

BARRAGES LE SAVOIR-FAIRE FRANÇAIS



COMITÉ FRANÇAIS
DES BARRAGES
ET RÉSERVOIRS



COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRS

BARRAGES
LE SAVOIR-FAIRE
FRANÇAIS



Savoie-Technolac – 4 allée du Lac de Tignes
73290 LA MOTTE-SERVOLEX – FRANCE
www.barrages-cfbr.eu

ISBN 979-10-96371-11-2
Dépôt légal : 2^{ème} trimestre 2022

SOMMAIRE



Remerciements	9
Préface	11
① Usages multiples des barrages	14
② Géologie, fondations et traitement des fondations	32
③ Hydrologie et évacuateurs de crues	46
④ Retenues et environnement	64
⑤ Barrages-poids	76
⑥ Barrages-voûtes	96
⑦ Barrages en remblai	114
⑧ Barrages mobiles et barrages en rivière	132
⑨ Dignes de protection contre les inondations	146
⑩ Équipements électromécaniques et contrôles-commandes	164
⑪ Auscultation et surveillance	176
⑫ Sûreté et analyse de risques	192
Index des auteurs	204

REMERCIEMENTS



Ce livre, publié à l'occasion du 27^e congrès et de la 90^e réunion annuelle de la Commission Internationale des Grands Barrages, a été préparé par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR).

Sa rédaction, sa relecture, sa mise au point ont mobilisé de très nombreux membres du comité français. Ils ont eu à cœur de partager leurs savoir-faire, leurs expériences, leur histoire. On trouve, en fin du livre, la liste de tous ceux qui ont participé à son écriture, sa relecture, et sa mise en forme.

Une partie notable de ce travail s'est déroulée durant les années 2020 et 2021, alors que le monde et la France luttaienent contre la pandémie de Covid-19.

Je tiens à exprimer à l'ensemble des participants tous mes remerciements pour l'important travail accompli, malgré des conditions qui ont pu être difficiles.

Patrick Le Delliou
Président honoraire du Comité Français
des Barrages et Réservoirs

PRÉFACE



Le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) est honoré et heureux d'accueillir à Marseille en 2022 le 27^e congrès et la 90^e réunion annuelle de la Commission Internationale des Grands Barrages. C'est l'occasion de nous retourner sur la longue histoire, plus de trois siècles, des barrages dans notre pays et de tenter de synthétiser ce qu'a pu être l'apport de la France à cette technologie.

Notre pays a une longue histoire de barrages qui débute avec la construction, entre 1667 et 1672, du barrage de Saint-Ferréol, de 36 m de hauteur, pour l'alimentation du canal du Midi reliant la mer Méditerranée à l'océan Atlantique. L'activité minière, l'alimentation en eau des voies navigables et la production énergétique ont été les fonctions principales des barrages construits au 18^e et au 19^e siècle. Au 20^e siècle, c'est le développement de l'hydroélectricité qui a permis nos plus belles réalisations. Enfin, dans les deux dernières décennies, l'irrigation, la protection contre les inondations et l'alimentation en eau potable ont assuré le maintien de l'activité de la profession, en parallèle avec la remise à niveau de notre parc.

La France et la CIGB, c'est une longue histoire d'amitié et de passion partagée pour les barrages, outils essentiels au service du développement et de la satisfaction des besoins élémentaires de l'humanité : l'eau, l'énergie, la sécurité vis-à-vis des crues et des sécheresses. La CIGB a été créée à Paris en 1928. Membre fondateur aux côtés des États-Unis, de l'Italie, de la Roumanie, de la Grande-Bretagne et de la Suisse, la France a donné à la CIGB son premier président, Gustave Mercier, élu à Londres en 1931. Depuis, la France a donné à la CIGB deux autres grands présidents : André Coyne (1946–1952) et Pierre Londe (1979–1982).

Le CFBR regroupe plus de 500 acteurs du monde des barrages : administration, entreprises, maîtres d'ouvrages, bureaux d'études, enseignants, chercheurs et experts individuels. C'est un lieu unique de rencontres et d'échanges entre tous ces professionnels. Forts de leurs différences de positionnement, chacun de nos membres apporte sa vision et son expertise afin de servir un objectif commun. La richesse du CFBR est de pouvoir rassembler toutes ces parties prenantes, à l'occasion de ses colloques techniques annuels, de ses groupes de travail, de ses groupes miroirs des comités techniques de la CIGB. C'est cette richesse que ce livre ambitionne de vous faire partager.

Le CFBR a toujours souhaité mettre l'ensemble de ses productions à la disposition de ses membres bien sûr, mais plus largement de la communauté des barragistes dans le monde entier. Ainsi les recommandations élaborées par notre comité sur des sujets variés, en particulier relatifs à la justification de la sécurité des barrages, sont disponibles sur le site internet du CFBR (<https://www.barrages-cfbr.eu/>). Il en est de même des actes de nos colloques annuels qui rassemblent un large public français et une participation européenne et africaine régulière. Au sein de la CIGB, le Comité français a toujours milité pour la diffusion large et gratuite des Bulletins des comités techniques.

L'implication du CFBR dans les activités de la CIGB a toujours été forte, à travers notre participation active à la plupart des comités techniques avec de nombreuses présidences ou vice-présidences et avec la mise en place de groupes de travail miroirs pour alimenter la contribution française. La production de rapports dans les congrès de la CIGB, généralement large et consistante, fait l'objet d'un travail collectif de nos membres afin d'élaborer et de faire connaître la vision française sur les questions débattues lors du congrès. Nous sommes fiers de compter deux rapporteurs généraux aux questions du congrès de Marseille.

Le parc de barrages français fournit plus de 13 % de notre énergie électrique et un tiers de notre énergie renouvelable ; il contribue à la fourniture de l'eau potable et d'irrigation et participe à la protection contre les inondations et les sécheresses. Pourtant la construction de barrages n'est plus une priorité en France. Ces dernières années ont même marqué un quasi-arrêt de la construction de nouveaux barrages. Notre principal défi actuel est la gestion intelligente de ce patrimoine de plus de 1 000 grands barrages afin de garantir leurs services de façon durable, économique et sûre. Notre comité a ainsi largement participé, en appui de l'administration, à l'élaboration de la nouvelle réglementation française mise en place à partir de 2007 qui vise au maintien en sécurité de ce patrimoine exceptionnel.

La France a joué un rôle de premier plan dans le développement des barrages dans la deuxième moitié du 20^e siècle. Après la seconde guerre mondiale, il a fallu reconstruire l'Europe et, dans notre pays, l'hydroélectricité a été l'un des moteurs de ce renouveau. André Coyne a eu un rôle fondamental dans la conception et la construction des barrages-voûtes. Pierre Londe a été un des fondateurs, après la rupture du barrage de Malpasset, de la mécanique des roches et a été l'inventeur des barrages symétriques en remblai dur. François Lempérière a proposé des innovations majeures dans le domaine de la modernisation des évacuateurs de crues avec les hausses et blocs fusibles, les seuils en touches de piano. Il continue de proposer des idées brillantes et novatrices pour la conception des barrages et leurs nouveaux usages dans un contexte marqué par le changement climatique et le développement rapide des énergies renouvelables intermittentes.

Je dédie ce livre à ces trois grands ingénieurs français qui continuent d'inspirer les travaux de notre comité et nous poussent à mettre l'innovation au premier rang de nos motivations.

L'ingénierie française des barrages est née du développement de l'hydroélectricité dans la deuxième moitié du 20^e siècle. Au 21^e siècle, elle a su survivre à la fin de cette grande aventure et est aujourd'hui présente sur les cinq continents. Elle est prête pour aborder une nouvelle page d'histoire dans laquelle les barrages, en plus de leur traditionnelle fonction de stockage de l'eau pour l'agriculture, l'eau potable, l'irrigation et la protection contre les crues et les sécheresses, seront des outils majeurs de la nouvelle politique énergétique mondiale, avec leur capacité unique à stocker l'énergie à grande échelle. L'évolution des usages et le changement climatique devraient conduire dans un futur proche à envisager de nouveaux projets et nous nous y préparons.

Nos entreprises de construction ont également largement participé à l'aventure des barrages tant en France qu'à l'étranger et particulièrement en Afrique. Après deux décennies de repli, elles sont de retour sur les marchés internationaux où elles proposent une alternative vis-à-vis de la concurrence internationale.

Que contient ce livre ? Ce n'est pas un cours de barrage et il ne prétend pas couvrir tous les aspects de la conception, de la construction et de la gestion des barrages. C'est plutôt une série de coups de projecteurs sur des thèmes où il existe une doctrine française forte et où notre contribution a été significative.

Le chapitre 1 aborde le thème du multi-usage des barrages qui est fortement ancré dans la tradition française de l'aménagement des cours d'eau et constitue le sujet du symposium organisé par le CFBR en marge du congrès de Marseille. Les chapitres 2 et 3 portent sur la géologie et l'hydrologie et mettent en avant la spécificité de l'approche française de ces deux disciplines au cœur de la conception des barrages. Les chapitres suivants sont consacrés à l'expérience française de conception, de construction et d'exploitation des différents types de barrages (barrage-poids, voûte, barrage en remblai et barrage mobile en rivière) y compris les digues fluviales et maritimes récemment entrées dans le champ de la CIGB. Le chapitre 8 met en avant les bonnes pratiques environnementales. Trois chapitres enfin abordent les équipements hydromécaniques et de contrôle-commande, l'auscultation et la pratique française en matière d'études de dangers et d'analyse de risques.

Sa rédaction s'appuie largement sur les contributions des groupes de travail et les actes de nos colloques techniques dont elle constitue une synthèse que nous sommes heureux de vous faire partager.

Dans un souci d'économie des ressources de notre planète, le livre est disponible en version électronique gratuite et en version papier payante en français ou en anglais.

Je forme le vœu que la lecture de ces quelques lignes vous incite à approfondir et apprécier l'approche française des barrages.

Pour conclure, je souhaite remercier chaleureusement Patrick Le Delliou, président honoraire du CFBR et président du comité de rédaction, qui a piloté l'élaboration de ce livre et bien sûr, les auteurs qui ont su, en 12 chapitres, faire partager à nos collègues et amis du monde entier le meilleur du savoir-faire français en matière de barrages.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'M' followed by a horizontal line and a vertical stroke.

Michel Lino
Président du Comité Français des Barrages et Réservoirs

CHAPITRE
1

USAGES MULTIPLÉS DES BARRAGES

La France est riche d'un patrimoine de barrages et retenues très important, constitué progressivement depuis plusieurs centaines d'années (paragraphe 1), avec une forte composante de barrages destinés à la production d'électricité. Une tendance forte de ces dernières décennies est l'optimisation des usages des retenues existantes, en tentant de concilier des usages très variés, dans un contexte évolutif : nouveaux besoins sociétaux, prise en compte accrue des besoins pour l'environnement, changement climatique.

Le paragraphe 2 présente plusieurs exemples de parcs de barrages français pour lesquels le multi-usage est, ou est devenu, le principe central de leur exploitation ; il montre également que cette question est posée d'office pour les projets de grands barrages dans d'autres contextes, avec le cas emblématique du bassin du Niger.

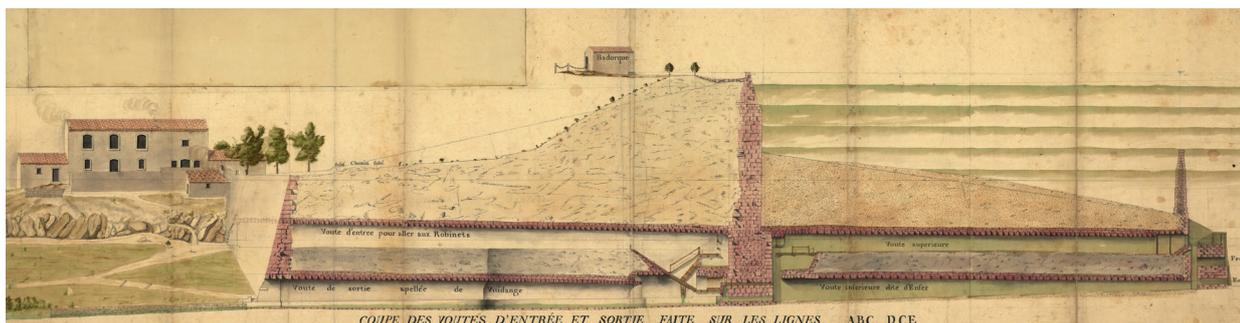
Ce panorama montre que la question du multi-usage est à chaque fois posée de manière très différente : il n'y a pas de règle générale. Un autre enseignement est que la conciliation des différents usages est une question difficile.

Cela a conduit la France à mettre en place des outils spécifiques pour réussir le partage des usages (paragraphe 3) : des outils de gouvernance et de financement pour piloter les projets, des études approfondies pour faire les bons choix.

En France, comme dans d'autres pays, la construction de nouveaux barrages a beaucoup ralenti. Pourtant, l'évolution des usages et le changement climatique devraient conduire à envisager de nouveaux projets ; le paragraphe 4 liste quelques pistes explorées pour y parvenir, dans un contexte où l'opinion publique française demeure globalement opposée aux projets de barrages.

Figure 1.1 – Barrage de Saint-Ferréol / ©Voies Navigables de France – archives des canaux du Midi

Le barrage de Saint-Ferréol est le plus vieux grand barrage français encore en exploitation. Construit par l'ingénieur Pierre-Paul Riquet, il a été mis en service en 1675 pour l'alimentation en eau du canal du Midi reliant la mer Méditerranée à l'océan Atlantique. Le lac qu'il forme est aujourd'hui un lieu important pour les activités touristiques. Haut de 35 m, il est composé d'un ensemble de murs en maçonnerie et de zones de remblai.



1. LE PARC FRANÇAIS DES BARRAGES

La France possède 722 grands barrages correspondant à la définition de la Commission Internationale des Grands Barrages. Ils sont situés en France métropolitaine, comme outre-mer. Les plus hauts d'entre eux sont implantés dans les zones de montagnes (Alpes et Pyrénées). Le plus haut est le barrage-voûte de Tignes, avec 180 m au-dessus des fondations.

Selon les critères de la réglementation française, sont classés au titre de la sécurité publique environ 2 000 ouvrages. Des recensements partiels permettent d'estimer que le nombre de petits barrages (plus de 2 m de hauteur sur terrain naturel) est supérieur à 100 000. Le parc français est relativement ancien ; de nombreux barrages importants ont été construits après 1945 (figure 1.2). Par tradition des ingénieurs français, et parce qu'ils ont été construits plus tôt, les barrages en béton sont plus fréquents (52 % du total, figure 1.3) que dans le reste du monde (19 %). En particulier, la proportion de barrages-voûtes est trois fois plus forte en France que dans le reste du monde.

Les barrages hydroélectriques représentent près de 50 % du parc (figure 1.4). Inversement, l'utilisation des barrages pour l'irrigation est beaucoup moins développée que dans d'autres pays du monde, même si cette fonction est plus fréquente dans les dernières années. Les statistiques représentées par le graphique concernent l'usage principal des barrages. Cependant, près de 35 % des grands barrages français ont des usages multiples, sans d'ailleurs que la répartition entre les différents usages soit profondément modifiée.

La variété des aménagements, et de leur destination, est illustrée avec quelques exemples dans les paragraphes qui suivent.

Figure 1.2 – Date de construction des grands barrages en France

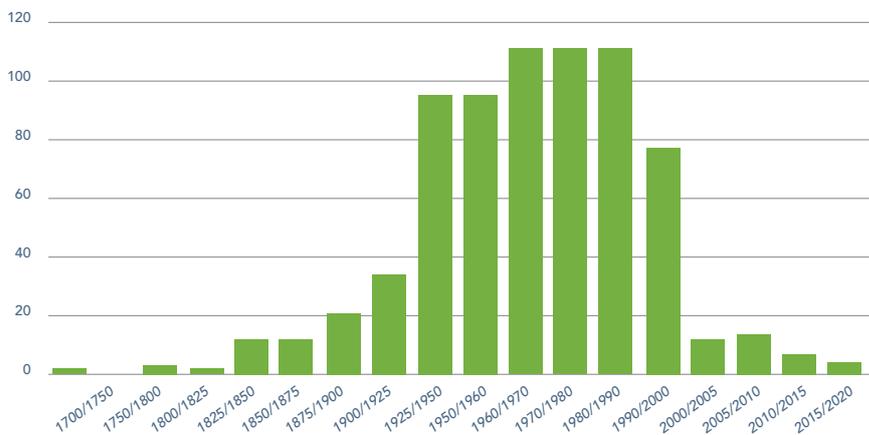


Figure 1.3 – Type des barrages (selon la terminologie de la CIGB)

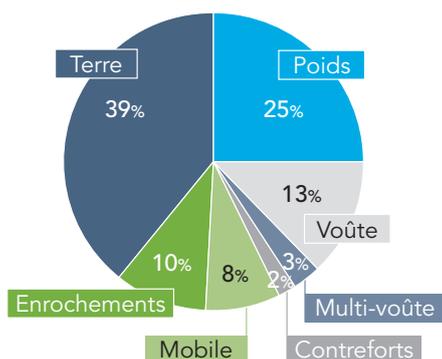
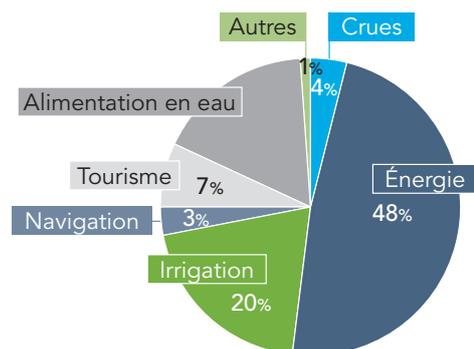


Figure 1.4 – Usage principal des barrages (selon la terminologie de la CIGB)



2. USAGES MULTIPLES DES BARRAGES : QUELQUES EXEMPLES TYPIQUES

Ce paragraphe décrit quatre parcs de retenues et montre à quel point la composante multi-usage s'est imposée en France, soit dès la conception, soit au fil du temps. C'est le cas de la métropole de Saint-Étienne, vallée industrielle en reconversion, où l'usage des retenues a beaucoup changé avec le temps ; des réservoirs de Seine Grands Lacs qui tempèrent les débits de la Seine à Paris (crue, étiage) où des usages nouveaux se sont imposés. C'est aussi celui de l'aménagement Durance-Verdon, à très grande importance économique pour l'hydroélectricité, la ressource en eau et le tourisme. On citera aussi le cas des lacs des coteaux de Gascogne, emblématiques de la richesse des services écosystémiques rendus par les réservoirs. Il illustre également, avec le cas du bassin du Niger, la mise en œuvre, à l'international, de l'expertise acquise en France dans la conception multi-usage.

2.1 Saint-Étienne Métropole : usages multiples et évolutifs

Saint-Étienne Métropole compte un parc de 12 barrages dont les constructions s'échelonnent sur près de 200 ans, entre 1789 et 1972. Ces ouvrages ont été créés pour le stockage d'eau, répondant au développement économique et démographique, et pour la régulation des débits des cours d'eau.

Le premier de tous : le barrage du Couzon. Il a été établi pour suppléer les étiages de la rivière Gier afin d'alimenter un canal initialement prévu pour relier les fleuves Loire et Rhône. Faute de moyens financiers et de ressources en eau suffisantes, le canal s'est finalement limité à 15,5 km, avec pour vocation le transport de la houille jusqu'à Givors. Très utilisé au début du 19^e siècle, le canal a ensuite été remplacé par une voie ferrée, puis détruit et comblé au 20^e siècle, laissant place à une autoroute reliant Givors à Saint-Étienne. Le barrage a été racheté par la ville de Rive-de-Gier pour son alimentation en eau potable à la fin du 19^e siècle, fonction qui reste la sienne aujourd'hui.

La rivière Furan est historiquement une rivière à usages multiples : force motrice des manufactures qui se sont implantées sur ses rives au 19^e siècle et ressource en eau potable de la ville de Saint-Étienne. Qualité de l'eau et quantité des prélèvements ont été sources de conflits d'usage. Par ailleurs, les crues du Furan mettaient en péril les biens et les populations installés trop près des rives. En conséquence, il apparut indispensable de stocker l'eau de la rivière et de réguler ses débits. Le barrage du Gouffre d'Enfer (1862-1866) a été édifié pour écrêter les crues et garantir l'approvisionnement d'une eau dont la qualité répondait aux besoins spécifiques des usiniers (armements, aciérie, textile...) et des populations.

De 1870 à 1970, avec le développement démographique et industriel, d'autres retenues étaient nécessaires. Pour la ville de Saint-Étienne, la capacité du barrage du Gouffre d'Enfer était insuffisante et la construction du barrage du Pas-du-Riot (1878) a été engagée. Pour les communes avoisinantes, d'autres retenues ont été édifiées : la Rive (1870), l'Échapre (1898), le Cotatay (1905), l'Ondenon (1904), la Chapelette (1907) et Lavalette (1917), Piney (1955), les Plats (1958), Soulages (1970) et Dorlay (1972).

Aujourd'hui, les besoins en eau, spécifiquement industriels, ont décliné avec la mutation économique du territoire et l'eau des barrages n'est plus utilisée que pour produire de l'eau potable. Les barrages contribuent à alimenter 98 % des habitants de la métropole stéphanoise en eau de surface. À cette unique vocation de ressource en eau potable, s'ajoutent et se développent des usages secondaires : axes de communication reliant les deux rives d'une vallée, activités récréatives particulièrement recherchées. Ces activités sont à concilier avec la nécessaire protection de la ressource et l'entretien des ouvrages.

Figure 1.5 – Fresque dessinée en 2017 sur un barrage déclassé : « le naufrage de Bienvenu » par Ella et Pitr / © Service Communication Saint-Chamond



Avec le changement climatique, déjà perceptible sur l'hydrologie des rivières, des fonctionnalités presque oubliées sont à nouveau évoquées. Par exemple, à l'incitation des associations de riverains de cours d'eau, il est envisagé de conférer aux barrages un rôle d'écrêteur de crues, ou encore, à l'initiative d'autres groupes, un rôle de soutien des étiages.

Cependant, les études hydrologiques mettent en

évidence la difficulté de concilier, avec les retenues disponibles, ces trois usages : le stockage pour l'eau potable (le plus haut possible sur les bassins versants pour une meilleure qualité d'eau, et avec des réserves de sécurité suffisantes pour les épisodes accidentels), l'écrêtement des crues (plus loin en aval dans la vallée) ou le soutien d'étiage.

2.2 Les Grands Lacs de Seine : crues, étiages et nouveaux usages

Les quatre lacs-réservoirs, gérés par l'Établissement public territorial de bassin (EPTB) Seine Grands Lacs, résultent d'une volonté politique de concevoir et réaliser une série de grands aménagements hydrauliques en amont du bassin versant de la Seine pour mieux protéger l'agglomération parisienne contre les crues, tout en assurant une certaine régulation des débits en période d'étiage.

Les inondations majeures de janvier 1910 et 1924, ainsi que la sécheresse de 1921, avaient en effet mis en évidence la grande vulnérabilité de l'agglomération parisienne face aux fortes variations naturelles de débit du fleuve. Le débit moyen de la Seine à Paris ne dépasse pas 300 m³/s et le débit naturel d'étiage peut descendre en dessous de 50 m³/s, ce qui est relativement faible pour assurer les besoins d'une agglomération urbaine de plus de 10 millions d'habitants. Inversement, une situation de forte crue se traduirait, comme en 1910, par une paralysie de la capitale pendant plusieurs mois, mais avec des dommages matériels très supérieurs, évalués désormais à plusieurs dizaines de milliards d'euros.

Figure 1.6 – Barrage de Pannecière / ©Seine Grands Lacs

Lancée dans les années 1930, la construction des premiers ouvrages a concerné notamment le barrage de Pannecière, entré en service en 1949. Elle a été suivie par l'aménagement de trois lacs-réservoirs réalisés en dérivation des cours de la Seine et de ses deux principaux affluents, l'Aube et la Marne. Ce dernier, dénommé aussi Lac du Der, est le deuxième plus vaste lac artificiel d'Europe. Dès l'origine, ces quatre

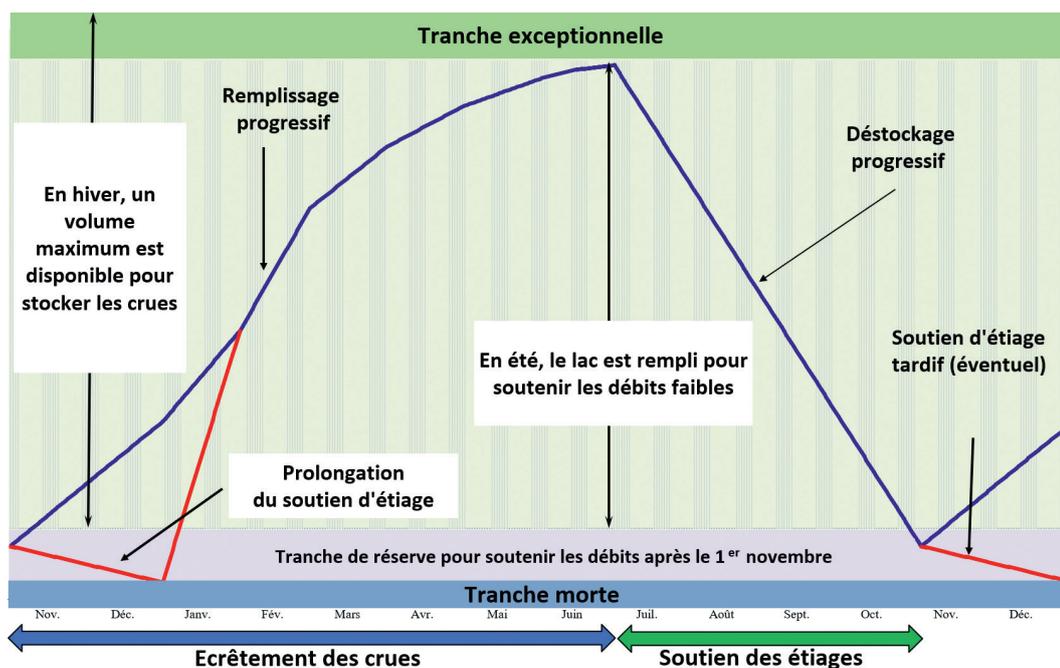


aménagement hydrauliques se sont vu assigner deux objectifs distincts, d'une part l'écrêtement des crues et d'autre part le soutien d'étiage pour assurer à tout moment un débit suffisant en aval, afin de satisfaire différents usages vitaux pour l'économie locale, dont l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la navigation sur la Seine, le refroidissement de certaines installations

industrielles ou encore la dilution des effluents issus des stations d'épuration, afin de restaurer le bon état écologique des cours d'eau.

Pour remplir ces deux objectifs, des courbes de gestion (figure 1.7) ont été élaborées, fixées par arrêté préfectoral et optimisées sur la base d'une analyse statistique du régime hydrologique de chacun des cours d'eau. Le principe est que les quatre ouvrages, qui mobilisent au total une capacité de stockage de près de 850 millions de m³, soient remplis à la fin du mois de juin afin de pouvoir assurer un soutien d'étiage suffisant au moins jusqu'à fin octobre, et parfois jusqu'en décembre grâce à l'exploitation d'une tranche de réserve.

Figure 1.7 – Principe des courbes de gestion des lacs-réservoirs gérés par l'EPTB Seine Grands Lacs / ©Seine Grands Lacs



Leur fonction d'écrêtement des crues est mobilisable à tout moment, les lacs étant mis à profit pour dériver et stocker temporairement les débits qui se présentent en amont.

La capacité de stockage des lacs, qui sont installés dans de vastes cuvettes naturelles imperméables ceinturées de digues artificielles, permet, par ailleurs, d'y dériver temporairement des volumes d'eau restitués immédiatement en aval. Cette fonction de by-pass, utilisée en complément de la fonction de stockage, contribue aussi à l'écrêtement des crues en limitant les risques de débordement le long du tronçon de cours d'eau ainsi court-circuité, ce qui permet en particulier de protéger activement certains enjeux locaux très exposés, tels que les agglomérations de Troyes et de Saint-Dizier.

La fonction d'écrêtement des crues, assignée aux quatre lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine, est très régulièrement mobilisée, surtout en période hivernale. Depuis leur mise en service, les crues sont systématiquement écrêtées, si bien que les vallées alluviales en aval ont vu la fréquence et l'ampleur des débordements se réduire fortement. Ceci a d'ailleurs contribué à une certaine évolution des pratiques agricoles, les grandes cultures ayant remplacé les prairies d'élevage malgré leur plus forte vulnérabilité en zone potentiellement inondable.

Même pour des événements de crue majeurs, comme celui que le bassin a connu en janvier 2018, l'action des lacs-réservoirs est déterminante. Ce dernier épisode s'est caractérisé par des cumuls pluviométriques, sur l'ensemble du bassin, supérieurs de deux à trois fois la normale et ceci pendant une partie du mois de décembre et tout le mois de janvier avec encore de fortes précipitations jusqu'en avril. Il en est résulté deux principaux pics de crue très rapprochés, à 15 jours d'intervalle.

En un mois, les 4 lacs-réservoirs ont permis de stocker plus de 500 millions de m³, avec des débits dérivés qui ont, par moments, atteint jusqu'à 70 % des débits naturels se présentant en amont des ouvrages de prise. Ces derniers ont été sollicités à leur pleine capacité, avec des débits de prise atteignant 300 m³/s pour le site Marne et 160 m³/s sur le canal d'aménée Seine, une valeur jamais atteinte depuis la construction de l'ouvrage, il y a plus de 50 ans.

Figure 1.8 – Canal d'amenée Seine, exploité à pleine capacité en janvier 2018 / ©Seine Grands Lacs

L'effet des ouvrages sur la protection des agglomérations urbaines situées en aval a été majeur, se traduisant par un fort écrêtement des débits. Ainsi, à Paris, la ligne d'eau a pu être abaissée de 65 cm grâce à l'action cumulée des lacs. Sans cela, le niveau serait resté pendant environ trois semaines au-dessus de la cote fatidique de 6,20 m pour laquelle il devient très difficile de protéger certaines infrastructures souterraines telles que métro, voies ferrées, postes sources d'électricité et de nombreux sous-sols et parkings enterrés. Selon la Caisse centrale de réassurance, les dommages directs évités lors de cet événement, du fait de l'action des lacs-réservoirs, représentent près de 90 millions d'euros, mais les coûts auraient en réalité été très supérieurs du fait des réseaux qui ne sont pas comptabilisés dans cette estimation.



L'effet des lacs-réservoirs sur le soutien d'étiage n'est pas moindre puisque les ouvrages permettent de restituer jusqu'à 68 m³/s pendant l'été et l'automne, ce qui représente jusqu'à 80 % des débits observés dans la Seine à Troyes ou la Marne à Châlons-en-Champagne. En 2018, comme d'ailleurs en 2017 et sans doute de plus en plus fréquemment du fait du réchauffement climatique, ce soutien d'étiage s'est prolongé très au-delà de la période normalement prévue. Sans cette action, le débit de la Seine serait resté pendant plus de quatre mois consécutifs (jusqu'au début décembre) inférieur au seuil de crise à Pont-sur-Seine, compromettant nécessairement de nombreuses activités, dont le bon fonctionnement de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine.

Au-delà de ces deux fonctions principales d'écrêtement des crues et de soutien d'étiage, les quatre lacs-réservoirs, gérés par l'EPTB Seine Grands Lacs, se sont imposés comme des sites d'une grande richesse écologique. Plusieurs réserves naturelles se sont développées autour des lacs qui sont devenus, au fil des années, des points de fixation pour la faune sauvage et un refuge temporaire pour de nombreux oiseaux migrateurs dont les grues cendrées qui s'y rassemblent par milliers chaque année. De très nombreuses activités de loisir, de pêche, de chasse, de sports nautiques se sont développées sur les 10 000 hectares d'emprise des lacs, dégagant de substantiels revenus touristiques pour les collectivités locales.

En parallèle, le barrage de Pannecière et la restitution du lac Seine ont été équipés, dès leur construction, de centrales hydroélectriques concédées. Un autre site de production hydroélectrique a été aménagé depuis et des études sont en cours pour développer encore ce potentiel de production d'énergie renouvelable par de nouveaux aménagements hydroélectriques et photovoltaïques. Ceci confirme, s'il en était besoin, que de tels ouvrages peuvent parfaitement remplir de multiples usages en parallèle, au-delà de leurs objectifs principaux, et favoriser de manière substantielle à la fois la qualité environnementale des milieux et le développement économique local.

2.3 Aménagement Durance-Verdon : hydroélectricité et partage de l'eau

La Durance constitue l'une des plus puissantes rivières torrentielles françaises, près de 55 % de ses eaux proviennent de la fonte des neiges. Autrefois, la région subissait à la fois ses crues dévastatrices et ses pénuries saisonnières. « *Le Parlement, le Mistral et la Durance sont les fléaux de la Provence* », disaient les Provençaux ! Ironiquement, malgré la présence de deux cours d'eau majeurs (la Durance et le Verdon), la région manque d'eau. Ses habitants se battent pour cette ressource qui fait l'objet de véritables conflits, comme raconté par Marcel Pagnol dans ses romans. Dès le début du 19^e siècle, des projets d'aménagement des vallées du Verdon et de la Durance sont envisagés. Mais la technique de l'époque ne permet pas de les réaliser, notamment pour la construction d'un barrage à Serre-Ponçon (figure 1.9).

Il faudra attendre l'après seconde guerre pour que le projet soit techniquement possible. Il

faut alors reconstruire la France et faire face aux besoins croissants en eau et en énergie. Cette reconstruction passe par la mise en œuvre de nombreux chantiers de développement de l'hydroélectricité. La loi d'utilité publique, du 5 janvier 1955, lance la réalisation du barrage de Serre-Ponçon et l'aménagement de la Basse-Durance.

En plus de leur mission de production d'électricité, ces aménagements doivent apporter une solution aux problèmes d'approvisionnement en eau de la Provence et de maîtrise de la rivière. En contrepartie d'une réserve d'eau pour l'usage agricole, le ministère de l'Agriculture finance les travaux à hauteur de 12,3 %. En 1960, Serre-Ponçon est mis en eau et crée le plus important lac artificiel de la France métropolitaine avec un volume de 1,2 milliard de m³ d'eau. La construction du canal de la Durance de 250 km (depuis Serre-Ponçon jusqu'à l'étang de Berre) va permettre d'alimenter consécutivement 15 centrales hydroélectriques et fournir la Provence en eau via des prises d'eau aménagées sur le canal. De plus, une réserve de 200 millions de m³ est constituée dans Serre-Ponçon pour remédier aux insuffisances du débit naturel de la Durance en période d'irrigation intensive.

Figure 1.9 – Retenue et barrage de Serre-Ponçon / © EDF – Bertrand Bodin



En 1962, la création de l'aménagement du Bas-Verdon est décidée à la suite d'un accord entre EDF, le ministère de l'Industrie et le ministère de l'Agriculture. Le projet prévoit la réalisation du barrage de Sainte-Croix constituant un réservoir complémentaire de 760 millions de m³. Ainsi, sur le Verdon, une réserve d'eau de 225 millions de m³ est mise à disposition pour alimenter en eau les départements du Var, des Bouches-du-Rhône et du Vaucluse.

Figure 1.10 – Retenue et barrage de Sainte-Croix / © EDF – Gérard Alloin

L'aménagement Durance-Verdon représente, aujourd'hui, 24 centrales, 16 barrages, un canal de 250 km, une puissance installée de 2 000 MW mobilisables en moins de 10 minutes. Outre la production d'électricité renouvelable de 5,5 TWh en moyenne par an, cet aménagement est une clé de voûte du partage de l'eau permettant :

- l'alimentation en eau potable de 3 millions de personnes dans la région dans 150 communes dont Marseille, Aix-en-Provence, Toulon ;
- l'apport en eau industrielle pour 440 entreprises ;
- l'irrigation de 80 000 hectares de terres agricoles ;
- la lutte contre les effets des crues et des sécheresses ;
- le développement du tourisme et de l'économie autour des lacs formés par les barrages, comme à Sainte-Croix-du-Verdon ou à Serre-Ponçon, hauts lieux touristiques de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.



Les aménagements Durance-Verdon jouent ainsi un rôle primordial dans l'économie régionale, dans la sécurisation de la ressource en eau sur un territoire historiquement sec, et assurent un partage entre tous les usages depuis soixante ans.

Figure 1.11 – Schéma de l'aménagement Durance-Verdon



2.4 Lacs des coteaux de Gascogne (Sud-Ouest de la France) : services écosystémiques

Les retenues de barrage remplissent des usages écosystémiques, le plus souvent sans que cela ait fait partie des usages identifiés lors de leur conception. Cela est illustré ici avec l'exemple des retenues exploitées par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG). Les écosystèmes rendent des services ; un inventaire de ceux-ci a été établi par le ministère de l'Environnement, qui a identifié 43 usages et services rendus [CREDOC, 2009]. L'approche territoriale de la CACG permet de répondre à une quinzaine de ces services tant par l'aménagement des lacs que leur gestion.

Une vingtaine de lacs de montagne et de piémont sécurisent le système « Neste » géré par la CACG. Ces lacs constituent une réserve pour le territoire : 15 lacs de piémont et 4 réserves de montagne, 118 hm³ d'eau mobilisables, soutien de 1 350 km de cours d'eau.

Figure 1.12 – Services écosystémiques rendus par les lacs des Coteaux de Gascogne

15 services d'approvisionnement (production de biens)	15 services de régulation (production de services)	13 services à caractère social (production de services)
Support de cultures alimentaires	Prévention des crues et des inondations	Qualité du paysage (esthétique) NC
Support de cultures énergétiques	Atténuation de l'effet des sécheresses NC	Qualité de l'environnement olfactif
Support pour l'aquaculture *	Prévention des désordres géomorphologiques des cours d'eau	Qualité de l'environnement sonore
Production d'animaux pour la pêche professionnelle	Purification et traitement des déchets (autoépuration) NC	Valeur intrinsèque et patrimoniale de la biodiversité (espèces protégées, etc.)
Production de végétaux et de champignons pour la cueillette	Régulation de l'érosion et des coulées de boues	Communautés humaines spécifiques
Éléments minéraux pour l'extraction (granulats)	Limitation des avalanches	Source d'inspiration artistique
Support pour la production de fibres et autres matériaux	Maintien de la qualité des sols	Production d'animaux pour la chasse NC
Support pour la production de bois	Recyclage de la matière organique	Production d'animaux pour la pêche *
Fourniture d'eau à usage domestique **	Régulation de la dynamique des pathogènes et parasites	Support de sports de nature (eau douce, randonnée, aérien) *
Fourniture d'eau à usage industriel *	Régulation de la dynamique des espèces nuisibles et envahissantes	Support pour le tourisme et les loisirs de nature *
Fourniture d'eau pour la production d'énergie) *	Maintien de la pollinisation	Support pour le thermalisme et la thalassothérapie
Fourniture d'eau à usage agricole ***	Purification et maintien de la qualité de l'air	Support de travaux de recherche
Production eau embouteillée (minérale et de source)	Régulation du climat local NC	Support pour le développement des savoirs éducatifs
Réservoir du vivant	Régulation du climat planétaire	
Transport fluvial maritime	Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes, maintien réciproque *	

Contribution financière marginale *
 Contribution financière importante **
 Contribution financière majeure ***

Figure 1.13 – Lac de Baïsole / ©CACG – Laurent Pascal

Parmi eux, le lac de Puydarrieux (14 hm³) fait référence en termes de multi-usage de l'eau. Ce lac mis en eau en 1987 se trouve sur la Baïsole, un affluent de la Baïse. Les services et usages rendus sont :

- eau brute – pour l'eau potable ;
- agriculture – le lac contribue à l'irrigation des cultures locales (près de 10 000 hectares en bénéficiant) ;
- vie aquatique – ouvrage important du Système Neste, le lac permet d'assurer l'alimentation en eau des rivières tout au long de l'année et de maintenir la vie aquatique sur des rivières qui connaîtraient naturellement des assècs importants ;
- oiseaux – le site est une zone de passage privilégiée pour près de 240 espèces d'oiseaux. Depuis 2006, un arrêté du ministère de l'Écologie et du développement durable classe le site de Puydarrieux en zone Natura 2000. Afin de favoriser des périodes de nidification et le besoin de proximité du rivage pour les échassiers, la CACG opère une gestion fine de la cote du plan d'eau jusqu'à fin février (amortissement de tous les aléas pluviométriques) ;
- Maison de la Nature et de l'Environnement 65 – projet de territoire, conçu au départ pour valoriser un lac d'irrigation devenu une réserve ornithologique classée Natura 2000. Au fur et à mesure, le projet s'est étoffé pour aborder, au-delà de l'oiseau et de l'agriculture, une grande diversité de sujets environnementaux en s'inscrivant, depuis sa création, dans une dynamique de développement local. C'est donc autour d'un lac anthropique que la Maison de la Nature et Environnement 65 forme, sensibilise, valorise l'environnement dans lequel s'inscrivent les activités humaines ;



Figure 1.14 – *Maison de la Nature et de l'Environnement, associée au lac de Baïsole* / © Christophe Cuenin

- pêche – l'activité pêche de loisir contribue également à l'attractivité de ces ouvrages. La coactivité est gérée via des comités d'usages et de concertation ;
- énergie – depuis 2015, une centrale hydroélectrique permet d'optimiser l'usage de l'eau : l'eau lâchée pour le milieu naturel (notamment le débit réservé) est turbinée afin de produire de l'énergie (300 kW, 1.1 GWh, soit la consommation d'une quarantaine de familles) ;
- navigation – le lac de Puydarrieux permet également, via une convention de partenariat avec les départements concernés, de maintenir au-delà des débits de soutien de la rivière Baïse, un niveau d'eau suffisant permettant la continuité de la navigabilité de cette rivière de Valence-sur-Baïse (Gers) à l'embouchure avec la Garonne à Buzet-sur-Baïse (Lot-et-Garonne).



Figure 1.15 – *Navigation sur la Baïse* / © CACG

La CACG veille ainsi à partager et sécuriser la ressource en eau entre les besoins liés aux usages économiques et ceux nécessaires au milieu naturel.

2.5 Bassin du Niger : promouvoir le multi-usage

La France apporte depuis les années 60 d'importants appuis sur plusieurs grands bassins versants transfrontaliers, dont les bassins du Sénégal, du Niger, du Nil, du Congo et du Mékong. Les grands barrages



à impact transfrontalier constituent le sujet majeur de coopération entre les États membres des organismes de bassin concernés. La France a par exemple joué un rôle important dans la création de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal en 1972 et continue à soutenir ses actions, dont le bilan économique pour les pays membres est positif (énergie électrique, eau potable, agriculture) à travers les barrages de Manantali, Diama, Félou et Gouina, propriété commune des États membres.

L'Aide publique au développement française s'était en particulier engagée fin 2007 à « être un élément moteur de la relance de projets de barrages multi-usages, dont les objectifs devront être correctement dimensionnés, les alternatives bien étudiées, les compatibilités internationales analysées, et les conséquences sociales, économiques et politiques prises en compte et compensées, si nécessaire. Le soutien ne concernera que les ouvrages inclus dans un programme d'investissement validé par l'ensemble des pays riverains » (Document d'Orientation Stratégique sur la gestion intégrée des ressources en eau transfrontalières, ministère des Affaires étrangères).

L'Office International de l'Eau (OIE), association française d'utilité publique, a étudié en 2011 la priorisation des grands barrages neufs pour la commission économique des États d'Afrique de l'Ouest, puis en 2012 dans toute l'Afrique, dans le cadre du Programme de développement des infrastructures en Afrique (PIDA) développé par l'Union africaine et la Banque africaine de développement.

1 USAGES MULTIPLES DES BARRAGES

Le programme hydraulique du PIDA vise à développer des grands barrages multifonctions (hydroélectricité et irrigation en priorité) et à renforcer les capacités des organisations de bassin des fleuves et lacs d’Afrique afin qu’elles puissent planifier et développer ces infrastructures. Plusieurs ouvrages ont ainsi été priorisés dans les dix plus grands bassins d’Afrique.

S’agissant du bassin du Niger, la Conférence internationale sur le bassin du fleuve Niger s’est tenue en avril 2004 à Paris, sous les auspices du Président Jacques Chirac. Réunissant les dirigeants de sept États membres de l’Autorité du bassin du Niger (ABN), elle a relancé le processus de « Vision partagée » et permis un accord sur le développement potentiel de grands ouvrages en amont du Nigeria. La France a soutenu un volet technique, centré sur la collecte des données et l’aide à la décision pour la programmation stratégique des grands barrages, ainsi qu’un volet d’appui à la mise en œuvre des réformes de l’ABN.

Un modèle d’allocation des ressources en eau à l’échelle du bassin du Niger a ainsi été élaboré en 2007 sur financement de l’Agence française de développement (AFD). Ce modèle a largement contribué à l’élaboration du Plan d’action pour le développement durable (PADD) du bassin du Niger. Les États membres de l’ABN ont opté pour les trois barrages multi-usages (hydroélectricité, irrigation, soutien d’étiage) de Fomi en Guinée (volume d’environ 5 000 hm³), Taoussa au Mali (3 200 hm³) et Kandadji au Niger (1 600 hm³), ce dernier étant aujourd’hui en construction.

Les études relatives au modèle d’allocation, au PADD, au Programme d’investissement qui l’accompagne et à la Charte de l’eau du bassin du Niger validés en 2008 ont été menées par des bureaux d’étude français, avec l’appui d’un assistant technique français en poste auprès de l’ABN durant le processus de « Vision partagée ». Les études des barrages de Kandadji et de Fomi ont été menées par l’ingénierie française, qui conduit également en 2019 une étude relative à la modélisation du delta intérieur du Niger dans le cadre d’une évaluation des impacts du barrage de Fomi.

Figure 1.16 – Carte du bassin du fleuve Niger



La France participe également à l'amélioration de la connaissance pour la gestion coordonnée des barrages existants et en projet. Ce travail se fonde en particulier sur l'utilisation de l'altimétrie spatiale autour du programme satellitaire SWOT (« Surface Water and Ocean Topography »), satellite programmé en 2021 par le Centre national d'études spatial français (CNES) et la NASA⁽¹⁾ qui fournira, pour la première fois en plus des océans, les variations spatio-temporelles des niveaux d'eau des grands fleuves, lacs et rivières.

3. USAGES MULTIPLES : LES OUTILS

Le paragraphe 2 montre à quel point les retenues de barrage en France et dans le monde sont de plus en plus souvent multi-usages, et montre également la grande variété des situations. Or, la gestion de retenues à usages multiples est bien plus complexe que dans le cas d'un usage unique, car il faut mettre au point les outils de partage des usages des retenues parce que :

- les outils de gouvernance sont fondamentaux : ils donnent le cadre permettant de discuter et concilier les différents usages ; le § 3.1 montre l'évolution récente du cadre de gouvernance en France ;
- la mise au point du partage nécessite de disposer de bases solides d'estimation des ressources et des besoins, et de leurs évolutions dans le contexte de changement climatique : des études prospectives poussées, basées sur des données précises, sont nécessaires, comme illustré par le § 3.2.

3.1 Gouvernance : outils réglementaires et organisation des territoires

En France, la construction et l'exploitation des retenues existantes s'appuient sur un cadre réglementaire qui a beaucoup évolué, dans le sens d'une meilleure prise en compte des intérêts multiples et croisés, à l'échelle des territoires. Par ailleurs, le financement public est souvent nécessaire pour permettre la matérialisation de nouveaux projets ; ce financement est conditionné à un certain nombre de « bonnes pratiques » qui visent également à vérifier la prise en compte de ces intérêts multiples et croisés à l'échelle des territoires.

3.1.1 Gestion des eaux : un pilotage prenant en compte les enjeux des territoires

Les bases du droit de l'eau actuel sont issues des trois grandes lois sur l'eau : loi du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution ; loi du 3 janvier 1992 sur l'eau ; loi du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques issue de la transposition en droit français de la Directive cadre européenne de 2000.

La loi de 1964 a mis en place les six Agences de l'eau, dont la vocation est la lutte contre la pollution et le pilotage de la gestion de la ressource. La loi sur l'eau de 1992 expose que « l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation » et met en place des outils pour concilier ses différents usages : dans chaque bassin, un Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), qui définit les orientations stratégiques de gestion de la ressource ; et, pour certains sous-bassins, un Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) qui précise les orientations du SDAGE. La loi de 2006 a pour objet principal l'atteinte du bon état des eaux, et modernise, à certains égards, les textes de 1964 et 1992.

Le SAGE est élaboré collectivement par les acteurs de l'eau du territoire, regroupés au sein d'une assemblée délibérante, la Commission locale de l'eau. Cette commission, présidée par un élu local, se compose de trois collègues : les collectivités territoriales, les usagers (agriculteurs, industriels, propriétaires fonciers, associations...), l'État et ses établissements publics. Le SAGE établit un Plan d'aménagement et de gestion durable (PAGD), qui est opposable aux tiers : tout projet dans le domaine de l'eau doit être compatible avec le PAGD. Une attention particulière est apportée au partage de l'eau : Plan de gestion quantitative des ressources en eau, Évaluation des volumes prélevables globaux.

(1) Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (États-Unis).

Seuls les projets inscrits dans les SAGE peuvent recevoir une aide financière par les Agences de l'eau ou par l'État, et à condition qu'il soit démontré que ces projets permettent la substitution de prélèvements en étiage par des prélèvements hors étiages.

3.1.2 Protection contre les inondations : une gouvernance mise en phase avec la gestion des eaux

À l'échelle des grands bassins, un Plan de gestion des risques inondations (PGRI) est arrêté par l'État. Ce PGRI encadre la politique de prévention des risques et identifie les Territoires à risques importants (TRI). Pour chaque TRI, un document de Stratégie locale de gestion du risque inondation (SLGRI) est élaboré.

La gouvernance des ouvrages de protection contre les inondations, qui s'inscrit dans les PGRI et SLGRI, a été récemment réformée. Ces ouvrages relèvent désormais de la compétence « GEMAPI » (Gestion de l'eau et des milieux aquatiques, et la prévention des inondations), affectée à des structures décentralisées, communales ou intercommunales. La compétence GEMAPI recouvre l'aménagement des bassins versants, l'entretien des cours d'eau, la défense contre les inondations, la protection et la restauration des écosystèmes. Il s'agit d'une partie des missions de la politique de l'eau définie par les SAGE.

3.1.3 Procédure d'autorisation : concertation et prise en compte de l'ensemble des enjeux

La construction de nouveaux aménagements, ou la modification d'aménagements existants, s'inscrit dans ce cadre, et doit obtenir une autorisation environnementale. Depuis 2017, une procédure d'autorisation unique permet une prise en compte globale des enjeux environnementaux. La procédure se déroule en plusieurs étapes :

- phase amont (facultative) : permet de préciser les informations demandées en fonction du projet et des procédures dont il fait l'objet ;
- dépôt du dossier ;
- phase d'examen du dossier (4 ou 5 mois) : instruction par les services de l'État, consultation des instances et commissions (notamment compatibilité SDAGE et SAGE), avis de l'autorité environnementale ;
- enquête publique (3 mois) : recueil des avis et établissement d'un rapport d'enquête ;
- phase de décision (3 mois) : consultation du Conseil départemental de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques ou de la Commission départementale de la nature des sites et des paysages ; projet de décision ; arrêté d'autorisation et publicité ;
- délai de recours (4 mois).

Cette procédure est censée permettre la prise en compte de l'ensemble des enjeux des usages de l'eau, et de l'ensemble des conséquences des projets. Elle est devenue la composante centrale des projets d'aménagements.

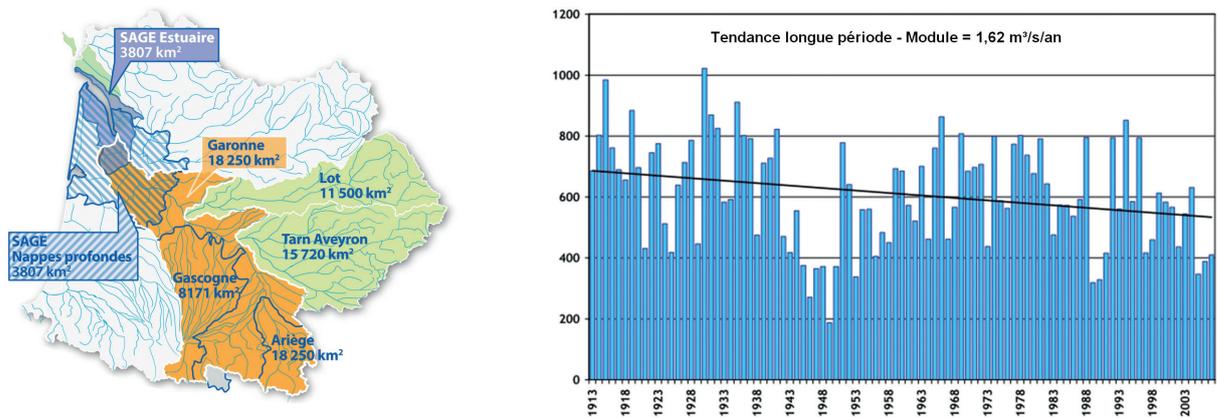
3.2 Élaboration de la politique : études prospectives de partage de la ressource

Les moyens actuels permettent de conduire des études approfondies concernant la ressource à l'échelle des bassins versants, et ces études fournissent des résultats utiles pour élaborer une politique de gestion partagée.

Par exemple, « Garonne 2050 » [Lhuissier et al., 2016] est une démarche prospective centrée sur l'eau, menée entre 2010 et 2012 à l'initiative de l'Agence de l'eau Adour-Garonne. Elle intègre le changement du climat et les évolutions possibles de la démographie, de l'énergie et de l'agriculture, ainsi que leurs impacts sur les ressources en eau. Elle répond à une demande du Comité de bassin Adour-Garonne dans le cadre de la mise en œuvre du SDAGE 2010–2015. Elle est conduite dans un contexte où le changement climatique est perceptible sur le bassin de la Garonne (28 000 km²), avec, par exemple, une tendance sensible à la baisse des débits naturels.

L'étude élabore des scénarios, sur la base des conclusions d'ateliers participatifs, puis les quantifie, notamment à travers l'utilisation d'un modèle de gestion « besoins-ressources ». Les conclusions doivent pouvoir aider à la décision pour anticiper les enjeux et les impacts des changements globaux sur l'hydrologie des rivières et les besoins en eau. Les ateliers participatifs sont pensés pour intégrer une approche multi-objectifs de la gestion des ressources en eau : usages anthropiques (préleveurs ou pas) et services environnementaux. Les ouvrages de stockage et de régulation des débits dans les cours d'eau constituent des éléments importants de la réflexion. Dans l'étude, plusieurs scénarios sont étudiés en faisant notamment varier un curseur sur l'utilisation de ces ouvrages hydrauliques : du mono-usage (irrigation ou hydroélectricité par exemple) au multi-usage (ce qui permet en particulier d'assurer le soutien des débits pour respecter les objectifs d'étiage).

Figure 1.17 – Localisation du bassin Adour-Garonne et évolution du débit moyen du fleuve



■ EXTRAIT DE L'ÉTUDE GARONNE 2050 [LHUISSIER ET AL., 2016]

L'incidence du changement climatique sur l'assèchement des rivières de notre bassin, confirmée par le dernier rapport du GIEC, sera majeure avec des impacts environnementaux, économiques et sociaux importants. Une stratégie d'adaptation d'ampleur est à imaginer pour l'avenir, si l'on souhaite équilibrer besoins et ressources en eau sur ce territoire. Pour se préparer à cet avenir, certaines mesures apparaissent dès aujourd'hui « sans regret » et urgentes à considérer, compte tenu du temps de mise en œuvre. Selon les hypothèses retenues, le manque d'eau sera un problème récurrent et structurel en 2050 et non la conséquence d'une année météorologique exceptionnelle. La stratégie du « laisser-faire » (compenser a minima) apparaît risquée car elle pourrait se heurter, au-delà des problèmes économiques et environnementaux directs, à des problèmes sanitaires forts, du fait de l'impact induit sur la qualité de la ressource. À l'inverse, les niveaux de débits d'objectifs d'étiage d'aujourd'hui semblent inaccessibles en 2050, du fait des coûts sociaux, économiques et environnementaux qu'engendrerait l'artificialisation du territoire.

Le niveau de compensation, face à la baisse prévisible des débits naturels, c'est-à-dire l'exigence de soutenir artificiellement les étiages en maintenant un débit minimum en rivière, est vu avant tout, pour le territoire de la Garonne en 2050, comme un choix social (aménités de l'eau en ville en été, usages récréatifs et paysagers...). Plus on sera ambitieux sur la demande moyenne (intégrant à la fois les usages et le principe de compensation), et donc sur les volumes à mobiliser pour y répondre, plus le risque de défaillance (risque de crise) sera grand. En tout état de cause, malgré les incertitudes sur le niveau et la répartition des précipitations futures et celles liées aux partis pris de modélisation, il est possible de dégager des pistes robustes en termes d'adaptation, à engager dès maintenant : œuvrer pour des économies d'eau et une gestion plus efficace, créer de nouvelles réserves, mobiliser des ressources non-conventionnelles (recharge de nappes, dessalement), augmenter ou favoriser la résilience des systèmes aquatiques, raisonner conjointement « eau et énergie », gérer collectivement la ressource pour l'intérêt général, recouvrer les coûts auprès des bénéficiaires, anticiper et innover.

À l'horizon 2050, même si les incertitudes demeurent importantes pour les précipitations, l'élévation de la température entraînera une augmentation forte de l'évapotranspiration. Les débits naturels d'étiage seront en moyenne réduits de moitié pour le bassin de la Garonne, territoire par ailleurs à la fois très agricole et très attractif d'un point de vue démographique. Le facteur qui a le plus d'impact dépend principalement d'un choix sociétal résumé à travers une double question : quel débit souhaitons-nous dans nos rivières l'été et que sommes-nous en capacité de faire ? Ces choix sont à réaliser rapidement, afin de mettre en œuvre des réponses adaptées. Dans les scénarios étudiés, le levier « sobriété de la demande » est systématiquement actionné mais ne suffit pas à résoudre le déséquilibre entre besoins et ressources.

4. RÉFLEXIONS SUR L'AVENIR DES BARRAGES EN FRANCE

La figure 1.1 montre le ralentissement et pratiquement l'arrêt de la construction de nouveaux barrages en France métropolitaine. Cette situation résulte d'une modification progressive de la perception des barrages par l'opinion publique. Les risques technologiques associés à ces ouvrages, les déplacements de populations qu'ils ont provoqués lors de la mise en eau de certaines retenues, l'impact des ouvrages sur le régime des rivières et sur la biodiversité expliquent l'évolution négative du regard porté en France vis-à-vis de ces grands projets d'aménagements hydrauliques, depuis les dernières décennies du 20^e siècle. Aujourd'hui encore, la construction de nouveaux barrages suscite les passions : des projets récents de nouvelles retenues agricoles de taille modeste, voulues par les irrigants pour compenser les effets constatés du changement climatique, ont conduit à des débats nationaux très vifs.

Pourtant, de nouveaux aménagements peuvent être nécessaires, pour répondre à des besoins actuels (ressource en eau, protection contre les inondations) ou pour répondre aux enjeux des changements climatiques. Il est raisonnable de penser que de tels aménagements sont possibles et souhaitables, pour différentes raisons.

Les bénéfices apportés par des aménagements existants ont été très importants, pour la société — ceci est illustré par exemple par la place considérable que la retenue de Serre-Ponçon a prise dans son territoire et dans toute la région Provence-Alpes-Côte d'Azur —, et aussi pour la biodiversité des retenues artificielles qui ont été classées pour leur importance écologique, sous le label Natura 2000 ou Ramsar. On peut penser que de nouvelles retenues, conçues dans cet esprit, pourraient également être porteuses de bénéfices sociaux et environnementaux. Cela nécessite sans doute de longues et minutieuses phases préalables d'analyse pour prendre en compte les enjeux multiples et croisés de tels aménagements. Les outils de gouvernance mis en place fournissent un cadre approprié pour cela ; il est possible que la réussite de premiers projets de grande qualité environnementale permette de faire évoluer la perception de l'opinion publique.

Cela semble une nécessité, car le changement climatique impose sa loi. D'une part, l'augmentation de la pénétration des énergies décarbonées intermittentes (solaire, éolien) conduit à une augmentation des besoins en régulation et stockage de l'électricité ; l'énergie hydraulique demeure certainement un moyen de réaliser ce stockage plus écologique que des parcs de batteries. D'autre part, les prospectives tendent à montrer que les mesures d'économie d'eau ne suffiront pas à compenser les sécheresses futures ; il faudra stocker davantage en hiver.

Ainsi, les besoins sont réels et il faudra pouvoir réaliser de nouveaux stockages, de nouvelles sources de production hydroélectrique. Cela nécessite de concilier les enjeux environnementaux de biodiversité et les enjeux sociétaux propres à chaque territoire. Cette évolution des besoins et des enjeux appelle de nouvelles idées. Voici quelques-unes des pistes explorées.

4.1 Les projets de territoire

Promus par une instruction ministérielle récente, les projets de territoire sont élaborés et mis en œuvre sous la conduite d'un comité de pilotage, avec pour objectif une gestion équilibrée de la ressource en eau, sans détériorer la qualité chimique et écologique des milieux aquatiques, et dans la perspective de prendre en compte l'ensemble des enjeux du territoire. Cette démarche, potentiellement longue, est peut-être de nature à faire émerger des solutions partagées.

4.2 Le stockage hors rivière

La continuité écologique est un des enjeux essentiels de biodiversité. Le stockage hors rivière permet d'envisager de nouveaux réservoirs qui ne créent pas de nouveaux obstacles.

Figure 1.18 – Projet La Bassée : réservoir de stockage des crues alimenté par pompage / © Seine Grands Lacs



C'est l'option utilisée depuis quelques décennies par l'EPTB Seine Grands Lacs (cf. 2.2), avec des retenues en dérivation, alimentées par gravité. L'EPTB prolonge encore davantage cette piste, avec le projet de La Bassée, figure 1.18, dont l'objectif est un stockage temporaire du pic de crue.

Cela fonctionne également hors de France : c'est l'option envisagée pour créer un nouveau réservoir de stockage dans le centre-sud algérien, en milieu aride, évitant ainsi un excès d'envasement et d'évaporation.

4.3 La surélévation des barrages

Il est devenu difficile de développer de nouveaux sites. L'optimisation de sites existants est souvent mieux acceptée. Cette optimisation peut parfois prendre la forme d'une augmentation de la ressource disponible, en relevant la cote d'exploitation de retenues existantes. À plusieurs reprises, une surélévation substantielle a pu être faite à coûts maîtrisés, en accompagnement d'une opération de confortement d'un barrage en service.

Figure 1.19 – Quatre exemples récents de surélévation de la cote d'exploitation en France, pour des barrages de tailles très variées. Dans trois cas, l'opération a également visé à améliorer la sécurité en crue du barrage



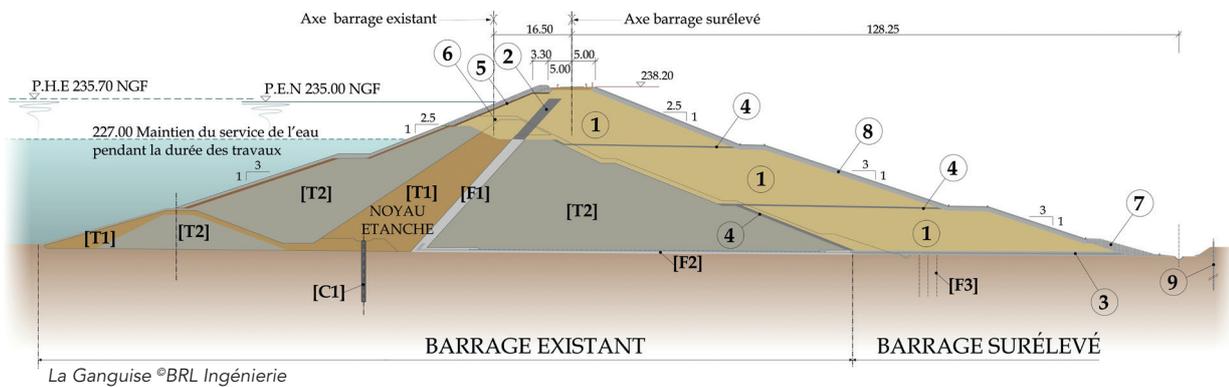
Rassisse © ISL Anthony Dols



Les Blanchets © ISL Olivier Lapeyre



Pont-et-Massène © VNF



La Ganguise ©BRL Ingénierie

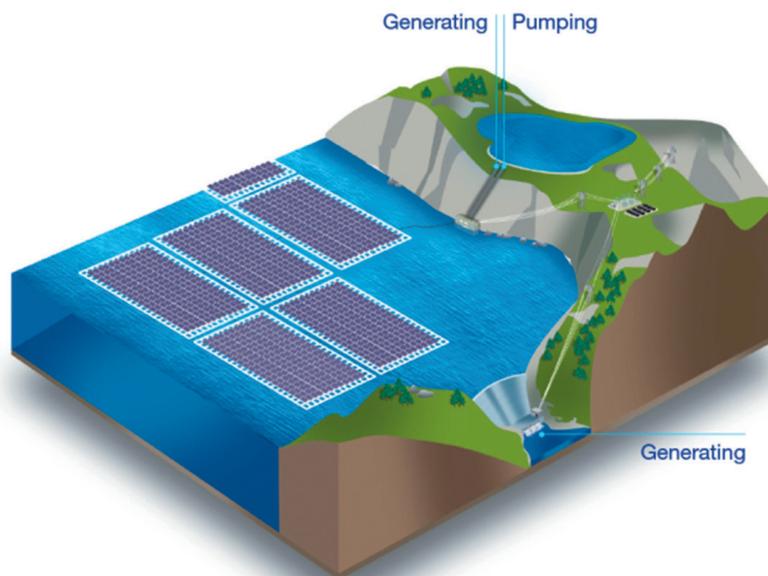
4.4 La combinaison hydro-solaire

Solaire et hydroélectricité peuvent naturellement être associés. C'est par exemple le cas du projet So FLEX'hy pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables par la souplesse de l'énergie hydraulique : inscrit dans le projet régional « Flexgrid », le projet EDF So FLEX'hy vise à déployer à grande échelle des réseaux électriques intelligents. Le projet teste, grâce à un démonstrateur de taille industrielle, des services et solutions techniques destinés à optimiser la complémentarité entre les moyens de productions renouvelables (hydraulique, solaire, éolien). Concrètement, plusieurs centrales solaires et hydroélectriques seront reliées entre elles pour lisser l'intermittence du solaire par la production hydraulique. Pilotée par un superviseur innovant, cette « centrale virtuelle » délivrera un ensemble de services aux gestionnaires de réseau et aux producteurs.

De manière plus intégrée encore, l'association bien calibrée d'une retenue existante, de panneaux solaires flottants et d'une station de pompage turbinage de capacité moyenne offre une électricité renouvelable (solaire), garantie (grâce au stockage) et sans consommation d'eau (pas d'impact sur l'exploitation de la retenue).

Cela fournit l'opportunité d'un usage supplémentaire à des retenues existantes. Ce type de combinaison entre énergie hydraulique et énergie solaire peut conduire à des centrales de grande capacité, d'un type nouveau, comme exemple les « twin dams » décrits par [F. Lempérière, 2018].

Figure 1.20 – Combinaison hydro-solaire / ©ISL



5. RÉFÉRENCES

- CREDOC (2009) – Étude exploratoire pour une évaluation des services rendus par les écosystèmes en France, étude réalisée à la demande du MEEDDM, Direction de l'eau et de la biodiversité, CREDOC Collection des Rapports N° 260, Asconit Consultants, Pareto, Biotope, sept. 2009.
- Lhuissier L., Lamblin V., Sauquet E., Arama Y., Goulard F. et Strosser P. (2016) – Retour sur l'étude prospective Garonne 2050, La Houille Blanche, 6 :30-35, DOI : <https://doi.org/10.1051/lhb/2016057>
- F. Lempérière, A. Nombre and L. Deroo (2018) – Dams and the need for more innovation, Hydropower & Dams ; Vol. 25 – Issue 3, 2018.

CHAPITRE
2

GÉOLOGIE, FONDATIONS ET TRAITEMENT DES FONDATIONS

L'apport du géologue, de la conception des barrages à l'évaluation du niveau de sûreté en cours d'exploitation, est essentiel [Antoine et al., 2018]. Le CFBR a consacré un colloque entier sur le thème des « Fondations des barrages » en 2015 [CFBR, 2015]. Ne sont abordés dans ce chapitre que quelques éléments en lien avec l'histoire de la géologie des barrages, des techniques innovantes de reconnaissances et en matière de traitement des fondations.

1. GRENOBLE ET LA GÉOLOGIE DES BARRAGES

La géologie des barrages a pris naissance au 19^e siècle dans les régions alpines comme le montre l'historique suivant.

En France, dès 1824, fut créé un enseignement de la géologie à l'université de Grenoble. Débuts très modestes puisque le personnel se limitait à une seule personne : le Professeur Émile Gueymard, ingénieur au Corps des Mines, minéralogiste et chimiste, titulaire de la chaire d'histoire naturelle qui venait d'être créée.

Dans le même temps, en 1827, Benoît Fourneyron (Saint-Étienne), inventeur de la turbine hydraulique, construisit une première turbine d'essai d'une puissance de 6 CV sous une modeste chute de 1,40 m. Les progrès furent rapides : en 1835 équipement d'une première haute chute en Forêt-Noire (114 m de hauteur – longueur de la conduite 500 m). Des installations suivirent rapidement pour les besoins de divers industriels, notamment : Uriage en 1863 (chute de 80 m) pour la société Vicat, 1866–67 à Domène pour les Papeteries des Gorges (chute de 30 m).

En 1868 vient s'établir en Dauphiné un ingénieur qui deviendra rapidement une célébrité, Aristide Bergès. C'était un Pyrénéen fabricant de défibreurs mécaniques pour la pâte à papier qui recherchait des sources d'énergie hydraulique. En janvier 1869, il entame la construction d'une chute de 200 m sur le torrent de la Combe de Lancey à Domène près de Grenoble. Celle-ci est mise en pression avec succès en septembre 1869. D'autres réalisations suivent rapidement comme la chute de Saint-Mury (1891) dans le même secteur. La rentabilité de ces aménagements était cependant fortement influencée par les fluctuations de débit des torrents alpins entre l'hiver et l'été. Utilisant au mieux la morphologie du vallon de la Combe de Lancey (et reprenant une solution qui se faisait jour à l'époque), il eut l'idée d'utiliser le Lac Crozet (1974 m d'altitude) comme régulateur des débits. En 1897, il perça le lac 25 m sous son niveau normal, portant le volume utilisable à près de 1 300 000 m³. Un résultat similaire pouvait évidemment être obtenu en créant un lac par un barrage dans une vallée d'altitude. L'ère des grands barrages s'annonçait.

Toutefois les utilisateurs de la force électrique (industries diverses) devaient alors être très proches de l'aménagement hydroélectrique lui-même. L'énergie produite n'était en effet pas transportable. Le transport par câbles conducteurs sur de longues distances fut imaginé par Marcel Desprez lequel mena, avec succès, divers essais à Paris en 1881, d'abord sur une courte distance (1 800 m), puis à Munich en 1882 sur 57 km ! En 1883, à la demande de la municipalité de Grenoble, il réalisa une célèbre expérience de transport d'énergie électrique entre Vizille et la Halle aux Grains de Grenoble, en plein centre-ville.

La coïncidence de dates entre les prémices de l'hydroélectricité et la création d'un laboratoire (encore très modeste) de géologie à l'Université de Grenoble est remarquable. Les trois successeurs d'Émile Gueymard, les Professeurs Charles Lory, Wilfrid Kilian et Maurice Gignoux en établirent la renommée pendant un siècle de 1849 à 1955. Ce furent les pères de la géologie alpine en France, puis de la géologie des barrages.

Les ingénieurs hydrauliciens de l'époque constatèrent rapidement que la taille croissante des ouvrages posait des problèmes de stabilité des appuis et d'étanchéité. Une bonne connaissance du terrain leur était donc indispensable. La coopération des sciences géologiques et hydrauliques devenait inévitable. Mais, où trouver des professionnels compétents ? La géologie en vue d'application à la construction était totalement ignorée du public et méconnue à l'université. Aucune formation de géologues professionnels n'existait alors. Seuls les professeurs des universités étaient susceptibles d'être consultés. Dans ces conditions, Wilfrid Kilian fut expert lors des premières études pour les projets de Génissiat et de Serre-Ponçon où des reconnaissances avaient été entreprises en 1898–99 (avant-projet de 1901). Il fit part de cette expérience, tout à fait inédite pour un géologue, dans deux conférences publiques, données à Grenoble en 1921, intitulées « La Géologie et l'aménagement hydroélectrique des chutes d'eau » [Kilian, 1921]. Il citait des aménagements en cours à l'époque, tels Viclaire en Tarentaise, Saulce-Ventavon sur la Durance, et mentionnait la construction du barrage d'Avignonnet sur le Drac (précocement

comblé par les alluvions du Drac, actuellement noyé sous la retenue de Monteynard). Il intervint également dans les études pour le barrage de Génissiat.

L'importance croissante des barrages réservoirs donnait évidemment un rôle essentiel aux massifs alpins, lesquels offraient morphologiquement de nombreuses possibilités de réservoirs et de hautes chutes. La Suisse, pays alpin par excellence, développa donc très rapidement ses nombreuses ressources en hydroélectricité. Or, la géologie des Alpes était encore très mal connue à la fin du 19^e siècle. Elle progressait toutefois rapidement grâce aux géologues suisses. Dès 1893, Hans Schardt reprit le concept géologique de nappe de charriage de Marcel Bertrand lequel fut exploité très brillamment, dès 1895, par Maurice Lugeon, professeur de géologie à Lausanne, pour expliquer les structures complexes des Préalpes romandes. Les géologues grenoblois s'en inspirèrent à leur tour très fructueusement dans les Alpes françaises et des liens se créèrent entre M. Lugeon et M. Gignoux.

Évoquer Maurice Lugeon offre un lien très direct entre la géologie alpine et celle des barrages. Seigneur parmi les géologues alpins, son esprit très pratique en avait fait rapidement un spécialiste incontestable pour la géologie des barrages en Europe et à l'échelle mondiale. Son nom est actuellement toujours familier aux ingénieurs barragistes du monde entier, lesquels ignorent généralement qu'il s'agissait d'un très grand géologue. Il imagina, en effet, l'essai d'eau tout à fait classique qui porte son nom, pour la conception des écrans d'étanchéité des grands barrages [Lugeon, 1932].

La technique des barrages se développant très rapidement, la nécessité de former des spécialistes divers fut très tôt établie. Ainsi, à Grenoble (ce n'est pas surprenant), une formation spécifique d'ingénieurs électriciens fut concrétisée dès 1900 avec la création de l'Institut Électrotechnique de Grenoble (IEG), suivie, en 1929, par celle de l'École des Ingénieurs hydrauliciens. Ces deux écoles ont fourni un grand nombre des ingénieurs qui ont largement contribué au vaste programme d'équipement hydroélectrique de la France après la seconde guerre mondiale.

Les professeurs de géologie grenoblois comprirent qu'il y avait là des débouchés certains pour de futurs étudiants. Ils se heurtèrent toutefois à un obstacle de taille : la lourdeur administrative française et la réticence du milieu universitaire vis-à-vis de formations professionnelles. Des certificats d'études supérieures avaient été créés vers 1880 pour obtenir un titre de licencié, soit en sciences naturelles, soit en sciences physiques. Il n'était toutefois pas question d'applications de ces sciences. Cependant, le 20 octobre 1901, le ministère de l'Instruction Publique autorisa la Faculté des Sciences de Grenoble à délivrer un certificat de Géologie et Minéralogie appliquée. Un pas important était franchi avec l'emploi de ce mot, mais ce certificat restait proche du fondamental.

L'enseignement supérieur n'ignorait pas la nouvelle science hydraulique, cela étant concrétisé par la création, mentionnée ci-dessus, d'une École d'ingénieurs hydrauliciens. Il s'y dispensait évidemment des cours dans les matières nécessaires aux applications pratiques de l'hydraulique dans les domaines de l'industrie et de l'aménagement. La géologie fut alors considérée comme telle et Maurice Gignoux fut choisi pour y enseigner la géologie des barrages. Il participait, comme Maurice Lugeon avec lequel il collabora, à l'étude de plusieurs sites alpins.

En 1948, Reynold Barbier fut nommé comme assistant de géologie à l'Université de Grenoble après avoir enseigné à l'Institut du Pétrole à Strasbourg, puis à Toulouse. Il devint professeur en 1953, titulaire d'une chaire nouvelle de Géologie appliquée. Gignoux et Barbier publièrent, ensemble, le célèbre ouvrage « Géologie des Barrages et des aménagements hydrauliques » de renommée internationale [Gignoux et al., 1955].

Figure 2.1 – Extrait de « Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques »

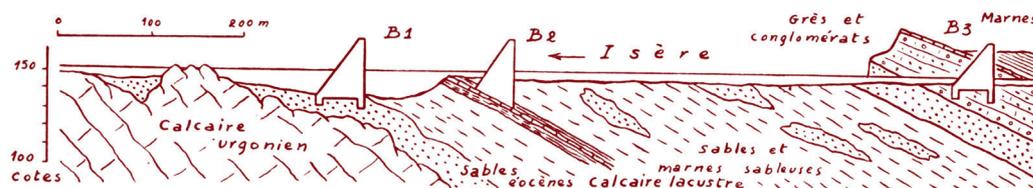


FIG. 98. – PROJET DE BARRAGE DE VALENSOLE SUR LA BASSE ISÈRE

Coupe géologique suivant le cours de l'Isère à la suite de la campagne de sondages (d'après «Solétanche») ; hauteurs doublées

Un emplacement aval sur les calcaires urgoniens a été tout de suite abandonné, car ceux-ci sont très corrodés et renferment des poches de sables éocènes. L'emplacement B₁ profiterait d'un niveau où ces sables sont localement plus cohérents. En B₂, on a cherché à utiliser la présence d'un banc calcaire. Enfin en B₃, on a étudié la possibilité de fonder l'ouvrage sur une barre de grès et conglomérats.

Maurice Gignoux décédant quelques mois après, ce fut donc à Reynold Barbier que revint dès 1955 le développement de l'enseignement de la géologie des barrages à Grenoble.

La création, en 1961 d'un troisième cycle comprenant deux options, Géologie des chaînes de montagnes et Géologie appliquée, officialisait l'enseignement de la géologie des barrages à l'université. Cela ouvrait des perspectives d'enseignement et de recherche que le laboratoire de Géologie n'avait jamais connues. La création du troisième cycle impliquait celle d'une année d'enseignement spécialisé, le DEA, préparatoire à un doctorat. Une option Géologie du génie civil permettait aux étudiants géologues de se former dans des disciplines non géologiques comme la mécanique des sols, des roches et l'hydraulique, ou à des ingénieurs désireux de se familiariser avec la géologie. Le point essentiel était que ce cycle d'étude conduisait à une formation scientifique de haut niveau — le doctorat d'État — ou professionnalisante — le doctorat de 3^e cycle — dans le domaine des applications de la géologie au génie civil [Cheylan, 1966] [Schneider, 1967] [Marinos, 1969] [Thérond, 1972] [Giraud, 1986] [Couturier, 1987].

Cet enseignement connut aussitôt un grand succès auprès des étudiants et des employeurs potentiels. Il bénéficiait en effet, à Grenoble, d'un contexte très favorable. Dès 1945 la France commençait, avec la création d'Électricité de France (EDF), la réalisation d'un vaste programme d'aménagements hydrauliques. Une conséquence en fut le développement parallèle d'industries telles que le génie civil (construction de barrages et de tunnels), l'industrie métallurgique (turbines, conduites forcées, vannes...), l'industrie électrique (alternateurs, transformateurs, câbles de tous types...). Or, Grenoble était le siège, depuis le début du siècle d'entreprises spécialisées dans la plupart de ces techniques, notamment en hydraulique (Neyret Bellier-Picard Pictet, Neyrpic, Bouchayer et Viallet pour les conduites hydrauliques), et en matériel électrique (Merlin et Gerin). Un important bureau d'étude spécialisé en applications de l'hydraulique se développa au sein du groupe industriel Neyrpic, devenant, en 1955, la Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH). Cette dernière se spécialisa, entre autres, dans l'étude des projets de barrages, essentiellement à l'international, où elle acquit une réputation mondiale. Des relations étroites s'établirent avec Reynold Barbier qui dirigea le laboratoire de Géologie pendant des années.

Sur le plan universitaire, d'autres laboratoires de recherche — et les enseignements correspondants — furent également créés en mécanique des sols (avec Jean Biarez) et des roches (avec Jean Kravchenko). L'Université de Grenoble devenait, un pôle majeur des enseignements

et recherches des sciences appliquées relatives aux sols et aux roches. Une initiative de Jean Biarez et Reynold Barbier conduisit à la création d'un Institut interdisciplinaire de géologie et de mécanique (IRIGM devenu LIRIGM), disparu depuis quelques années. Cet institut fut cependant à l'origine de la création, au sein de l'Université de Grenoble, d'une École d'ingénieurs géotechniciens (ISTG) à laquelle participèrent activement les géologues du Génie civil (Pierre Antoine, Denis Fabre, André Giraud puis par la suite Bernard Couturier et Pierre Desvarreux, centralien converti à la géologie). Cette école maintient la tradition de collaboration, voulue de longue date, entre les géologues et les mécaniciens, au sein d'un ensemble d'écoles désormais beaucoup plus vaste, Polytech Grenoble.



Figure 2.2 –

*De gauche à droite :
André Giraud (IRIGM),
Bernard Couturier
(CTPBOH),
Denis Fabre (IRIGM),
Reynold Barbier
(Ex-CTPBOH),
Pierre Antoine
(Ex-CTPBOH),
Jean Letourneur
(IRIGM) /*

© Bernard Couturier

Cette association de la géologie aux projets de barrages s'est concrétisée, hors du cadre universitaire, avec la création au sein de l'Administration française, en 1966, à la suite de la catastrophe de Malpasset (1959), du Comité Technique Permanent des Barrages. Ce comité, renommé en 2007, Comité Technique Permanent des Barrages et des Ouvrages Hydrauliques, donne un avis sur tous les projets de nouveaux barrages, les modifications substantielles ou la réhabilitation d'anciens ouvrages dont la hauteur dépasse 20 m au-dessus des terrains de fondations. Il est constitué de douze membres et comprend un géologue. Depuis sa création, ce sont trois universitaires grenoblois qui se sont succédé sur ce poste, Reynold Barbier, Pierre Antoine et aujourd'hui Bernard Couturier.

2. APPORTS DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES POUR ÉTABLIR LE MODÈLE GÉOLOGIQUE DES MASSIFS ROCHEUX

L'utilisation des technologies numériques vient compléter les techniques de reconnaissances géologiques « traditionnelles », au sens large, en facilitant la représentation 3D du massif rocheux dans lequel est implanté un barrage, une galerie ou une usine hydroélectrique extérieure ou souterraine. Ces technologies nouvelles ne peuvent cependant pas remplacer les levés géologiques de terrain qui restent le travail de base, fondamental, pour un projet nouveau ou la maintenance d'un ouvrage existant [Antoine et al, 2018].

2.1 Utilisation des drones et des lidars

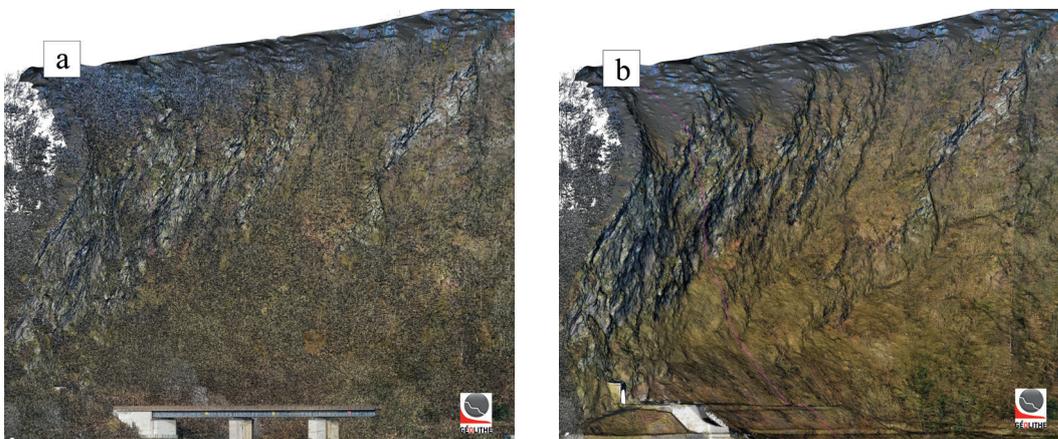
La modélisation de la topographie des sites étudiés par l'utilisation combinée des drones et des lidars permet d'obtenir des relevés topographiques précis des sites de barrage sans nécessiter de moyens importants d'investigations topographiques au sol.

Cette modélisation permet ensuite de proposer une maquette 3D à partir de laquelle toutes les observations et reconnaissances sont intégrées.

Figure 2.3 – Relevé lidar à partir d'un drone / © Géolithe



Figure 2.4 – Site de Laifour (08) Modèle numérique obtenu par levé lidar multi-échos : a) avant traitement de la végétation ; b) après élimination de la végétation avec la mise en évidence d'un merlon de protection d'un pont en pied de versant / © Géolithe



À EDF, la technologie LIDAR a été utilisée pour une meilleure cartographie du bassin versant alimentant le réservoir du barrage du Mont-Cenis, incluant les glissements de terrain du Lamé et du Laro ainsi que les dolines du Lamé.

Les drones permettent d’imager les zones peu accessibles des fosses de réception à l’aval des barrages ; ceci permet une meilleure connaissance des conditions structurales conditionnant l’érodabilité du rocher dans ces fosses. Dans les zones difficilement accessibles, cette technique permet également d’observer les falaises. Les photos prises par les drones sont traitées par un logiciel 3D et restituées sous formes d’images en relief, ce qui facilite les études de stabilité.

2.2 Analyse structurale numérique de terrain

Ces nouvelles technologies permettent de renforcer l’analyse structurale des massifs, précédemment définie uniquement à partir des relevés directs sur les affleurements et des reconnaissances classiques. Les figures ci-dessous représentent un levé et une analyse structurale numérique menés sur le site de Jouques d’un affleurement de calcaires argileux grumeleux du Berriasien, réalisés à partir de la maquette numérique.

Figure 2.5 – a) nuage de points géoréférencé et colorisé ; b) nuage de points colorisé selon les normales de chaque point ; c) classification en familles directionnelles pour les failles et diaclases – Pôles et Plans, canevas de Schmidt et de Wulf / © Géolithe

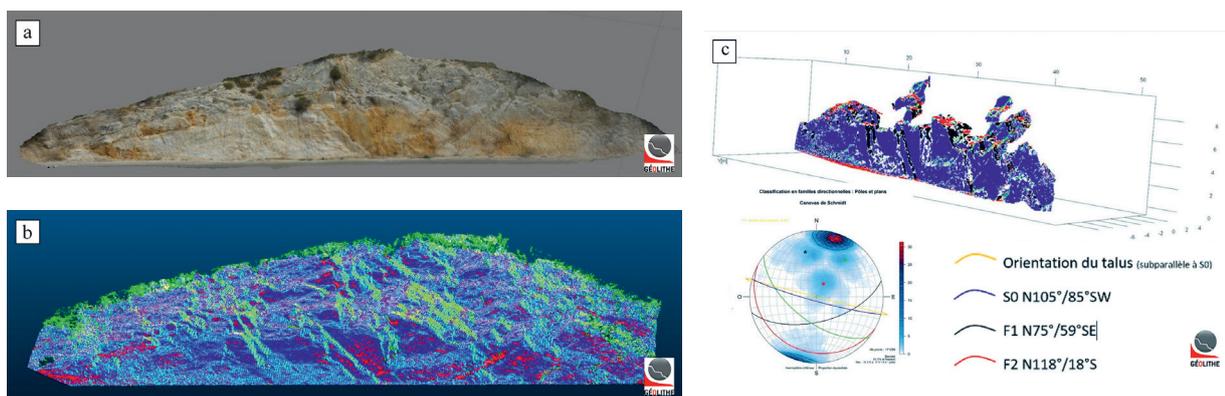


Figure 2.6 – Analyse structurale numérique de détail site de Pombourg réalisée à partir de la maquette numérique dans un massif de calcaires noduleux de l’Oxfordien, chaque famille de discontinuité est représentée par une couleur / © Géolithe

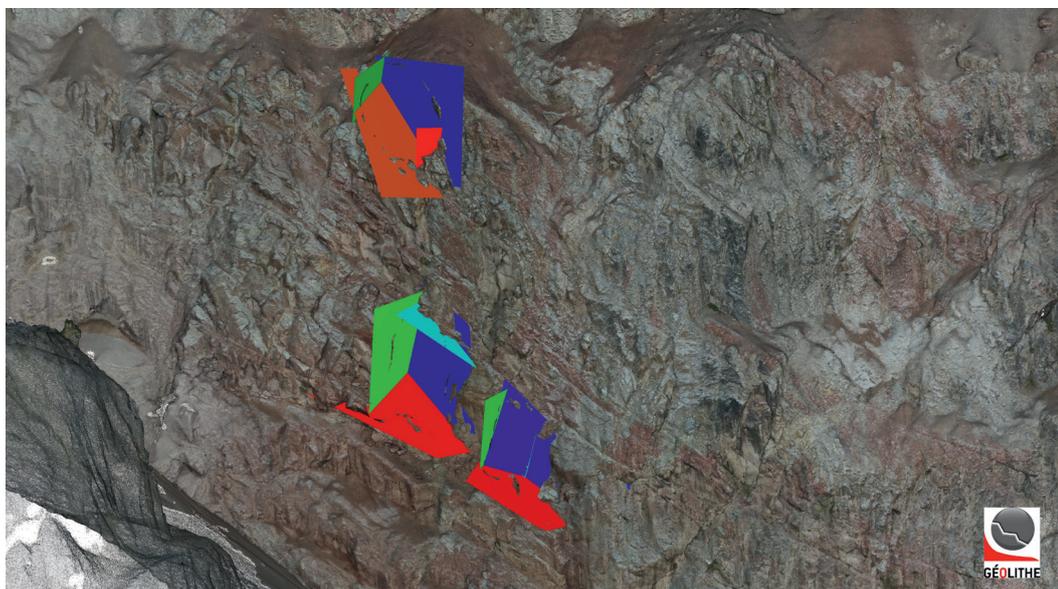
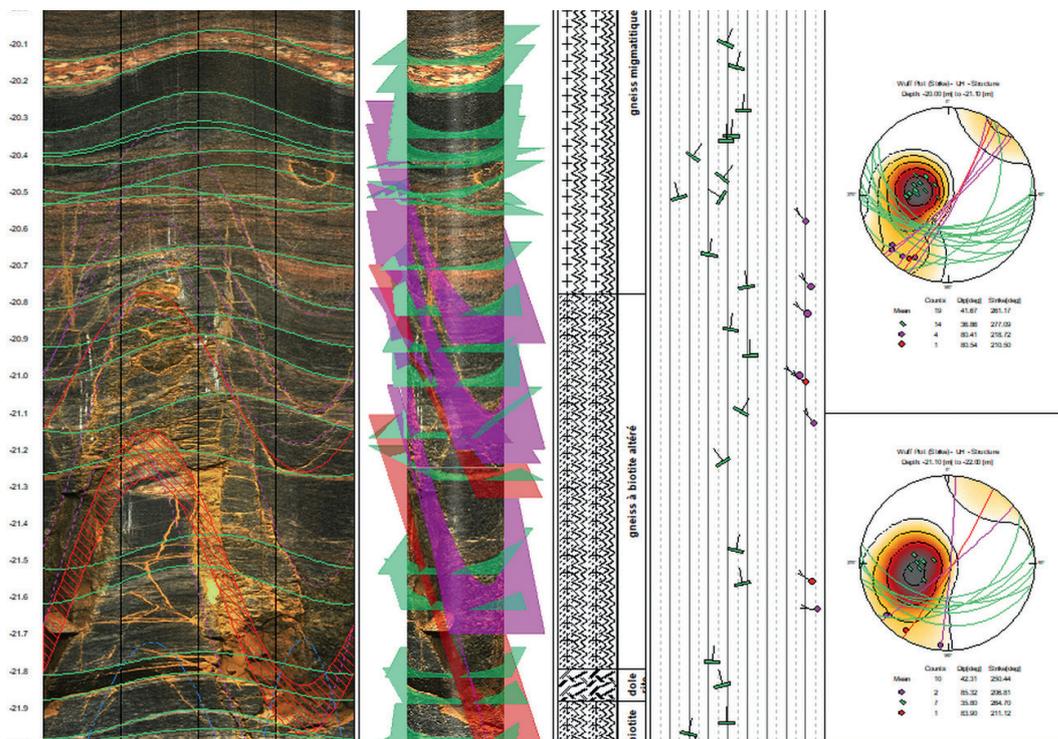


Figure 2.7 – Aménagement hydroélectrique de Volobe (Madagascar), Diagraphie avec imageur numérique et analyse structurale montrant des filons de Dolérite au sein des Gneiss à biotite/ © Géolithe



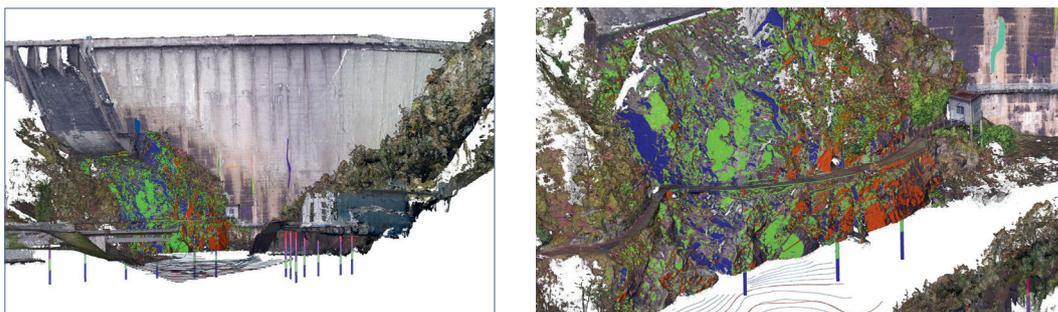
Pour les calculs de stabilité des barrages-poids en béton, l'imagerie de la paroi des sondages permet de voir si le contact béton-rocher est fermé et s'il est possible de lui attribuer une résistance à la traction et donc une cohésion.

2.3 Montage des modèles numériques

L'intégration, dans des logiciels géologiques du marché, de tous ces éléments numériques, complémentaires des éléments traditionnels qui incluent également, et selon le besoin, les paramètres géotechniques de compressibilité et / ou de perméabilité, permet de mieux préciser le modèle géologique du site par une visualisation plus claire des zones de failles et de concentrations de diaclases, ce qui est très utile pour une galerie, une stabilité de falaise voire le positionnement de l'axe d'un futur barrage.

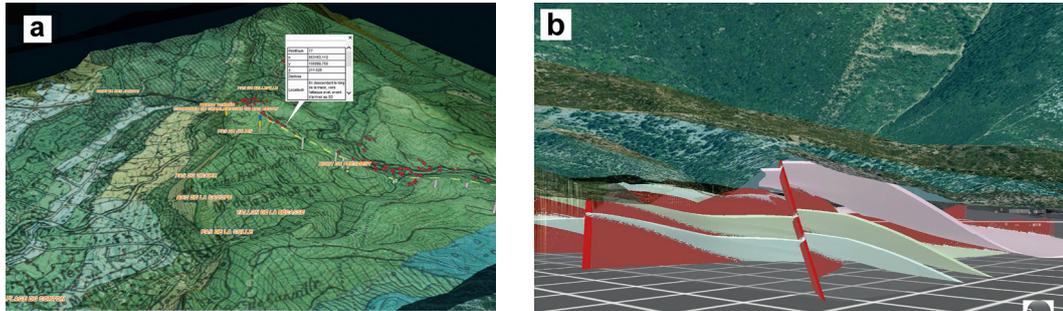
La figure 2.8 montre un exemple d'intégration d'éléments numériques pour un versant sur lequel s'appuie un barrage-voûte.

Figure 2.8 – Barrage de Marèges : maquette numérique complète avec intégration de tous les relevés stratigraphiques / © Géolithe



La figure 2.9 fournit un exemple d'intégration d'éléments numériques pour la galerie hydraulique des Janots (13) dans le massif sédimentaire de la Couronne de Charlemagne, dans les formations du Turonien (marnes bleues pyriteuses et calcaires marneux noduleux, calcaires à rudistes, Grès) et du Cénomaniens (calcaires à rudistes, grès ferrugineux, marnes sableuses).

Figure 2.9 – a) superposition Modèle Numérique de Terrain (MNT) / Carte géologique / sondages / levés de terrain ; b) vue en profondeur des différentes formations et failles géologiques obtenues par la modélisation géologique 3D sous le logiciel Geomodelleur3D / © Géolithe



Ces images, combinées à l'ensemble des données disponibles, permettent l'élaboration d'un modèle géologique / géotechnique 3D avec repérage des anomalies karstiques probables au cœur du massif, de manière à limiter les risques de débousses de cavité, de défauts de soutènements, d'instabilité des fronts de tailles pendant le creusement au tunnelier de la galerie.

2.4 Recherche & Développement en géophysique appliquée

Une géophysique d'origine pétrolière (sismique réflexion à très haute résolution) a été utilisée dans le but d'imager le contact béton-rocher des barrages-poids.

Les évolutions réglementaires (séismes et crues) conduisent les maîtres d'ouvrage à interroger les marges existantes pour justifier la stabilité des barrages-poids. Les efforts portent sur l'amélioration de la caractérisation du contact béton-rocher et ses éventuels redans qui augmentent significativement la résistance au cisaillement.

La voie actuellement explorée par EDF-DI-TEGG, pour des ouvrages dont le fond de fouille est peu documenté, est d'établir une analogie entre le parement d'un barrage et l'axe d'un forage dévié, pour mettre en œuvre la méthode de sismique pétrolière, dite Profil Sismique Vertical (PSV cf. figure 2.10), en utilisant non seulement les ondes P mais aussi les ondes S.

Figure 2.10 – Principe du PSV

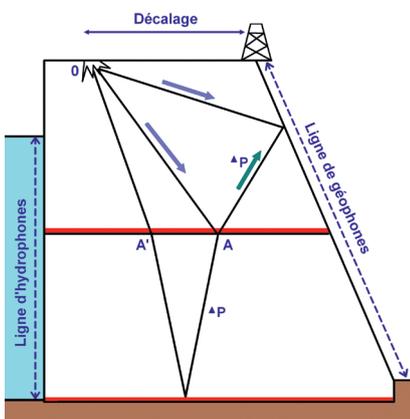


Figure 2.11 – Image pseudo-PSV d'un barrage

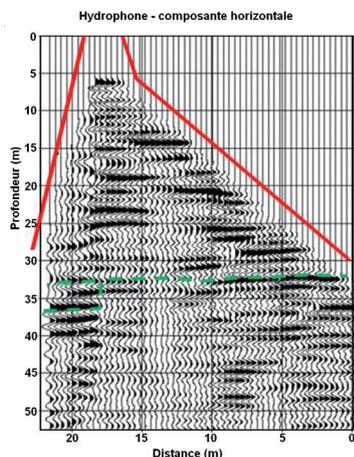
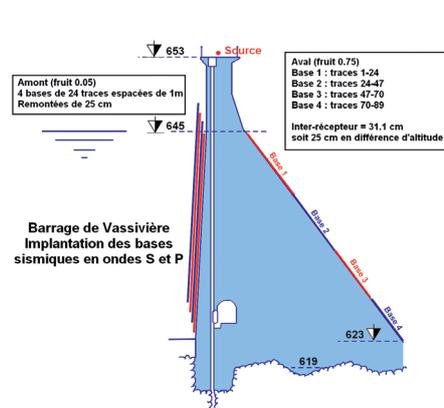


Figure 2.12 – Application au barrage de Vassivière



La méthode a été appliquée au barrage de Vassivière. À partir des connaissances acquises par des mesures in situ (cf. figures 2.11 et 2.12), des simulations numériques (signaux synthétiques) sont en cours pour évaluer la sensibilité de la méthode pour imager les redans (forme et dimension) du contact béton-rocher selon le contraste de vitesse entre le béton et le substratum rocheux.

2.5 Conclusion

Les technologies numériques de reconnaissance pour un site hydraulique (comme d'ailleurs pour tout site) viennent compléter les levés de terrain et les reconnaissances traditionnelles en permettant une visualisation plus aboutie du massif rocheux entourant l'ouvrage.

Ces évolutions technologiques ne sont pas contradictoires avec la nécessité de réaliser des campagnes de reconnaissances géologiques et géotechniques successives comportant des synthèses d'étapes tout le long de l'élaboration du modèle géologique du site et de la construction du projet ; elles ont toutes pour objet d'optimiser l'intégration de l'ouvrage dans le milieu naturel.

Ces applications et leurs utilisations sont en devenir et croissance permanente ; elles conduiront, avec le développement et la rationalisation des projets grâce au BIM. (Building Information Modeling) conjugués avec l'utilisation de l'intelligence artificielle, à une fiabilisation de la connaissance de l'histoire du site et de l'insertion de l'ouvrage dans ce site.

Toutes les données collectées pendant la conception, la construction, l'auscultation et la maintenance de l'ouvrage, pourront être disponibles sur le terrain à l'aide d'outils de « réalité augmentée » en plein devenir, consultables sur une tablette.

Ces différents outils numériques, ainsi que les recherches en géophysique par sismique réflexion à très haute résolution, faciliteront la réévaluation de la sécurité des ouvrages en fonction des enjeux.

Néanmoins, les levés géologiques de terrain, ainsi que les observations en cours de travaux, resteront toujours un préalable indispensable à toute étude de site.

■ PIERRE LONDE (1922–1999)



Diplômé de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Pierre Londe commence sa carrière dans le bureau d'études Coyne et Bellier.

En 1953, il publie avec Georges Post le livre, préfacé par André Coyne, « Les barrages en terre compactée », qui a longtemps fait référence en France. En cela, il a aussi contribué à faire progresser la mécanique des sols.

Après la rupture du barrage-voûte de Malpasset en 1959, Pierre Londe a largement participé

aux études scientifiques réalisées pour expliquer l'éjection d'une partie du massif rocheux en rive gauche. Il est à l'origine de la définition des « coins de Londe », ou volumes rocheux potentiellement instables que l'on recherche systématiquement sur tous les appuis des barrages-voûtes dans le monde. En cela, il a contribué à faire progresser la mécanique des roches.

Il a été membre de nombreuses sociétés savantes et conseils scientifiques en France (CFMR-CADAS...) et à l'étranger. En 1979, il est élu président de la Commission Internationale des Grands Barrages. C'est un brillant ingénieur qui a fait l'essentiel de sa carrière dans le bureau Coyne et Bellier et qui, pendant plus de 50 ans, a consacré ses activités à l'étude et à la conception des barrages, en France et dans le monde.

3. TRAITEMENT DES FONDATIONS

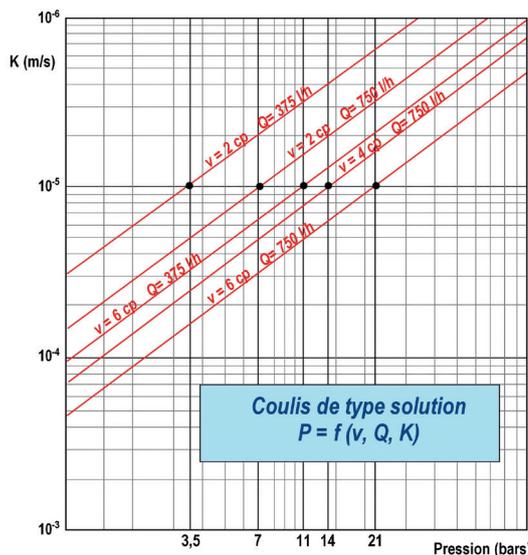
Ce paragraphe montre la nécessité de concilier les injections de résines avec les contraintes environnementales lors des opérations de maintenance du parc de barrages.

L'injection des coulis classiques, à base de bentonite et de ciment, trouve rapidement ses limites dans les faibles perméabilités granulaires ($K < 5 \times 10^{-5}$ m/s) et dans les fortes perméabilités ($K > 10^{-3}$ m/s) avec des écoulements turbulents d'eau très froide provenant des fonds de retenues de barrages (températures < 10 °C voire 4 °C). Pour ces situations « extrêmes », le besoin des résines et des liqueurs non granulaires persiste, malgré leur chimie complexe et leur toxicité potentielle ou réelle.

3.1 Domaine des faibles perméabilités

Dans le domaine des faibles perméabilités, les micro-ciments ont pu faire descendre l'injection d'imprégnation granulaire dans la partie haute de la gamme des faibles perméabilités ($K \# 10^{-5}$ m/s), guère en deçà du fait de leur granularité. Les nano-silices en sont encore au stade expérimental. Les liqueurs de silice et les résines demeurent nécessaires par leur absence de granularité et leur faible viscosité ($v \leq 5$ mPa.s). Ainsi, les lentilles de sable des grès du Trias germanique du barrage de Vieux-Pré, dans les Vosges, ont été injectées par un gel dur de silicate de sodium. Le durcisseur C du silicate était toxique mais son dosage est très faible ; depuis, il a évolué vers le durcisseur 600 E, beaucoup moins toxique pour l'environnement. Pendant la mise en eau, il a fallu reprendre en sous-œuvre l'injection par imprégnation du sable de remplissage des crevasses du grès au contact du noyau en argile du barrage, à partir de la galerie d'injection. Pour ne pas claquer le contact argile-grès, la pression d'injection devait être la plus faible possible, il fallait donc que la viscosité soit la plus faible possible. Le Siprogel ($v \approx 2$ à 3 mPa.s), mélange de monomères acryliques toxiques et de gel de silicate de sodium, a été utilisé pour imprégner le sable par une injection à faible pression.

Figure 2.13 – Lien entre la pression d'injection en bars ($1 \text{ bar} = 0.1 \text{ Pa}$) la perméabilité K en m/s, la viscosité v en centipoises ($1 \text{ cp} = 1 \text{ mPa.s}$) et le débit d'injection Q



Une résine à faible viscosité ($v = 2$ cp), injectée à faible débit ($Q = 375$ l/h), permet d'injecter des faibles perméabilités de pores (sable) $K = 10^{-5}$ m/s à faible pression $P = 3,5$ bars.

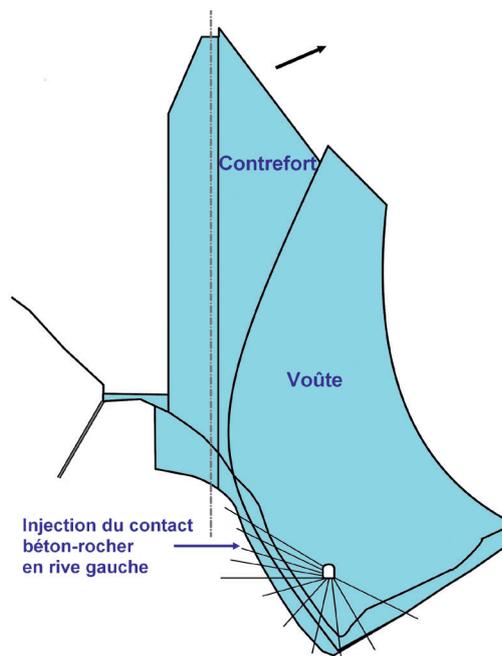
Les propriétés du Siprogel ont également été utilisées pour étancher le contact béton-rocher de la partie voûte du barrage de Roselend ($H = 150$ m) et du contact béton-béton entre la partie voûte et la partie barrage-poids à contreforts, qui sollicitent différemment la fondation. La très faible épaisseur de ces contacts ne génère pas de débit de fuite significatif mais transmet la pression vers l'aval. La finesse du contact et sa variation d'épaisseur en fonction du marnage de la retenue ont conduit à faire appel au Siprogel de 1973 à 1975 pour sa faible viscosité et son comportement élastique.

Figure 2.14 – Barrage de Roselend : injection du contact béton-rocher

L'élasticité n'est pas pérenne (durée 10 à 15 ans) il faut régulièrement remplacer le Siprogel.

Depuis plus de 15 ans, du fait de sa toxicité, le Siprogel n'est plus fabriqué. Pour la dernière reprise d'injection en 2010, il a fallu recourir à une nouvelle résine, aussi peu toxique que possible, à base de méthacrylate d'éthyl et d'amines, aux propriétés (viscosité et élasticité) aussi proches que possible de celles du Siprogel.

L'expérience a montré qu'une montée en compétence des entreprises est nécessaire pour maîtriser la chimie complexe de cette résine en eau très froide et qu'il faut adapter les pompes d'injection à l'agressivité des composants de la résine.



3.2 Domaine des fortes perméabilités avec écoulement turbulent

Pour stopper les écoulements turbulents, les coulis bentonite-ciment sont facilement dilués, même quand ils sont rigidifiés avec l'adjonction d'environ 10 % de silicate de soude. En 1993, pour parvenir à stopper une boulange dans les alluvions du Rhône, à l'aval du déversoir d'Herbens (canal de Jonage, près de la ville de Lyon) il a fallu recourir à l'utilisation mal maîtrisée d'une résine polyuréthane. Cette injection de résine polyuréthane a fini par être couronnée de succès, mais seulement après de nombreux « tâtonnements ».

En 1996–1997, il a fallu recourir à nouveau à une résine polyuréthane, pour colmater la fuite du noyau en béton bitumineux du barrage de Lastioules Sud dans le Massif Central. Précédemment, plusieurs campagnes d'injections de coulis bentonite-ciment avaient échoué. Il est vrai qu'au niveau du noyau, la vitesse de l'eau était très élevée, estimée à 1 m/s.

Figure 2.15 — Barrage de Lastioules : injection d'une résine polyuréthane bi-composants

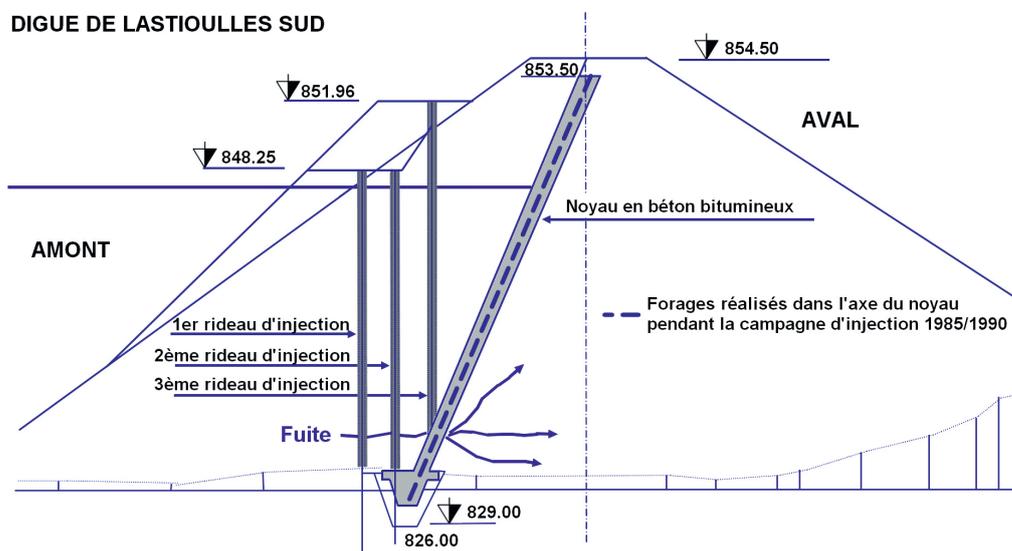


Figure 2.16 – Tests de résines au laboratoire EDF-TEGG en 1999 : écoulement turbulent dans des graviers avec une eau réfrigérée à 10 °C puis à 2 °C à travers un tube en PVC transparent, de 10 m de long / ©EDF



Devant cette situation, et la complexité des résines polyuréthanes, à partir de 1997 le laboratoire de EDF-TEGG à Aix-en-Provence a procédé à deux séries de tests de résines présentes sur le marché, en particulier les résines polyuréthanes mono-composant et bi-composants.

Seulement deux résines polyuréthanes bi-composants ont passé le test avec succès. Une résine polyuréthane mono-composant a fait exploser le tube d'essai par dégagement important de gaz carbonique.

L'une des résines bi-composants ayant réussi les tests a été utilisée avec succès pour colmater la fuite du noyau du barrage de Lastioules Sud et aussi pour les campagnes d'injection ultérieures à Lastioules Nord.

Concernant l'impact environnemental, les composants de la résine bi-composants (di-isocyanate et polyol) sont individuellement toxiques mais le produit de réaction est inerte. À condition de maîtriser la réaction, en particulier en veillant à ce que la réaction soit complète, il n'y a pas d'impact environnemental. Sur le site de Lastioules Sud, la société de pêche, implantée à l'aval du barrage, n'a pas subi de dommages.

3.3 Conclusion

Les résines sont indispensables pour assurer la maintenance du parc hydraulique. Certaines d'entre elles ont dû être remplacées pour respecter les contraintes environnementales ; cela s'est fait au prix d'une chimie complexe et d'une mise en œuvre très délicate. Leur utilisation nécessite une montée en compétence des entreprises, ainsi qu'une adaptation du matériel d'injection à l'agressivité des composants des résines.

4. GLISSEMENTS DE TERRAINS DANS LES RETENUES DE BARRAGES

Du fait de l'importance de son parc hydraulique (68 barrages soumis à des plans particuliers d'intervention qui sont prescrits pour les barrages les plus importants et 255 mouvements de terrains potentiels ou actifs), comportant quelques sites sensibles, EDF possède une longue expérience dans la gestion des mouvements de versants, tant lors de la première mise en eau que pendant l'exploitation. Ceci a été exposé dans de nombreuses publications, notamment à l'occasion de congrès de la CIGB.

Figure 2.17 – Le glissement de la Berche au 21 juillet 2015 © EDF-DI-TEGG



Cette expérience a par exemple été mise à profit en 2015 pour évaluer l'impact potentiel du glissement de la Berche dans la retenue du barrage du Chambon où, en partant du type de glissement, il a été possible d'évaluer la hauteur de la vague induite (figure 2.17 ci-dessus). Cette étude a fait l'objet d'une publication (Q102) lors du congrès de la CIGB de Vienne en 2018.

5. RÉFÉRENCES

- Antoine P., Couturier B., Vuillermet E. (2018) – Les apports du géologue, de la conception des barrages à l'évaluation du niveau de sûreté en cours d'exploitation. 25^e congrès de la CIGB, Vienne, Autriche, Q102-R18.
- CFBR (2015) – Fondations des barrages. Colloque CBFR Chambéry, avril 2015. <https://www.barrages-cfbr.eu/2015-Fondations.html>
- Cheylan G. (1966) – Études géologiques des aménagements hydrauliques de la Compagnie de Bas-Rhône-Languedoc, Thèse doctorat d'État ès sciences, Université de Grenoble, 343 p.
- Couturier B. (1987) – Les études géologiques dans les projets de barrages. Thèse doctorat d'État ès sciences, Université de Grenoble 1, 351 p.
- Couturier B., Goubet A., Antoine P., Schmidt E. (1997) – Géologie des barrages en béton compacté au rouleau (BCR). Bull. de l'AIGI, Paris, n° 55.
- Gignoux M., Barbier R. (1955) – Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Masson, Paris, 344 p. 176 fig. 28 planches photo.
- Giraud A., (1986) – Caractérisation géotechnique des massifs rocheux par étude structurale et essais in-situ – Application aux sites de barrages. Thèse doctorat d'État ès sciences, Université de Grenoble 1, 204 p.
- Kilian W. (1921) – La géologie et l'aménagement hydroélectrique des chutes d'eau. La Houille blanche, nlle série, n° 169, pp. 41-44.
- Lugeon M. (1932) – Barrages et Géologie. Rouge et C^{ie}, Lausanne, 138 p., 63 photos.
- Marinos P. (1969) – Études géologiques d'aménagements hydrauliques dans le Lauragais. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Grenoble, 208 p.
- Schneider B. (1967) – Contribution à l'étude des fondations de barrages. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Grenoble, 241 p.
- Théron R., (1972) – Recherches sur l'étanchéité des lacs de barrages en pays karstiques. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Grenoble, 409 p.
- Vaysse F., Castanier G., Viard T., Chuillat O., Aelbrecht D. – CIGB Vienne (2018) Question 102 Risque induit par les glissements de terrain – du modèle géologique aux hauteurs de vagues induites.

CHAPITRE
3

HYDROLOGIE ET ÉVACUATEURS DE CRUES

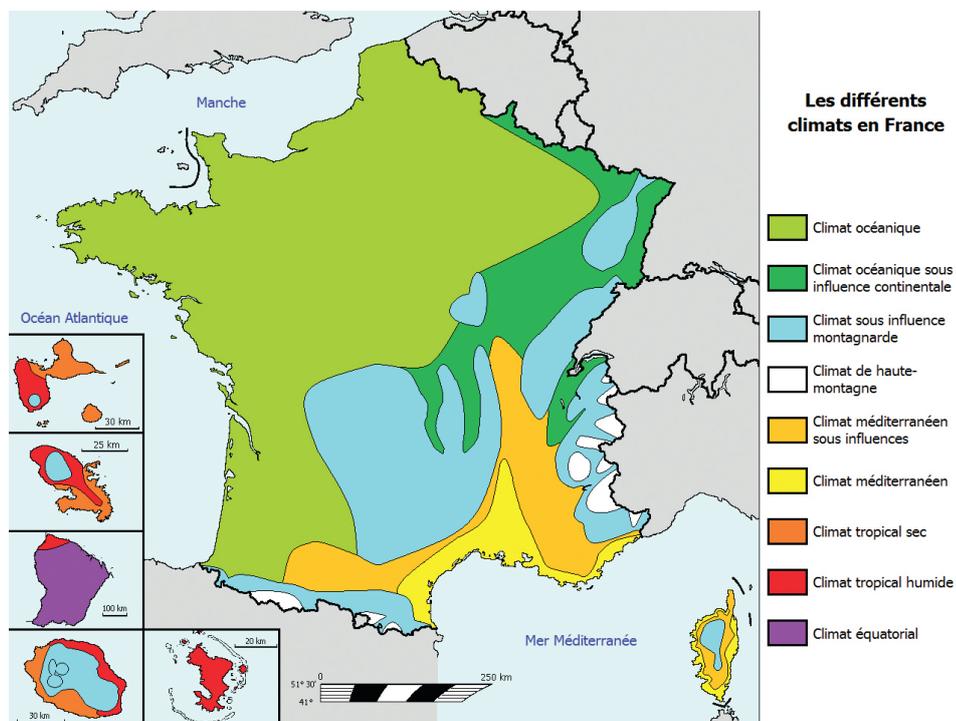
1. HYDROLOGIE

1.1 Hydrologie et géographie française

La France métropolitaine (551 000 km²) se situe autour du 45^e parallèle Nord et bénéficie d'un climat dit tempéré. Cependant, ce climat tempéré présente une assez grande variabilité, selon la latitude, l'altitude et la proximité ou non des côtes.

La figure 3.1 montre les grands types de sous-climats que l'on peut rencontrer en France métropolitaine et ultra-marine.

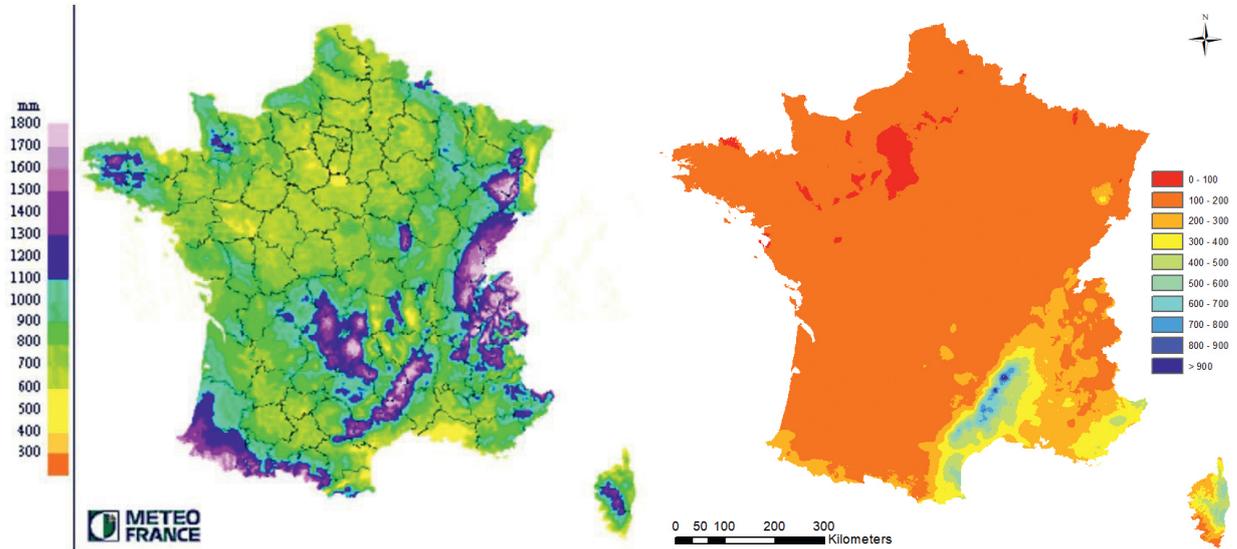
Figure 3.1 – *Climats en France métropolitaine et ultramarine* / © www.librecours.eu – J. Daget



Les deux cartes des figures 3.2 et 3.3 montrent que la pluviométrie moyenne et l'intensité des précipitations varient notablement d'une région à l'autre.

Figure 3.2 – Pluviométrie moyenne annuelle (mm) / © Météo France

Figure 3.3 – Pluie de durée 24 h et de période de retour 1 000 ans (en mm) – SHYREG / © INRAE – P. Arnaud



La variabilité climatique est encore plus prononcée quand on s'intéresse aux départements et territoires d'outre-mer.

Les barrages français illustrent bien ces conditions hydrologiques très différentes, ainsi que le montrent l'illustration suivante issue d'une synthèse des études hydrologiques les plus récentes (synthèse PoNSOH – INRAE). La carte de la figure 3.4 découpe la France métropolitaine en zones hydrologiques. Pour chaque zone, on a établi une corrélation entre le débit de pointe millénal (Q_{P1000} en m^3/s) et la surface du bassin versant (S_{BV} en km^2) que l'on relie par une relation $Q_{P1000} = A \cdot S_{BV}^a$. Le paramètre A varie de façon considérable selon les régions (de 3 à plus de 20 en Métropole et jusqu'à plus de 50 en Outre-mer). Selon les régions, le débit Q_{P1000} , calculé par la formule régionale pour un bassin versant de $100 km^2$, est dans une fourchette très large de $100 m^3/s$ à $3\,200 m^3/s$.

Figure 3.4 – Régions hydrologiques en France (Synthèse PoNSOH – INRAE)

Cette variabilité dans les climats métropolitains et ultramarins et donc dans l'hydrologie a permis à l'ingénierie française de s'adapter aux divers climats du globe en mettant au point des méthodologies et des outils hydrologiques robustes quel que soit le type de climat rencontré.



1.2 Les méthodologies françaises d'estimation des crues extrêmes

Les méthodes françaises pour l'estimation des crues de dimensionnement des ouvrages s'inscrivent dans le champ des méthodes probabilistes : elles proposent une estimation des distributions des variables d'intérêt (par exemple débit de pointe, ou volume de la crue), jusqu'à des temps de retour élevés (10 000 ans). C'est une originalité dans le paysage international, où les méthodes dites « déterministes » du type Pluie Maximale Possible-Crue Maximale Probable sont très représentées. Au côté des méthodes « classiques », s'appuyant sur les statistiques des pluies et débits observés (GRADEX et méthodes apparentées, AGREGEE et SPEED), sont apparues, à partir des années 2000, des méthodes plus sophistiquées s'appuyant sur la génération stochastique des pluies et la simulation pluie-débit (SCHADEX et SHYPRE-SHYREG).

1.2.1 Méthode du GRADEX

La méthode du GRADEX a été introduite à la fin des années 60 par EDF [Guillot et Duband, 1967]. C'est une méthode probabiliste qui propose une extrapolation de la distribution de fréquence des débits à partir de la distribution de fréquence des pluies sur un bassin. Elle fournit ainsi des estimations des quantiles élevés du débit moyen et du débit de pointe. Elle s'applique à des bassins versants de quelques km² à une dizaine de milliers de km². Elle est présentée de manière détaillée dans le bulletin [CFGB, 1994].

La méthode repose sur trois hypothèses principales :

1. Au pas de temps de l'étude (c'est-à-dire sur une durée adaptée à la dynamique de crue du bassin versant), les précipitations extrêmes suivent une loi à décroissance exponentielle. Le paramètre d'échelle de cette loi est le « gradex » ; il est propre à un site et à une saison donnée.
2. Le déficit d'écoulement, c'est-à-dire la différence entre le volume d'eau précipité et le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant au pas de temps de l'étude, n'augmente plus, en valeur moyenne, au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, à partir d'un certain état de saturation du bassin versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de pluie ou de débit. Ce concept se traduit graphiquement par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements au pas de temps équivalent. Le point de départ de cette extrapolation, nommé « point pivot », est fixé à une période de retour comprise entre 10 et 50 ans selon le bassin versant considéré.
3. Pour tous les temps de retour, le débit de pointe peut être calculé à partir du volume écoulé (au pas de temps de l'étude) en utilisant un coefficient multiplicatif moyen caractéristique du bassin versant. Ce coefficient, dit « coefficient de forme », peut être estimé à partir des hydrogrammes de crues enregistrées sur le bassin versant.

Sa formulation globale est restée quasiment inchangée ; cependant, ses modalités d'application ont évolué avec la progression des moyens de calcul, avec notamment le passage du traitement des précipitations maximales par saison ou par mois à celui de l'ensemble des pluies observées.

Depuis la fin des années soixante jusqu'aux années 2000, la méthode du GRADEX a été très largement utilisée par l'ingénierie francophone (EDF et bureaux d'études) pour le dimensionnement de plusieurs centaines de barrages en France, mais également en Afrique du Nord. Sa simplicité formelle et son élégance intellectuelle ont beaucoup contribué à sa notoriété dans la communauté hydrologique. Cependant, à partir des années 1990, la communauté scientifique et certains praticiens de la méthode en ont souligné certaines limites, dont la sous-évaluation de la probabilité des pluies extrêmes au regard de certaines observations, la transition brutale au « point pivot » entre la distribution des débits observés et celle de la pluie de bassin, la rusticité du passage pluie-débit, etc. Ces réserves ont amené les hydrologues à repenser largement le problème et à travailler sur des méthodes s'appuyant sur la génération stochastique des pluies et la simulation pluie-débit : SCHADEX et SHYPRE-SHYREG.

1.2.2 SPEED

La méthode SPEED (Système Probabiliste d'Étude par Évènements Discrets), développée par SOGREAH [Cayla, 1993], est fondée, d'une part, sur une analyse particulière et régionale des pluies, d'autre part, sur la relation mise en évidence par SOGREAH entre pluie et débit de crue. Cette méthode, basée sur le même principe que la méthode du GRADEX, utilise néanmoins une

formule de transformation pluie-débit différente. Cette méthode permet de mettre en évidence une relation pluie-débit sur un bassin et ainsi d'extrapoler aux fréquences rares. Cette méthode s'applique à des bassins versants de taille inférieure ou égale à l'extension normale des averses, c'est-à-dire : $S \leq 2\,000\text{ km}^2$ (ou $S < 10\,000\text{ km}^2$ si la pluie est de type cyclonique – précipitations longues et étendues mais peu intenses). Cette méthode s'applique tant aux pluies annuelles et apports liquides annuels qu'aux pluies rares et aux débits de crues [Cayla, 2012] [Carré, 2013].

1.2.3 SCHADEX

La méthode SCHADEX (Simulation Climato-Hydrologique pour l'Appréciation des Débits Extrêmes), développée à EDF-DTG, est depuis 2007 la méthode de référence pour le dimensionnement des évacuateurs de crues des barrages d'EDF-Hydro, particulièrement bien adaptée aux zones de montagne, avec une représentation explicite des processus nivo-glaciaires. Elle s'appuie sur deux composantes principales :

- un modèle probabiliste de pluies extrêmes, MEWP (Multi-Exponential Weather Pattern), qui combine des lois exponentielles ajustées sur des échantillons de pluie observée regroupés par type de temps [Garavaglia et al., 2010] ;
- un processus stochastique de simulation pluie-débit, basé sur le modèle hydrologique MORDOR [Garavaglia et al., 2017], qui permet de simuler des épisodes de pluie de toutes intensités sur toute la variété possible d'états hydriques du bassin (saturation des sols, stock de neige...), générant ainsi plusieurs centaines de milliers de crues [Paquet & al., 2013].

Elle permet d'estimer la distribution complète des débits (jusqu'au temps de retour 10 000 ans) pour des bassins d'une dizaine à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés, et pour tout type de climatologie. Des hydrogrammes synthétiques adaptés à toutes les crues simulées peuvent être générés par la méthode SHYDONHY [Paquet, 2019], pour être injectés en entrée de modèles hydrauliques d'aménagement ou de vallée, afin de calculer les distributions de cote atteinte en retenue ou en rivière [Lassus et al., 2017].

1.2.4 SHYPRE-SHYREG

La méthode SHYPRE (Simulation d'HYdrogrammes pour la PREdétermination des crues) et sa version régionalisée SHYREG (SHYpre REGional) ont été développées par Irstea depuis les années 2000 avec l'appui du ministère de l'Écologie. La méthode vise à créer de multiples hydrogrammes de crues aux formes variées, statistiquement équivalents aux hydrogrammes observés. Elle s'appuie donc sur un générateur de pluies horaires et une modélisation hydrologique simple pour générer ces hydrogrammes (plusieurs dizaines de milliers) [Arnaud & al., 2002]. Ces hydrogrammes sont ensuite utilisés pour simuler le fonctionnement des ouvrages hydrauliques soumis aux crues extrêmes et proposer une distribution de fréquence complète de leur réponse. La version régionalisée (SHYREG) permet l'estimation des crues extrêmes en sites non jaugés. Elle est issue d'une simplification de la méthode SHYPRE et d'une cartographie des paramètres nécessaires à la mise en œuvre de la méthode. Cette régionalisation a été réalisée sur l'ensemble de la France (métropole et outre-mer), et a conduit à une base de données des résultats, diffusée sur un site web [Arnaud et al., 2014].

1.2.5 Synthèse sur les méthodes françaises d'estimation des crues extrêmes

Le projet de recherche EXTRAFLO, mené de 2008 à 2013, s'est donné pour objectif de comparer toutes les méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes pratiquées couramment en France, en s'appuyant en particulier sur des bassins versants où l'on disposait d'une information historique ancienne [Lang et al., 2014].

Pour l'estimation des crues extrêmes sur un bassin versant jaugé, le projet conclut qu'il est important d'exploiter des informations complémentaires (notamment les pluies), pour conforter l'extrapolation de la distribution des crues et recommande d'utiliser les méthodes de simulation basées sur l'information pluviométrique (SCHADEX, SHYPRE).

Pour les bassins versants non jaugés, il est préférable d'utiliser le modèle de simulation SHYREG-débit. Toutefois l'approche n'a pas été validée hors de la gamme usuelle de superficie des bassins jaugés [$10 ; 2\,000\text{ km}^2$] et le cas de bassins à fonctionnement spécifique (influence nivale, karst, barrages, zone urbaine), justifie des compléments d'étude et d'expertise.

2. ÉVACUATEURS DE CRUES

2.1 Les méthodologies et contributions françaises sur l'hydraulique des évacuateurs

2.1.1 Des laboratoires pionniers de la modélisation physique

Très tôt au 20^e siècle, les organismes de recherche et l'ingénierie française ont compris l'intérêt de réaliser des modélisations physiques à échelle réduite dans le domaine des aménagements hydrauliques.

Le laboratoire d'Artelia (précédemment SOGREAH) a été créé en 1917 afin de tester initialement des turbines et des aménagements hydrauliques sur le Drac et la Romanche. Fort de ces premiers succès, le laboratoire développe considérablement son activité d'étude sur modèles réduits en abordant peu à peu tous les organes de barrages et de centrales puis ensuite les aménagements maritimes ainsi que les ouvrages industriels et urbains.

Le laboratoire hydraulique d'EDF (LNHE Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement) a été créé dès 1947 afin d'accompagner la construction du parc des ouvrages EDF (hydrauliques initialement, mais aussi thermiques et nucléaires). Le LNHE dédie ses activités à l'interaction de l'eau et de l'environnement avec le parc de production. Le champ d'activité du laboratoire couvre les modèles réduits physiques et le développement d'outils de modélisation numérique. Il reste aujourd'hui en pointe avec la réalisation de modèles physiques de R&D tels que le Saut de l'Ange (caractérisation de la puissance hydraulique des jets plongeants pour les questions d'érosion aval) ou le développement de modèles numériques 3D (VOF, lagrangien).

Créé en 1936, le laboratoire d'hydraulique de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) a réalisé l'ensemble des études liées à la conception de ses ouvrages. Au fil du temps, les missions du laboratoire se sont enrichies afin de garantir la sûreté de l'exploitation du fleuve. Aujourd'hui, il veille à la maîtrise des risques hydrauliques et participe à l'optimisation du fonctionnement des ouvrages.

Si les principes de la modélisation physique sont relativement anciens, ils restent toujours pertinents, voire indispensables, en l'absence d'alternative notamment pour l'étude de phénomènes complexes comme ceux mêlant des interactions eau-air ou eau-sédiments, par exemple.

De très nombreux ouvrages hydrauliques à travers le monde ont ainsi bénéficié de l'expérience accumulée par ces laboratoires. Les figures 3.5 et 3.6 montrent quelques exemples.

Figure 3.5 – Prises d'eau de la STEP de Venda Nova



Modèle physique / ©Artelia – Derrien



Prototype / ©EDP – Pinto

Figure 3.6 – Évacuateur de crues du barrage du Causse Corrèzien



Modèle physique / ©Artelia – Loisel



Prototype / ©Artelia – Loisel

2.1.2 Une expertise numérique

Parallèlement à la modélisation physique, l'ingénierie française a aussi été à l'origine de nombreux codes informatiques permettant la modélisation numérique des écoulements à surface libre ou en charge.

TELEMAC-MASCARET

Parmi les plus récents et les plus couramment utilisés dans le monde entier, on peut citer le système TELEMAC-MASCARET, propriété d'EDF et développé par un consortium international : Artelia (France), BAW (Allemagne), CEREMA (France), Daresbury Laboratory (Royaume-Uni) and HR Wallingford (Royaume-Uni).

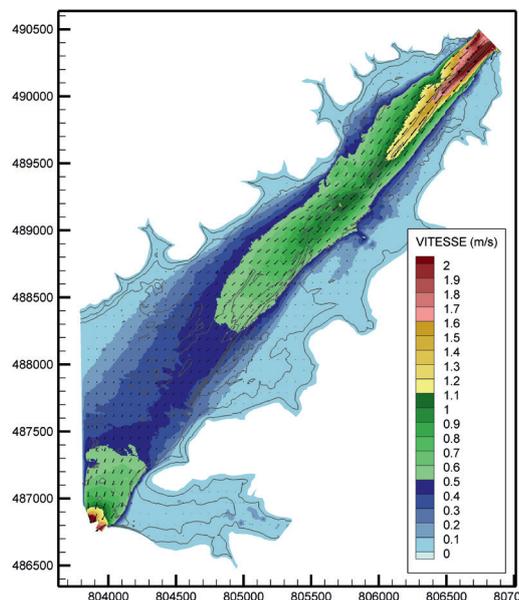
Le système TELEMAC-MASCARET propose un ensemble de logiciels 1D, 2D et 3D pour le calcul des mouvements d'eau, de substances dissoutes et de sédiments dans les milieux aquatiques naturels : fleuves et rivières, lacs, estuaires, côtes et marges continentales. Il est désormais mis à disposition gratuitement, en open source, et dispose, par ailleurs, d'une large communauté scientifique internationale qui contribue à le faire évoluer régulièrement.

Figure 3.7 – Champ de vitesses dans la retenue du barrage de Nachtigal (Cameroun) / © Artelia – Gonzales, Delinares

Modélisation CFD

L'ingénierie française a investi par ailleurs, depuis de nombreuses années, dans les systèmes logiciels CFD (Computational Fluid Dynamic) à travers des projets de R&D sur fonds propres ou à financement partagé, mais également par la réalisation d'études en interne ou pour ses clients.

Par exemple, Artelia utilise couramment OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation) CFD Toolbox et EDF, ainsi que d'autres ingénieries françaises, utilisent FLOW 3D®.



2.2 Les évacuateurs des barrages français

Le parc hydraulique français a été construit principalement dans les années 1950 et 1960. Sa moyenne d'âge est de 70 ans. Les barrages français sont ainsi équipés d'évacuateurs de crues adaptés aux techniques et aux règles de dimensionnement de l'époque : seuils libres profilés, vannes plates wagons pour les grandes vannes, clapets, vannes segments [Cottin, 2009 et Royet, 2009]. Le parc français présente également un gros pourcentage d'ouvrages à vocation principale hydroélectrique. Ces derniers sont donc souvent équipés de plusieurs vannes de dimensions importantes pour optimiser la gestion de la production et maximiser le volume des réservoirs.

Depuis les années 90, la réévaluation des études hydrologiques et l'évolution des exigences réglementaires ont conduit à augmenter les capacités d'évacuation d'une part non négligeable du parc. La réhabilitation et la modernisation d'un ouvrage existant constituent une tâche souvent plus délicate que la construction d'un nouvel ouvrage car les contraintes sont généralement plus importantes : il convient d'intégrer l'historique de l'ouvrage, l'état du génie civil (les ouvrages les plus anciens sont en maçonnerie ou en béton cyclopéen, certains ouvrages en béton sont atteints de gonflement), l'emprise disponible, la maîtrise de la sûreté et les contraintes d'exploitation (optimisation de la production hydroélectrique, usages d'irrigation ou d'eau potable, activités de loisirs), etc. Ainsi, depuis une douzaine d'années, plus de 60 projets de réhabilitation de ce type ont été conduits en France [CFBR, 2019].

Figure 3.8 – a) Barrage de Record sur l'Agout (2015) – Remplacement de quatre vannes segments par quatre PKW à l'abri d'un batardeau provisoire permettant de maintenir l'ouvrage en service, b) PKW installé sur le barrage de l'Étroit (2009) /

© EDF – F. Laugier



En parallèle, à partir des années 2000, des analyses de sûreté plus globales ont intégré la fiabilité et la robustesse des organes d'évacuation des crues dans les analyses de risques. Ces approches ont permis d'objectiver l'intérêt technico-économique d'intégrer des seuils libres autonomes et ont contribué à l'émergence d'innovations marquantes dans les évacuateurs de crues.

À ce titre, les hausses fusibles, de conception française (brevet Hydroplus), sont largement utilisées dans le monde avec plus de 70 ouvrages équipés. Le barrage français de Lussas (en Ardèche) a été le premier barrage au monde à en être équipé en 1991. Elles permettent d'augmenter les capacités d'évacuation ou d'optimiser les capacités de production des ouvrages par rehausse de la cote de retenue normale. Leur hauteur peut aller de 1 m à plus de 10 m. Elles peuvent être en béton, en acier, ou en structure mixte et elles peuvent accepter de déverser avant de basculer. Les délais d'installation peuvent être courts avec beaucoup de préfabrication potentielle, ce qui permet de réduire les temps d'indisponibilité des ouvrages en phase travaux.

Figure 3.9 – Hausses fusibles béton sur le barrage de Tréauray (2014) et sur le barrage de Terminus aux USA (2004) / © Hydroplus

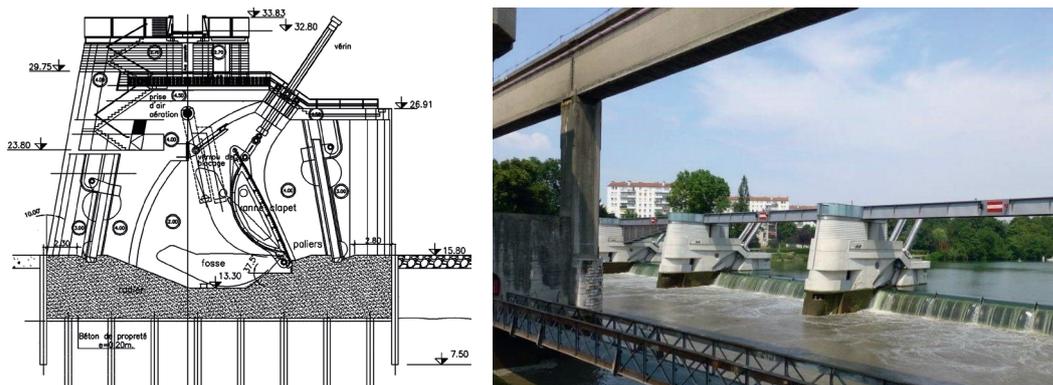


Seconde innovation importante, les PKW (Piano Key Weir) permettent d'associer la simplicité et la robustesse des seuils libres tout en assurant une capacité d'évacuation compétitive face aux ouvrages vannés (multiplication jusqu'à 4 du débit d'un seuil libre profilé). Le PKW a été développé par l'association française Hydrocoop sur la base de développements menés dans plusieurs laboratoires d'hydraulique : université de Biskra en Algérie, LNHE [Lempérière 2003]. Le premier PKW au monde a été installé sur le barrage français de Goulours en 2006 [Laugier, 2006]. On compte aujourd'hui une quinzaine de PKW en France et une trentaine ont été installés sur les cinq continents [Registre PKW] et [Epicum, 2017].

La juxtaposition de ces évacuateurs innovants avec les équipements traditionnels existants offre le compromis idéal en termes de sûreté et de fonctionnement : capacités d'évacuation importantes et passage des sédiments pour limiter l'engrèvement des retenues (évacuateurs vannés de fond ou demi-fond) et robustesse, fiabilité et évacuation des corps flottants (évacuateurs de surface). Cette association est aujourd'hui à la base de la philosophie de dimensionnement des nombreux ouvrages neufs ou anciens (réhabilitation) conçus ou réalisés par les bureaux d'étude et entreprises françaises [Chapuis, 2018]

Pour les barrages mobiles en rivière, la tendance récente est de remplacer les anciennes vannes par des clapets de grandes dimensions (jusqu'à 8 m de haut) ou, pour les installations plus modestes, d'installer des boudins gonflables (principe imaginé en 1947 et breveté par le français Mesnager). En effet, les clapets présentent un optimum technico-économique pour ces ouvrages : risque limité de coincement des corps flottants, absence de remise en charge des vannes et limitation des risques de non-ouverture. Les barrages gonflables sont très utilisés sur les ouvrages nécessitant un réglage fin de la cote de retenue en permanence. De nombreuses réalisations sont récentes ou en cours sur les voies navigables françaises (notamment à travers le projet VNF Aisne-Meuse [VNF, 2012] et [Carlier, 2017]).

Figure 3.10 – Barrage rénové de Chatou sur la Seine / © Boidy, 2013



2.3 La sûreté de fonctionnement des évacuateurs français

Au-delà des aspects structurels et hydrauliques, la sûreté de fonctionnement des évacuateurs vannés est un souci permanent des exploitants français qui ont développé des pratiques qui font référence dans la profession [Reverchon, 2015]. La sécurité d'exploitation des ouvrages d'évacuation de crues est basée sur les principes suivants :

- la fiabilité de la conduite, manuelle ou automatique, est assurée par la mise en œuvre de redondances et l'élimination systématique des modes communs ;
- la sûreté intrinsèque est assurée par l'exploitant, et en situation dégradée les manœuvres sont réalisées sans l'aide d'un système automatisé ;
- le maintien en condition opérationnelle des installations est assuré par une surveillance, des contrôles et essais périodiques.

Leur conception, leur exploitation et leur maintenance nécessitent un examen au regard des différents risques caractérisant la sûreté hydraulique :

- les risques liés à l'exploitation : la cinétique et l'ampleur d'une ouverture intempestive ou non maîtrisée peuvent avoir un impact sur les personnes ou les biens situés à l'aval de l'ouvrage ;
- le risque « crue » : la manœuvre non maîtrisée, la non-ouverture, peuvent présenter un risque pour les ouvrages ou une aggravation des conséquences pour les riverains à l'amont et à l'aval des ouvrages ;
- le risque « rupture d'ouvrage » : l'indisponibilité ou le non-fonctionnement de l'évacuateur de crues peut avoir des répercussions sur la tenue des ouvrages à la suite de l'exhaussement non maîtrisé du niveau de la retenue.

Des consignes précises sont donc nécessaires afin de prévoir toutes les situations possibles. Les règles d'exploitation de tels ouvrages sont d'abord gouvernées par le respect de la sécurité des tiers, puis par celle des ouvrages. Les manœuvres d'exploitation prioritaires sont celles liées au passage des crues.

La conduite automatique présente des avantages sensibles pour les évacuateurs des barrages de basse chute ; en revanche, pour les barrages de grande hauteur à réserve importante, l'intérêt de la conduite automatique doit faire l'objet d'une analyse de risques sérieuse.

■ FRANÇOIS LEMPÉRIÈRE

50 ans d'innovation et d'audace au service de l'hydraulique et des barrages

Né en 1926, François Lempérière est diplômé de l'École Polytechnique et de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Il travaille durant plus de 40 ans pour l'entreprise de construction GTM (aujourd'hui Vinci Construction).

Il contribue à la construction de grands barrages en France, sur le Rhône et le Rhin, et à l'international sur le Nil ou du barrage de Cahora Bassa sur le Zambèze, par exemple. Il participe également à la réalisation d'ouvrages maritimes majeurs (digue du Havre Antifer, Grande Forme pour paquebots de Saint-Nazaire, Port de Jeddah) et à la construction d'autoroutes, de canaux et de centrales nucléaires.

Il a été un membre particulièrement actif de la CIGB et du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR). Pour la CIGB, il a été membre de 5 comités techniques, vice-président du Comité sur la technologie de construction et président du Comité sur le coût des barrages. Il a contribué à la rédaction de 8 bulletins de la CIGB au sujet des méthodes de construction, de coût et d'économie des barrages.

Il préside de 1991 à 1995 le CFBR. En 1997, avec Pierre Londe, il fonde HydroCoop, une association à but non lucratif, créée pour promouvoir l'aide aux pays en développement et la coopéra-

tion technique internationale dans l'ingénierie des barrages, en particulier pour le contrôle des crues, les déversoirs et les problèmes de sédimentation.

Toujours à la recherche de solutions innovantes, économiques et sûres, François Lempérière est à l'origine d'innovations importantes dans le domaine des barrages et des évacuateurs de crues. À ce titre, il est à l'origine du principe des hausses fusibles (plus de 70 réalisations dans le monde) et des évacuateurs labyrinthes en touche de piano. Les PKW, dont le concept a été initié avec les collaborations notamment du Professeur Ouamane et de Michel Ho Ta Khan, comptent plus de 30 réalisations dans le monde [Lempérière, 2003]. Il publie également de nombreux articles introduisant des concepts innovants pour la production ou le stockage hydroélectrique en rivière ou en mer tels que les « twin dams », les « emerald lakes » ou les « maréliennes ». Il a récemment proposé un concept alternatif de station de pompage pour la protection de Paris contre les inondations.

Il est récompensé par l'Académie des sciences en 1996 pour son concept des hausses fusibles. Il reçoit en 2018 le prix de l'innovation de la CIGB pour l'ensemble de sa carrière.



De 1950 à 2012.



Photo du haut : © F. Lempérière / Photo du bas : © EDF- F. Laugier

ÉTUDE DE CAS

Barrage de Sainte-Cécile-d'Andorge (France)

A. Présentation du barrage

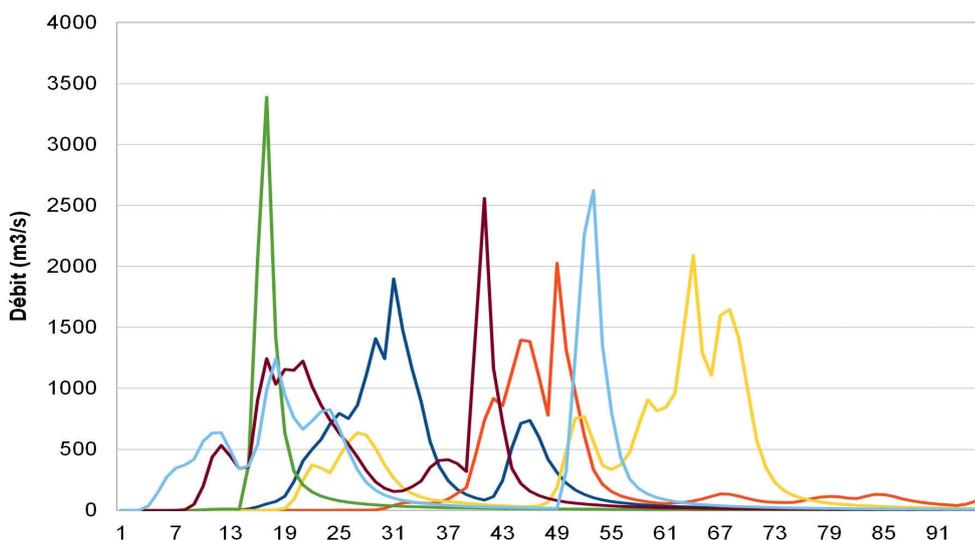
Construit en 1967 pour l'écroulement des crues et le soutien estival des étiages du Gardon d'Alès, le barrage de Sainte-Cécile-d'Andorge est un barrage en enrochements à masque amont. La hauteur sur fondation est de 45 m. L'évacuateur de crues est constitué de deux pertuis de demi-fond et d'une tour-tulipe raccordés à une double galerie hydraulique en béton qui chemine sous le remblai jusqu'en aval.

À la cote du seuil des pertuis, la retenue quasi-permanente a un volume de 0,88 Mm³. La tranche d'eau destinée à l'écroulement des crues, située entre la cote des pertuis et la cote du seuil de la tulipe a un volume de 14,88 Mm³.

B. Révision de l'hydrologie

À la suite des événements hydrologiques du début des années 2000 qui ont touché plusieurs barrages voisins, l'étude hydrologique a été réactualisée en 2008, puis à nouveau en 2012 avec la méthode SHYPRE. L'aléa hydrologique de projet a été déterminé pour une période de retour de 10 000 ans conformément aux recommandations françaises pour les grands barrages en remblai. La méthode SHYPRE a permis de générer une multitude d'hydrogrammes de crue (figure 3.11) dont on a ensuite simulé le passage dans la retenue et l'évacuateur. Cela a permis d'établir une loi de probabilité de la cote maximale de la retenue. Il en ressort que la période de retour de déversement sur le barrage est de l'ordre de 1 800 ans et que la cote de période de retour 10 000 ans est estimée être supérieure de 3 m à la cote de la crête du remblai. Une mise à niveau de l'évacuateur de crues s'imposait donc.

Figure 3.11 – Exemple d'hydrogrammes SHYREG conduisant à une cote 10 000 ans sur le barrage (en ordonnée : débit en m³/s ; en abscisse : temps en heures) / ©HYDRIS – Fine



C. Solution pour la mise à niveau de l'évacuateur de crues

Les critères adoptés pour le projet de confortement ont été les suivants (les deux derniers étant conformes aux recommandations du CFBR [CFBR, 2013]) :

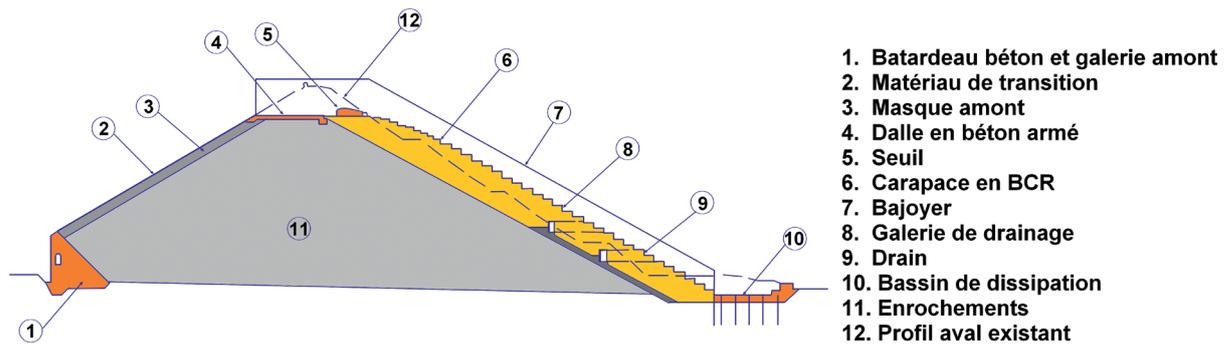
- maintenir une fonction « écrêtement des crues » optimale jusqu'à $T = 100$ ans ;
- crue de projet de période de retour $T = 10\,000$ ans, transitant avec une revanche par rapport à la crête ;
- probabilité d'atteinte de la cote de danger inférieure à $10^{-5}/\text{an}$.

Le projet de confortement à l'étude par ISL consiste à construire un évacuateur additionnel à seuil libre, intégré à une recharge massive en BCR, posée sur l'aval du remblai (figure 3.12). Le seuil déversant, de 45 m de longueur, est calé à la cote atteinte pour une période de retour 100 ans (optimum de la fonction d'écrêtement des crues). La dissipation d'énergie est assurée par les marches d'escalier du parement aval et par une fosse terrassée et aménagée en pied (radier en béton armé ancré au rocher et massifs de protection latérale).

La cote de crête du couronnement du barrage est rehaussée de 0,4 à 0,7 m au-dessus de la crête actuelle et un nouveau parapet d'une hauteur de 1,1 m est aménagé en bordure amont de la crête.

Figure 3.12 – Coupe type de l'évacuateur additionnel sur recharge en BCR /

© ISL – A. Salmi



ÉTUDE DE CAS

Barrage de New Fulajj (Sultanat d'Oman)

A. Analyse hydrologique

Le climat du Sultanat d'Oman est de type aride à semi-aride, caractérisé par une pluviométrie faible d'environ 100 mm/an en moyenne. Cependant, à cause de la proximité de la côte et de la présence de chaînes montagneuses, le pays connaît aussi régulièrement des crues éclairables capables d'inonder de vastes plaines et d'impacter de nombreuses zones habitées.

Récemment, le pays a subi les effets dévastateurs des cyclones Gonu (2007) et Phet (2010) qui ont apporté des records de pluviométrie, respectivement 440 mm/24 h et 300 mm/24 h. La période de retour du cumul pluviométrique du cyclone Gonu a été estimée à environ 500 ans.

L'ensemble de ces paramètres hydrologiques a conduit le Ministère des Ressources en Eau à lancer un programme d'aménagements de protection contre les crues. Pendant plus de 10 ans, Artelia a accompagné les autorités omanaises en dimensionnant et supervisant la construction de nombreux barrages écrêteurs de crues, dont le barrage de New Fulajj présenté ci-après.

B. Présentation du barrage

Situé juste en amont de la ville de Sur, une importante capitale régionale, le barrage de New Fulajj a pour objectif d'écrêter les crues de l'oued Rafsah grâce à un volume de stockage de 20 hm³ et ainsi protéger des crues des palmeraies, des zones commerciales et résidentielles.

Il s'agit d'un barrage en enrochements avec noyau en béton bitumineux (H = 26,50 m ; L = 1 100 m) équipé d'un évacuateur en béton (H = 30 m ; L = 140 m) et d'un ouvrage de chasse constitué de quatre vannes wagon (4,6 m x 3,6 m) et d'une prise d'eau.

La chenalisation du lit (excavation, protection, digues) sur 9 km (soit 3 x 10⁶ m³ de terrassement) vient compléter le projet.

C. Conception et construction de l'évacuateur

L'évacuateur a été dimensionné pour évacuer la Crue Maximale Probable dont le débit de pointe est évalué à 6 940 m³/s.

Un modèle physique a été mis en œuvre au laboratoire d'Artelia afin :

- de vérifier les performances et conditions hydrauliques de l'évacuateur ;
- d'étudier la capacité d'écoulement des vannes de fond et la dissipation d'énergie ;
- de tester les érosions à l'aval des ouvrages ;
- d'optimiser les dimensions du bassin de dissipation de l'évacuateur de crues (limiter les coûts).

Figure 3.13 – Modèle physique de l'évacuateur du barrage de New Fulaj /

© Artelia – Loisel

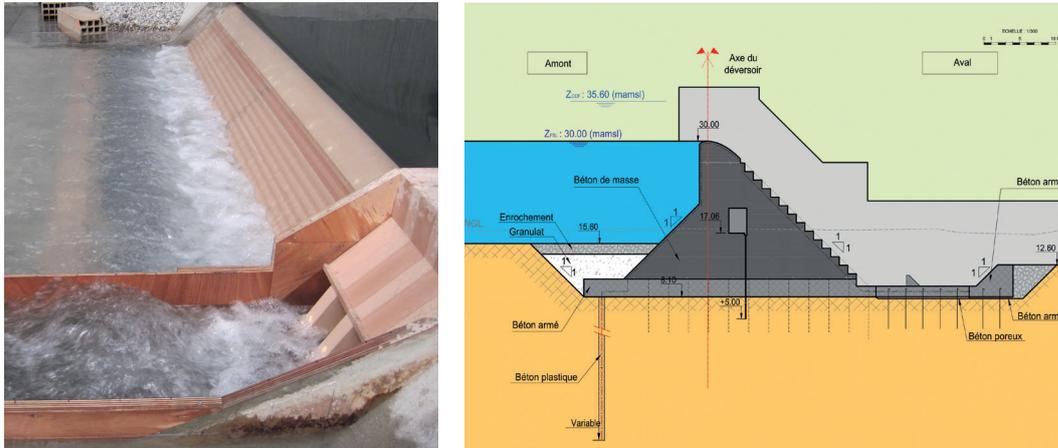


Figure 3.14 – Évacuateur de crues en construction et achevé © STRABAG



Les travaux de construction du barrage et de recalibrage aval ont été achevés en 2017. Le barrage a subi avec succès son premier déversement lors d'un épisode de tempête tropicale en mai 2019.

ÉTUDE DE CAS

Barrage de Malarce (France)

A. Présentation du barrage

Le barrage de Malarce [Pinchard, 2013] a été construit en 1969 sur la rivière Chassezac. C'est un barrage-poids en béton de 31,4 m de hauteur sur fondations équipé à l'origine de 3 vannes segments surmontées de clapets, fermant des pertuis de 14 m de largeur par 11,5 m de hauteur.

Figure 3.15 – Barrage de Malarce vu d'aval avant les travaux de réalisation du nouvel évacuateur de crues PKW et vu d'amont pendant les travaux / ©EDF – T. Pinchard

B. Contexte hydrologique – Déficit de débitance et gradients de crue record

La débitance théorique du barrage (4 000 m³/s à la cote des PHE, située 1 m au-dessus de la RN) a été validée sur modèle réduit au laboratoire hydraulique d'EDF à Chatou. La réévaluation des études hydrologiques en 2008 a conduit à retenir une crue de projet (temps de retour 1 000 ans) de 4 600 m³/s en pointe, soit un déficit d'environ 600 m³/s en pointe. La plus forte crue connue est de l'ordre de 2 700 m³/s en pointe. Par ailleurs, le Chassezac est soumis à un régime de crues cévenol, et la montée des débits peut être très rapide, jusqu'à une valeur de 1 300 m³/s/h pour la crue millénaire.



C. Choix de conception du nouvel évacuateur PKW

Étant donné le gradient de montée très important, il a été décidé d'implanter un nouvel évacuateur autonome, ne requérant ni énergie ni présence humaine pour fonctionner. Pour cela, un évacuateur à seuil libre semblait adapté.

Du fait de la configuration étroite du barrage et de la vallée, seul un évacuateur de type Piano Key Weir pouvait assurer l'efficacité hydraulique nécessaire considérant les charges hydrauliques disponibles.

L'amélioration de la sûreté du barrage de Malarce, par la création d'un PKW, ne se limite donc pas à la seule augmentation de 15 % de la capacité d'évacuation des crues à la cote des PHE. C'est l'augmentation de la capacité d'évacuation pour des scénarios dégradés extrêmes (absence de l'exploitant ou perte d'énergie principale et secours) qui constitue une partie substantielle du gain en sûreté.

En complément, le PKW apporte une souplesse d'exploitation puisqu'il fonctionne en premier, sous une charge de 50 cm, avant que la régulation par les clapets n'entre en jeu.

L'emprise globale du PKW sur le plot rive droite du barrage est de 42,5 m de largeur. Il fonctionne sous une charge nominale de 1,5 m. Ce PKW présente un porte-à-faux de plus de 6,5 m à l'amont et de 2 m à l'aval. Il est composé de 12 bacs inlets et 12 bacs outlets. À l'aval, un tapis de réception en béton armé protège le rocher de toute érosion et des ouvrages en pied de ce coursier (cuillère et murs déflecteurs) permettent de dissiper l'énergie de la chute et de se prémunir de tout risque d'érosion en pied de barrage.

D. Construction et mise en service du PKW

La construction a démarré en novembre 2011 pour se terminer en novembre 2012. Plus de la moitié de la durée du chantier a été consacrée à sa préparation (accès, démolition et terrassements). À l'emplacement actuel du PKW, il a fallu démolir plus de 800 m³ de béton de grande qualité.

L'effectif du chantier était d'environ 30 personnes avec des pointes à 60 personnes au plus fort de l'activité, pour un montant d'environ 4,5 M€.

Le PKW de Malarce a subi deux épisodes de déversement au mois de mai 2013 quelques mois après l'achèvement des travaux. Le premier a atteint un débit d'environ 50 m³/s, et le second 200 m³/s soit une lame d'eau de 18 et 50 cm respectivement. Le PKW a fonctionné comme prévu et aucun dommage n'a été constaté. Depuis lors, le PKW a connu une dizaine de déversements significatifs.

Figure 3.16 – Barrage de Malarce / © EDF – T. Pinchard



a) Modèle physique



b) Construction

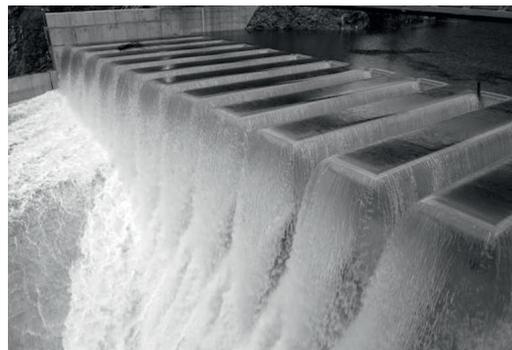
Figure 3.17 – Barrage de Malarce – Vue aval en fin de travaux du nouvel évacuateur PKW / © EDF – T. Pinchard



Figure 3.18 – PKW du barrage de Malarce / © EDF – T. Pinchard



a) PKW terminé.



b) Durant un déversement.

3. RÉFÉRENCES

- Arnaud P., Lavabre J. (2002) – Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research*, 38 (6): 11-1-11-11, DOI: 10.1029/2001WR000474.
- Arnaud P., Aubert Y., Organde D., Cantet P., Fouchier C., Folton N. (2014) – Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG – Présentation – Performances – Base de données. *La Houille Blanche – Revue Internationale de l'Eau*. 2 (2014) : 20-26. DOI :10.105/lhb/2014012.
- Boidy E., Castillo P., Mouy V., Roche C. – Reconstruction du barrage de Chatou : retours d'expériences sur les travaux de génie civil In Colloque CFBR « Modernisation des barrages » Chambéry, 4-5 décembre 2013.
- Carlier D., Aubonnet J. – Modernisation des barrages de navigation VNF AISNE MEUSE. Symposium du CFBR du 26 janvier 2017 à Chambéry.
- Carré J.-C. (2013) – Extreme peak discharge evaluation through a probabilistic approach: assessment of 20 years experience by Artelia / Sogreah. Évènements extrêmes d'inondation, SHF – Lyon, 13-14 November 2013.
- Cayla O. (1993) – Probabilistic approach of design flood – SPEED. Proc. Int. Symposium on Engineering hydrology – San Francisco, July 25-30, ASCE: 647-652.
- CFBR (2020) – Rapport d'étape du groupe de travail « Sécurité des évacuateurs de crues de barrages », <http://www.barrages-cfbr.eu/Recommandations.html>
- CFGB (1994) – Les crues de projet des barrages : méthode du GRADEX. Design Flood Determination by the Gradex Method – 18^e congrès CIGB-ICOLD n° 2, nov., Bulletin du Comité Français des Grands Barrages, 96 p.
- Chapuis A. (2018) – Combi gagnant des DIA « Déversoirs innovatifs associés » au service de la réhabilitation passive des barrages vis-à-vis du passage des crues – Théorie et cas d'étude. In Colloque CFBR-SHF « Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues » Chambéry, 27-28 novembre 2018.
- Cottin L. (2009) – Les évacuateurs de crues des barrages hydroélectriques concédés français. Vue synthétique du parc. In Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues», Lyon – 20, 21 Janvier 2009.
- Erpicum S., Laugier F., Ho Ta Khanh M., Pfister M. Labyrinth and Piano Key Weirs III – Proceedings of the 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2017), February 22-24, 2017, Qui Nhon, Vietnam. CRC Press.
- Garavaglia F., Gailhard J., Paquet E., Lang M., Garçon R. & Bernardara P. (2010) – Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6): 951-964.
- Guillot P., Duband D. (1967) – La méthode du GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. In Colloque International sur les crues et leur évaluation, Leningrad (pp. 15-22).
- Lang M., Arnaud P., Carreau J., Deaux N., Dezileau L., Garavaglia F. & Soubeyroux J.-M. (2014) – Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes. *La Houille Blanche*, (2) : 5-13. Et également <https://extraflo.irstea.fr/wp-content/uploads/2017/11/ExtraFloRapportV.pdf>.
- Lassus C., Vermeulen J., Viard T., Paquet E., Rouillon N. (2017) – Outil d'estimation de la distribution complète des cotes de retenues atteintes en crue pour un barrage capacitif. In Colloque CFBR-SHF « Hydraulique des barrages et des digues », Chambéry – 29, 30 novembre 2017 : 103-114.
- Laugier F. and Vermeulen J. (2014) – Lessons learnt on design and construction of labyrinth Piano Key Weir spillway for a large set of dams: specific cases and research actions. 25^e congrès de la CIGB 2015 Q97 – Stavanger Norvège.

- Lempérière F. and Ouamane A. (2003) – The Piano Key weir: a new cost-effective solution for spillways. *Hydropower & Dams* 10(5): 144-149.
- Paquet E., Garavaglia F., Garçon R. & Gailhard J. (2013) – The SCHADEX method: A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology*, 495:23-37.
- Paquet E. (2019) – Synthetic hydrograph generation by hydrological donors, *Hydrological Sciences Journal*, 64:5:570-586.
- Pinchard T., Farges J.-L., Boutet J.-M., Lochu A. and Laugier F. (2013) – Spillway capacity upgrade at Malarce dam: construction of an additional piano key weir spillway. Workshop « Labyrinth and Piano Key Weirs II » CRC Press – Paris France.
- Registre mondial des PKW – <http://www.pk-weirs.ulg.ac.be/?q=content/world-register-pkw>
- Reverchon B., Claveyrole P., Bouquier P.-G., Barthomeuf H. (2015) – Conception, exploitation et rénovation des évacuateurs de crues vannés des barrages exploités par Électricité de France (EDF). 25^e congrès de la CIGB 2015 Q97 R39 – Stavanger Norvège.
- Royet P., Tourment R., Félix H., Wolff M. (2009) – Les évacuateurs de crues des barrages relevant de la loi sur l'eau. Vue synthétique du parc. In Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues », Lyon – 20, 21 janvier 2009.
- VNF, CETMEF, CETE Est – Guide – Barrages gonflables avec ou sans volets métalliques.

CHAPITRE
4

RETENUES ET ENVIRONNEMENT

1. INTRODUCTION

Les grands barrages sont des infrastructures très structurantes des territoires. En France, ils ont été construits majoritairement au milieu du 20^e siècle, ce qui permet un retour d'expériences conséquent sur toutes les composantes environnementales et sociétales, liées à leur construction puis à leur exploitation. Après le bouleversement sociétal induit par leur construction (déplacements de villages...), ils ont été considérés pendant longtemps principalement au travers du prisme des bénéfices liés à leur(s) fonction(s) (alimentation en eau potable / irrigation, écrêtement des crues, production hydroélectrique...). Ce n'est que récemment (années 2000), qu'une prise de conscience de leurs impacts environnementaux s'est exprimée, aboutissant parfois à des conflits locaux dramatiques autour de projets d'ouvrages (ex. : barrage à vocation agricole de Sivens), ou à des oppositions récurrentes contre le développement de la petite hydroélectricité, par exemple.

En lien avec les engagements de la France vis-à-vis du climat ou de la biodiversité en général, les évolutions réglementaires découlant du Grenelle de l'environnement (2007) se sont fortement accentuées ces 15 dernières années, avec en particulier l'application de la séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC) à tous les projets ou programmes ayant une incidence notable sur l'environnement et qui a trouvé sa traduction dans la Loi du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages.

Cette prise de conscience avait été anticipée, notamment par Électricité de France (EDF), qui avait développé un partenariat de recherche et de développement (R&D) avec le CEMAGREF (aujourd'hui INRAE), dès les années 90, notamment pour la thématique des débits réservés et des éclusées. Depuis les années 2000, tous les grands gestionnaires d'ouvrages ont investi la R&D, au travers de partenariats élargis à d'autres institutions (CNRS, AFB, universités...) et à tous les champs environnementaux (continuité écologique, qualité d'eau, biodiversité...). Cet investissement dans la compréhension des processus écologiques et des impacts des barrages dans des contextes subissant de multiples pressions anthropiques a permis de développer un savoir-faire précis pour les diagnostics et la mise en œuvre de solutions d'atténuation de ces impacts.

Ce chapitre présente quelques exemples de bonnes pratiques basées sur la prise en compte des composantes environnementales les plus liées aux barrages et retenues : gestion des sédiments, restauration de la biodiversité et préservation de la ressource en eau ; étant donné le rôle à venir de l'hydroélectricité dans la transition énergétique, les questions relatives au bilan carbone des ouvrages, et plus généralement à la prise en compte des aspects environnementaux et sociaux (E&S) comme critères dans la conception des nouveaux ouvrages, sont également présentées.

2. BIEN GÉRER LES SÉDIMENTS

L'accumulation des sédiments en amont des barrages constitue régulièrement un sujet de préoccupation pour les exploitants d'ouvrages du fait de la limitation des usages induite par la réduction des volumes utiles (navigation, alimentation en eau potable, irrigation, production hydroélectrique, stockage des crues...) ou par la dégradation de la qualité des eaux qui peut en résulter (eutrophisation pénalisant les usages de loisirs, par exemple). Pour le cours d'eau et les usagers à l'aval, ce déficit sédimentaire, notamment celui concernant la fraction grossière, peut aussi, à plus long terme, engendrer des dysfonctionnements écologiques ou des dégradations d'ouvrages (ponts...). Si les ouvrages disposant de larges vannes (type barrages mobiles en rivière) permettent d'assurer une certaine continuité sédimentaire moyennant des précautions particulières (voir chapitre 8), les autres types d'ouvrages nécessitent souvent une gestion particulière et coûteuse (extractions, gestion à terre...).

2.1 Faire transiter les sédiments fins

Sur le Rhône, et la partie supérieure de son bassin notamment, les flux de sédiments fins sont gérés selon un protocole spécifique depuis le début des années 1980. Lors des chasses organisées à l'initiative des exploitants suisses pour prévenir les risques de sur-inondation induits par la sédimentation intervenant dans la retenue de Verbois, les flux de sédiments fins relâchés en aval de ce barrage sont régulés rigoureusement par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) dans la retenue de Génissiat afin de maintenir un taux moyen de matières en suspension (MES) inférieur à 5 g/l au niveau du cours français du Rhône. Cette contrainte très exigeante pour la gestion de l'ouvrage est néanmoins justifiée par la nature et la diversité des enjeux et usages en lien avec le fleuve : haute valeur environnementale des Vieux-Rhône, alimentation en eau potable de la ville de Lyon, prises d'eau pour le refroidissement des centrales nucléaires EDF, sûreté des barrages de CNR, sûreté de navigation...

Figure 4.1 – Abaissement contrôlé de la retenue de Génissiat lors de l'opération des chasses suisses du Haut-Rhône en 2012 / © CNR – Camille Bezzina



Elle est satisfaite par une gestion fine, et en temps réel, de la cote de la retenue et des débits solides sortant des 3 organes d'évacuation répartis judicieusement à différents niveaux du barrage : vanne de fond, vanne de demi-fond et évacuateur de surface [Peteuil, 2013]. Pour cela, des mesures in situ sont réalisées et transmises en temps réel au poste de pilotage pour définir les manœuvres d'ouvrages les plus appropriées à un instant donné. Outre la concentration en MES, ces mesures concernent de nombreux autres suivis : physico-chimique, toxicologique, bactériologique, captages pour l'eau potable, espèces protégées, Vieux-Rhône et zones refuges piscicoles, bathymétrie...

Par suite d'une réflexion commune, entre les autorités et les exploitants franco-suisses, engagée après les opérations de 2012, cette gestion exemplaire est étendue depuis 2016 à la partie suisse du Rhône de manière à assurer une gestion sédimentaire durable et cohérente de part et d'autre de la frontière [COTECH, 2014]. Un plan de gestion respectant l'ensemble des objectifs transfrontaliers a été défini à une échelle pluriannuelle (2016–2026). Il combine 3 modes de gestion, impliquant les différents gestionnaires d'ouvrages :

- un accompagnement du transit sédimentaire lors des crues d'Arve ;
- un abaissement partiel triennal de la retenue de Verbois, un accompagnement par le barrage de Chancy-Pougny et une gestion spécifique des ouvrages de CNR conforme aux modalités mises en œuvre depuis les années 1980 ;
- des dragages complémentaires sur certains dépôts ciblés (au moyen d'une drague aspiratrice avec rejet dans le lit principal du Rhône).

Figure 4.2 – Robot de dragage / © EDF



Les opérations de dragage peuvent avoir de fortes contraintes techniques et environnementales ; EDF a développé, en partenariat avec Watertracks, un robot de dragage autonome NESSIE® permettant de réduire les nuisances au maximum et qui sera utilisé sur la retenue du Chambon avec turbinage des eaux chargées et rejet dans la Romanche (figure 4.2).

Dans le cadre de ces deux exemples, des actions de recherche et développement sont mises en œuvre par les gestionnaires (CNR sur le Rhône, EDF sur la Romanche) et le laboratoire Hepia (Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture, Genève). Elles visent à mieux comprendre l'incidence de différentes concentrations en matières en suspension sur les poissons, en fonction des durées d'exposition, des espèces et des stades de vie ; des travaux sont en cours en vue de mieux ajuster les critères utilisés actuellement (Indice de Newcombe & Jensen, 1996) lors de futures opérations.

2.2 Valoriser les sédiments

Les gestionnaires, contraints de curer leurs ouvrages, cherchent à valoriser les sédiments extraits ; les filières de type « minéral » (céramiques, cimenterie, béton, techniques routières...) sont bien connues et peuvent être intéressantes pour les sédiments extraits de chenaux de navigation dans un contexte de « recyclage » et d'économie circulaire (exemple des sédiments des écluses du Rhin). Elles sont cependant rarement utilisables pour des ouvrages hydroélectriques qui se situent généralement trop loin des centres de valorisation pour être économiquement acceptables.

De ce fait, les travaux de recherches se sont plutôt orientés vers l'utilisation des sédiments dans la reconstruction de sols pouvant permettre de restaurer des milieux anthropisés dégradés (friches industrielles), ou vers les filières de valorisation agricole locales. Suite à des expérimentations menées par des Chambres d'Agriculture, avec des matériaux issus du dragage de sédiments marins ou de fleuves navigués [Balloy et al., 2018], ayant démontré l'intérêt, mais aussi les conditions, de cette voie de valorisation, des sites pilotes d'optimisation des modalités techniques ont ainsi été lancés par VNF (ex. : sédiments du canal de Baulieu) ou EDF (ex. : sédiments de la retenue d'Escaumels, ou du Mont-Cenis), visant à démontrer l'intérêt pour différents types de cultures (cultures de betteraves, maïs, prairies pâturées...)⁽¹⁾.

2.3 Faire transiter les sédiments grossiers

Les sédiments grossiers qui s'accumulent en amont des barrages sont autant de matériaux qui « manquent » à la rivière en aval pour son bon fonctionnement. La mise en transparence des barrages, lors des crues (on utilise généralement le terme de chasses, sluicing en anglais), permet la remobilisation et le transport d'une grande partie des matériaux vers l'aval. Toutefois, les modes d'exploitation des ouvrages n'empêchent pas toujours une accumulation des sédiments les plus grossiers en queue de retenue (delta), ce qui peut générer des inconvénients pour les riverains. Sur la Roya, par exemple, les accumulations de matériaux dans la retenue de Breil occasionnaient une gêne visuelle : lors du renouvellement de l'autorisation d'exploiter de l'aménagement hydroélectrique, une vaste rénovation de l'ouvrage a été mise en œuvre avec révision des débits et des conditions de mise en transparence de l'ouvrage, permettant de rétablir de manière plus efficace le transit sédimentaire.

À Saint-Sauveur, sur le Büech, l'augmentation du risque d'inondation sur les rives de la retenue, bien que le barrage soit mis en transparence régulièrement, a conduit à une opération de curage des matériaux grossiers et leur réinjection à l'aval, en plus d'une révision de la consigne de crue (abaissement du seuil de débit de mise en transparence). Les 44 000 m³ de matériaux ont permis de rehausser le plancher alluvial et de retrouver un bon fonctionnement sédimentaire [Brousse et al., 2018].

(1) Cf. Assises nationales de la valorisation des sédiments, Paris 1^{er} octobre 2019. <http://www.cd2e.com/?q=assises-nationales-sediments-paris-2019>

3. AGIR CONTRE L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

3.1 Sur Le Rhône

Le programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône est né d'une volonté partagée par les élus locaux, les gestionnaires du fleuve (CNR, EDF & VNF) et l'État de retrouver un fleuve « vif & courant ». Initié en 1998, ce programme comprend quatre grands types d'intervention :

- l'augmentation des débits réservés dans les tronçons court-circuités par les aménagements hydroélectriques ;
- la restauration des lônes, annexes fluviales plus ou moins connectées au chenal, dont la plupart étaient partiellement asséchées, et qui sont maintenant remises en eau et reconnectées au chenal principal ;
- la restauration des axes de migration piscicole, notamment grâce à la création de passes à poissons parallèlement aux barrages et au niveau des confluences du lit principal avec ses affluents ;
- le démantèlement partiel des ouvrages de navigation historiques devenus inutiles avec l'aménagement à grand gabarit du Rhône développé par CNR, et consistant à favoriser la mobilité latérale du fleuve.

Figure 4.3 – Démarche de restauration / suivi RhôneEco / © GRAIE 2016 – G. Chagny dans RhonEco

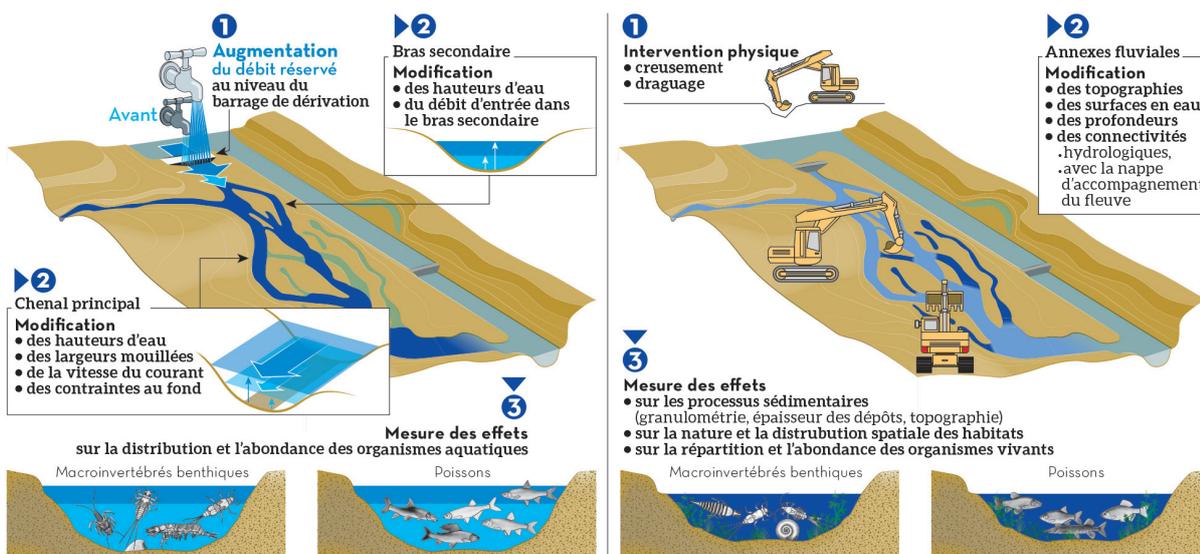
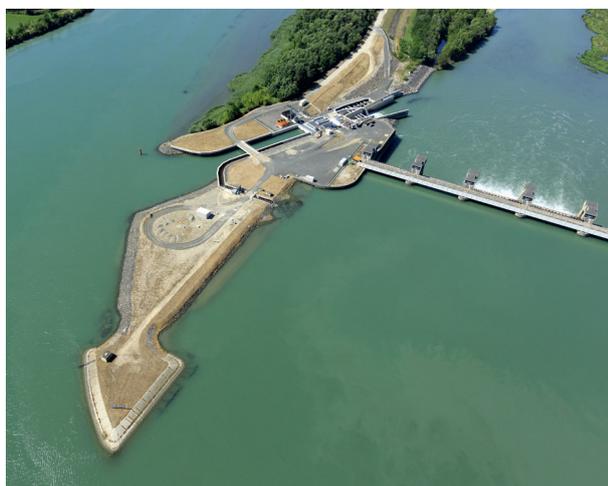


Figure 4.4 – Petite centrale hydroélectrique et passe à poisson de Rochemaure

© CNR – Camille Moirenc

En accompagnement de l'ensemble des actions précitées, et pour compenser la sensible augmentation des débits réservés induisant une perte de production à l'usine principale, des petites centrales hydroélectriques, implantées en « by-pass » au droit des barrages mobiles, ont été installées, de puissances comprises entre 4 et 8 MW, avec un débit turbiné entre 50



et 85 m³/s. Ces opérations ont été couplées à la construction d’ouvrages de franchissement piscicole : passe à bassins pour la montaison, galerie collectrice et conduite pour la dévalaison (figure 4.4).

Sur la période 2000–2015, près du quart de la longueur du fleuve (soit 120 km) a été traité, ce qui représente 38 lônes restaurées, 4 petites centrales hydrauliques construites et mises en service, dont 2 accompagnées d’ouvrages de franchissement piscicole. D’une ampleur exceptionnelle à l’échelle internationale, ce programme comporte depuis son origine un programme d’accompagnement scientifique nommé RhôneEco. Piloté par des équipes de recherche pluridisciplinaires, RhôneEco a permis de produire une connaissance unique sur l’état écologique du fleuve et son évolution à la suite des travaux de restauration. La diversification des actions de restauration a permis d’augmenter fortement la diversité des conditions de milieux à l’échelle du paysage (figure 4.5). Cela s’est traduit aussi par l’augmentation de la biodiversité des communautés vivantes.

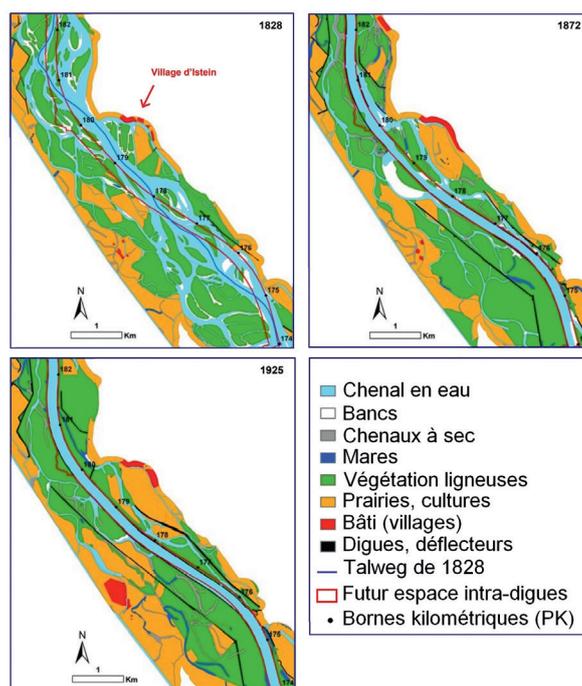
Figure 4.5 – Restauration de la lône des Dames (Bourg-Saint-Andéol). À gauche : avant. À droite : après / © CNR – C. Mora



3.2 Sur le Rhin

Figure 4.6. – Évolution du lit du Rhin / © Arnaud 2012

À l’enjeu industriel et de navigation des aménagements du Rhin s’ajoute la prise en compte de nouvelles ambitions environnementales et sociétales visant à rétablir des conditions écologiques qui ont été altérées par l’aménagement lourd du fleuve. Jusqu’en 1840, le Rhin, entre Bâle et Lauterbourg, était un fleuve encore à l’état sauvage, composé de chenaux multiples, de bancs graveleux, d’îles végétalisées et de hauts-fonds gênant la navigation (figure 4.6). Des travaux d’endiguement, puis de rectification du lit du Rhin entre Bâle et Neuf-Brisach, réalisés au 19^e siècle et début du 20^e siècle, ont conduit à la fixation du lit et à son incision sur plusieurs mètres ; le transit sédimentaire a également été fortement réduit, notamment du fait des multiples aménagements hydroélectriques en amont de Bâle.



La construction du barrage de Kembs, en 1932, a eu pour effet de dévier la majeure partie du débit liquide (débit d'équipement de l'usine de Kembs de 1 400 m³/s) dans le Grand Canal d'Alsace, court-circuitant ainsi le fleuve, appelé désormais « Vieux Rhin » (figure 4.7). Ce dernier est alimenté par le débit réservé et les déversés du barrage pendant les crues. On observe, depuis les endiguements et la chenalisation, un lit pavé, incisé, altérant les conditions écologiques des milieux.

Figure 4.7 – Barrage de Kembs /

© EDF – Airdiasol – R. Rothan



Comme pour le Rhône, un ensemble de mesures hydro-environnementales, visant à la restauration des conditions hydro-morphologiques et écologiques dans le Vieux Rhin à l'aval du barrage de Kembs, a été mis en place [Garnier et al., 2014] :

- augmentation du débit réservé (entre 52 m³/s l'hiver et 150 m³/s l'été), turbiné par une nouvelle centrale hydroélectrique de 8,4 MW, produisant 28 millions de kWh, ainsi qu'un débit d'attrait pour la nouvelle passe à poissons attenante ;
- mise en place d'ouvrages permettant la circulation des poissons et des castors, dont notamment l'aménagement d'une liaison piscicole entre la Petite Camargue Alsacienne (réserve naturelle nationale) et le grand Canal d'Alsace ;

Figure 4.8 : Le Petit Rhin /

© EDF – Airdiasol – R. Rothan



- restauration d'un bras de rivière dans l'île du Rhin sur plus de 7 kilomètres, baptisé le Petit Rhin, avec reconstitution d'un ensemble de milieux naturels humides et secs, propices à la biodiversité au niveau d'une parcelle de 100 ha anciennement cultivée [Pascal, 2018] ; le nombre d'espèces d'oiseaux a, par exemple, été multiplié par 3, mais également tout un cortège d'espèces de vertébrés et d'invertébrés a très rapidement colonisé le site constituant un réservoir de biodiversité important pour la plaine d'Alsace ;

Figure 4.9 : Le Vieux Rhin /

© EDF – A. Barillier



- programme innovant de réintroduction de matériaux dans le lit du Vieux Rhin, dans un objectif de renaturation et d'amélioration des conditions d'habitats aquatiques et rivulaires : deux types de modalités ont été mis en œuvre par injection de graviers issus d'anciens dépôts du Rhin sur le lit majeur, et l'érosion de berges par les crues après l'enlèvement des digues du 19^e siècle. Depuis 2013, plus de 50 000 m³ de matériaux ont été réinjectés dans le Vieux Rhin et 1 000 m de berges ont été fragilisées pour permettre leur érosion, aboutissant à une diversification des habitats aquatiques et une amélioration de la diversité faunistique [Barillier et al., 2018].

4. ÉCONOMISER LA RESSOURCE EN EAU

Outre leur rôle dans la production d'énergie, les infrastructures hydrauliques ont parfois été conçues en France, comme dans de nombreux pays, pour jouer un rôle multiple et contribuer à de nombreux services, dont la navigation, la fourniture d'eau potable, l'atténuation des sécheresses (soutien d'étiage), l'irrigation, etc. Cette gestion multi-usage participe ainsi au développement économique des territoires mais nécessite une gouvernance adaptée, à l'échelle du bassin versant.

Un bel exemple est apporté par le système Durance-Verdon, où la gestion anticipée et coordonnée des 30 aménagements hydroélectriques de ces deux vallées permet de fournir 2 000 MW au réseau électrique, tout en permettant d'alimenter en eau la population et les industriels de toute une région, d'irriguer des terres agricoles, de maîtriser les crues, gérer les sécheresses, respecter les cotes touristiques des grandes retenues, ou encore de respecter les critères de rejets d'eau douce et de limon favorables à la qualité de l'étang de Berre (cf. paragraphe 2).

Cette logique de partage équilibré de la ressource en eau et de conciliation des usages est également au cœur du modèle économique imaginé par les fondateurs de CNR en 1933. Ce modèle, cité en exemple dans la loi de transition énergétique de 2015, considère que les revenus tirés de l'exploitation hydroélectrique du fleuve Rhône, bien commun de la Nation, doivent aussi bénéficier aux territoires où cette valeur ajoutée est créée et être redistribués pour financer le développement de la voie navigable, l'irrigation de la vallée et la réalisation de missions d'intérêt général en lien avec la transition énergétique, le développement touristique ou l'agriculture durable par exemple.

■ Et si les panneaux photovoltaïques flottants (FPV) étaient un bon moyen d'économiser la ressource en eau ?

Une bonne partie du territoire métropolitain est favorable, sur le plan énergétique, au développement de centrales solaires ; ces dernières présentent toutefois l'inconvénient de consommer de l'espace foncier ce qui potentiellement peut avoir des impacts sur les usages (agriculture), les paysages, la biodiversité... Le développement du FPV, en couvrant une bonne partie des surfaces en eau des retenues, permettrait de limiter leur réchauffement et leur évaporation estivale, tout en produisant de l'électricité à un moment où la tension sur l'eau est maximale... Un projet a récemment été mis en exploitation par CNR sur le lac d'irrigation de La Madone à Mornant (Rhône), où 630 panneaux photovoltaïques flottants

combinent maintenant production d'électricité solaire photovoltaïque (227 kWc), et développement de la biodiversité aquatique grâce à l'installation de modules d'habitats artificiels sous les flotteurs qui permettent à la faune et à la flore lacustre de se développer. Un autre site pilote est en cours de développement par EDF sur la retenue hydroélectrique de Lazer dans le sud de la France, avec une capacité de 15 MWc sur une surface de 24 ha (80 % de la surface de la retenue) [Grenier et al., 2019]. À l'étranger, des études conduites par TRACTEBEL sont en cours sur la retenue de l'aménagement de Kossou en Côte d'Ivoire pour y intégrer une centrale photovoltaïque flottante.

Figure 4.10 – Retenue hydroélectrique de Lazer / © EDF



La prise de conscience de la raréfaction de la ressource en eau avec le changement climatique (exemple de l'étude prospective Garonne 2050), conduit la politique de l'eau à encourager la sobriété des usages et une meilleure gestion de la ressource en amont : le comité de bassin Adour-Garonne, l'État et les régions Nouvelle-Aquitaine et Occitanie ont par exemple récemment défini cinq priorités pour s'adapter au déficit futur en eau estimé à 1,2 milliard de m³ à l'horizon 2050 pour l'ensemble du bassin [AEAG, 2018] : outre le plan d'économie d'eau par les différents usagers, le développement de mesures fondées sur la nature (restauration de zones humides...), la lutte contre la perte des sols, le soutien de nouvelles filières plus économes, un axe concerne les moyens de stockage avec l'optimisation des ressources existantes, en particulier les réservoirs hydroélectriques, et le développement de nouveaux ouvrages. L'acceptabilité sociétale de nouveaux ouvrages n'est toutefois pas acquise : le barrage de Sivens n'a finalement pas été construit après une mobilisation dramatique des opposants, alors que celui de Caussade, dans le Lot-et-Garonne l'a été, malgré l'absence d'autorisation, liée à l'évaluation insuffisante de ses impacts sur la biodiversité et de la ressource hydrologique.

C'est, en effet, souvent la mauvaise prise en compte des impacts sur la biodiversité terrestre (suppression de zones humides...), ou aquatique (dégradation de la qualité de l'eau, risque de développement d'espèces indésirables...) ou sur les paysages, qui sont à l'origine de ces tensions. La difficulté à envisager de nouveaux moyens de stockage de l'eau conduit, inévitablement, à accentuer la pression sur des réservoirs hydroélectriques existants qui n'étaient pas initialement conçus dans une optique de multi-usages, ce qui implique de trouver un nouveau modèle économique et de gouvernance pour les ouvrages concernés.

5. ACCOMPAGNER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

La transition énergétique se traduit par une augmentation de la pénétration des énergies variables dans le système électrique, nécessitant le développement de moyens de stockage de l'électricité. L'hydroélectricité représente actuellement 99 % des capacités de stockage en France, et son rôle est amené à s'accroître dans le futur, du fait de sa flexibilité. Toutefois, il s'agit de démontrer que cette énergie est peu émettrice de gaz à effet de serre, dans un contexte où les grands barrages sont pointés du doigt du fait de leurs émissions en CO₂ ou CH₄, y compris en zone tempérée [Baulieu et al., 2017 pour les États-Unis ; DelSontro et al., 2010 pour la Suisse, par exemple]. Les publications scientifiques récentes montrent toutefois que ces émissions sont très variables en fonction des zones géographiques, et pour les réservoirs suisses alpins et périalpins, inférieures de plusieurs ordres de grandeur aux émissions brutes mesurées sur les réservoirs tropicaux.

Rendu obligatoire, en 2011, en France pour toutes les entreprises et associations de droit privé de plus de 500 salariés, ainsi que pour les collectivités de plus de 50 000 habitants, le Bilan de gaz à effet de serre (GES) doit être publié tous les 4 ans. Électricité de France publie un bilan GES tous les ans sur son site internet, qui prend en compte les émissions liées à la mise en eau des réservoirs. Les émissions sont calculées au moyen de la méthode IPCC à partir des superficies des réservoirs supérieures à 1 ha, et des chiffres d'émissions brutes moyens par zone climatique.

En parallèle, EDF a développé une compétence particulière dans les mesures et l'évaluation des émissions in situ, sur les réservoirs tropicaux [Guérin et al., 2016 ; Deshmukh et al., 2018], mais aussi métropolitains [Descloux et al., 2017] et a contribué au développement du G-Res Tool de l'IHA, qui évalue les émissions nettes qui ne sont dues qu'à la présence du barrage [Prairie et al., 2018]. En 2017, des chercheurs de l'IHA ont entrepris une étude de 498 réservoirs dans le monde à l'aide de l'outil G-Res et ont montré que l'intensité médiane globale des émissions de GES des réservoirs d'hydroélectricité inclus dans l'étude était de 18,5 gCO₂-éq / kWh.

En dehors de nos frontières, TRACTEBEL et AERA Group ont obtenu pour leur client CI-Energies la certification carbone du plus grand barrage hydroélectrique de Côte d'Ivoire. Le Conseil Exécutif de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a officiellement enregistré le barrage hydroélectrique de Soubré dans le cadre du Mécanisme de Développement Propre (MDP) en 2017⁽²⁾. Avec le plus fort potentiel en crédits carbone de Côte d'Ivoire, cette centrale permettra d'éviter l'émission de plus de 600 000 tonnes de CO₂ par an en provenance du réseau électrique national ivoirien. L'aménagement hydroélectrique de Soubré, situé en amont des chutes naturelles de la Nawa sur le fleuve Sassandra, est un projet clé de la stratégie énergétique nationale en Côte d'Ivoire. Avec une capacité de 275 MW et une production de 1 170 GWh, il s'agit du plus grand barrage du pays.

6. INTÉGRER LES PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX & SOCIÉTAUX COMME CRITÈRES DE CONCEPTION

Il est intéressant de souligner que l'ensemble des exemples donnés au sein de ce court chapitre entraînent peu dans le champ de préoccupation des premiers aménageurs, et qu'ils ne représentent qu'une fraction faible de l'investissement initial des aménagements ; les coûts peuvent toutefois paraître « inaccessibles » ou inopportuns à certains exploitants d'ouvrages existants, lorsqu'il s'avère nécessaire de corriger des impacts a posteriori. Dans le contexte socio-environnemental d'aujourd'hui où maîtres d'ouvrages et bailleurs de fonds relaient les attentes de la société, l'intégration, dès la conception, de solutions minimisant l'empreinte environnementale globale d'un projet, dans le respect de la séquence ERC, est donc non seulement une nécessité pour l'acceptabilité du projet, mais probablement également une certitude de réduction des coûts à moyen / long terme.

Les études d'impact environnemental et social des grands barrages répondent maintenant systématiquement à cette logique, et cherchent avant tout à insérer l'ouvrage dans son contexte, en participant étroitement aux critères de conception (à titre d'exemples, voir l'expérience EDF présentée dans [Nathan 2016], [Beche et al, 2017], [Beche & Nathan, 2019] et TRACTEBEL dans [Tomczak, 2018]). C'est ainsi que de récents projets ont pu être mis en œuvre à l'étranger, en tenant compte du fait qu'il ne s'agit pas nécessairement de construire le plus grand barrage, mais le plus adapté.

En Guinée, l'analyse des alternatives du projet a montré que le nombre de personnes à déplacer serait trois fois moins important en baissant de 20 m la cote du réservoir tout en correspondant à l'optimum de production d'énergie du complexe Kaléta-Souapiti. C'est ainsi que le barrage de Souapiti a été décidé et est en voie d'achèvement [Tomczak, 2018] et [Tomczak, 2018b].

Par ailleurs, il ne faut pas sous-estimer les bénéfices sociaux-économiques induits dans des régions peu développées. Lors de la construction de grands barrages, l'objectif initial de développement socio-économique de la région est maintenant clairement affiché et les maîtres d'ouvrage s'attachent à maximiser les bénéfices : les routes et les ponts permettent le désenclavement, l'accès à l'électricité dans les environs du barrage et de nombreuses infrastructures collectives complètent le bilan positif du développement socio-économique local lié à la construction du barrage. La prise en compte des paramètres E&S dans les études de conception intervient également sur ce point.

(2) <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/RWTUV1476171677.04/view>

7. RÉFÉRENCES

- Agence de l'Eau Adour Garonne (2018) – Plan d'adaptation au changement climatique de la région Occitanie. Approuvé le 2 juillet 2018.
- Arnaud F (2012) – Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Thèse Univ. Lyon 2, 280 p.
- Balloy B., coord. (2018) – Utilisation des terres de curages sur les sols agricoles. Recommandations pour en évaluer l'intérêt et les risques, retour d'expérience. Rapport Agricultures et Territoires, 11 p. Disponible sur https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/Casdar/Guide_utilisation_terres_curage_sols_agricoles.pdf
- Barillier A., Clutier A., Aelbrecht D., Garnier A. (2018) – Mesures de restauration morphologique du Rhin à l'aval du barrage de Kembs par érosion maîtrisée de berge et par injections : études, mise en œuvre et premier bilan après quelques années. CIGB, 26^e congrès, Vienna, Austria, 1^{er}-7 juillet 2018.
- Beaulieu J.J., Smolenski R.L., Nietch C.T., Small A.T. et Elovitz. M.S. (2014) – High Methane Emissions from a Midlatitude Reservoir Draining an Agricultural Watershed. *Environmental Science & Technology* 48 (19): 11100-11108. doi:10.1021/es501871g
- Beche L., André C., Ardorino F. (2017). - Perspectives on biodiversity offsets in rivers. - IAIA special Biodiversity symposium, Washington DC, 14-15 November.
- Beche L. & Nathan F., (2019) – Impact avoidance in hydropower projects. IAIA 39th conference, Brisbane, Australia, 29 Apr–2 May.
- Brousse G., Bertrand M., Arnaud-Fassetta G., Liébault F., Borgniet L. et al. (2018) – Monitoring of a sediment replenishment operation: The case of the Saint-Sauveur dam in the Buëch River (Southern Alps, France). *I.S. Rivers 2018 (Integrative sciences and sustainable development of rivers)*, June, Lyon, France. hal-01814406.
- COTECH (2014) – Nouvelle gestion sédimentaire du Rhône genevois et du Haut-Rhône français, Rapport de synthèse. Sur http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20141020_Gestion_sedimentaire_Synthese_COTECH_cle21112f.pdf
- DelSontro T., McGinnis D.F., Sobek S., Ostrovsky I. et Wehrli. B. (2010) – Extreme Methane Emissions from a Swiss Hydropower Reservoir: Contribution from Bubbling Sediments. *Environmental Science & Technology* 44 (7): 2419-2425. doi:10.1021/es9031369
- Descloux S., Chanudet V., Serça D., Guérin F. (2017) – Methane and nitrous oxide annual emissions from an old eutrophic temperate reservoir. *Science of the Total Environment*, 598, 959-972
- Deshmukh C., et al. (2018) – Carbon dioxide emissions from the flat bottom and shallow Nam Theun 2 Reservoir: Drawdown area as a neglected pathway to the atmosphere. *Biogeosciences*, 15, 1775-1794.
- Garnier A. & Barillier A. (2014) – The Kembs project: environmental integration of a large existing hydropower scheme. Congrès SHF « Enhancing hydropower plant ». Grenoble, 9-10 avril.
- GRAIE, 2016 – RhônEco 2000-2015 : le suivi scientifique de la restauration hydraulique et écologique du Rhône. Brochure 28 p. <http://restaurationhone.univ-lyon1.fr>
- Grenier A., Spizthorn C., Pouget L. (2019) – Lazer floating PV: EDF to build France first floating solar powerplant in major commitment to solar/hydro cooperation. SHF conference « HydroES 2019 », Grenoble.
- Guérin F., Deshmukh C., Labat D., Pighini S., Vongkhamsoo A., Guédant P., Rode W., Godon A., Chanudet V., Descloux S. Serça D. (2016) – Effect of sporadic destratification, seasonal overturn, and artificial mixing on CH₄ emissions from a subtropical hydroelectric reservoir. *Biogeosciences*, 13, 3647-3663.

- Nathan F., (2016) – Insights and lessons from Nam Theun 2 hydroelectric project, Lao PDR; social programs. 6th International Conference and Exhibition on Water Resources and Hydropower Development in Asia (Asia 2016), Vientiane, Laos, 1-3 mars 2016.
- Pascal B. (2018) – Les oiseaux du site renaturé de Kembs-Rosenau (Haut-Rhin) entre 2013 et 2018. *Ciconia* 42 (3), 2018, 141-151.
- Peteuil C., Fruchart F., Abadie F., Reynaud S., Camenen B. and Guertault L. (2013) – Sustainable management of sediment fluxes in reservoir by eco-friendly flushing: the case study of the Génissiat dam on the upper Rhône River (France). Proceedings of 12th International Symposium on River Sedimentation. Kyoto, Japan.
- Prairie et al. (2017) – Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoir: What does the atmosphere see? *Ecosystems*, Vol 21, n° 5, 1058-1071.
- Tomczak N. (2018) – Barrage de Souapiti en Guinée : rôle de l'EIES dans la recherche de solutions socialement acceptables. SIFEE, Paris 2018.
- Tomczak N. (2018, 2) – Working with project affected people in the framework of the environmental and social impact assessment for hydraulic projects. Africa, 2019.

BARRAGES-POIDS

Les grands barrages de type poids sont, en France, à la fois une tradition ancienne qui remonte au 18^e siècle, et un domaine toujours riche d'actualités nouvelles.

La tradition est celle de la construction de plusieurs centaines de barrages, représentant 25 % du parc des grands barrages français. L'actualité est à la fois celle de la maintenance de ce parc (diagnostic de sécurité, confortement), et de la construction neuve par les ingénieries et entreprises françaises, essentiellement hors de France. Cela alimente une activité de recherche et développement très active.

Ce chapitre débute par deux éclairages spécifiques sur l'histoire française des barrages-poids (section 1) : l'histoire de la conception des barrages en maçonnerie, et la contribution à la technologie du BCR. La section 2 est consacrée à la maintenance du parc en exploitation, qui a suscité plusieurs avancées dans les vingt dernières années : la mise au point de corpus standardisés de justifications par le calcul, l'amélioration des moyens physiques de diagnostic des ouvrages anciens, la mise en œuvre de procédés de confortement variés pour les barrages dont la stabilité était incertaine. Finalement, la section 3 illustre quelques thèmes pour lesquels la recherche demeure active en France, sur ce sujet des barrages-poids.

1. QUELQUES ÉLÉMENTS D'HISTOIRE

1.1 Les barrages anciens en maçonnerie

Historiquement, les barrages-poids ont d'abord été construits en maçonnerie. Ce type de barrages représente la grande majorité des barrages construits en France pendant le 19^e siècle et le début du 20^e siècle. [Royet, 2003 et 2013] dresse une synthèse des 70 barrages français en maçonnerie construits avant 1950.

1.1.1 Du 17^e au 19^e siècle : rationalisation et optimisation de la géométrie des barrages

Les plus anciens de ces barrages sont constitués d'un mur maçonné relativement mince s'appuyant sur un remblai butoir important à l'aval et parfois aussi à l'amont (pour assurer la stabilité à la vidange), à l'image du barrage de Saint-Ferréol (H = 35 m, achevé en 1675), qui est le plus ancien grand barrage français encore en service. Parallèlement, des barrages en maçonnerie sans remblai virent aussi le jour, en général assez massifs et avec contreforts (figure 5.1, type 1), surtout lorsqu'ils n'étaient pas arqués, à l'image du barrage du Paty (H = 16,5 m en 1766, rehaussé à 20 m en 1870). Une troisième géométrie de barrage ancien en maçonnerie est représentée par les ouvrages dont la stabilité est essentiellement assurée par l'effet voûte, à l'image du barrage Zola (H = 36 m, 1854) qui, à l'époque, était le plus haut barrage-voûte en maçonnerie au monde.

C'est vers 1850 que les recherches de MM. de Sazilly et Delocre conduisent à proposer des profils poids plus élargés, utilisant de la matière mieux répartie. C'est le profil « d'égale résistance » publié en 1853 dans les Annales des Ponts et Chaussées : le « taux de fatigue » de la maçonnerie est égal à l'amont à retenue vide et à l'aval à retenue pleine. Les parements amont et aval, inclinés et concaves confèrent aux ouvrages un profil « creux » (figure 5.1, type 2). Les contraintes de compression sont très modérées : 600 à 800 kPa. Le premier barrage de ce type est le Gouffre d'Enfer, appelé aussi le Furens (H = 55 m, 1866) et record du monde à l'époque. À la même époque, certains barrages sont construits avec un profil vertical à l'amont et sensiblement rectiligne à l'aval (figure 5.1, type 3), avec un fruit global de plus en plus réduit, jusqu'à 0,58 au barrage de Bouzey (H = 24 m, 1881).

1.1.2 1884 et 1895 : les deux accidents de Bouzey

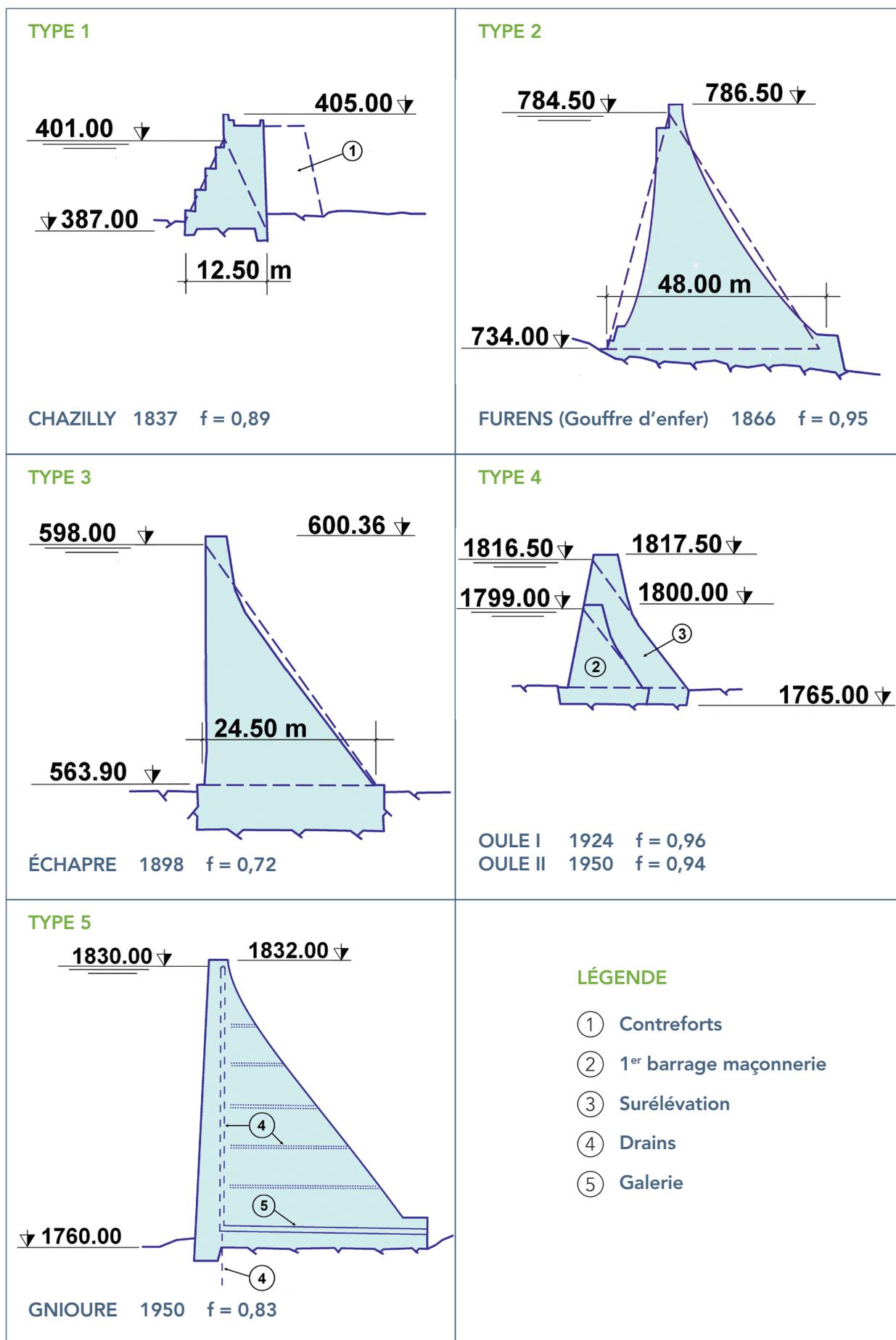
Un glissement d'ensemble sur la fondation est constaté le 14 mars 1884 lors du premier remplissage de la retenue de Bouzey, conduisant à mettre en place un massif de confortement en pied aval. Le 27 avril 1895, la rupture catastrophique se produit par renversement de la partie centrale au-dessus du massif de confortement. À la suite de cette rupture, Maurice Lévy a attiré l'attention sur l'effet des pressions « ascendantes » résultant de la pénétration et du cheminement de l'eau dans le corps du barrage.

Les barrages les plus importants ont alors été recalculés. Certains ont été abandonnés, d'autres confortés par un remblai aval et d'autres confortés par des masques (dits « de Maurice Lévy ») permettant de ramener à zéro les pressions interstitielles dans tout le corps du barrage. Au barrage de Chartrain (H = 55 m, 1892) apparaît pour la première fois la condition de non-traction en pied amont. La contrainte admissible de compression est portée à 1,1 MPa.

1.1.3 20^e siècle : barrages de conception moderne, puis transition vers les barrages en béton

Les barrages construits après 1900 ont bénéficié des méthodes de calcul prenant en compte les règles de non-traction en pied amont et la présence de sous-pressions. Cela s'est traduit par des profils triangulaires à parements en général rectilignes, souvent inclinés à l'amont et dont le fruit amont + aval est au minimum de 0,8 (figure 5.1, type 4). La dernière génération des barrages français en maçonnerie se caractérise par l'introduction du drainage interne et en fondation avec des galeries dans le corps de l'ouvrage (figure 5.1, type 5), à l'image du barrage de Gnioure (H = 70 m, 1950).

Figure 5.1 – Évolution des profils types des barrages français en maçonnerie



Mais depuis quelques années, le béton avait déjà pris le relais avec les barrages d'Éguzon (1926), de Grande Rhue (1927), du Sautet et du Chambon (1934). Cette génération de barrages en béton conventionnel vibré (BCV) se caractérise par le traitement de la fondation qui couple systématiquement injections et drainage ; le drainage du corps du barrage et une galerie en pied amont équipent les grands barrages. Largement utilisé jusque dans les années 1990, le BCV va progressivement céder le pas au béton compacté au rouleau (BCR).

1.2 La contribution française à la technologie du BCR

Le barrage des Olivettes est le premier grand barrage français réalisé en béton compacté au rouleau en 1988. Le projet d'exécution en BCR est issu d'une variante proposée par l'entreprise, en alternative à une solution de base en enrochement avec masque amont en béton bitumineux.

À la suite de cette réalisation, la technique du BCR a soulevé un grand intérêt en France. Elle pouvait, en effet, permettre des gains de délais et une réduction notable des coûts.

Figure 5.2 – Barrage du Riou / © BETCGB – Stéphane Aigouy



En 1989, la France décide un programme de recherche et développement rassemblant les acteurs principaux du monde des barrages : c'est le projet BaCaRa.

Parmi les thèmes abordés, il y a notamment eu la question de l'étanchéité. Diverses solutions ont été mises en œuvre, adaptées à chaque site.

Le barrage du Riou (figure 5.2) a été l'occasion de mettre en œuvre une géomembrane en PVC tendue Sibelon développée par les sociétés italiennes Carpi et Italfarm et utilisée pour la première fois sur un projet neuf.

Les barrages des Olivettes, de Choldocogagna et de la Touche Poupard sont équipés d'un masque amont en béton conventionnel mis en place en même temps que le BCR.

Le barrage du Sep a été équipé d'un mur amont en béton armé classique, construit en avance sur le BCR, accroché à une plinthe et destiné à reprendre et transmettre à la fondation les efforts induits par le séisme de référence. Enfin, le BCR de Petit-Saut est protégé des eaux acides de la retenue par un mur amont en béton vibré construit en avance sur le BCR.

Le tableau 5.1 ci-dessous dresse la liste des barrages construits en France pendant la durée du projet BaCaRa.

■ BaCaRa (1989-1996) : projet de recherche collaboratif sur les barrages en BCR

- 30 organismes : maîtres d’ouvrage, concepteurs, constructeurs, ministère, Fédération des travaux publics.
- 5 millions d’euros d’études et d’essais.
- Études relatives au matériau BCR, aux déversoirs à marches, à la conception des barrages (étanchéité, stabilité).

Concernant le matériau BCR, le projet BaCaRa insiste sur :

- liants faiblement exothermiques et à prise lente, élaborés à partir de produits issus de la sidérurgie éventuellement complétés de cendres volantes ;
- relâchement des exigences sur les granulats ;
- recouvrement rapide du BCR, favorisant la liaison entre les couches (reprises dites chaudes) ;
- utilisation de compacteurs d’intensité modérée : classe V3 (masse de la bille entre 40 et 55 kg/m et à double amplitude).

Tableau 5.1 – Liste des barrages en BCR construits dans la période du projet BaCaRa

Barrages (BCR)	Barrage : longueur (m) ; hauteur (m) ; volume BCR (m ³)	Retenue : surface (ha) ; volume (hm ³)
Les Olivettes, 1988	255 ; 36 ; 80 000	40 ; 4,4
Le Riou, 1991	322 ; 26 ; 41 000	15 ; 0,8
Choldocogagna, 1992	100 ; 36 ; 19 000	11 ; 0,85
Le Sep, 1994	145 ; 46 ; 49 000	33 ; 4,7
Touche-Poupard, 1994	200 ; 36 ; 34 000	143 ; 15
Petit-Saut, 1994	740 ; 51 ; 250 000	31 000 ; 3 500

De nombreuses techniques ont été développées et utilisées à l’occasion de la réalisation de ces ouvrages. Pour le barrage du Riou : parement aval en béton extrudé, y compris au droit de l’évacuateur de crues ; parement amont utilisant les supports de la future géomembrane pour le soutènement du BCR ; galeries terrassées à la pelle, ou à la machine à attaque ponctuelle sur BCR âgé de plus d’un mois ; BCR rustique composé à partir d’un tout-venant simplement écrêté ; réalisation en période froide ; partitionnement de la surface de travail, permettant de réaliser trois couches par jour. Le barrage de Choldocogagna a conduit à une intéressante réflexion sur les dimensions minimales d’un ouvrage compatibles avec un BCR économiquement intéressant. Ces expériences ont fait la preuve que la collaboration entre maîtres d’ouvrage, concepteurs et constructeurs constitue une méthode de travail responsabilisant chaque partenaire, conduit à une qualité satisfaisante de l’ouvrage et garantit l’économie pour chaque acteur du projet.

Figure 5.3 – Quelques barrages en BCR conçus par les ingénieries françaises



Aoulouz (Maroc) – 1991
 $H = 75 \text{ m} - V = 0,9 \text{ hm}^3$
 © TRACTEBEL



Tha Dan (Thaïlande) – 2004
 $H = 93 \text{ m} - V = 5 \text{ hm}^3$
 © TRACTEBEL



O. Mellegue (Algérie) – 2019
 $H = 51 \text{ m} - \text{pkweir} + \text{marches}$
 © ISL – Luc Deroo



Tabellout (Algérie) – 2015
 $H = 121 \text{ m} - V = 1 \text{ hm}^3$
 © TRACTEBEL



GIBE III (Éthiopie) – 2016
 $H = 246 \text{ m} - V = 6 \text{ hm}^3$
 © TRACTEBEL



Souapiti (Guinée) – 2020
 $H = 110 \text{ m} - V = 4 \text{ hm}^3$
 © TRACTEBEL

À l'étranger, les ingénieries et entreprises françaises ont apporté leur savoir-faire et contribué à l'évolution de la technique du BCR (BCR enrichi en coulis, barrage zoné, pente amont / aval, couches inclinées...) sur plusieurs barrages emblématiques, partout dans le monde (figure 5.3).

2. JUSTIFICATION ET MAINTENANCE DU PARC DES BARRAGES-POIDS

2.1 Un standard de justification : les recommandations du CFBR

Le Comité Français des Barrages et des Réservoirs (CFBR) a décidé, en 2004, de rédiger des recommandations pour la justification des barrages-poids en partant du double constat que les pratiques françaises en matière de justification de ces barrages étaient hétérogènes et que les publications professionnelles disponibles présentaient également des différences sensibles entre elles. La version définitive des recommandations a été publiée en 2012 et traduite en anglais : http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2012_poids.pdf

Ces recommandations adoptent le format des méthodes semi-probabilistes aux états limites, à l'instar des Eurocodes qui constituent un référentiel standard bien adapté pour une harmonisation des pratiques. Ces recommandations s'insèrent dans un ensemble cohérent de recommandations professionnelles concernant les barrages et les digues, portant sur la justification de la stabilité des barrages et digues en remblai, le risque sismique et le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages.

Dans ces recommandations, on examine successivement : les situations de projet, les actions et leurs combinaisons, les résistances des matériaux, les états limites et les conditions d'état limite. Les situations de projet sont classées en plusieurs catégories différenciées par l'intervalle de temps pendant lequel les distributions de toutes les données (actions, résistances) sont considérées comme constantes :

- les situations normales d'exploitation ;
- les situations transitoires ou rares : conditions temporaires de fonctionnement ou probabilités d'occurrence assez élevées ;
- les situations accidentelles ;
- les situations de crues, qu'il est apparu nécessaire d'introduire de façon spécifique :
 - les situations rares de crue (pour les barrages écrêteurs de crue) ;
 - les situations exceptionnelles de crue (correspondant à l'atteinte de la cote des Plus Hautes Eaux – PHE) ;
 - les situations extrêmes de crue (au-delà de laquelle l'intégrité de l'ouvrage ne serait plus garantie).

Les propriétés de résistance des matériaux ainsi que les actions permanentes sont prises en compte dans les calculs à partir de leurs valeurs caractéristiques, c'est-à-dire une estimation prudente de la valeur de résistance ou de l'intensité de l'action. L'estimation prudente fait alors appel au jugement de l'expert, à partir des résultats d'essais disponibles et / ou à partir de valeurs guides issues de la littérature.

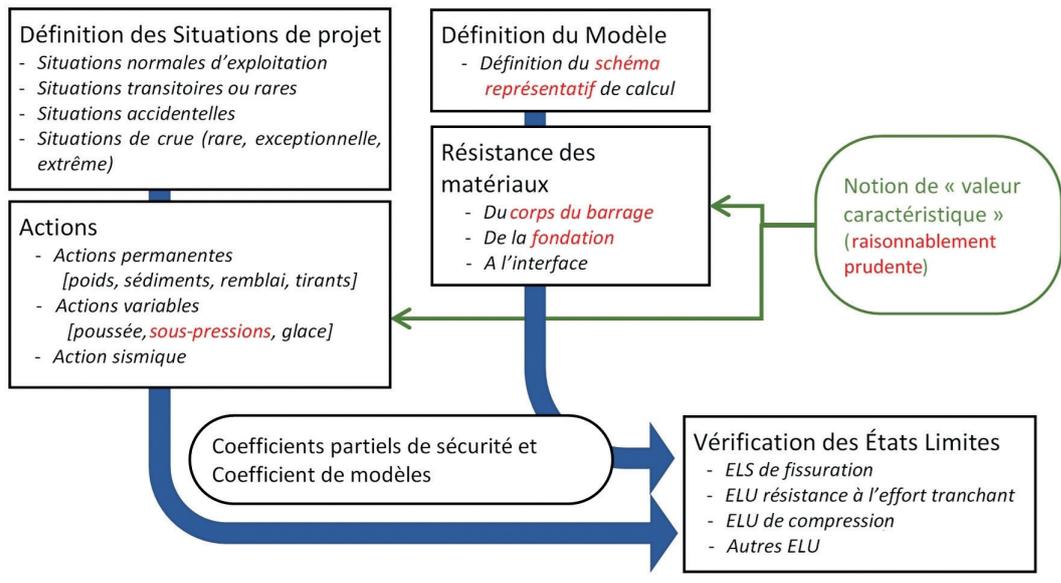
Les actions variables de l'eau et l'action accidentelle sismique sont définies à partir des crues et séismes considérés, par des méthodes décrites dans d'autres volumes des Recommandations du CFBR.

On justifie la stabilité des barrages-poids pour différents états limites, c'est-à-dire pour différents phénomènes préjudiciables contre lesquels on cherche à se prémunir :

- le défaut de résistance à l'effort tranchant ;
- la contrainte en pied amont et l'extension des fissures depuis le pied amont ;
- le défaut de résistance à la compression.

Pour chaque état limite, on écrit la condition d'état limite, qui fait intervenir les actions, les propriétés de résistance (pondérées par un coefficient partiel — noté γ_m — prenant en charge l'incertitude pesant sur la connaissance de la propriété) et le coefficient de modèle (γ_d) qui prend en charge toutes les incertitudes ne relevant pas de la connaissance des propriétés de résistance, en particulier les incertitudes relatives au modèle hydraulique et au modèle d'état limite.

Figure 5.4 – Démarche de la justification de la stabilité des barrages-poids



Par exemple, la condition d'état limite de résistance à l'effort tranchant sur une section du barrage s'exprime de la façon suivante, pour chaque combinaison d'actions considérée :

$$[C_k / \gamma_{mC} \cdot L' + N' \cdot (\tan\phi)_k / \gamma_{m\tan\phi}] > \gamma_{d1} \cdot T \quad (1)$$

avec :

- C_k et $(\tan\phi)_k$ valeurs caractéristiques de la cohésion et de la tangente de l'angle de frottement ;
- L' la longueur de la section non fissurée étudiée ;
- N et T les composantes normale et tangentielle des actions agissant sur la section étudiée ;
- $N' = N - U$, avec U la résultante des pressions interstitielles au niveau de la section étudiée ;
- γ_{mC} et $\gamma_{m\tan\phi}$ les coefficients partiels affectant les valeurs caractéristiques des résistances ;
- γ_{d1} le coefficient de modèle de l'état limite de résistance à l'effort tranchant.

Les valeurs à adopter pour les coefficients partiels sur les résistances au cisaillement du matériau et pour les coefficients de modèle sont indiquées dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 – Coefficients partiels

Combinaisons :	quasi-permanentes	rares	extrêmes
γ_{mC}	3	2	1
$\gamma_{m\tan\phi}$	1,5	1,2	1
γ_{d1}	1	1	1

2.2 Le diagnostic des barrages anciens

Le parc des barrages-poids français est remarquable par son ancienneté. Il offre une perspective unique sur la question du vieillissement et de la durée de vie de ces ouvrages avec une cinquantaine de barrages en maçonnerie de plus de 150 ans, et plusieurs barrages en béton de plus de 70 ans. Des questions ont été posées sur le vieillissement de ces ouvrages, et sur leur capacité à résister à des sollicitations extrêmes, par exemple sismiques. Il ne s'agit pas de questions simples, en raison de la variabilité des matériaux et moyens utilisés pour la construction, illustrés par exemple par la figure 5.5 au barrage de Rochebut (1909) et de Chazilly (1837).

Figure 5.5 – Hétérogénéité de la granulométrie des blocs et du remplissage au mortier, barrages de Rochebut et de Chazilly / © ISL Olivier Lapeyre



Le progrès des moyens de reconnaissance améliore la perception des caractéristiques des matériaux en œuvre.

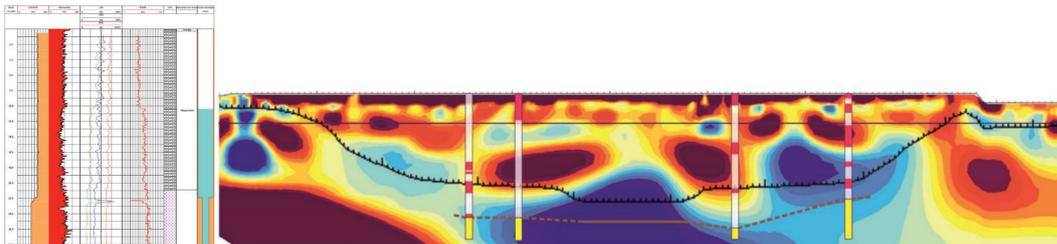
Les sondages carottés en grand diamètre sont utilement complétés par l'imagerie en forage avec repérage orienté des éventuelles discontinuités et aperçu de l'état du contact entre le corps du barrage et le rocher (figure 5.6).

Figure 5.6 – Imagerie en forage, barrage de Pont-et-Massène / © Lim Logging



Les méthodes géophysiques gagnent en précision. La tomographie sismique ou électrique (figure 5.7) fournit une image qualitative de l'ensemble du corps du barrage. Les sondes gamma réussissent parfois à fournir des profils de densité.

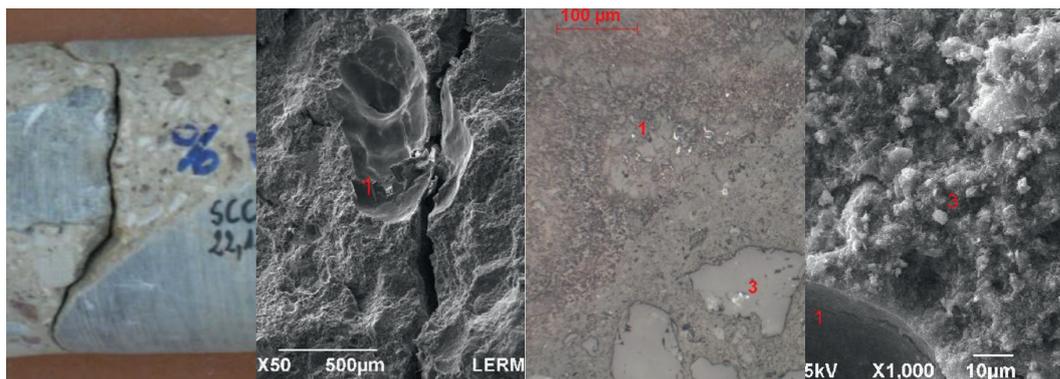
Figure 5.7 – Tomographie électrique, barrage de Pont-et-Massène / © Lim Logging et Soldata



Les barrages en maçonnerie sont suspectés de s'altérer en vieillissant, en raison de la dissolution de la chaux contenue dans le mortier de liaison des moellons, avec pour conséquences : perte de densité, augmentation des fuites, pertes de résistance mécanique.

De nombreux barrages français ont fait l'objet de mesures pour détecter un éventuel vieillissement : observation des carottes, mesure de la densité des maçonneries ou du mortier, analyse minéralogique, examen au microscope électronique à balayage pour observer la microstructure du mortier (figure 5.8). L'évaluation du vieillissement, croisant ces différentes approches, demeure du domaine de l'expertise, pour faire le tri entre l'hétérogénéité initiale du matériau et l'éventuelle évolution par vieillissement.

Figure 5.8 – Vieillessement : examen multi-échelle / © LERM



2.3 Les projets de réhabilitation et confortement

Plusieurs barrages-poids français ont fait l'objet d'opérations de réhabilitation et de confortement. Les motivations de ces opérations ont été variées ; seules celles destinées à améliorer les conditions de stabilité (hors crue) sont décrites ici.

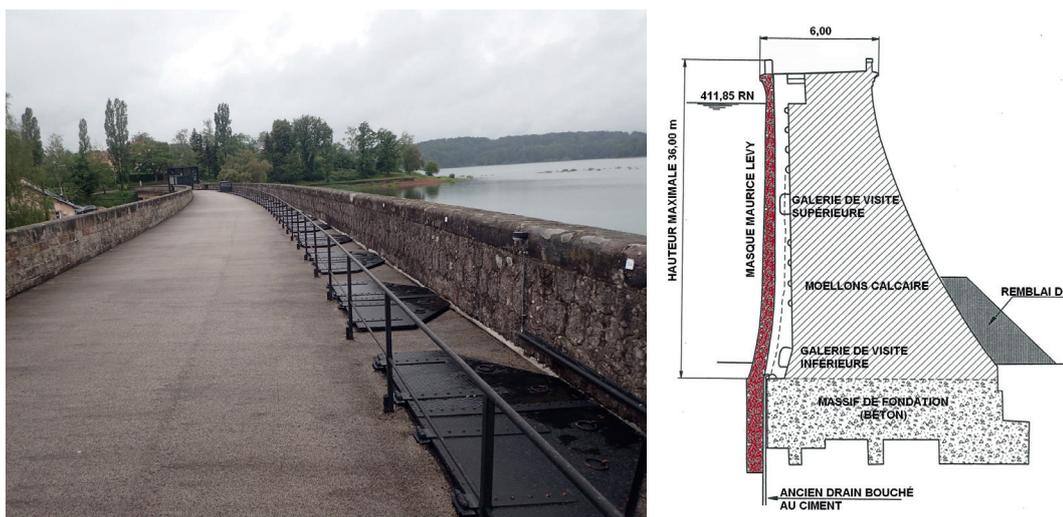
Au début du 20^e siècle, plusieurs ouvrages ont été confortés pour donner suite aux accidents de Bouzey et Grosbois : glissement sur la fondation ou instabilité dans le corps du barrage, avec comme cause première le développement de pressions interstitielles. Les confortements ont consisté à créer un écran étanche amont (« masque Lévy ») ou à conforter mécaniquement le barrage : contreforts, remblai aval.

Depuis une petite vingtaine d'années, plusieurs opérations de confortement nécessaires ont été mises en œuvre grâce aux recommandations françaises, qui ont permis de mieux mettre en évidence les barrages les plus sensibles.

2.3.1 Étanchement du parement amont : du masque Lévy aux matériaux plastiques

Plusieurs barrages en maçonnerie trop élancés ont été confortés au début du 20^e siècle par la mise en œuvre d'un masque en béton non armé (figure 5.9). Cette solution est très moderne dans sa conception : elle permet la mise hors d'eau des maçonneries, et l'organisation d'une galerie de visite en pied amont ; tous les barrages ainsi équipés se sont bien comportés jusqu'à aujourd'hui. Malheureusement, elle est un peu onéreuse.

Figure 5.9 – Barrage de Ban de Champagne – Masque Maurice Lévy : une solution d'étanchement centenaire / © ISL



En France, comme ailleurs, le développement des géomembranes a remis au goût du jour cette possibilité de protéger les maçonneries contre les percolations.

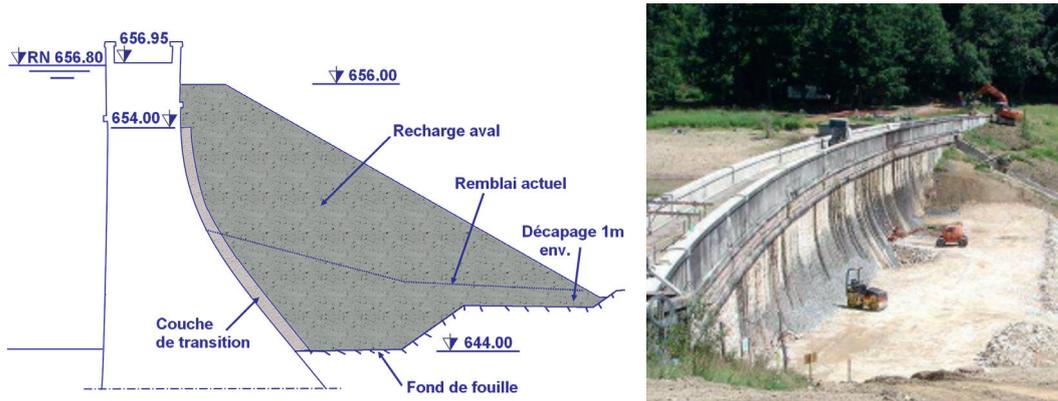
Notons que les techniques rustiques conservent leur intérêt : la reprise des joints des maçonneries du parement amont, complétée par des injections de peau, produit de bons résultats, sous réserve d'être réalisée par des ouvriers qualifiés.

2.3.2 Confortement par l'aval : contreforts, remblais

Lorsque les barrages ne sont pas trop hauts, et lorsque l'emprise est disponible, l'adjonction d'un remblai permet d'apporter une poussée stabilisatrice et celle d'un massif en béton contre le barrage de diminuer les sollicitations dans le corps de celui-ci et en fondation.

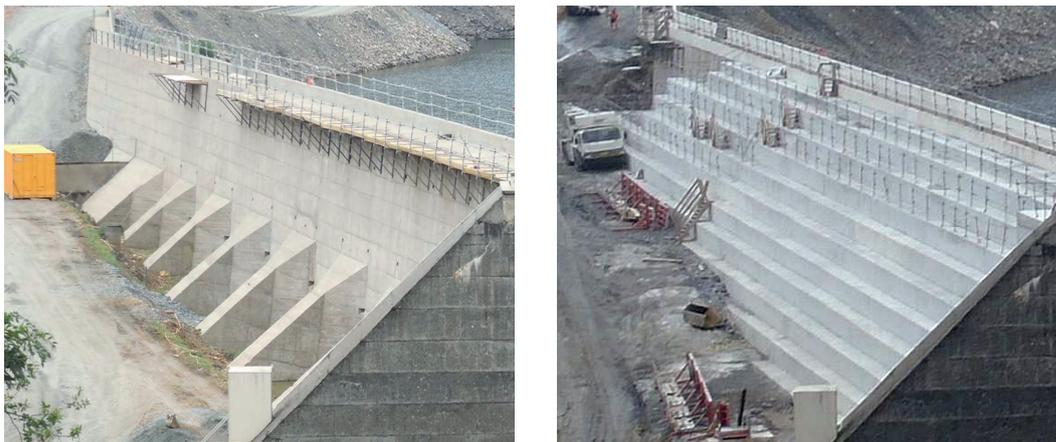
Le confortement par remblai aval en enrochements a été pratiqué sur six barrages au cours des 35 dernières années. Pour le remblai aval, il est recommandé d'utiliser un tout-venant rocheux 0/400 mm. Cela permet, d'une part, de limiter la pente du remblai en comparaison d'un matériau terreux et, d'autre part, d'obtenir une plus grande force stabilisatrice en comparaison d'un enrochement plus massif.

Figure 5.10 – Barrage de La Gimond – Profil type et vue pendant travaux / © TRACTEBEL



Des confortements par contreforts ou massif-poids en béton ont été régulièrement mis en œuvre, toujours avec le souci d'assurer le caractère monolithique du nouvel ensemble.

Figure 5.11 – Barrage de Rassisse, confortement par massif-poids (à gauche : avant ; à droite : après confortement) / © ISL – Anthony Dols



2.3.3 Précontrainte

La France a été pionnière dans l'utilisation de la précontrainte, en particulier grâce aux contributions d'Eugène Freyssinet et d'André Coyne (cf. encadrés ci-après).

L'usage de la précontrainte dans le domaine des ouvrages hydrauliques est, aujourd'hui, toujours d'actualité pour les ouvrages neufs. Des progrès notables ont été réalisés et des innovations ont été concrétisées dans le domaine des armatures, de la protection contre la corrosion, de la mise en tension et de l'instrumentation. Les pathologies identifiées et analysées ont conduit à l'amélioration des procédés.

Les ancrages géotechniques précontraints par post-tension peuvent offrir une réponse adaptée à la stabilisation, au confortement, à la réhabilitation ou à la surélévation de barrages en minimisant l'incidence sur l'exploitation du réservoir, les impacts environnementaux notamment liés à la vidange de la retenue, tout en maîtrisant le coût des travaux.

■ EUGÈNE FREYSSINET (1879–1962)



Eugène Freyssinet
© Association Eugène Freyssinet

Le 2 octobre 1928, Eugène Freyssinet, après avoir promu la vibration mécanique et l'étuvage du béton, dépose, avec son confrère Jean Seaille, un brevet d'invention relatif à un « procédé de fabrication de pièces en béton armé ». Ce brevet décrit un système de pré-tension par fils adhérents, utilisant des aciers durs à limite élastique élevée, adapté à la construction de poutrelles, tuyaux et traverses en béton.

Dans la période 1925–1930, la construction par la « Société Limousin et Compagnie – Procédés Freyssinet » du Pont Albert-Loupe franchissant l'Élorn à Plougastel, doté de trois arcs en béton dont la portée avoisine 136 m (record du monde à cette date) conforte les expérimentations d'Eugène Freyssinet relatives à la quantification des déformations différées du béton.

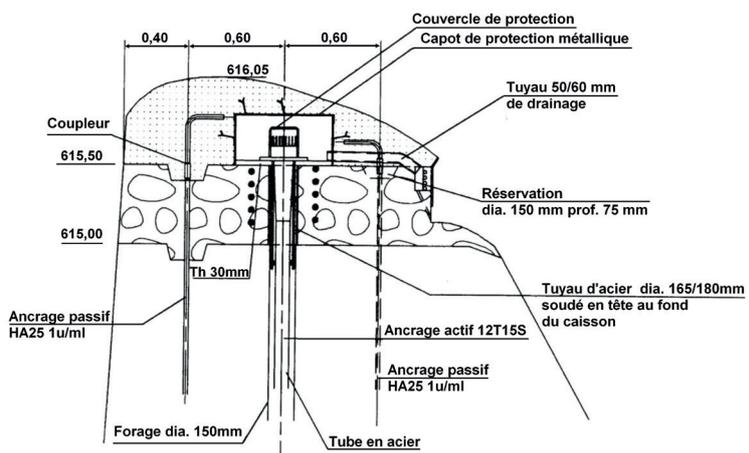


Barrage de Beni Bahdel
© Association Eugène Freyssinet

Entre 1937 et 1941, Eugène Freyssinet développe le vérin plat et l'utilise, en Algérie, en partenariat avec la société Campenon Bernard, pour comprimer le radier du barrage des Portes de Fer et pour appliquer, en prenant appui sur des contreforts construits à cette fin, un effort stabilisateur à la base du barrage de Beni Bahdel dont la surélévation a été entreprise. Eugène Freyssinet emploiera cette technologie sur de nombreux autres ouvrages dans le monde. Le 26 août 1939, Eugène Freyssinet dépose un brevet relatif aux « systèmes de câbles sous tension destinés à la réalisation de constructions en béton précontraint ». Ce procédé utilise des armatures constituées de fils parallèles, mises en tension par des vérins spéciaux puis bloquées par des cônes d'ancrage.

Plusieurs opérations de confortement de barrages-poids (Lampy, Pontabouland), ou de culées-poids de barrages-voûtes (Rassisse, Laouzas, Pont-du-Roi, Bazergues, Bimont, Choranche) par la mise en œuvre de tirants actifs ont été réalisées en France ces dernières années [Veylon, 2018]. L'usage de la précontrainte pour ces ouvrages dont la durée de vie est longue a nécessité une conception appropriée, incluant notamment : le choix adapté des nuances d'acier, la bonne prise en compte des effets de relaxation, la maîtrise des efforts locaux sur les ouvrages de structure, la protection contre la corrosion pour des durées d'utilisation dépassant 100 ans, l'instrumentation des têtes pour permettre la surveillance, et la possibilité de remise en tension si nécessaire.

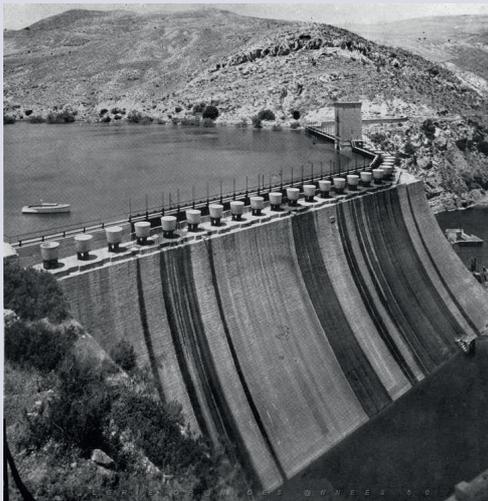
Figure 5.12 – Barrage de Pontabouland – coupe de la crête du barrage / © EDF



■ ANDRÉ COYNE (1891–1960) ET LA PRÉCONTRAINTE



© Jean Coyne



Barrage de Cheurfas

© www.tenes.info

André Coyne fut, pendant près de trente années, un acteur majeur dans le domaine de la conception et de la construction des grands ouvrages hydrauliques, soit environ 100 barrages dont 55 voûtes. Sa profonde conviction « chaque ouvrage doit être dessiné pour s'adapter étroitement au site tout en minimisant son coût et en préservant sa beauté architecturale » donna une impulsion exceptionnelle au domaine des barrages.

André Coyne fit la connaissance d'Eugène Freyssinet sur le chantier du pont Albert-Loupe. De leurs échanges, naquit l'idée d'utiliser la précontrainte dans les ouvrages hydrauliques.

Le 1^{er} juillet 1929, André Coyne déposa un brevet synthétisant plusieurs idées nouvelles relatives à l'utilisation de câbles précontraints de tension de service élevée, ancrés dans la fondation et destinés à stabiliser des barrages.

En 1931, il mit en œuvre cette idée, pour la première fois, sur le site du barrage des Cheurfas, en Algérie, où 37 tirants constitués de câbles tendus avec un effort de 1 000 tonnes ont été installés dans le cadre de la surélévation de l'ouvrage.

Entre 1930 et 1935, la construction du barrage de Mairèges, maillon de l'équipement hydroélectrique de la Haute-Dordogne, et premier barrage-voûte à double courbure en Europe, donne à nouveau à André Coyne l'opportunité de mettre en œuvre des câbles précontraints par post-tension dont la traction atteint 500 tonnes. Ces ancrages apportent un effort stabilisateur à la culée rive gauche qui héberge l'évacuateur de crues.

En France, ce type d'ancrages sera notamment utilisé par André Coyne sur la voûte multiple de Saint-Michel, les culées du barrage de Maury, ou pour renforcer les appuis des barrages de Castillon et de Chaudanne.

D'autres ouvrages conçus par André Coyne, sur le territoire français, ont également recours à la précontrainte pour des motifs divers, et notamment les barrages de Bort-les-Orgues, l'Aigle, Chastang, Grangent et Yaté en Nouvelle-Calédonie,...

André Coyne a été président de la CIGB (1946–1952).

2.3.4 Une opération exceptionnelle : le confortement du barrage du Chambon

[Chulliat, 2013] présente le cas du barrage du Chambon, barrage-poids de hauteur 90 m, soumis à un phénomène d'alcali-réaction important, susceptible d'affecter alors son intégrité sous séisme.

Une première campagne de confortement a été conduite dans les années 90 : injection de fissures, comblement de l'ancien évacuateur vanné (remplacé par un évacuateur souterrain), membrane d'étanchéité et sciage.

Le diagnostic de l'ouvrage conduit entre 2007 et 2010 sur la base de reconnaissances spécifiques et d'un calcul aux éléments finis calé sur l'auscultation, a notamment mis en évidence : la poursuite du gonflement, sans ralentissement ; la formation d'un état de contraintes internes à certains égards défavorables ; la fissuration évolutive.

Cela a conduit à une seconde campagne de confortement, récemment achevée, avec :

- mise en place de 415 tirants précontraints horizontaux traversant la structure d'amont en aval, avec dispositif de réglage de la tension ;
- complétés par un filet en fibres de carbone en parement amont, dont la fonction est de retenir les petits blocs non épinglés par les tirants et de répartir l'effort d'arrachement des tirants ;
- 7 nouveaux traits de scie au câble diamanté en diamètre 16 mm ;
- le remplacement de la membrane d'étanchéité de 1990, qui a dû être déposée pour permettre la réalisation des travaux ; opération accompagnée de mesures de vieillissement sur la membrane de 1990.

Figure 5.13 – Barrage du Chambon, travaux de 2014 /

© EDF – François Taule



3. UNE RECHERCHE ACTIVE

3.1 Thèmes d'actualité

En ce qui concerne les barrages-poids, les thèmes d'actualité en France sont nombreux. On peut par exemple citer :

- à la frontière entre barrages-poids et barrages en remblai : les barrages en remblai dur et sols enrichis (cf. § 3.2) ;
- justification des barrages-poids au séisme (cf. § 3.3) ;
- justification des barrages en béton sous crues extrêmes, y compris avec déversement par-dessus la crête ;
- modèles numériques avec couplages (hydromécanique, thermomécanique) ;
- alcali-réaction et réaction sulfatique interne : compréhension des mécanismes, modélisation ;
- amélioration de la compréhension et de la justification des paramètres mécaniques à l'interface barrage-fondation ;
- évaluation des apports des calculs probabilistes, et des approches tenant compte des incertitudes ;
- compréhension du comportement barrages – ancrages et justification des confortements par ancrages passifs ;
- méthodes de reconnaissance (cf. notamment § 2.2).

Un focus est fait ci-dessous concernant deux sujets actifs depuis de nombreuses années et toujours porteurs de nouveautés : le remblai dur et la modélisation numérique des barrages-poids.

3.2 Les barrages en remblai dur et en sols enrichis

En 1992, dans la continuité d'essais et de réflexions engagés dans le cadre du programme de recherche BaCaRa, Pierre Londe et Michel Lino proposaient la conception du barrage en remblai dur symétrique à masque (RDSM). En 2016, plus de 50 barrages de ce type ont été construits dans le monde, dont certains sont illustrés figure 5.14.

Figure 5.14 – Quelques barrages en Remblai Dur de technologie française



Marathia (Grèce) – 1993 :
1^{er} barrage remblai dur ; H = 31 m
© M. Dunstan



Koudiat Acerdoune (Algérie) – 2009
H = 121 m
© TRACTEBEL



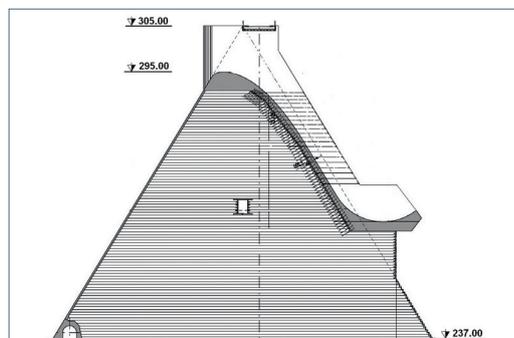
Saf-Saf (Algérie) – 2010
H = 36 m
© ISL Thibault Guillemot



Rizzanèse (Corse) – 2012
H = 41 m
© EDF



Wadi Umti (Oman) – 2014
H = 23 m
© Artelia



Mellegue (Tunisie) en construction
H = 70 m
© ISL

Le succès de cette innovation française tient à des avantages identifiés dès 1992.

Avantage 1 : le RDSM peut être construit sur des fondations médiocres

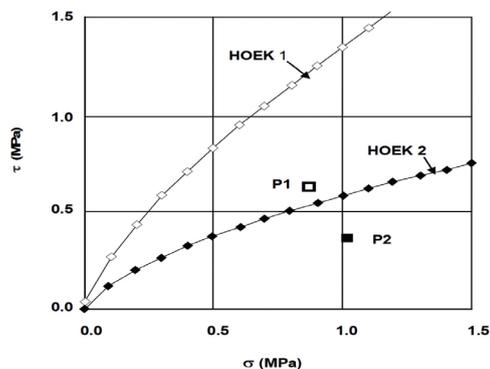
Le diagramme de la figure 5.15 illustre des courbes typiques d'un rocher de bonne qualité (Hoek 1) et d'un rocher de qualité médiocre (Hoek 2). Il place sur ce diagramme les sollicitations imposées par un barrage-poids classique (P1) et d'un RDSM (P2). Le diagramme de sollicitation de la fondation est beaucoup plus homogène que celui d'un barrage-poids classique et, de plus, relativement peu différent entre barrage vide et barrage plein.

Figure 5.15 – Stabilité des barrages poids sur fondation médiocre (h = 100 m)

Ce résultat théorique est confirmé par la pratique. Des RDSM ont pu être construits sur des fondations de marne tendre, des grès peu cimentés, de granite altéré, de siltites et argilites.

Avantage 2 : le RDSM utilise les matériaux du site, et peu de ciment

La résistance à la compression requise pour le remblai dur est faible, quelques MPa, et les sollicitations de cisaillement sont faibles. Cela permet d'envisager des granulats de qualité inférieure à ceux d'un BCR classique : alluvions avec une teneur significative en fines ; roches altérées, roches tendres. Le dosage en ciment peut également être réduit. Ce principe de conception économique a été retenu, dès 1995, pour l'ouvrage du Rizzanèse en Corse qui n'a été finalement construit qu'en 2012 mais conformément au projet d'origine.



Avantage 3 : le RDSM est bien adapté aux sollicitations exceptionnelles

La résistance au séisme et à des niveaux d'eau exceptionnels est bonne : en effet, le profil trapézoïdal évite, sous sollicitations extrêmes, de trop modifier les sollicitations de cisaillement. Pendant les travaux, une éventuelle crue submergeant le barrage en cours de construction est bien tolérée.

Le succès du barrage RDSM a conduit à élargir les réflexions vers d'autres matériaux de construction. Avec, en particulier, la réutilisation des matériaux fins (limons, argile) additionnés de liant pour former un matériau résistant : un vaste champ d'application pour ce type de matériau est celui des digues de protection contre les inondations.

Ce constat est à l'origine d'un projet de R&D collaboratif, « DigueElite ». Le projet rassemble des acteurs variés : instituts de recherche, maîtres d'ouvrage, ingénieries, industriels. Chacun des acteurs contribue à la recherche par des apports financiers ou en nature. L'État et les collectivités locales accompagnent l'effort de recherche en apportant une contribution financière substantielle. Ce travail a été récompensé par un prix de l'innovation lors du congrès de la CIGB à Vienne en 2018. On peut aussi se reporter au chapitre 7 § 2.9 et au chapitre 9 § 4.5.4.

Figure 5.16 – DigueElite ; essai grandeur nature / © INRAE



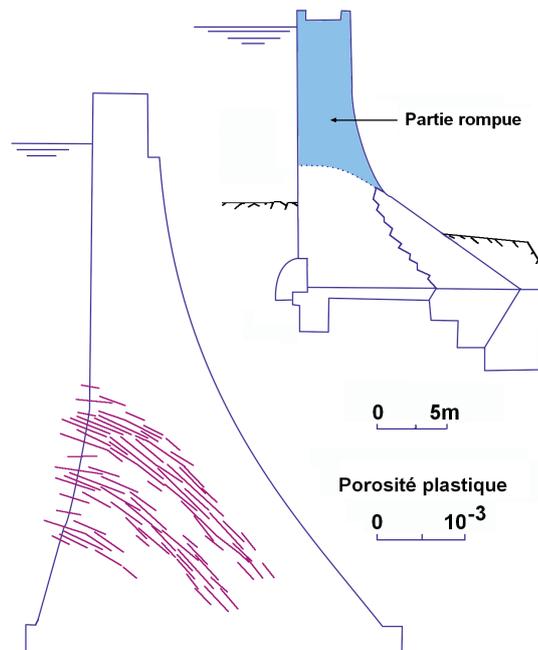
Les efforts de formulation, les essais de laboratoire et un test grandeur nature ont permis de démontrer l'intérêt : le traitement confère une cohésion et une résistance à la compression simple et confère également une résistance vis-à-vis des mécanismes d'érosion interne et externe. Les recherches et développements se poursuivent, en France (construction d'une plateforme de recherche) et au sein de la communauté CIGB (comité technique P « Barrages en remblai cimenté ») avec une contribution très active de la France.

3.3 La modélisation numérique

Figure 5.17 – Comparaison entre la fissuration estimée par un modèle poroplastique et la rupture observée sur le barrage de Bouzey

Afin de s'affranchir du choix a priori d'un plan de rupture, le développement de modèles de type poroplastiques [CFBR 1994] a été initié dans les années 90 pour représenter par exemple la rupture observée sur le barrage de Bouzey en 1895 (figure 5.17). Un tel modèle est basé sur une représentation macroscopique continue d'un milieu poreux saturé superposant un milieu mécanique et un milieu fluide en interaction :

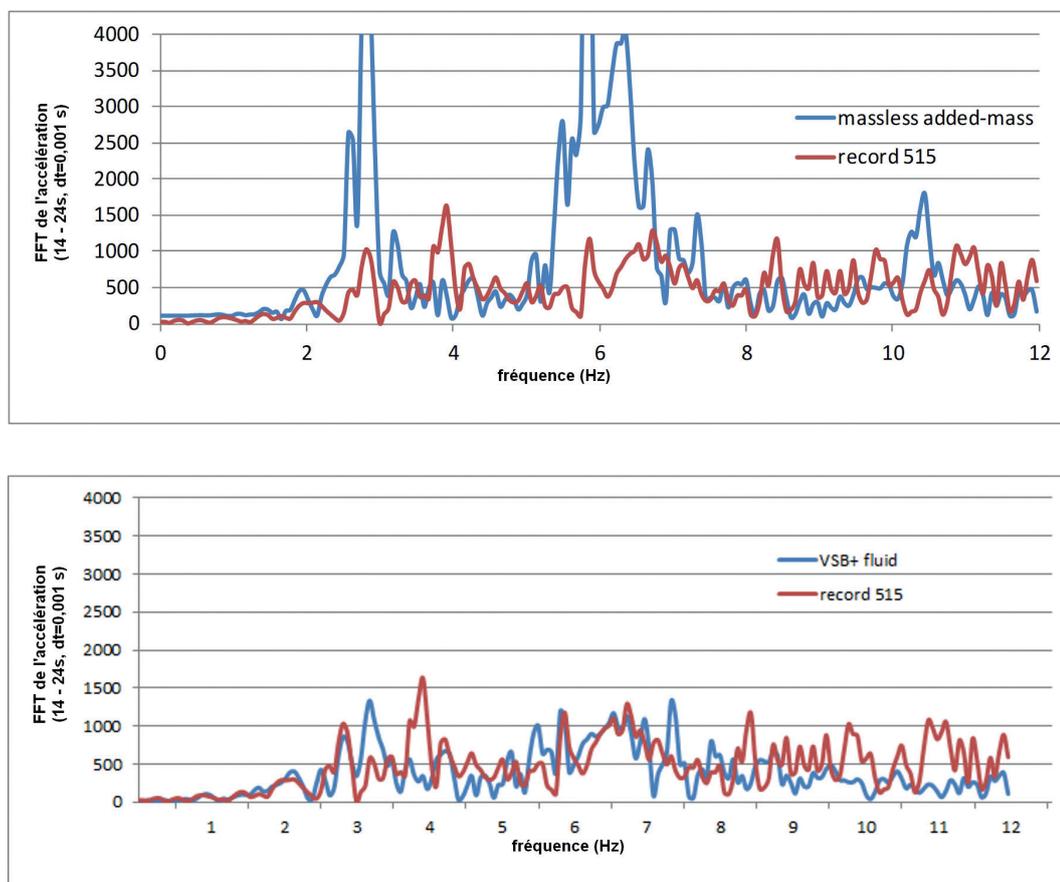
- pour la fissuration du béton, un critère de plasticité est retenu, exprimé en fonction des contraintes principales et de la pression interstitielle ;
- concernant le milieu fluide, la perméabilité varie de façon anisotropique en fonction du tenseur des déformations plastiques.



Dans le domaine du calcul au séisme des barrages en béton, un effort de développement important a été réalisé par les ingénieries françaises. Cela s'est traduit, tout d'abord, dans les années 90, avec, en particulier, le développement de méthodes simplifiées pour le prédimensionnement des barrages-poids [Tardieu, 1993] puis 20 ans plus tard, dans le cadre de la coopération franco-japonaise [Fry, 2018] sur le comportement au séisme des barrages et de leur équipement. Cette dernière a fait l'objet d'un livre [ICOLD, 2017] synthétisant les travaux et connaissances partagées lors de cette collaboration.

Dans le domaine de la modélisation numérique des barrages en béton, il a été en particulier démontré la pertinence d'utiliser des méthodes numériques avancées prenant en compte la compressibilité de l'eau, l'inertie de la fondation et des conditions de frontières absorbantes sur les bords du domaine afin de correctement représenter le comportement sous séisme du barrage japonais de Tagokura, enregistré par des accéléromètres. Ces modélisations permettent d'obtenir des résultats nettement plus proches des enregistrements par comparaison aux modélisations conventionnelles (avec fondations sans masse et masse ajoutée de Westergaard), comme le montre la figure 5.18.

Figure 5.18 – Comparaison des accélérations horizontales, mesurées (en rouge) et calculées (en bleu) pour deux calculs : en haut, le calcul classique (fondation sans masse ; retenue représentée par des masses ajoutées), en bas un calcul moderne (avec : compressibilité de l'eau, inertie de la fondation conditions de frontières absorbantes)



4. RÉFÉRENCES

- BaCaRa, Projet National 1988–1996 (1996) – Le Béton Compacté au Rouleau / Les Barrages en BCR, Presses des Ponts et Chaussées.
- Boinay V., Frossard E. (2009) – Koudiat Acerdoune Dam, Tackling complex geology and design in seismic area, Hydropower & Dams.
- Bouyges B., Garnier G., Jensen A., Martin J.-P. (1988) – Construction et contrôle d'un barrage en béton compacté au rouleau (BCR), un travail d'équipe, CIGB congrès de San Francisco Q62-R34.
- Carrère A., Coussy O., Fauchet B – Stabilité des barrages-poids : apports de la mécanique des milieux poreux. Annales des Ponts et Chaussées, Elsevier Science, 1990, 3^e trimestre, pp. 10-30. hal-00586561.
- Cervetti J.-L., Sichaib A., Valladié M. (2015) – Seismic design of Tabellout arched RCC Dam, Hydropower & Dams.
- CFBR (2012) – Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids. Guidelines for the justification of the stability of gravity dams. http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2012_poids.pdf
- Chulliat O. Taquet B., Boutet J.-M. – Le confortement du barrage du Chambon. Colloque CFBR 2013. Chambéry, 4-5 décembre 2013.

- Deroo L. – Justification de la stabilité des barrages-poids : pratiques actuelles. CFBR, colloque 2019 ; doi : 10.24346/cfbr_colloque2019_b11
- Fry J.J., Matsumoto N. (2018) – Validation of Dynamic Analyses of Dams and their Equipments, CRC Press/Balkema, ISBN 9780429491160.
- Guérinet M. – Les barrages en BCR de hauteur moyenne. Point de vue d'un entrepreneur / Medium height dams using RCC. A building contractor's point of view. Dans : Travaux, n. 765 (juin 2000).
- Lecocq A., Theoleyre F., Cervetti J.L. (2019) – SOUAPITI: A large regional hydropower project under construction in Guinea, Conference AFRICA 2019.
- Lignier P., Delmas S. (2020) – Confortement des barrages en maçonnerie par recharge aval, CIGB, congrès de New Dehli.
- Mine E., Feraru D., Vibert C., Ianos S. (2015) – Impacts des imprévus de la fondation sur un grand barrage. GIBE III, colloque CFBR.
- Neyrincx N., Bonelli S. et al. (2018) — DigueElite: Overflow resistant lime treated soils for dikes and earthdams. CIGB, congrès de Vienne, prix de l'innovation n° 29.
- Royet P., Noret C., Brunet C., Cochet D., Lino M. (2003) – Synthèse sur le vieillissement et la réhabilitation des barrages français en maçonnerie. CIGB, congrès de Montréal, Q82-R41.
- Royet P., Laugier F., Rosin-Corre N., Agresti P., Salmi A. (2013) – Le parc des barrages français en maçonnerie. Techniques de reconnaissance et de confortement. Colloque CFBR « Modernisation des barrages », 4-5 décembre, Chambéry.
- Royet P., Peyras L. (2013) – French Guidelines for Structural Safety of Gravity Dams in a Semi-probabilistic Format. 9th ICOLD European Club Symposium « Sharing experience for safe and sustainable water storage », 10-12 April, Venice.
- Veylon G., Royet P., Morel F., Piron A., Salmi A. (2018) – Utilisation de tirants actifs pour le confortement des barrages. Retour d'expérience et études de cas. Colloque CFBR 2018 : « Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues ». 27-28 novembre, Chambéry.
- Barrage du SEP, revue Travaux n° 702 d'octobre 1994.
- Barrage de Petit-Saut, revue Travaux n° 688 de juin 1993.

CHAPITRE
6

BARRAGES- VOÛTES

Le parc français est richement doté en barrages-voûtes, avec une centaine d'ouvrages, principalement construits entre 1935 et 1980.

1. LE DÉVELOPPEMENT DES BARRAGES-VOÛTES EN FRANCE

1.1 Les précurseurs

On trouve trace d'un premier barrage arqué en Martinique : haut de 8 mètres et large d'une quarantaine de mètres, le barrage de Latouche, aujourd'hui totalement engravé, présente une courbure marquée vers l'aval et aurait été construit en 1716. C'est le barrage Zola, situé à proximité d'Aix-en-Provence et encore en service aujourd'hui, qui marque l'avènement de ce type d'ouvrages en métropole. D'une hauteur de 43 m, mis en eau en 1852, il est construit en maçonnerie. Même si la formule du tube était déjà établie à l'époque, expérimentalement par Mariotte en 1673 et démontrée par Navier en 1826, il semble que l'ouvrage n'ait été dimensionné qu'en considération de la stabilité au renversement des consoles et prise en compte forfaitaire des effets d'arcs.

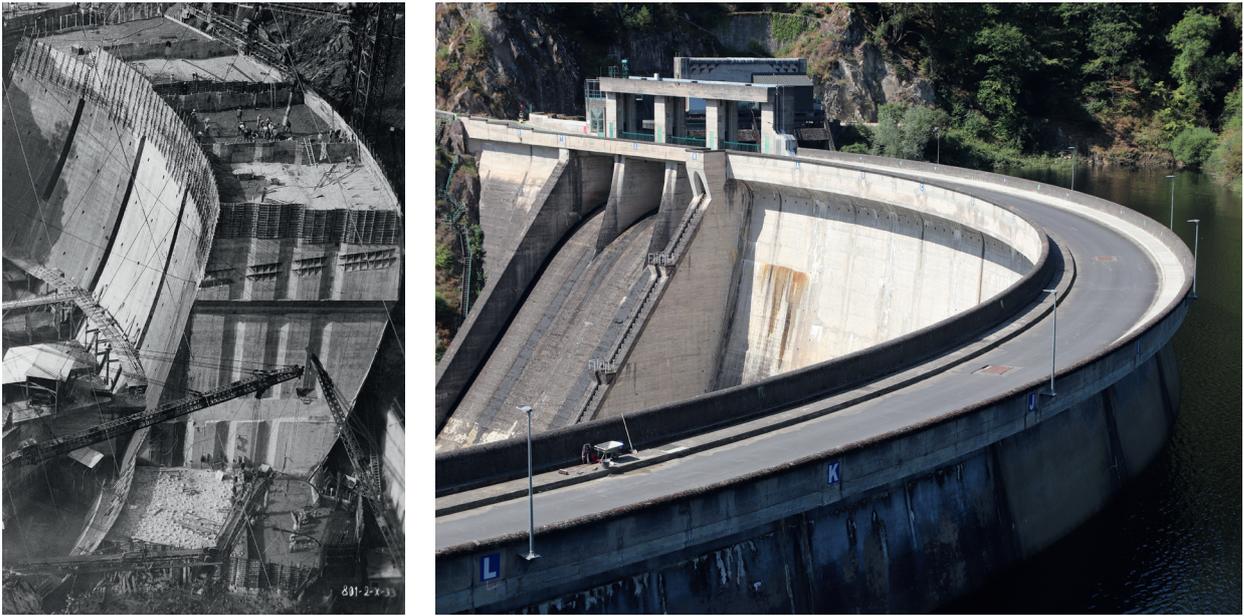
En réalité, l'entrée des barrages-voûtes sur la scène française se fait avec le petit barrage de Savenay, entre Nantes et Saint-Nazaire, construit en 1917 par l'armée américaine qui venait de s'engager dans la première guerre mondiale, pour fournir en eau un hôpital militaire. C'est cet ouvrage modeste à la forme inédite en France, construit dans ce nouveau matériau qu'était encore le béton, qui va, dans les années qui suivent, passionner les ingénieurs de l'État, alors en charge du développement hydroélectrique de la France. Parmi eux, André Coyne, chargé du suivi de son auscultation, s'en inspire quand il conçoit le barrage de Pont-Rolland en Bretagne, une voûte très mince pour « tester des taux de fatigue élevés ».

Avec l'équipement de la Truyère, dans le Massif central, c'est le barrage de la Bromme (42 m) mis en service en 1932 qui marque véritablement le début de la phase de construction des barrages-voûtes hydroélectriques. Le barrage de Marèges (H = 90 m, 1935), qui le suit de peu, sera la référence pour tous ceux qui vont suivre. Sur cet ouvrage à double courbure, André Coyne a notamment développé la méthode de calcul par arcs plongeants. L'ouvrage se distingue par plusieurs innovations : une forme typique des voûtes à double courbure (avec d'ailleurs un système de béquilles pour assurer l'équilibre à vide), un évacuateur de crues à saut de ski, une culée équilibrée par des tirants actifs...

1.2 Les voûtes dans le programme d'électrification français

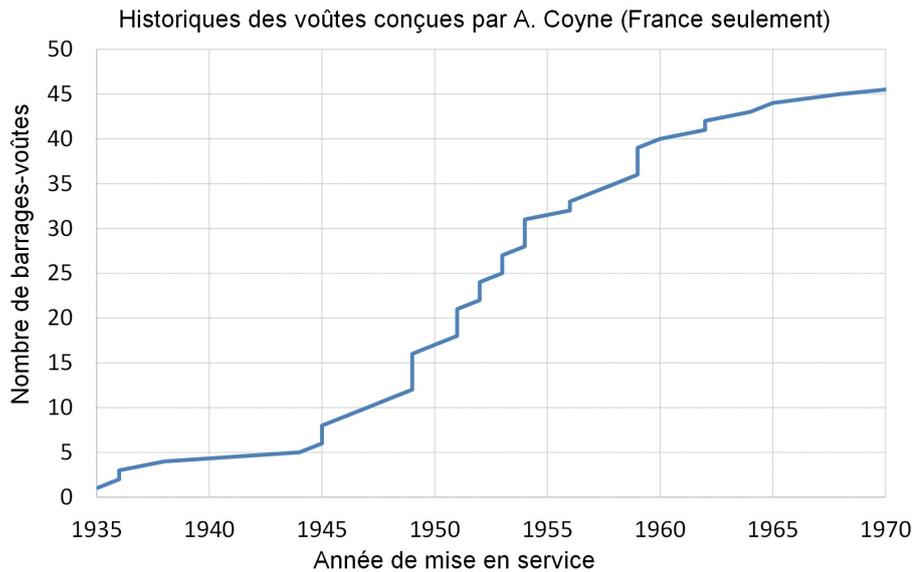
Commencé avant la seconde guerre mondiale, et poursuivi tant bien que mal pendant l'occupation, le programme de développement hydroélectrique du pays reprend à marche forcée dès 1946 avec la création d'Électricité de France (EDF). Beaucoup de sites se trouvent en montagne, dans des vallées relativement étroites où les conditions tant topographiques que géotechniques sont favorables aux ouvrages en béton, en particulier aux voûtes. L'expérience acquise à Marèges est mise à profit pour la conception et la construction de très nombreux aménagements. Ce développement se fait, principalement, à travers la coopération entre les services d'EDF et du bureau d'ingénieurs conseils Coyne et Bellier créé en 1947 par André Coyne précisément dans ce but.

Figure 6.1 – Barrage de Marèges / © SHEM & SHEM-Sophie Le Scaon



La figure 6.2 présente la progression du nombre de mises en service des voûtes conçues sous la direction de cet ingénieur, entre 1935 et 1973 ; quelques-uns de ces ouvrages ont pour but l’alimentation en eau des villes, mais la très grande majorité s’intègre dans les aménagements hydroélectriques ; il conviendrait pour être complets d’y ajouter les voûtes conçues par d’autres organismes ; on voit que le rythme a atteint presque 3 ouvrages par an entre 1950 et 1960.

Figure 6.2 – Année de mises en service des barrages-voûtes conçus sous la direction d’André Coyne



■ ANDRÉ COYNE (1891–1960)

Diplômé de l'École Polytechnique et de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, il participe à la guerre de 1914-1918, notamment en qualité de pilote de guerre en 1917. Sa carrière professionnelle commence à Brest, dans les services de l'État en charge des ouvrages maritimes. Nommé membre de la commission des barrages de grande hauteur du Conseil général des Ponts et Chaussées vers 1925, il intervint dans le suivi de l'auscultation du petit barrage-voûte de Savenay (1925), construit en 1917 par l'armée américaine, près de Donge. C'est pour lui l'occasion de découvrir la technologie des barrages-voûtes qu'il perçoit comme une solution très prometteuse. Désormais sa carrière va s'inscrire dans la démarche de la politique énergétique en France, visant à remplacer progressivement le charbon par l'énergie hydroélectrique (la houille blanche), ceci jusqu'aux années 70. Nommé chef du service spécial d'aménagement de la Haute Dordogne en 1928, il conçoit le barrage de Marèges, qui, à cette époque, est le plus grand barrage-voûte d'Europe. Le grand mérite d'André Coyne est d'avoir apporté à cette réalisation de l'ordre et de la simplicité en affirmant des principes dont il ne se départit pas jusqu'à la fin de sa carrière : innovations prudentes fondées sur l'observation et la mesure des précédents, optimisation de l'ensemble barrage-ouvrages annexes, recherche de la simplicité des formes facilitant la construction et réduisant les délais et les coûts.

Parallèlement à son rôle direct dans l'aménagement de la Dordogne, André Coyne prend la direction du Service Technique des Grands Barrages, nouveau service ayant 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... ». André Coyne est également professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Lorsqu'est déclarée la seconde guerre mondiale, il recrute ses élèves comme stagiaires sur le chantier de construction de barrage de l'Aigle dans le Massif central, pour leur éviter la déportation. Ce chantier avancera d'ailleurs à petite vitesse, de façon à n'être terminé qu'à la fin de la guerre. La guerre terminée, l'équipement hydroélectrique du pays reprend, avec la création d'EDF. André Coyne quitte une haute position dans l'administration française pour se lancer dans une nouvelle aventure humaine, en fondant en 1947 le cabinet d'ingénierie ACJB, s'entourant d'une toute



© Jean Coyne

jeune équipe partiellement issue de ses élèves de l'École des Ponts et Chaussées. Ses premiers projets seront dédiés aux aménagements hydroélectriques d'EDF, à commencer par ceux commencés pendant la guerre dans le Massif central. La plupart sont des barrages-voûtes, dessinés, calculés et construits à raison de deux à trois par an. Vont s'y ajouter des projets de barrages à voûtes multiples, puis des ouvrages en remblai, tirant profit des expériences américaines. Le domaine d'intervention d'André Coyne va s'élargir, d'abord aux ouvrages destinés à d'autres usages que l'hydroélectricité en France, puis à l'étranger (Portugal, Maghreb, Afrique du Sud, Chine...).

La réputation d'André Coyne a vite dépassé l'Hexagone, grâce notamment à son implication dans la création, en 1928, puis l'animation de la Commission Internationale des Grands Barrages, dont il fut le président de 1946 à 1952.

Violoniste amateur virtuose, André Coyne avait très tôt inventé les capteurs à corde vibrante et créé la société Télémac en charge de leur fabrication. Il vécut quelques mois avant sa disparition la catastrophe de Malpasset, en fin 1959, qui fera plus de 400 victimes, dont il ne connaîtra d'ailleurs pas les raisons précises. Ses dernières recommandations à ses collaborateurs seront de mettre tout en œuvre afin d'élucider ce qui à ses yeux restait un mystère, ce qu'ils feront effectivement dans les années suivantes.

Dans cette série, le plus haut barrage est celui de Tignes dans les Alpes (H = 180 m, 1952).

Figure 6.3 – Barrage de Tignes : la plus haute des voûtes françaises (180 m) /

© Alain Pellorce



À partir de 1970 le rythme se ralentit notablement, car le parc des sites favorables approche de la saturation. Les dernières voûtes construites seront Vouglans dans le Jura (H = 130 m, 1968), Laparan dans les Pyrénées (H = 106 m, 1985), et enfin Puylaurent dans le Massif central (H = 73 m, 1996), dont la fonction hydroélectrique n'est que marginale.

Figure 6.4 – Barrage de Puylaurent, dernière voûte construite en France en 1996 /

© EDF – Claude Fougeirol



1.3 L'architecture des voûtes françaises

Un barrage n'est jamais invisible, il est un geste fort qui se doit d'être beau à l'échelle de la nature à laquelle il se mêle. La recherche de formes pures n'est pas contradictoire, au contraire, avec l'efficacité structurale. Certaines réalisations sont emblématiques en la matière. Un exemple en est fourni par le barrage de Roselend (H = 150 m, 1962), une improbable combinaison entre une voûte et un barrage à contreforts, considéré par beaucoup comme le plus beau barrage du monde.

Figure 6.5 – Barrage de Roselend : un bel exemple d'intégration dans son environnement naturel /

© Cervos/Urope



Dans un autre registre, on a cherché à bien combiner les différentes composantes d'un aménagement, comme à l'Aigle, où l'exiguïté du site a obligé à combiner l'usine hydroélectrique, collée au pied de la voûte, et l'évacuateur de crues dont le coursier et les cuillers en saut de ski couvrent l'usine : de ces contraintes résulte une indubitable réussite esthétique.

Figure 6.6 – Barrage de l'Aigle : un exemple d'intégration des ouvrages / © BETCGB



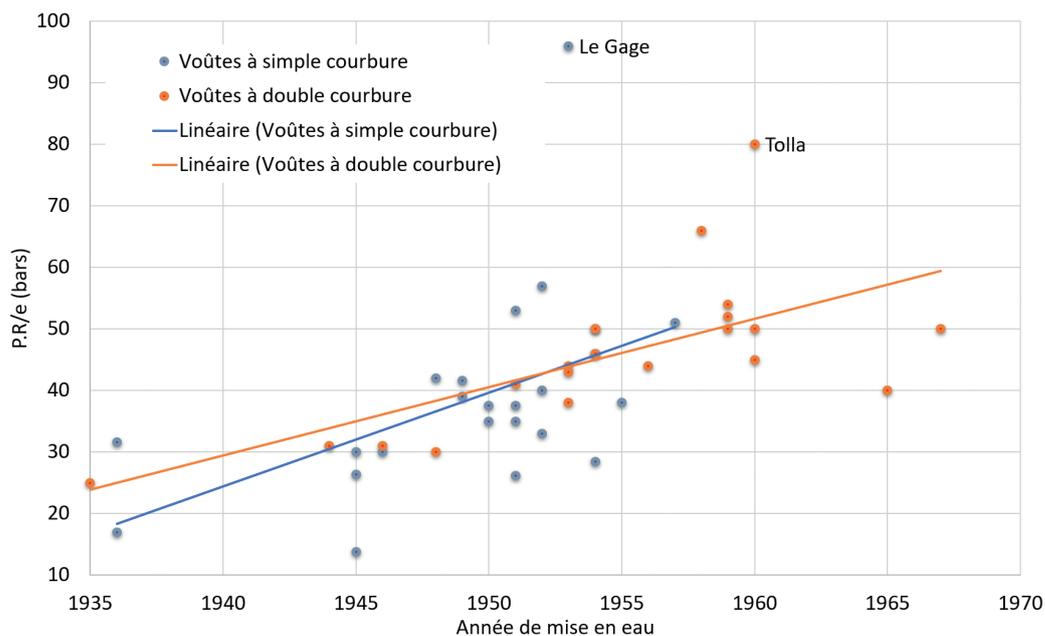
2. MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT

2.1 Évolution des méthodes analytiques

Les premières méthodes de dimensionnement des voûtes font appel à des modélisations bidimensionnelles des arcs horizontaux. Elles sont héritées de l'ingénierie des ponts, comme le rappelle André Coyne dans son cours de l'École Nationale des Ponts et Chaussées : « Un barrage-voûte reporte la majeure partie de la poussée de l'eau sur les rives par des effets d'arc. C'est comme un pont à une arche qui aurait fait quartier vers l'amont. »

La formule du tube dite « du P.R/e », démontrée par Navier en 1826, est la plus simple, pourtant la plus utilisée en prédimensionnement car elle a la grande qualité de fournir les contraintes moyennes d'arc. La figure 6.7 représente les valeurs du P.R/e pour les voûtes construites sur les projets de Coyne et Bellier de 1935 à 1967 : on constate une augmentation des valeurs de référence, entre le début de la période dans les années 30 et le milieu des années 50, où la valeur de 50 bars (5 MPa) est atteinte. Quelques excursions à des niveaux plus élevés correspondent à des ouvrages plus ou moins expérimentaux (Le Gage, Tolla) ou de conception particulière (Moulin Ribou).

Figure 6.7 – Contraintes moyennes d'arc (P.R/e) pour des voûtes françaises entre 1935 et 1970



Dès que l'épaisseur relative d'un arc devient importante, les moments de flexion sous la charge hydrostatique engendrent des tractions à l'aval en clé et surtout à l'amont près des appuis. D'où l'étape suivante qui consiste à éliminer les zones tendues qui dans la réalité sont censées ne transmettre aucun effort, par ouverture des joints ou de fissures (figure 6.8). C'est la notion, elle aussi héritée de l'ingénierie des ponts, d'arc actif inscrit dans la géométrie de l'arc réel. La détermination des zones tendues, et des contraintes extrêmes qui en résultent, se fonde sur les études de Résal et Pigeaud [Annales des Ponts et Chaussées, 1898] et est obtenue, en pratique, par une méthode graphique grâce au « rapporteur Géhin » (valide pour un arc symétrique sur appuis rigides, figure 6.9). La contrainte maximale de compression est en général voisine du double de la contrainte moyenne de l'arc géométrique de départ.

Cette méthode de dimensionnement, dite des « arcs actifs », a été utilisée pour le dimensionnement de la plupart des barrages-voûtes dans les années 50.

Figure 6.8 – Arc élastique fin et arc actif inscrit dans un arc épais

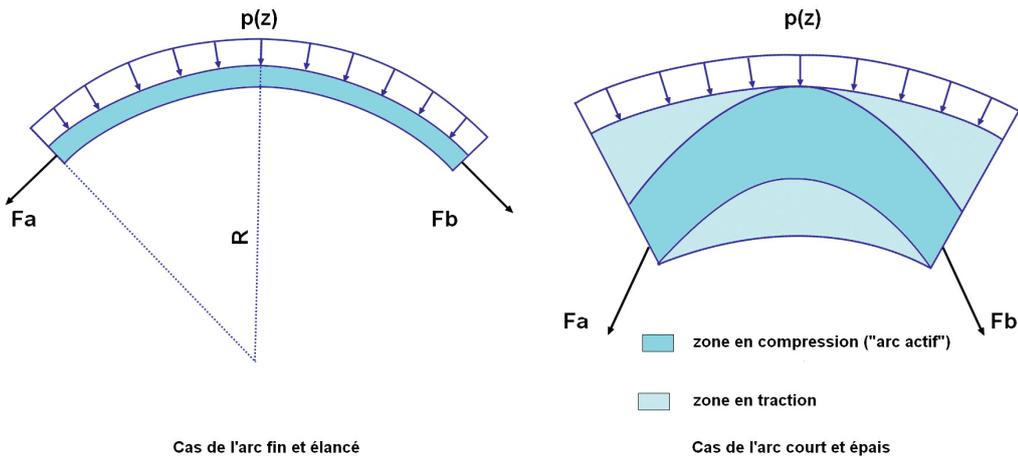
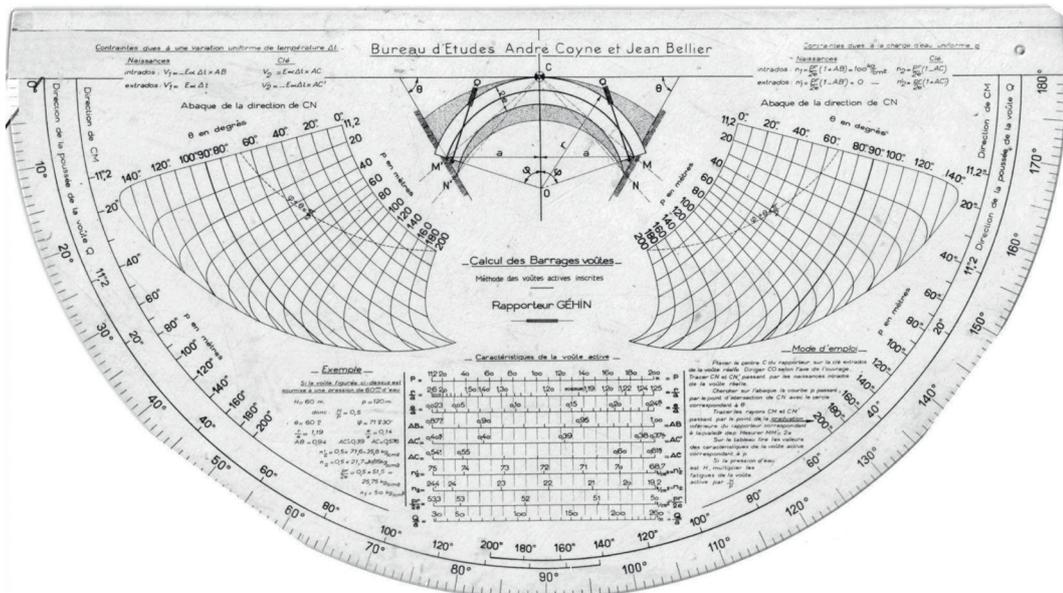


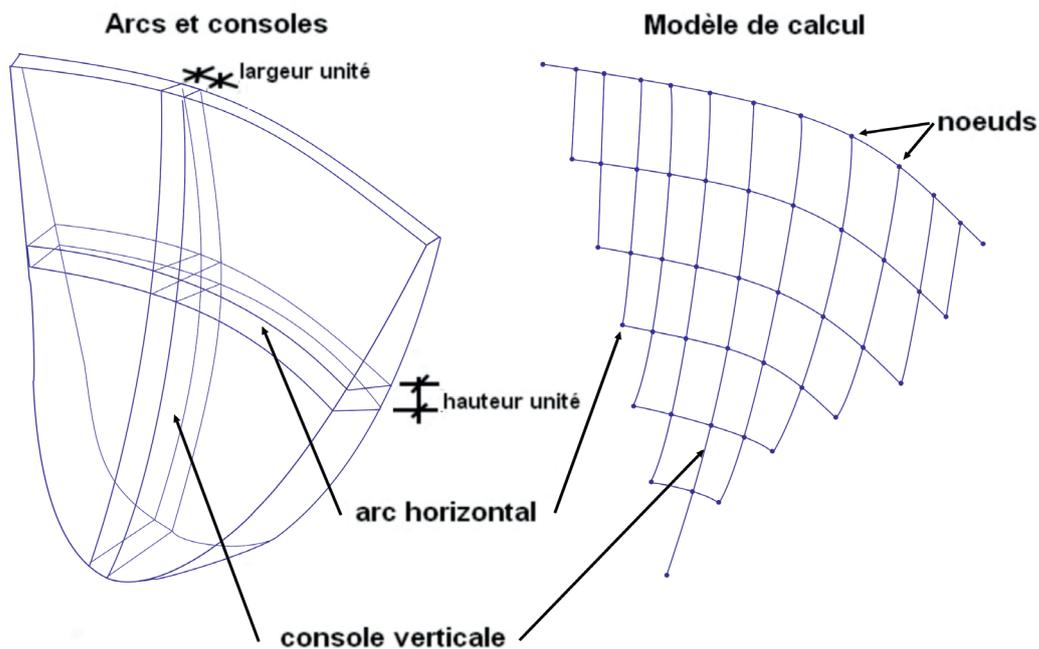
Figure 6.9 – Rapporteur Géhin utilisé en prédimensionnement dans les années 1950



Pour en finir avec les modèles bidimensionnels, il faut citer la notion d'arc plongeant : mise en œuvre pour le projet de Marèges (1935), elle résulte de l'observation de la distribution des contraintes telle qu'elle apparaissait sur le parement aval des modèles physiques de voûtes en plâtre, très utilisés à cette époque, et telle qu'elle apparaîtra plus tard avec les modèles numériques 3D. Cette méthodologie a été également mise en œuvre pour le dimensionnement du barrage de Roselend, en complément de modèles physiques en plâtre et caoutchouc.

Par la suite, les méthodes de dimensionnement utilisées en France se sont inspirées des premiers calculs d'ajustement entre arcs et console de clef, réalisés aux USA par Visher et Wagoner en 1889, suivis par Ritter (1913). Le principe consiste à répartir la charge hydraulique entre les arcs horizontaux et la console de clé, censée représenter toutes les liaisons verticales. La généralisation à un échantillonnage de plusieurs consoles verticales a conduit à la Trial Load de l'USBR (1938, figure 6.10), qui a été complétée par M. Leroy en ajustant les 6 degrés de liberté, ce que permettait le calcul par ordinateur. La première application en a été le barrage de Vouglans (H = 130 m, 1968).

Figure 6.10 – Principe et maillage de la Trial Load



À partir des années 1970, apparaît la méthode de calcul aux éléments finis, introduite dans le domaine du génie civil par O.C. Zienkiewicz. La nouvelle méthode va vite fasciner de nombreux ingénieurs et s'imposer face à tout ce qui se faisait auparavant. Cette méthode a été utilisée d'abord pour le dimensionnement des dernières voûtes françaises (Laparan, Puylaurent) puis, surtout, en support aux très nombreux projets portés par l'ingénierie française à l'étranger. Il faut notamment citer Sir, Turquie (H = 120 m, 1991) ; Gomal Zam, Pakistan (H = 133 m, 1993) ; Tekeze, Éthiopie (H = 180 m, 1998) ; Katse, Lesotho (H = 185 m, 1999) ; Xiaowan, Chine (H = 292 m, 2001) ; Berke, Turquie (H = 201 m, 2007)...

2.2 Méthodes expérimentales

En complément de l'amélioration des méthodes numériques et de l'optimisation graduelle des ouvrages par le retour d'expérience faisant passer la contrainte moyenne théorique de 25 kg/cm² (Marèges) à plus de 45 kg/cm² (La Palisse), deux ouvrages expérimentaux ont été réalisés : les barrages du Gage — 47 m achevé en 1954 — et de Tolla — 90 m terminé en 1961 (figure 6.11). Ces ouvrages exceptionnellement minces ont été dessinés de façon que la contrainte moyenne théorique soit de l'ordre du double de celle des ouvrages conçus à l'époque : environ 10 MPa pour Gage et 8 MPa pour Tolla.

Le barrage du Gage a été exploité pendant une dizaine d'années tout en étant intensément surveillé : l'apparition en novembre 1963 d'une fissure singulière faisant penser à un mécanisme de cisaillement a conduit à la réalisation d'un deuxième ouvrage positionné juste à l'amont (Gage II, figure 6.12).

Le barrage de Tolla, tel qu'initialement conçu, a connu une fissuration importante dès sa première mise en eau attribuée à la rigidité de la fondation et à la sous-estimation des effets thermiques [CIGB 1979] Un renforcement massif par des anneaux confortatifs, fondés à distance en pied aval afin de conserver une exploitation à cote basse de l'ouvrage durant les travaux, a été rapidement mis en place (figure 6.12).

Figure 6.11 – Barrage de Tolla – Forme initiale

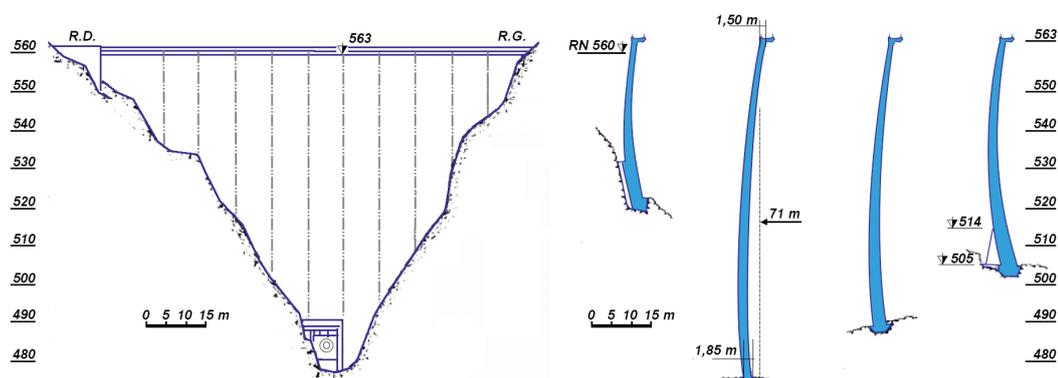
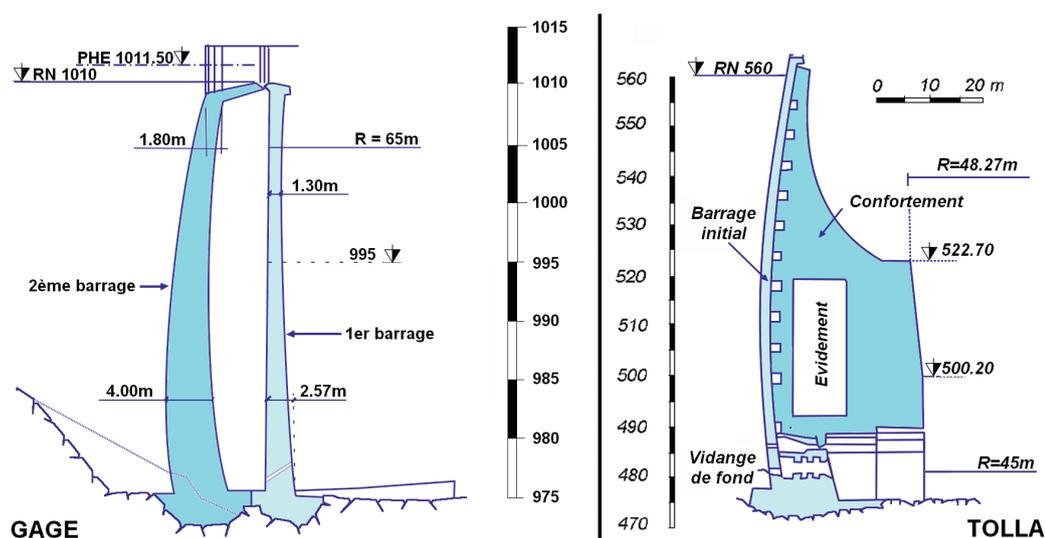


Figure 6.12 – Double voûte du Gage – Confortement du barrage de Tolla



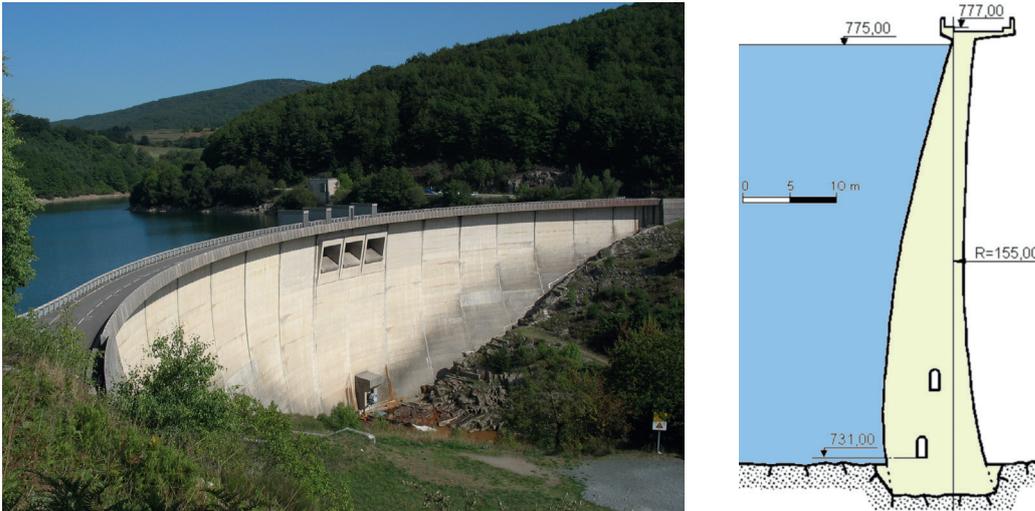
2.3 Les voûtes en vallée large

Peut-être plus que n'importe où au monde, les ingénieurs français se sont efforcés de construire des voûtes jusque dans des vallées dont la largeur rendait la conception d'un tel ouvrage délicate. La période de réalisation d'une grande partie des voûtes françaises juste après la seconde guerre mondiale, avec un accès limité aux ressources a sans doute contribué au choix de ces ouvrages économes en béton.

La problématique de ces voûtes implantées en vallée large, avec une tendance au développement d'une fissuration en pied amont, a contribué à l'expertise des ingénieries françaises dans ce domaine que ce soit en matière d'analyse du comportement, d'auscultation, de rôle de la géologie ou encore de travaux de confortement.

Figure 6.13 – Vue aval du barrage du Laouzas et coupe de la console centrale /

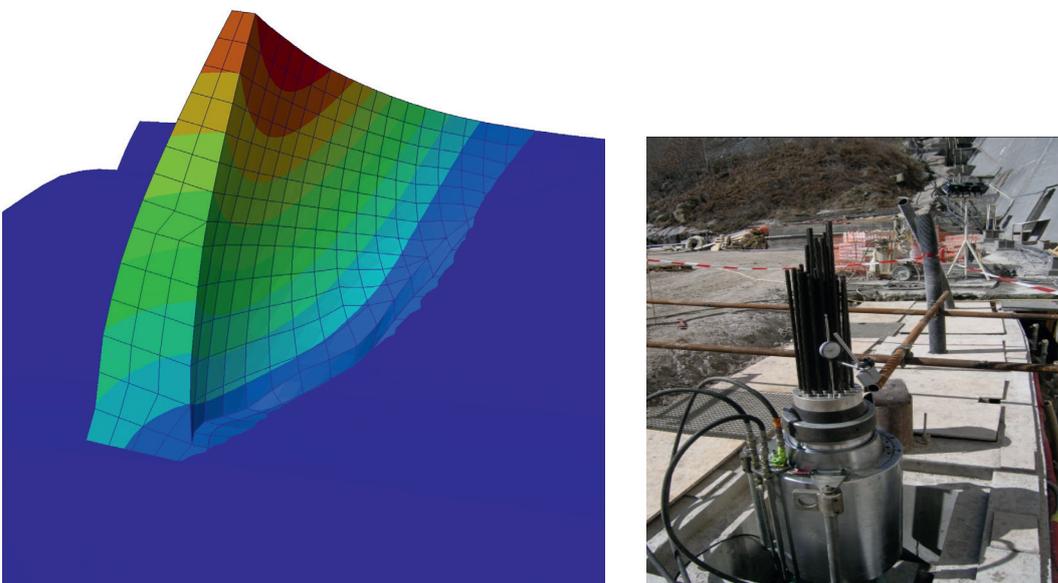
© BETCGB



Parmi les ouvrages concernés par cette problématique, et dont certains ont déjà fait l'objet de communications [CIGB 2003], on pourra citer le barrage de Laouzas (figure 6.13), ouvrage de 52 m de haut, achevé en 1965. Malgré la présence d'un joint horizontal positionné sur les plots centraux au droit de la galerie de drainage, une ouverture du contact béton-rocher s'est progressivement développée sous l'effet des chargements thermiques, hydrostatiques et d'un fluage important des bétons, entraînant une propagation de la sous-pression sous les consoles centrales.

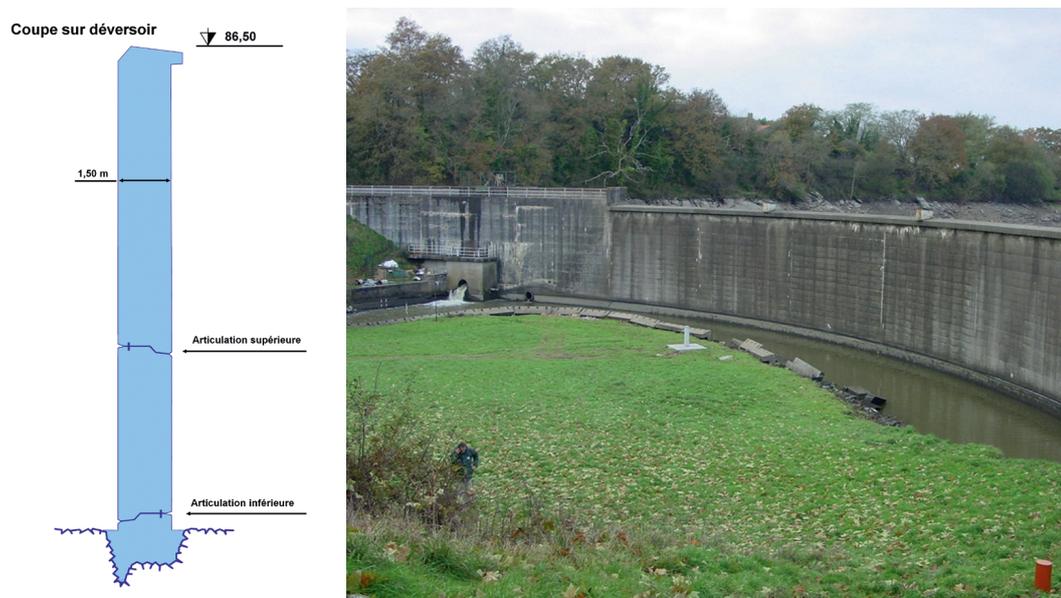
Le renforcement du dispositif d'auscultation, avec en particulier la mise en place de nombreuses mesures de piézométrie sous les consoles centrales, mais également en pied aval, et de nombreuses analyses par éléments finis, avec l'utilisation de lois non-linéaires avec couplage hydromécanique au contact béton-rocher, ont permis de mieux appréhender le fonctionnement mécanique de cet ouvrage. Ces éléments ont conduit au choix d'un confortement de la butée rocheuse en pied aval de l'ouvrage par une poutre en béton armé hébergeant astucieusement dispositifs de drainage, de précontrainte et d'auscultation (figure 6.14).

Figure 6.14 — Ouverture du contact béton-rocher et dispositif de renforcement de la butée rocheuse en pied aval / © EDF



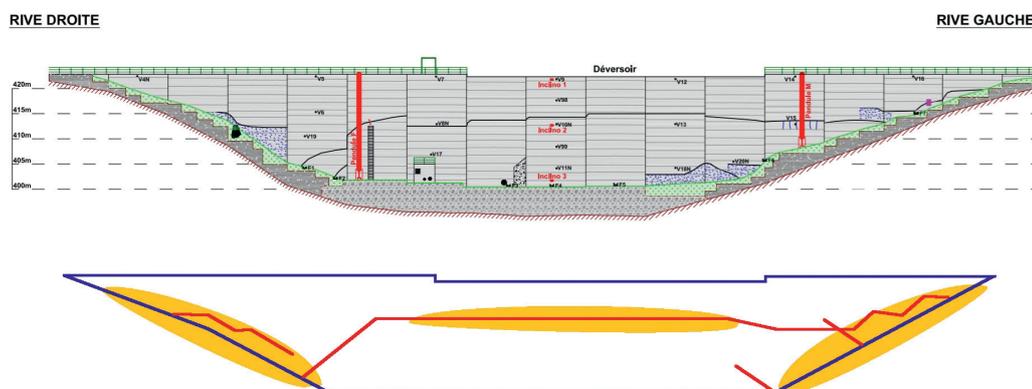
Au moins un ouvrage français a fait l'objet d'une conception particulière, visant à lui conférer un fonctionnement en arc pur : c'est le petit barrage de Moulin Ribou près de Cholet (H = 21 m, 1955), implanté dans un site très large. Le transfert vertical d'efforts par effet de console a été neutralisé par la création d'une double articulation horizontale (figure 6.15).

Figure 6.15 – Le barrage de Moulin Ribou sur la Moine – Sa console de clé à 2 rotules / © Coyne et Bellier – Alain Carrère



Ce dispositif, relativement complexe et coûteux, a parfaitement fonctionné en empêchant la création de fissures dans l'ouvrage. Mais le même ingénieur, ayant un autre barrage très comparable en projet quelques années plus tard, a choisi de laisser la nature créer les articulations nécessaires au bon fonctionnement de la structure : c'est le barrage de Pont-du-Roi (H = 27 m, 1959), dans lequel une fissure horizontale s'est effectivement créée dès le premier remplissage (figure 6.16).

Figure 6.16 – Le barrage de Pont-du-Roi – Fissures principales



2.4 Recommandations pour la justification du comportement des barrages-voûtes existants

2.4.1 But et composition du groupe de travail du CFBR

Dans la continuité des recommandations techniques fixant un certain nombre de règles de l'art pour le dimensionnement et la vérification des barrages-poids et des barrages en remblai, le CFBR a constitué un groupe de travail dans le but d'établir des recommandations pour les voûtes déjà en service [CFBR 2018].

Ce groupe de travail technique a mobilisé une quinzaine de personnes regroupant des maîtres d'ouvrages, des bureaux d'études, des experts et des représentants de l'administration. Parmi ces membres on compte plusieurs experts internationaux qui ont participé à la conception de barrages-voûtes en France et dans le monde ; leurs contributions précieuses à ce document sont nécessaires pour léguer aux générations actuelles et futures les principes fondamentaux de vérification et de surveillance de tels ouvrages.

L'objectif principal des recommandations est de constituer une synthèse de l'état de l'art en matière de vérification des voûtes, à vocation didactique marquée, et proposer des approches méthodologiques et des principes d'évaluation de la performance pour l'évaluation de la sûreté de ces ouvrages. Il s'intéresse spécifiquement aux ouvrages existants et constitue un guide de vérification, et non de conception.

Les recommandations ont été élaborées à partir de l'accidentologie, de l'incidentologie internationales et des comportements observés afin d'en déduire les mécanismes de défaillance propres à ces ouvrages. Elles s'appuient également sur certaines problématiques qui ont tout particulièrement mobilisé les ingénieries ces dernières années : stabilité au pied des voûtes implantées en vallée large, stabilité des culées non calées à l'appui sous l'effet des contraintes thermiques ou de pathologie de gonflement, interactions voûte / fondation, fluage, gonflement, résistance au séisme... Ces études ont occasionné des développements méthodologiques en termes de modélisation non-linéaire, de couplage hydraulique / mécanique dans les fissures, de prise en compte des effets thermiques... Les recommandations sont téléchargeables sur le site internet du CFBR à l'adresse : https://barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2018_voutes.pdf

2.4.2 Résumé du rapport

Seuls les points les plus saillants du document de recommandations sont repris ici.

Concepts généraux

Le chapitre « Concepts généraux » s'appuie notamment sur l'historique des méthodes de calculs et sur l'accidentologie. L'analyse montre que seules deux voûtes ont rompu totalement dans le monde : Malpasset en France et Meihua en Chine. Néanmoins, il y a eu aussi plusieurs incidents / accidents qui n'ont pas conduit forcément à des ruptures totales, mais à des libérations d'une partie de la retenue ou à des comportements non souhaités / déviants.

La notion d' « adaptation » a été introduite pour caractériser le comportement de ces ouvrages fortement hyperstatiques, selon trois niveaux :

- relevant d'un comportement « normal » de l'ouvrage et acceptable pour des situations durables ;
- les états d'adaptation amenant l'apparition progressive de désordres locaux ne remettant pas en cause la stabilité d'ensemble de l'ouvrage ;
- au-delà, l'apparition de désordres pouvant entraîner la rupture.

La difficulté dans l'évaluation de la sûreté des voûtes est de correctement estimer les limites d'acceptabilité de ces adaptations. L'expertise du géologue, du géomécien, de l'ingénieur en génie civil, du modélisateur se révèle déterminante pour répondre à cette problématique. Le rapport est donc surtout un support qui permet de guider les experts dans leur réflexion.

Les fondations

Les fondations sont l'élément clef de la sûreté d'un barrage-voûte. Elles ont pour rôle essentiel de reprendre les charges transmises par la voûte. On souligne l'importance :

- d'un modèle géologique et hydrogéologique de qualité ;
- de la mise en évidence de cinématiques de sortie, en particulier pour les coins rocheux ;
- de faire une distinction dans les différentes échelles qui décrivent la structure du rocher.

Cela ne peut être fait que par un géologue spécialiste et compétent dans le domaine des barrages.

Du point de vue géomécanique, le rapport :

- fait le point sur les différents types de modules (1^{er} chargement, réversible, dynamique, irréversible), leur détermination dépend de la méthode d'évaluation ;
- insiste sur la nécessité d'un dialogue entre le géomécanicien et le vérificateur pour déterminer les paramètres caractéristiques : par exemple le choix entre résistance de pic ou résiduelle ;
- ne donne pas de valeurs guides des paramètres de cisaillement, mais plutôt la bonne façon de les obtenir.

Le béton dans les barrages-voûtes

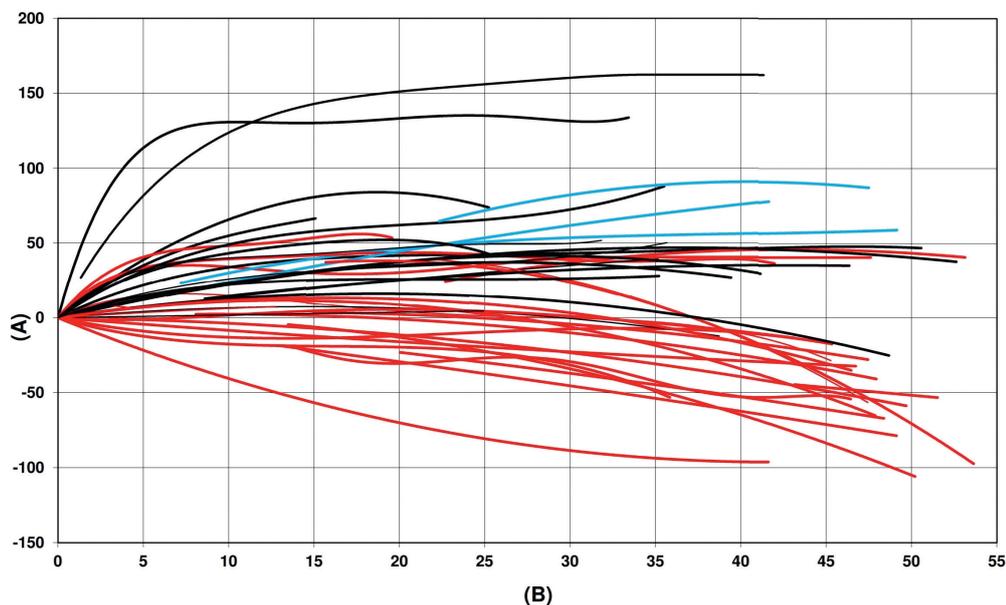
Ce chapitre traite, en particulier :

- des différents essais et reconnaissances utilisables pour caractériser le matériau ;
- du comportement du béton et des processus irréversibles (gonflement, retrait, fluage) ;
- de ses propriétés mécaniques (caractéristiques thermiques, les modules d'élasticité, des propriétés dynamiques...). Quelques valeurs guides sont fournies.

Auscultation et surveillance

Le comportement réversible est bien sûr évoqué mais les développements sont notamment dirigés vers les comportements irréversibles (retrait, gonflement, fluage, déplacements des appuis, changement des conditions thermiques ou d'exploitation, sollicitations jamais connues...). Un large retour d'expérience sur le comportement connu des voûtes au travers de l'auscultation est réalisé, en particulier sur la base des travaux de l'ingénierie [CFBR 2018]. La figure 6.17 représente une analyse menée sur les voûtes d'EDF en 2003 [Fabre, Bourdarot, 2003].

Figure 6.17 – Déformations de l'arc de crête (valeur positive : déplacements vers l'aval) – Ordonnées (A) : Déformations de l'arc de crête (raccourcissements en microns par mètre). Abscisses (B) : Nombre d'années depuis la fin de la mise en eau – En noir : Voûtes à double courbure ; En rouge : Voûtes à simple courbure ; En bleu : Voûtes à fort surplomb / © EDF



Sur la base de ce retour d'expérience, le rapport donne des conseils de surveillance et d'auscultation possibles en fonction des mécanismes identifiés. Le rapport présente également les méthodes d'analyses statistiques et plus spécifiques, développées ces dernières années, utilisées en France.

Actions et combinaisons d'actions

Parmi les chargements à prendre en compte, on insiste sur la prise en compte des effets thermiques, ce qui constitue une spécificité des barrages-voûtes. Il a été choisi de dissocier les voûtes jugées vulnérables aux effets thermiques (par exemple, les voûtes en vallée large, les voûtes s'appuyant sur des culées ou encore des ouvrages très fins). Pour celles-ci, des situations complémentaires sont à vérifier.

Si plusieurs cas de charges sont proposés à l'étude (cf. tableau 6.1), le guide insiste sur la nécessité de tenir compte de scénarios réalistes.

Tableau 6.1 – Cas de charges à étudier

Nom de la situation	Description des actions extérieures	Description des conditions thermiques
Situations normales d'exploitation		
Situations saisonnières décennales d'exploitation	Cote de retenue généralement associée* Cote de retenue généralement associée*	« Hiver décennal » « Été décennal »
Situations rares ou transitoires		
Situation saisonnière rare*	Cote RN amont et cote(s) aval associée(s) Cote RN amont et cote(s) aval associée(s)	« Hiver » « Été »
Situations rares de crue combinant des chargements thermiques saisonniers significatifs	Crue rare sans saisonnalité marquée du régime des crues	« Hiver » et « Été »
	Crue rare avec saisonnalité marquée : Crue saisonnalisée associée Crue saisonnalisée la plus forte	Chargement thermique hiver et / ou été le plus préjudiciable Chargement thermique associé
Situations extrêmes ou accidentelles		
Situation extrême d'une crue combinée à un chargement thermique	Crue à définir	Chargement thermique à définir
Situation extrême d'un séisme combiné à un chargement thermique	Séisme à définir	Chargement thermique à définir

* Si, dans les situations saisonnières d'exploitation, la cote d'exploitation diffère de la cote de RN.

Mécanismes de ruptures, critères et évaluation de la sûreté

Sur la base de l'analyse accidentologique et incidentologique, 6 mécanismes principaux ont été identifiés.

- La problématique des coins rocheux (REX : Malpasset, mais aussi Frayle, Idbar, El Atazar, Montsalvens). Sur la base du modèle géologique et hydrogéologique, la cinématique probable du mécanisme doit être identifiée. La méthode la plus couramment utilisée est celle de Londe. Il existe néanmoins d'autres méthodes plus récentes telles que les modélisations par éléments discrets. Le message principal du Groupe de Travail est de réaliser des analyses de sensibilité (sur les sous-pressions et / ou sur les angles de frottement), plutôt que d'introduire des coefficients de sécurité. La solution de confortement réside essentiellement dans le drainage des appuis.
- Le glissement sur fondations (REX : Meihua Dam). L'analyse se base sur les forces et contraintes normales et tangentielles au contact béton/rocher ainsi que sur les contraintes de cisaillement au contact béton / rocher. Une approche graduée est proposée. Un point de vigilance est fait sur les culées.
 - La première approche est une approche linéaire. Celle-ci est acceptée / valide si une majorité du contact béton-rocher reste dans le domaine élastique. Ce serait le cas pour des voûtes en vallée étroite.
 - La seconde approche est non-linéaire. Il s'agit de vérifier que le report d'effort sur les consoles adjacentes permet l'atteinte d'un nouvel équilibre. Dans cette démarche, des déplacements millimétriques seraient acceptables en situation normale et rare, jusqu'à centimétrique en situation extrême. Les marges de sécurité sont recherchées en effectuant une diminution de la résistance au cisaillement.
 - Pour les culées. La même approche est possible. Mais, si celle-ci joue un rôle significatif pour la stabilité du barrage, elle doit être dimensionnée comme un barrage-poids.
- Le desserrement du contact béton / rocher. Le desserrement de la zone de contact en pied amont est visible sur plusieurs voûtes en vallée large (cf. 2.3). Une approche similaire peut être engagée. Les aspects à vérifier sont en particulier les conditions de sous-pressions : ouverture des fissures, propagations de sous-pression, augmentation des gradients hydrauliques. Il est important de vérifier que les conséquences de la modification des contraintes de cisaillement ne provoquent pas d'autres mécanismes de rupture.
- Le dépassement des contraintes admissibles dans le matériau béton. Le groupe de travail n'a pas connaissance de cas de rupture de voûte en compression. Le développement d'une fissuration (traction) n'est pas un mécanisme de rupture. C'est la zone non-fissurée qui va subir une compression plus importante et les efforts transmis y sont accentués. Des critères ont été proposés. Le guide recommande également de vérifier l'absence de surface significative sollicitée au cisaillement dans le béton (critère de Mohr-Coulomb).
- L'érosion par surverse (REX : Sweetwater Dam). Trois types de mécanismes d'érosion possibles ont été identifiés : érosion des rives au voisinage des plots d'extrémité (contournements) ; érosion des masses rocheuses en rive, par déstabilisation d'écaillles sous l'effet des pressions dynamiques ; érosion des masses rocheuses en fond de vallée (impact de la chute d'eau). L'hydraulicien et le géologue déterminent l'affouillement ; la tenue mécanique de l'ouvrage à la suite de la perte des volumes rocheux en aval est ensuite évaluée.
- L'érosion interne dans des situations géologiques particulières (REX : Lake Lanier Dam). L'érosion interne de la fondation est le dernier mécanisme identifié, peut-être le moins probable, bien qu'il y ait un cas connu : rupture de la culée de Lake Lanier Dam, à la suite de l'érosion interne de sa fondation. Les voûtes sont par nature des ouvrages peu sensibles à ce phénomène, car le rocher de fondation est censé être de bonne qualité, mais des conditions géologiques particulières restent possibles (érosion régressive dans des failles avec mylonite, débouffrages de remplissages sableux / argileux...). Il est difficile de définir un gradient limite au-delà duquel l'érosion ou le débouffrage s'initie, tout dépend de la nature et de la compacité des matériaux érodables. Cette évaluation du risque reste entre les mains expertes du géologue.

Modélisations

Ce chapitre traite des modélisations possibles dans les différentes parties de l'ouvrage.

- Modélisation et analyse du corps du barrage :
 - modélisation par une loi élastique linéaire du barrage ;
 - modélisation par une loi non-linéaire du barrage : approche avec éléments-joints, approche de type endommagement (on garde la mémoire de la fissuration / dégradation) ;
- Modélisation et analyse de la fondation :
 - modélisation élastique linéaire isotrope / anisotrope ;
 - approches discontinues (coins de Londe, éléments discrets) ;
- Modélisation et analyse de l'interface barrage / fondation :
 - approche linéaire ;
 - approche non-linéaire (éléments-joints avec les différentes lois pouvant régir leurs comportements).

La méthode de calculs par réduction progressive de la résistance au cisaillement, citée auparavant, est aussi détaillée dans ce chapitre. En outre, la modélisation des effets irréversibles et la modélisation au séisme sont précisées dans ce chapitre.

2.5 Le rôle de l'ingénierie française des voûtes à l'étranger comme en France

L'ingénierie française, après s'être appuyée initialement sur l'expérience étrangère essentiellement américaine, a développé ses propres méthodologies, à la faveur du très grand nombre de projets lancés sur quelques décennies, de 1935 à 1975. La construction de ces ouvrages a été réalisée par des entreprises de génie civil qui ont, de leur côté, mis au point de nombreuses méthodes particulières, dans des domaines aussi divers que les coffrages, le refroidissement in situ des bétons, les injections, etc. Et les exploitants, en raison même du grand nombre d'ouvrages, ont mis au point des méthodes et règles de gestion, surveillance, maintenance de leurs ouvrages. Tous ces acquis constituent ainsi les bases de l'expertise française en matière de barrages-voûtes.

Cette expérience a été très largement exportée un peu partout dans le monde. On peut citer notamment :

- les voûtes portugaises (en coopération étroite avec l'Université de Coimbra) : Santa Luzia (H = 76 m, 1944) ; Castelo Do Bode (H = 115 m, 1950) ; Venda Nova (H = 97 m, 1951) ; Salamonde (H = 75 m, 1953) ;
- les aménagements en Afrique, du Maroc (Bin-el-Ouidane, H = 135 m, 1953) au Lesotho (Katse, H = 185 m, 1999) en passant par Kariba sur le Zambèze (Zimbabwe-Zambie, H = 128 m, 1959) et Tekeze en Éthiopie (H = 180 m, 1998) ;
- la participation des équipes françaises d'ingénierie aux projets hydrauliques chinois : Kukuan (Taiwan, H = 86 m, 1962) ; Lijiaxia sur le Fleuve Jaune (H = 150 m, 1988) ; Xiaowan sur le Mékong (H = 292 m, 1997) ;
- ailleurs dans le monde : Sir et Berke en Turquie ; Rappel au Chili (H = 110 m, 1967) ; Gomal Zam au Pakistan (H = 133 m, 1993).

Par ailleurs, le recul dans le temps de l'expérience acquise par les exploitants dans la surveillance — les plus anciennes voûtes sont centenaires — a fait apparaître des comportements plus ou moins particuliers, avec des pathologies qu'il a fallu comprendre, évaluer, et corriger. Cette compétence acquise sur le terrain est à la disposition des maîtres d'ouvrages du monde entier pour leur apporter une aide à la résolution de leurs problèmes de surveillance, maintenance, réhabilitation.

On peut citer quelques exemples :

- Kariba sur le Zambèze (Zimbabwe-Zambie) : gonflement du béton, érosion à l'aval, vantellerie ;
- Katse (Lesotho) : assistance à la maintenance des ouvrages de prise d'eau ;
- Cahora Bassa (Mozambique) : inspection quinquennale, réévaluation de la sécurité ;
- Dumbéa (Nouvelle-Calédonie) : études du confortement ;
- Belesar (Espagne) : mission de diagnostic (gonflement du béton) ;
- Sir (Turquie) : revue décennale de sûreté ;
- Bimont et d'autres voûtes françaises soumis à des pathologies de gonflement des bétons (réaction alcali-granulat et / ou sulfatique interne) ;
- Laouzas, Vouglans, Pont du Roi... : pour la problématique des voûtes implantées en vallée large comme présenté dans le § 2.3.

3. RÉFÉRENCES

- Annales des Ponts et Chaussées, 1898 – Méthode générale pour le tracé de la courbe des pressions dans une voûte à triple articulation, dans Annales des ponts et chaussées. 1^{re} partie. Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur, 1898, 3^e trimestre, p. 82–90.
- CIGB 1979 – Désordres graves constatés sur des barrages français. CIGB 1979, New Delhi, Q49R37.
- CIGB 2003 – Comportement de voûtes en vallées larges : 4 voûtes minces des années 50. CIGB 2003, Montréal, Q82R44.
- CFBR 2018 – Recommandations pour la justification du comportement des barrages-voûtes : version provisoire. CFBR, octobre 2018. <https://barrages-cfbr.eu/Recommandation.html> et https://barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2018_voutes.pdf
- Fabre et al., 2003 – Fabre J.-P., Bourdarot E. – Analyse du comportement mécanique à long terme des barrages-voûtes, 21^e congrès de la CIGB, Montréal, 2003, Q42-R83.



BARRAGES EN REMBLAI

1. LA CONTRIBUTION DU CFBR DANS LE DOMAINE DES BARRAGES EN REMBLAI

Le Comité Français des Barrages et Réservoirs a connu trois périodes d'innovations : la période des 30 glorieuses de 1950 à 1980, la fin du 20^e siècle avec les décennies des années 80 et 90 et le début du 21^e siècle.

La réalisation d'un important parc de barrages, justifié par le développement du pays, s'est terminée dans les années 80, par la mise en eau des barrages de stations de transfert d'énergie par pompage (Grand'Maison et Le Verney) et par le soutien à la ressource en eau de centrales nucléaires (Vieux-Pré, Mirgenbach et Naussac) ou d'eau potable (La Verne). Le développement des barrages se poursuivait sur toute la planète et en particulier dans les nombreux pays qui s'équipaient à cette période. Ces développements, dans des pays de géographie et de climats très différents de la France, étaient l'occasion d'explorer de nouveaux types de projets et de nouvelles technologies.

Durant toute cette période, le bureau d'études Coyne et Bellier a lancé ou soutenu plusieurs innovations : les barrages en remblai armé (Vallon des Bîmes et Conqueyrac), les barrages mixtes remblai-BCR (Mae Suai et R'mil), les noyaux en matériaux grossiers (Serre-Ponçon, Mont-Cenis, Grand'Maison), les recharges en enrochement friable (Vieux-Pré), les évacuateurs de crues sur remblai (Lebna, Vallon des Bîmes) et les parois moulées en raccordement de masque amont (Le Verney et Pla de Soulcem). À la même époque, la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG), en charge de construire de nombreuses réserves d'eau pour l'irrigation avec des barrages en argile, a développé un concept innovant d'évacuateur sur le parement aval de ces barrages.

Dans les années 80 et 90, l'accent a été mis sur la justification de la sécurité des barrages. La maîtrise de la modélisation numérique s'est affirmée grâce à la loi Hujieux et au logiciel Gefdyn qui contribua exclusivement au programme de justification des barrages aux séismes extrêmes. À cette époque, apparurent les prémices de l'évaluation du risque d'érosion interne.

Dans les années 2000, l'accent a été mis sur l'aspect environnemental, la gestion de la ressource (le Comité Français des Grands Barrages devint le Comité Français des Barrages et Réservoirs), le renforcement de la sécurité caractérisé par la généralisation réglementaire de l'analyse de risques et, récemment, la mise au point de nouveaux matériaux pour remblais : les argiles traitées à la chaux et les matériaux granulaires calcifiés.

Les paragraphes suivants donnent un rapide aperçu de l'apport de ces innovations à la conception, construction et exploitation des barrages en remblai.

2. NOUVELLES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION ET DE RENFORCEMENT

2.1 Barrages en remblai armé

Les barrages en remblai armé sont constitués d'écailles ancrées, généralement à l'aval du remblai. Ce principe, développé par André Coyne à la digue de col de Saint-Cassien, a été appliqué au barrage du Vallon des Bîmes (cf. § 2.6.2), avec le procédé Terre Armée de manière à rendre le barrage déversant. Les armatures sont constituées de lanières d'acier plat galvanisées. Cette solution est réservée à des retenues de petite taille et à de petits bassins versants aux crues potentiellement violentes. La durée de vie du barrage dépend de l'état de corrosion des lanières d'acier.

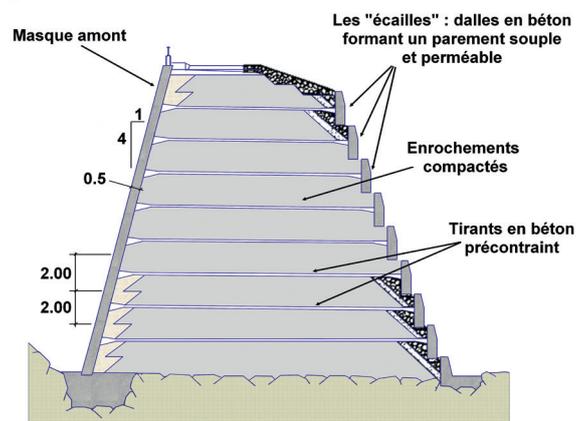
Le barrage écrêteur de crues de Conqueyrac, sur le Vidourle, est constitué d'un masque amont subvertical et d'écailles aval reliées au parement amont par des armatures passives. Ces armatures passives sont enrobées dans des poutrelles préfabriquées en béton précontraint sur banc, de manière à assurer la pérennité de l'armature et donc du barrage en conformité avec la grande durée de vie habituelle des barrages. Les connexions aux extrémités sont également enrobées de béton. Cette technologie a été retenue car la fondation est très karstique : selon la localisation des pluies sur le bassin versant, les avens produisent de l'eau ou aspirent de l'eau de manière imprévisible dans la fondation du barrage et à son voisinage immédiat. La retenue est constamment vide et se remplit soudainement lors des crues associées avec des résurgences sous le corps du barrage. Ce massif d'enrochement armé très drainant s'accommode de ces résurgences. Ce barrage peut être déversant en cas de crues extrêmes.



Figure 7.1 – Barrage de Conqueyrac (France)

- En haut à gauche : parement aval
- En haut à droite : évacuateur de fond
- En bas à gauche : profil-type

© Coyne et Bellier



2.2 Barrages mixtes remblai-BCR

Le barrage mixte est constitué d'un remblai amont et d'une zone aval en BCR. Il a été utilisé pour les batardeaux des barrages-voûtes de Sir et de Berke en Turquie, de Katse au Lesotho, pour les barrages de Mae Suai en Thaïlande, R'mil en Tunisie et Wadi Wala en Jordanie.

Le remblai argileux amont et le remblai aval en BCR montent simultanément. Le remblai sert à la fois d'étanchéité, de piste d'accès au niveau de mise en place du BCR et de coffrage amont du BCR. Le BCR placé à l'aval permet à l'ouvrage d'être déversant sur une grande longueur, ce qui est particulièrement utile lorsque les crues extrêmes sont difficiles à évaluer. Dans le cas du barrage de Mae Suai, la partie en BCR se referme latéralement vers l'aval pour protéger les rives.



Figure 7.2 – Barrage de Mae Suai (Thaïlande) en construction /

© Coyne et Bellier

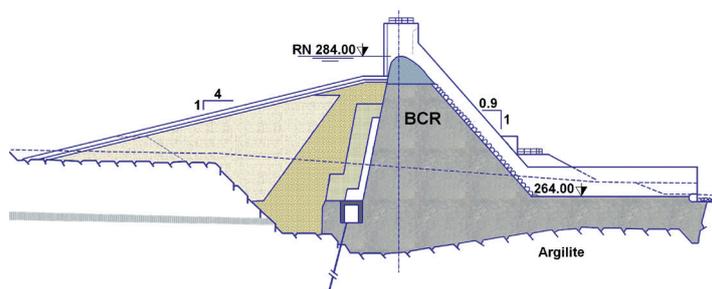
Les critères imposés au BCR sont très flexibles en fonction des disponibilités du site en agrégats même médiocres. Le remblai est constitué de matériaux granulaires contenant plus de 14 % de fines pour assurer l'étanchéité. Ce type de barrage peut être construit très rapidement entre deux crues et est parfaitement déversant en phases travaux et définitive.



Figure 7.3 – Barrage du R'Mil (Tunisie) – Fin de construction

- En haut à gauche : vue amont
- En haut à droite : vue aval
- En bas : coupe type sur l'évacuateur

© Coyne et Bellier



2.3 Noyaux en matériaux grossiers

Le noyau des barrages en enrochement peut être constitué de matériaux grossiers du moment que la partie fine ($\% < 0,1 \text{ mm}$) contient plus de 15 % de fines raisonnablement plastiques ($\text{VBS} > 0,4$). Le noyau du barrage de Grand'Maison est constitué de couches de 0,5 mètre d'épaisseur de matériaux morainiques très grossiers. Son étanchéité est assurée par le contenu en fines ($\% < 0,1 \text{ mm}$ supérieur à 17 %, et moyenne égale à 26 %). L'avantage de cette solution est un coût très bas, sans nécessité de sélection autre que l'élimination des gros blocs, et surtout la possibilité d'exploiter directement les matériaux situés à proximité immédiate du site. Le module de déformation de ce noyau est proche de celui des recharges, ce qui élimine les problèmes associés aux tassements différentiels entre noyau et recharges. Pour les grands barrages, cela permet de réduire considérablement le risque d'effets voûte, déchargeant la contrainte verticale dans le noyau et rendant possible sa fracturation hydraulique.

2.4 Recharges en matériaux friables

Le barrage de Vieux-Pré est un barrage zoné, dont les recharges sont constituées de grès sableux des Vosges. À condition de protéger les rives à l'aval du noyau par un filtre, pour prévenir le risque d'érosion interne en cas de résurgences d'eau, le matériau s'est parfaitement comporté. Le module de déformation et l'angle de frottement de ces grès compactés sont élevés et permettent un profil économique du barrage. Cette solution a permis d'exploiter pleinement les matériaux du site et de diminuer le coût et les impacts environnementaux du barrage dans le massif des Vosges.

2.5 Parois moulées en béton plastique

Deux barrages en remblai à masque bitumineux, Le Verney et Pla de Soulcem, sont fondés sur un épais remplissage alluvial. Une paroi moulée en béton plastique assure l'étanchéité du système. Dans les deux cas, l'anisotropie des alluvions et moraines permet d'assurer l'étanchéité au moyen d'une coupure partielle de la fondation alluviale tout en maintenant un infero-flux satisfaisant. Il est très fréquent que le rapport d'anisotropie de perméabilité k_h/k_v des matériaux déposés dans les vallées par les rivières et les glaciers soit très élevé : des valeurs de 100 ou 200 ont été mesurées. Dans ce cas, les coupures partielles sont fréquemment suffisantes pour assurer le bon fonctionnement de la retenue en profitant de la faible perméabilité verticale de la fondation. Elles sont beaucoup plus simples et bien moins coûteuses à réaliser que les coupures totales, difficilement parfaites.

Le raccordement entre la tête de paroi et le masque utilise des dispositifs innovants, très différents du système complexe de dalles et de joints en cuivre couramment utilisés en Amérique du Sud (par exemple au barrage Olmos au Pérou). La solution retenue au barrage du Verney consiste à réaliser, en tête de paroi moulée, un massif, également en béton plastique non ferrailé, d'environ 5 m sur 5 m, traversé par la paroi moulée, dans lequel vient s'ancrer la plinthe en béton armé, qui assure la connexion entre le masque en béton armé ou en béton bitumineux et la paroi. La plinthe et son ancrage sont ferrailés de manière continue, sans joints. La paroi moulée est placée au pied du remblai pour bénéficier d'une partie des efforts de compression verticale durant la mise en place du remblai.

2.6 Les évacuateurs sur remblai

2.6.1 Les évacuateurs à seuil libre sur les barrages en terre de la CACG (France)

La CACG, créée en 1959, contribue au développement économique des zones rurales. Afin de compenser l'important déficit de ressource en eau constaté sur ces territoires, elle a pris en charge la création de nombreux réservoirs et de barrages collinaires en remblai argileux homogènes.

Afin de réduire l'emprise foncière des aménagements, tout en optimisant leur coût, elle a conçu et réalisé des coursiers sur remblai [Martin 1999]. La première réalisation date de 1962 à Boulogne-sur-Gesse et concerne un remblai de 8 m de hauteur et un débit de projet inférieur à $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Cet ouvrage a subi sans dommage la crue de 1977, dont la période de retour est estimée à

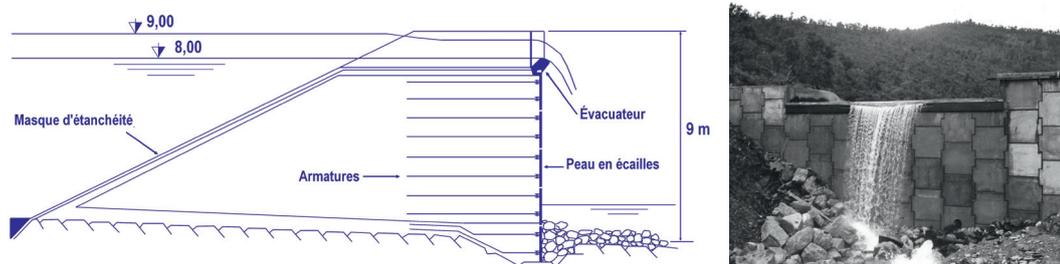
500 ans. Entre 1967 et 1994, la CACG réalise 85 ouvrages à partir d'un modèle type, comprenant le coursier en béton banché débouchant dans un bassin de dissipation réalisé soit en béton, soit en enrochements, soit en enrochements liés au ciment. Les tassements sont compensés par des joints transversaux étanchés par des waterstops, la sous-face du radier étant entièrement drainée par des drains longitudinaux. Dans les années 80, quatre ouvrages, de longueur du seuil central déversant dépassant 12 m et de charge modeste, ont leur coursier et leur bassin de dissipation réalisés en enrochements liés au béton reposant sur un tapis de 20 cm en béton. À partir de 1995, le mur amont du bassin de dissipation, à ressaut ou à impact, est remplacé par des pentes de fosse de dissipation dotées de parements en enrochements liés au béton ; le coursier est dorénavant constitué de plots successifs en béton projeté réalisés en « touches de piano » dans une tranchée excavée dans le remblai, dont les parois ont été préalablement gunitées. L'avantage de cette solution est de diviser par deux le temps de réalisation et de limiter les phénomènes d'érosion au contact entre bajoyer et remblai.

En conclusion, la solution d'évacuateur sur remblai en argile, appliquée depuis 1967 sur une centaine d'ouvrages, apparaît comme une solution économiquement satisfaisante pour les ouvrages de faible hauteur (8 à 22 m de hauteur) situés sur de petits bassins versants (débit inférieur à 300 m³/s).

2.6.2 Le barrage du Vallon des Bîmes (France)

La technique de la terre armée s'est développée comme soutènement d'ouvrages routiers. La première application aux barrages concerne le barrage déversant du Vallon des Bîmes en 1979. S'agissant d'un prototype, l'ouvrage a une hauteur limitée à 9 m. Le talus amont du remblai est incliné et recouvert d'un masque assurant l'étanchéité de la structure. Le talus aval, constitué d'une peau en écailles, est vertical ; son ancrage doit se faire dans une fondation de bonnes caractéristiques et suffisamment profonde pour éviter son déchaussement dans la zone déversante (figure 7.4).

Figure 7.4 – Barrage du Vallon des Bîmes : profil-type et vue aval / @ Coyne et Bellier



Depuis, cette conception a été reprise en dehors de la France, par exemple pour la réalisation du barrage de Taylor Draw aux États-Unis (hauteur 22,5 m).

2.6.3 Le barrage du Lebna (Tunisie)

Le barrage du Lebna est mis en service en 1986. De hauteur modeste (20 m), sa particularité réside dans son évacuateur de crues de taille notable ancré en surface du remblai (débit de projet 300 m³/s). Cette disposition est dictée par un contexte géologique et topographique particulièrement défavorable pour positionner cet évacuateur en rive (que ce soit en surface ou en galerie) ; par ailleurs, la fondation meuble et compressible du barrage interdit la réalisation d'un ouvrage mixte remblai-béton, ainsi que la disposition d'une tour déversante connectée à une galerie d'évacuation sous remblai adaptée aux débits à restituer.

À l'époque de la conception, la perception des risques rattachés à la mise en place d'un évacuateur sur un remblai fait que cette solution n'est envisagée que pour des petits barrages à hauteur de chute et débits de crue limités. Ces risques sont essentiellement liés à la déformabilité du remblai, à son érodabilité, aux infiltrations que connaît tout barrage (principalement à proximité du pied aval) et à une restitution proche du pied de barrage.

Erratum :
Remplacer
"Vallon des Bîmes
en 1979"

par

"Vallon des Bîmes
conçu par Alain
Cassard et al.
en 1972"

Erratum :
Remplacer
"@ Coyne et
Bellier"

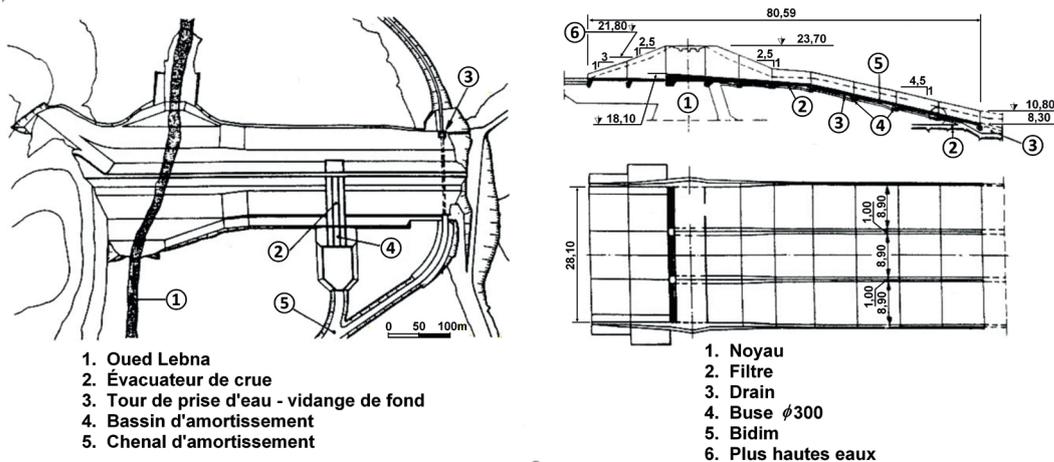
par

@ Alain Cassard"

La largeur de l'évacuateur du Lebna, 30 m environ, est faible par rapport à la longueur en crête du barrage, 600 m. Il a donc été positionné là où la fondation du barrage est le plus homogène. En effet, il faut éviter les tassements différentiels, plus nocifs que les tassements absolus. Pour limiter ces derniers, l'évacuateur est entaillé dans le remblai préalablement achevé jusqu'à la crête, afin de bénéficier d'une préconsolidation de sa fondation.

Des précautions particulières sont prises pour assurer le bon fonctionnement de l'évacuateur (figure 7.5). Du point de vue structural, l'évacuateur est constitué des trois conduits indépendants, sortes de « touches de piano », et de plots articulés en « tuiles » dans la direction amont-aval ; chaque plot s'appuie à l'amont sur des bèches assurant un bon ancrage dans le remblai, les mouvements des plots étant homogénéisés par des aciers longitudinaux traversant les joints.

Figure 7.5 – Barrage du Lebna : vue d'ensemble, profil en long et vue en plan



Pour limiter les cheminements préférentiels et les risques d'érosion, tout d'abord une bonne liaison est assurée entre le plot de l'entonnement et le noyau du barrage. Ensuite, il faut concevoir un système de drainage aval particulièrement efficace. Pour cela, chaque plot est drainé de façon indépendante ; les débits de fuite de chaque plot sont captés par un système de buses, placées dans la bêche du plot inférieur, puis envoyés dans des collecteurs latéraux. En cas de mouvements relatifs des plots et des conduits, cette indépendance est maintenue à l'aide de joints waterstops et Sika. La restitution des débits est assurée dans des bassins d'amortissements adjacents prolongeant les trois conduits.

Cet aménagement est en fonctionnement depuis plus de 30 ans. En 1996, il connaît un déversement qui dure une dizaine de jours ; 30 millions de m^3 transitent par l'évacuateur soit l'équivalent du réservoir. Le débit maximum arrivant dans le réservoir, estimé à $470 m^3/s$, pour un débit restitué de $100 m^3/s$, correspond à une crue centennale. L'évacuateur a parfaitement fonctionné ; seuls quelques joints Sika ont dû être refaits. À ce jour, le comportement de cet ouvrage est tout à fait satisfaisant.

Figure 7.6 – Barrage du Lebna : parement aval avec son évacuateur / @ Coyne et Bellier



2.7 Les filtres géotextiles dans les barrages en remblai

Les géotextiles comprennent les géotextiles tissés et les géotextiles nontissés. Dans la quasi-totalité des cas, les filtres géotextiles utilisés dans les barrages sont des géotextiles nontissés. Ils sont généralement faits de polypropylène ou de polyester.

La première utilisation d'un géotextile dans un barrage est celle, en 1970, d'un géotextile comme filtre pour les drains en gravier de la partie aval du barrage de Valcros [Giroud et al. 1977], un barrage en remblai de 17 m de hauteur, constitué d'un sol silteux ayant une granulométrie très étendue. Un filtre traditionnel en sable était prévu, mais, à la dernière minute, le sable spécifié étant indisponible, une décision rapide s'imposait. Un nouveau matériau, que l'on n'appelait pas encore « géotextile », avait fait l'objet d'essais pour une application routière. Il s'agissait d'un textile nontissé utilisé pour séparer une couche de granulats d'un sol argileux. Le succès de ces essais, c'est-à-dire le fait que les particules fines du sol ne traversaient pas le textile, en dépit des contraintes exercées par les camions circulant sur la couche de granulats, laissa penser que ce textile pouvait être utilisé comme filtre entre drain en gravier et sol silteux. La nécessité justifia l'audace et la décision fut prise d'utiliser ce textile nontissé comme filtre dans le barrage de Valcros. Par deux fois, des années après la construction du barrage, des échantillons de géotextile prélevés dans le barrage ont subi des essais de laboratoire, qui ont montré la durabilité du géotextile et l'absence d'évolution notable de sa perméabilité, indiquant qu'aucun colmatage significatif ne s'était produit. À l'exutoire du drain, au pied aval du barrage, coule un constant filet d'eau claire depuis la mise en eau du barrage en 1970.

Dans le succès du filtre du barrage de Valcros il y avait une part de chance. Cette chance a créé une obligation, celle de faire des recherches qui ont conduit à des critères de dimensionnement des filtres géotextiles. Après perfectionnements et publications intermédiaires, ces critères de filtres ont fait l'objet d'une ultime publication [Giroud 2010]. Il est intéressant de noter que ces recherches sur les filtres géotextiles ont eu comme retombées positives des améliorations des critères de filtres granulaires, ce qui montre que l'utilisation des géosynthétiques s'inscrit parfaitement dans le cadre plus général de la géotechnique.

L'exemple donné par le barrage de Valcros a été suivi par les concepteurs de nombreux barrages où un filtre géotextile nontissé est utilisé, notamment plusieurs barrages en France, parmi lesquels : barrage de La Valière (1976) avec tapis drainant ; barrage de Chateaufort (1983) avec drain interne incliné ; barrage de Dzoumogné (2000) avec drain interne incliné et tapis drainant. On peut également citer des barrages construits en Afrique avec filtres géotextiles : le barrage de Sidi M'hamed Ben Taiba (2003), en Algérie, avec drains horizontaux en gravier, entourés de filtre géotextile nontissé, utilisés pour assurer la stabilité de la partie amont en cas de vidange rapide du réservoir, et le barrage de Samira (2001), au Niger, avec drain vertical et tapis drainant, ces deux drains étant en gravier avec filtre géotextile nontissé [Degoutte & Fry 2002].

La bonne utilisation des filtres géotextiles requiert une grande attention au niveau de la conception, des spécifications et de l'installation : (a) Le filtre géotextile doit être sélectionné en fonction des caractéristiques du sol en utilisant des critères de filtres. (b) La composition chimique de l'eau peut avoir une influence sur la durabilité d'un géotextile. Ainsi, dans le cas d'une eau basique, on ne doit pas utiliser un géotextile en polyester. (c) Il faut éviter que l'eau puisse contourner le filtre géotextile : pour éviter ce problème, il faut des spécifications précises. (d) Comme un filtre en sable, un filtre géotextile ne peut pas fonctionner si le sol en amont du filtre est très perméable avec une granulométrie discontinue telle que les particules fines du sol transportées par l'eau viennent s'accumuler sur le filtre. Ce cas demande des dispositions particulières. (e) Un filtre géotextile se colmate s'il n'est pas en contact intime avec le sol. Ceci n'est possible que si la granulométrie du gravier du drain est telle que la contrainte exercée par le gravier sur le géotextile est aussi uniforme que possible. Le concepteur du barrage doit donc spécifier la granulométrie du gravier non seulement pour assurer la perméabilité du drain mais aussi pour assurer le contact intime du géotextile et du sol. Il faut également spécifier que la surface du sol ne soit pas trop irrégulière afin que le géotextile puisse être installé en contact intime avec le sol. (f) Les géotextiles, étant formés de filaments fins, ont une grande surface spécifique et, par conséquent, sont sensibles aux rayons UV. Il faut donc installer les géotextiles aussitôt que possible après enlèvement de leur emballage de protection et les recouvrir rapidement.

Les filtres géotextiles utilisés dans les barrages montrent de nombreux avantages par rapport aux filtres granulaires traditionnels : s'agissant de produits industriels, ils sont toujours disponibles et, faisant l'objet de contrôles de qualité, leurs caractéristiques sont uniformes, constantes et fiables ; ils sont légers (moins de 500 g/m²), donc faciles à transporter jusqu'aux chantiers de barrages peu accessibles ; leur mise en place est facile, quelle que soit la configuration des systèmes de drainage. Ces avantages des filtres géotextiles sont importants, en particulier pour les barrages de taille modeste où le coût des filtres est relativement élevé.

La durabilité des filtres géotextiles situés à l'intérieur d'un barrage en remblai (à une profondeur suffisante pour être hors de portée des rongeurs et racines) est supérieure à 50 ans comme l'indique la performance du barrage de Valcros et supérieure à 45 ans selon l'expérience fournie par un nombre considérable de filtres géotextiles installés après la construction du barrage de Valcros dans tous types d'ouvrages dans le monde. Cependant, la durabilité est inférieure aux valeurs ci-dessus pour les filtres géotextiles qui sont insuffisamment protégés contre l'exposition aux rayons UV ou les agressions des rongeurs.

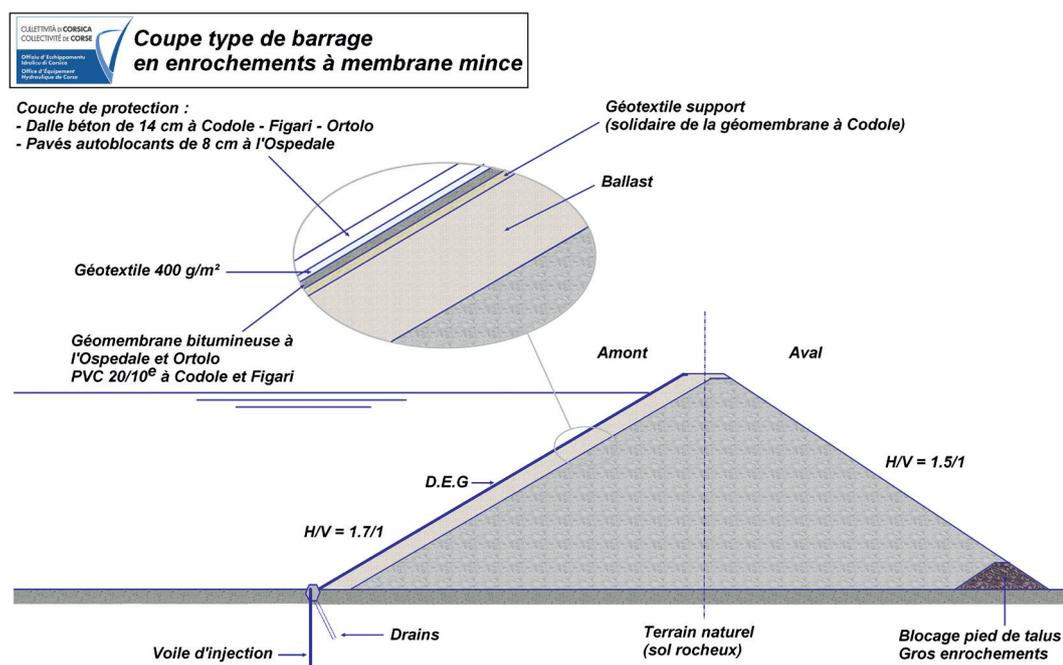
2.8 Les barrages corses étanchés par géomembranes

L'Office d'Équipement Hydraulique de la Corse (OEHC) assure la gestion de la ressource en eau de l'île. Du fait de la rareté des terres et sous l'impulsion de Claude Tisserand, une génération de barrages corses avec dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) est conçue et la technique perfectionnée [Royet et al. 2002].

2.8.1 Le barrage de l'Ospédale (1979)

En 1971, l'OEHC n'a que l'expérience du barrage de l'Alésani, barrage en enrochement dont l'étanchéité est un masque amont en enrobé bitumineux. C'est une belle réalisation, laborieuse et coûteuse, dont l'étanchéité donne pleinement satisfaction. C'est ainsi que 5 ans plus tard, la solution du masque amont en enrobé bitumineux est retenue par le projet du barrage de l'Ospédale, en vertu du principe « pourquoi changer ce qui marche ? ». Mais ce qui était déjà complexe et coûteux sur un grand barrage comme celui d'Alésani, devient quasiment ruineux sur un petit ouvrage comme l'Ospédale, car il nécessite les mêmes frais fixes, investissements en matériel spécialisé, frais de transport (poste important pour la Corse), procédures de tests et de mises au point. Et de surcroît, la situation géographique de l'Ospédale, à 950 m d'altitude, complique sérieusement les travaux (avec plus de 50 cm de neige lors des hivers rigoureux durant la durée du chantier et des routes en mauvais état).

Figure 7.7 – Profil-type des barrages corses / © OEHC



Ainsi, à l'issue de l'appel d'offres, la société Colas (et son agence locale Corsovia) emporte le marché avec une solution de géomembrane bitumineuse, dite Coletanche (épaisseur 5 mm), qu'elle a mise au point quelques années auparavant et appliquée sur quelques petits ouvrages. Cette solution est aisée à mettre en œuvre avec un matériel léger et facile à fabriquer (treuils de couronnement, épandeur de pente...). Le reste de la structure est directement inspiré du barrage de l'Alésani (pentes des talus, granulométrie, et surtout couche support en enrobé bitumineux drainant), modèle invariable de tous les ouvrages suivants, toujours selon le principe « on ne change pas ce qui marche » (figure 7.7).

Il reste cependant un problème important à régler : la couche de protection. La dalle de béton est envisagée, mais sa mise en œuvre pose à peu près les mêmes problèmes que celle du masque en enrobé. C'est pourquoi, la solution des pavés autobloquants (pavés SABLA), faciles à mettre en œuvre, sans matériel spécial (il suffit de les laisser glisser sur le parement jusqu'à l'équipe de pose qui les récupère et les dispose correctement) est adoptée. Commencé en 1976, le barrage est terminé en 1979, sans aucun problème majeur. Cependant en exploitation, les pavés n'apparaissent pas vraiment bloqués. Un pavé glissant sur son support n'a rien à voir avec un pavé posé à plat sur une couche de sable. Par suite de défauts de planéité du support et à des imperfections dans la mise en place, ces pavés se sont trouvés mal serrés à la partie supérieure du parement. À la suite de fortes tempêtes, des plaques plus ou moins importantes de pavés sont emportées et retrouvées au pied du barrage. Ils ne pouvaient être remis en place que les années sèches, pour lesquelles la vidange est possible. Resserrés et rejointoyés au mortier (figure 7.8), ils n'ont plus été arrachés depuis.

Cette réhabilitation est l'opportunité de réaliser, en novembre 2007, trois prélèvements d'échantillons de géomembrane en vue d'une étude approfondie de l'évolution de ses propriétés [Touze-Foltz N. et al. 2011]. Les résultats mettent en évidence une perte de souplesse notable de l'ordre de 75 % (ce qui n'est pas un inconvénient rédhibitoire pour une membrane plane et statique), une légère perte de résistance à la rupture de 18 % et une étanchéité intégrale (fuites non mesurables lors des essais). À l'inverse de ces excellents résultats constatés sur la géomembrane, l'état général des pavés autobloquants, pourtant de bonne qualité, reste préoccupant. Leur surface est attaquée par l'eau agressive (eau en terrain granitique) ; ce phénomène, déjà notable au bout d'une dizaine d'années, reste surveillé.

Le débit de fuite global, s'établit à environ 2,4 l/h/m² de section barrée, ce qui reste très raisonnable et comparable à celui des autres ouvrages.

Figure 7.8 – Bombement (gauche) – Granulats apparents et lessivage du liant (droite) /

@ C. Tisserand



2.8.2 Le barrage de Codole (1985)

Ce barrage est réalisé selon la même coupe-type que le barrage de l'Ospédale, avec à peu près la même hauteur (28 m contre 25 m), mais il a une plus grande longueur et surtout un DEG, sélectionné à l'issue des appels d'offres, différent. L'étanchéité est assurée par une membrane PVC de 2 mm d'épaisseur, solidaire du géotextile support. La couche de protection évite les déboires rencontrés avec les pavés « autobloquants », en coulant en place une couche de béton armé d'épaisseur 14 cm, en dalles de 5 m par 5 m avec treillis soudé, reposant sur un géotextile de 400 g/m². L'ancrage du couronnement diffère de celui de l'Ospédale par application d'une platine boulonnée sur longrine en béton, bien plus satisfaisante au niveau géométrique que l'ancrage par tranchée de l'Ospédale. Dans cette couche de béton de protection, 4 ou 5 réservations coffrées et jointoyées, faciles à enlever, sont disposées afin de permettre une éventuelle inspection et / ou prélèvement d'échantillon de la couche d'étanchéité (opération qui n'a pas été réalisée à ce jour). Cette conception et ces travaux, pourtant d'une ampleur conséquente, n'ont pas posé de problème particulier ni à la réalisation, ni à l'exploitation. Le débit de fuite, étudié de 1984 à 2000, s'établit entre 0,6 et 1,2 l/h/m² de section barrée, ce qui est 2 à 4 fois plus faible qu'à l'Ospédale.

2.8.3 Le barrage de Figari (1990)

Cet ouvrage en enrochement de 35 m de hauteur, réalisé selon un schéma identique à ses prédécesseurs, en diffère seulement par le DEG. Il est dommage que l'étanchéité en PVC 2 mm ne soit pas solidaire du géotextile, à cause d'un problème de fournisseur. A contrario, la double soudure à la machine avec canal central permet un excellent contrôle à l'air comprimé sur l'ensemble des joints. La couche de protection est en béton renforcé par une « armature » en fibres polyester.

Cette réalisation n'a pas posé de problème majeur, ni en construction, ni en exploitation, excepté une tempête, qui emporte à la construction une grande partie de la géomembrane encore non protégée. L'absence de problèmes montre que la technique est au point à la troisième génération. Le débit de fuite est de 0,5 à 1 litre/s, à peu près identique à celui de Codole.

2.8.4 Le barrage de l'Ortolo (1996)

Sa hauteur de 37 m et sa conception sont voisines de celles du barrage de Figari. Mais à l'appel d'offres, un DEG en géomembrane bitumineuse l'emporte. La quatrième réalisation aurait pu être une « routine ». Il n'en est rien ! L'ouvrage subit durant le chantier une crue exceptionnelle juste avant la mise en place de la membrane. La dérivation, calculée pour la crue décennale, est rapidement saturée et obstruée par des troncs d'arbres. La mise en eau est presque totale (figure 7.9) et la vidange devient impossible.

Le danger pour le remblai devient imminent. Il n'est pas envisageable d'envoyer un plongeur qui pourrait être aspiré en cas de rupture de l'embâcle ! Il ne reste qu'une solution : faire sauter l'embâcle à l'explosif ! Ce qui est fait, heureusement avec un total succès. À l'avenir d'autres dispositions seront cependant à prévoir. À l'issue de ces événements, le DEG est mis en place sans difficulté particulière. Bien que cette submersion ait entraîné beaucoup de « fines », les tassements sont acceptables.

En 2018, la moyenne des tassements atteint 26 mm depuis l'origine, avec un maximum de 60 mm sur un repère aval, avec une tendance à la stabilisation, voire une légère remontée lors des dernières mesures. Quant aux débits de fuites, ils restent très modérés, inférieurs à 4 l/s, soit 2,6 l/h/m² de section barrée (débits comparables à ceux de l'Ospédale).

Figure 7.9 – Barrage de l'Ortolo : crue en construction.
Parements amont (haut) et aval (bas) / @ A. Sanguinetti



2.9 Les sols traités à la chaux

Le traitement des sols à la chaux est une technique très ancienne qui connaît, depuis plus d'un demi-siècle, un développement spectaculaire. Les raisons sont multiples : valorisation des sols limono-argileux et / ou humides, gestion optimisée des ressources en matériaux naturels, réduction des nuisances et des coûts générés par les transports de matériaux d'emprunts, réduction des délais d'exécution et du coût global des travaux. C'est le domaine des infrastructures de transport, dans le cadre des politiques de déploiement et de modernisation

des réseaux (autoroutes, plates-formes aéroportuaires, lignes pour trains à grande vitesse) qui a su, le premier, tirer profit des progrès réalisés dans les technologies d'exécution et la maîtrise des performances des matériaux traités.

Dans le domaine des ouvrages hydrauliques, les applications correspondent à des traitements curatifs, parfois préventifs, suite à des désordres ou des craintes consécutives à des comportements particuliers des composants des ouvrages : sols instables, érodables ou dispersifs. Ainsi, au début des années 80, la retenue de Michelbach (7,8 hm³ d'eau pour usage domestique dans l'est de la France) est étanchée par la mise en œuvre en fond de retenue d'une couche de 30 cm de sol traité à 2 % de chaux et 5 % de ciment. D'autres réalisations existent sur tous les continents (figures 7.10 à 7.13).



Figure 7.10 – Canal de Friant Kern (USA, photo 2012) – Rupture type de la dalle de protection en béton de la berge due à la présence de sols gonflants / @ Lhoist



Figure 7.11 – Canal de Friant Kern (USA, photo 2012) – Tronçon de berge remis en état en 1973 par traitement à la chaux des sols gonflants, sans dalle de protection en béton / @ Lhoist



Figure 7.12 – Digue de Hvezda (République Tchèque, photo 2003) – À la suite d'inondations, traitement de sédiments humides à la chaux pour la reconstruction de la digue / @ Lhoist



Figure 7.13 – Digue de Hvezda (République Tchèque, photo 2003) – Aspect général de la digue après reconstruction / @ Lhoist

Ces dernières années, d'importantes recherches, en laboratoire et in situ, ont été entreprises pour quantifier les performances du sol traité à la chaux, en termes de stabilité, d'étanchéité et de résistance à l'érosion interne. En France, la résistance à l'érosion de surface a été testée en vraie grandeur par des essais de surverse sur un ouvrage démonstrateur, dans le cadre du programme de recherche « DigueELITE » (figure 7.14). L'ensemble des résultats a fait l'objet d'une présentation au congrès de la CIGB à Vienne en 2014, qui a reçu le prix de l'innovation [Nerincx et al., 2018]. Ces résultats ont été intégrés par le Comité technique P de la CIGB sur les barrages en matériaux traités (CMD : Cemented Material Dams), dans le bulletin technique consacré à l'emploi des sols traités dans les barrages (CSD : Cemented Soil Dams). Concernant le projet DigueELITE, on peut aussi de reporter au chapitre 5 § 3.2 et au chapitre 9 § 4.5.4.

En s'appuyant sur les fonctions recensées par DigueELITE (tableau 7.1), il est possible de mettre en évidence l'intérêt du composant sol-chaux pour les ouvrages hydrauliques et de constituer les premiers éléments d'une base de données utile aux concepteurs.

Figure 7.14 – Évaluation de la résistance in situ à la surverse –
 a) Essai sur démonstrateur du projet DigueElite (Vidourle, 2016),
 b) Essai sur plate-forme (Rhône, 2018) / (a) © INRAE – S. Bonelli (b) © Symadrem



Tableau 7.1 – Fonctions du composant sol-chaux dans un ouvrage hydraulique

Fonction recherchée	Maniabilité	Stabilité	Étanchéité	Résistance à l'érosion interne	Protection de surface	Évacuation
Propriétés du composant	Facilité de mise en œuvre (cas des sols humides)	Stabilité sous poids propre et éventuellement sous sollicitations sismiques	Étanchéité	Résistance à l'érosion interne	Résistance à l'érosion externe	Résistance aux écoulements à forte vitesse (chenal d'évacuation, etc.)
Propriétés vérifiées pour le composant sol-chaux	Application courante et codifiée (normes, guides locaux)	Application courante et codifiée (normes, guides locaux)	Démontré en laboratoire et en vraie grandeur (démonstrateur)	Démontré en laboratoire et en vraie grandeur (démonstrateur)	Démontré en laboratoire et en vraie grandeur (surverse sur démonstrateur)	À l'étude

Le traitement des sols à la chaux, déjà éprouvé et largement appliqué dans d'autres domaines, permet ainsi d'envisager des possibilités nouvelles dans le domaine des ouvrages hydrauliques, notamment :

- valorisation des matériaux limono-argileux de qualité médiocre ;
- raidissement des pentes des ouvrages grâce à l'amélioration de la stabilité mécanique ;
- simplification du système de filtration et drainage grâce à la résistance à l'érosion interne ;
- conception d'ouvrages (tronçons de digues ou petits barrages) résistants à la surverse.

2.10 La calcification des matériaux granulaires

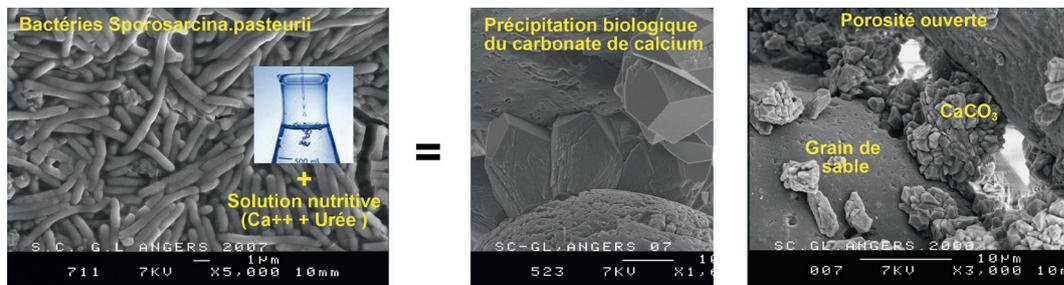
La consolidation des sols par voie biologique est une écotechnologie innovante qui imite les processus naturels de calcification pour cimenter le sol en place. La porosité, et donc la perméabilité du sol, ne sont pas modifiées significativement à l'issue du traitement. Son application est envisagée pour le renforcement des ouvrages hydrauliques en charge (digues fluviales, canaux hydroélectriques et canaux d'irrigation) vis-à-vis du risque d'érosion interne et du risque de liquéfaction.

La mise en œuvre par injection est faite à partir de forages de petits diamètres répartis sur la zone à traiter, à la profondeur voulue. La cimentation biologique est obtenue grâce à une réaction enzymatique conduisant à la formation de calcite in situ. Cette réaction est catalysée par une bactérie naturellement présente dans les sols — *Sporosarcina pasteurii* — en présence d'une solution calcifiante composée d'urée et de chlorure de calcium (figure 7.15).

La calcite correspond à une forme minérale très stable de carbonate de calcium CaCO_3 dont les cristaux vont lier physiquement les grains de sol entre eux. La cohésion et la résistance mécanique sont considérablement augmentées : en fonction des paramètres du traitement, plusieurs centaines de kPa peuvent être obtenues en quelques jours.

Figure 7.15 – Principe de la réaction de biocalcification par voie uréolytique /

© Soletanche Bachy



Le procédé Biocalcis®, développé et breveté par Soletanche Bachy, est destiné à des applications hors nappe ou sous nappe statique, qui laisse la possibilité de ménager des phases de « repos » après chaque application de solution calcifiante. Les résultats du projet BOREAL (Bio renforcement des OuvRagEs hydrAuLiques en remblais) permettent de définir les spécificités d'application du traitement de biocalcification sur les digues en charge, en présence d'écoulements. La mise au point d'une procédure d'injection compatible avec une mise en œuvre sous gradient hydraulique élevé et de fortes vitesses d'écoulement a été réalisée sur la base de configurations de digues réelles typiques. Des recherches portant à la fois sur la formulation des agents de biocalcification (bactéries- solutions calcifiantes) et sur les méthodes de mise en œuvre ont été nécessaires, avec des tests allant de la petite échelle de laboratoire à celle semi-industrielle en modèle physique. Pour garantir la sûreté des ouvrages sur le long terme à l'issue du traitement, la durabilité temporelle chimique et mécanique du matériau calcifié a été étudiée en parallèle avec des tests portant sur la résistance du matériau vis-à-vis de l'érosion interne (JET, CET, HET) et des essais triaxiaux cycliques de liquéfaction. Ces essais permettent d'acquérir des données utilisables à l'échelle du site et de réaliser des modélisations numériques pour finaliser le processus d'injection, dans les zones sensibles à la liquéfaction, qui puissent justifier la tenue de l'ouvrage.

Enfin, une étude a été menée pour garantir l'acceptabilité environnementale du procédé et vérifier l'innocuité du traitement d'un point de vue biologique et chimique. Un protocole d'étude est proposé, portant à la fois sur les aspects biologiques (devenir des bactéries utilisées, influence sur l'écosystème) et sur les aspects chimiques (influence des solutions calcifiantes avant et après réaction sur le milieu environnant), en référence à la législation en vigueur et en comparaison avec les techniques de confortement usuelles à base de liants hydrauliques ou chimiques. Les résultats du projet BOREAL démontrent que le procédé de biocalcification est efficace pour renforcer des ouvrages hydrauliques en charge contre des phénomènes d'érosion interne et de liquéfaction. Plusieurs étapes de validation ont été franchies au niveau de la durabilité, du dimensionnement, des protocoles de mise en œuvre et des dispositifs de contrôles, dans des conditions de modèles physiques représentatives de cas réels d'application [Esnault Filet A. et al. 2018].

Figure 7.16 – Mise en place et résultat d'essais de biocalcification au laboratoire CACOH / © CNR Soletanche Bachy



La réalisation de démonstrateurs in situ devrait permettre de valider le procédé BOREAL comme nouveau procédé de renforcement des ouvrages en remblais existants.

3. NOUVELLES MÉTHODES DE CALCUL

3.1 Les logiciels en contraintes effectives avec couplage hydromécanique

L'apport incontestable des modèles numériques à base d'éléments finis (MEF, écrits en repère eulérien ou lagrangien) est de coupler les équations de la mécanique à celles des transferts hydriques, pour effectuer tout type de calcul de barrages transitoire en contraintes effectives et quantifier les effets majeurs du drainage. L'emploi des lois de comportement s'est généralisé de l'élastique-plastique de Mohr-Coulomb (années 60), à la loi hyperbolique de Duncan-Chang (années 70) aux lois élastoplastiques avec écrouissage et plusieurs surfaces de charge (Cam-Clay, Prevost, Aubry et Hujeux dans les années 80). Depuis les années 90, les modèles micromécaniques intégrés par la méthode aux éléments discrets (MED ou DEM, discrete element method) progressent, mais leurs applications restent encore le domaine des chercheurs. Si la loi de Duncan est adaptée à la construction des grands barrages zonés, elle est incapable de reproduire le radoucissement et la rupture progressive et donc le comportement sismique. C'est pour combler cette lacune que la loi Hujeux [Hujeux, 1979] a été initiée et intégrée par Aubry dans le logiciel Gefdyn [Aubry et al. 1982 et 1990]. En comprenant quatre surfaces de charge à écrouissage volumique et cinématique, cette loi généralise les modèles de Mohr-Coulomb et Cam-Clay et peut ainsi modéliser tout type de sols. Son aptitude à simuler le comportement des barrages sous séismes extrêmes (modélisation de Infernillo 1989 et San Fernando 1994) ou en vidange [An Chau Ngoc 1999] est telle qu'elle est toujours utilisée à l'heure actuelle.

Les modèles aux éléments finis permettent de décrire avec précision la réponse des sols sous des chargements complexes, à la condition d'identifier de nombreux paramètres et à mettre en œuvre un minimum de ressources de calcul. Heureusement, des raccourcis allègent l'utilisation de certains modèles en introduisant des lois d'évolution explicites dans une formulation simplifiée. Ainsi, un modèle intègre dans FLAC2D les deux phénomènes principaux de la liquéfaction : (1) la relation liant le déviateur initiant la liquéfaction au nombre de cycles via la loi de Byrne et (2) la prise en compte de la résistance résiduelle après liquéfaction. Une fois ces deux mécanismes étalonnés, le modèle prédit correctement la rupture du barrage inférieur de San Fernando, l'absence de rupture du barrage supérieur lors du séisme de 1971 et l'absence de dégâts lors du séisme de 1912 [Le 2006].

Les enregistrements sismiques collectés par le comité japonais JCOLD sur les barrages pointent les phénomènes physiques nécessaires à une prédiction juste du comportement sismique des barrages en remblai [Fry et Matsumoto 2018] qui sont (1) la prise en compte des caractéristiques

3D du barrage dans le mouvement vibratoire ; (2) les paramètres élastiques à déterminer sur site ; (3) la raideur et l'amortissement évoluant avec la sollicitation ; (4) la montée de pression interstitielle avec prise en compte de la non-saturation ; (5) la décroissance de la résistance vers sa valeur résiduelle au fil de l'accélérogramme ; (6) le tassement calculé comme la somme d'une compressibilité et d'un cisaillement. Pour intégrer tous ces phénomènes, une nouvelle approche simplifiée est développée, l'approche Fr-Jp [Fry et Matsumoto 2018]. Les tests de justification de la méthode retrouvent les accélérogrammes en crête des barrages japonais à partir de l'accélérogramme de base. L'analyse de la robustesse de cette méthode justifie son aptitude à reproduire les ruptures bien documentées (barrages de Fujinuma et San Fernando).

L'étude USACE, généralisant l'approche de Sarma, évalue la réponse d'un barrage sur une fondation meuble tabulaire. Cette approche très utilisée considère un amortissement de 15 à 20 % et des modules élastiques. Une réactualisation de cette étude [Durand 2018] aboutit à une analyse sismique simplifiée des digues, à partir de 512 simulations de digues avec des hypothèses plus réalistes (séismes adaptés à la France et comportement non linéaire des matériaux). Les résultats sont disponibles sous forme d'abaques et de tableaux Excel issus des réseaux de neurones.

Récemment, l'approche granulaire [Chang et Hicher 2015] apparaît comme l'approche la plus pertinente pour simuler l'écoulement d'une couche de sols liquéfiée et ses conséquences dans un modèle aux éléments finis. Quant à la méthode aux éléments discrets (MED), qui modélise tant le comportement statique que sismique d'un barrage [Vincens et al. 2016], elle nécessite le développement de préprocesseurs et postprocesseurs conviviaux.

3.2 L'évaluation du risque d'érosion interne

Les bases de l'évaluation du risque d'érosion interne datent du colloque d'Aussois en 2005. Ce colloque est organisé par EDF, sous l'égide du Professeur Fell, avec le soutien du CFBR. Le colloque réunit une trentaine d'experts internationaux, sollicités pour partager leur expérience. À la fin de cette consultation, un consensus est trouvé pour évaluer le risque [Fell et Fry, 2007]. Le processus d'érosion interne est décomposé en quatre phases : (1) l'initiation de l'érosion, (2) la continuation de l'érosion (ou absence de rétention totale), (3) la progression d'un conduit, ou d'une instabilité (par exemple le déchaussement de surface) et (4) l'initiation de la brèche ou rupture. L'initiation regroupe quatre mécanismes : (1) l'érosion de conduit (ou de fissure), (2) l'érosion régressive, (3) l'érosion de contact et (4) la suffusion. Ces mécanismes et leurs évaluations sont ensuite adoptés dans le bulletin CIGB 164. La méthodologie d'évaluation du risque d'érosion interne examine tous les processus qui peuvent se développer depuis l'application des charges jusqu'à la rupture en huit étapes : (1) définition des situations de chargement ; (2) localisation des différentes amorces de l'initiation de l'érosion ; (3) évaluation de la vraisemblance de l'initiation ; (4) analyse des conditions de continuation (ou au contraire de filtration) ; (5) examen des conditions de progression ; (6) évaluation de la faillite de la détection ; (7) évaluation des conditions d'échec d'une intervention ; (8) vérification des conditions de protection des populations en cas de rupture. Cette approche favorise une évaluation probabiliste du risque, mais le type d'évaluation est laissé à l'initiative de l'ingénieur, sur la base de son expérience : il peut être basé sur le jugement, la quantification qualitative ou l'approche purement probabiliste.

Pour approfondir ces évaluations du risque, le CFBR s'implique dans le projet ERINOH (ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques) de 2006 à 2013. Ce projet développe des moyens expérimentaux de caractérisation de la résistance et de la détection de l'érosion interne. L'apport du projet ERINOH se concrétise sous la forme de trois guides. Dans le premier guide [Francois 2016], l'accent est d'abord mis sur la connaissance du site (l'ouvrage, sa fondation, les phénomènes à appréhender et les défauts à repérer). Ensuite, un tour d'horizon des méthodes de détection disponibles est évoqué. « Où passe l'eau ? Et à quelle vitesse ? » sont les deux questions fondamentales, auxquelles les méthodes de détection répondent. Les mesures thermométriques, de potentiel spontané et les méthodes de traçage sont parmi les plus fréquentes à obtenir de bons résultats.

Le second guide fait la revue des essais de laboratoire disponibles pour quantifier la résistance à l'érosion [Chevalier et Bonelli, 2017]. L'essai d'érosion de conduit (HET) permet d'établir la carte d'identité de l'argile ou du limon constitutif du corps de remblai ou du noyau en quantifiant deux

paramètres fondamentaux : la contrainte critique ou seuil d'érodabilité, et le coefficient d'érosion ou la cinétique d'érosion. Ces paramètres permettent d'emblée de quantifier une barrière : la résistance à l'érosion de conduit. L'érosion de conduit se développe dans les ouvertures d'un sol cohérent (trou de fouisseur, fissure, vide au contact d'une conduite...). Elle est mise en équation d'une manière rigoureuse [Bonelli et al. 2013]. La résolution permet d'estimer la cinétique d'érosion, le débit maximum et le temps de rupture de barrages homogènes avec les résultats des essais HET comme données d'entrée. Pour les sols granulaires, l'approche est totalement différente, il s'agit de repérer les conditions de ségrégation extrême qui peuvent exister pour en connaître les conséquences en termes de perméabilité, vitesse et capacité d'entraînement des particules fines. Les conditions de l'état initial doivent être les plus proches possibles de celles du terrain (prélèvement intact) et des situations les plus défavorables crédibles. Ainsi le second guide détaille l'usage de 17 appareillages développés au cours d'ERINOH caractérisant 7 phénomènes qui sont : (1) la dispersivité, (2) la filtration, (3) la suffusion, (4) l'érosion de contact, (5) l'érosion régressive, (6) l'érosion de conduit et (7) l'érosion de surface. Pour chaque appareillage sont décrits (1) le dispositif, (2) la classe de sol concernée, (3) les chiffres clés, (4) l'état de la technique et (5) les conditions d'essai.

Le dernier guide est dédié aux méthodes d'ingénierie [Deroo et Fry, 2020]. Il comporte cinq chapitres principaux. Après l'introduction, le chapitre 2 rassemble des cas réels d'érosion interne. L'idée est d'apporter une aide au diagnostic par une présentation concise des mécanismes physiques les plus fréquents, qui pourraient se reproduire sur d'autres ouvrages. Une fois les situations pathologiques clarifiées, il est important de les nommer et de les classer, le glossaire du chapitre 3 doit permettre d'appréhender les concepts et les phénomènes. Ensuite les chapitres 4 et 5 rassemblent les éléments disponibles du diagnostic : formules analytiques (chapitre 4) et situations à risque (chapitre 5). Enfin le chapitre 6 propose trois niveaux de diagnostic du risque d'érosion interne. Les approches proposées visent un niveau ambitieux de quantification et sont, à cet égard, novatrices et sans équivalent dans les autres pays. Elles peuvent être très efficaces, mais demandent encore une période de validation et être utilisées avec toute la prudence et le jugement de l'ingénieur en période probatoire.

4. RÉFÉRENCES

- Albert R., Develay D., Harzallah K., Trabelsi M., 1991 – Évacuateurs de crues fondés sur remblais : cas du barrage du Lebna. 17^e Congrès CIGB, Vienne, Q.67–R.19.
- Albert R., Gautier J., 1992 – Évacuateurs fondés sur remblai. *La Houille Blanche*, n° 2.
- An Chau Ngoc, 1999 – Analyse de l'influence des caractéristiques hydrauliques et mécaniques sur le comportement des barrages en terre et en enrochement. Thèse de l'Université de Grenoble.
- Aubry D., Hujeux J.-C., Lassoudière F., Meimon Y., 1982 – A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behavior. *Proceeding of the International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, Zürich, Suisse, 3–13.
- Aubry D., Modaressi A., Modaressi H., 1990 – A constitutive model for cyclic behaviour of interfaces with variable dilatancy. *Computers and Geotechnics*, 9(1–2): 47–58.
- Bonelli S. (ed.), 2013 – *Erosion of Geomechanics Applied to Dams and Levees*, 388 p. Wiley / ISTE.
- Cazzuffi D., Giroud J.-P., Scuero A. & Vaschetti G., 2010 – « Geosynthetic barrier systems for dams », Keynote Lecture, *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics*, Guarujá, Brazil, May 2010, Vol. 1, pp. 115–163.
- Chang S., Hicher P.Y., 2005 – An elasto-plastic model for granular materials with microstructural consideration. *International Journal of Solids and Structures*, 42 (2005) 4258–4277.
- Chevalier C. & François D., 2017 – *Méthodologie de Caractérisation Expérimentale. Guide ERINOH Volume 1*. 233 p. Irex. Presse des Ponts. ISBN : 978-2-85978-501-7.
- CIGB, 2017 – L'érosion interne dans les digues, barrages existants et leurs fondations. *Bulletin technique* n° 164.
- Degoutte G., Fry J.J., 2002 – Les géotextiles dans les barrages : retours d'expérience. Colloque technique CFGB-CFG « Géotextiles et géomembranes dans les barrages », juin 2002.

- Deroo L. & Fry J.J., 2020 – Méthodologie pour l'ingénierie. Guide ERINOH Volume 3. Irex. Presse des Ponts. ISBN : 978-2-85978-501-7 (à paraître).
- Durand C., 2018 – Stabilité des digues sous chargement sismique : vers une nouvelle génération de méthodes simplifiées. Université Grenoble Alpes.
- Esnault Filet A., Gutjahr I., Béguin R., Garandet A., Viglino A., Mondoloni A., Monier J.-M., Emeriault F., Martins J., 2018 – Le renforcement des ouvrages hydrauliques en remblais par biocalcification : bientôt une réalité. Colloque CFBR 2018 « Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues ». https://barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/colloque2018_maintenance.pdf
- Fell R. & Fry J.J., 2007 – Internal Erosion of Dams and their Foundations. Taylor & Francis / Balkema. ISBN: 978-0-415-43724-0.
- François D., 2016 – Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai. Guide ERINOH Volume 2. Irex. Presse des Ponts. ISBN : 978-2-85978-501-7.
- Fry J.J & Matsumoto N., ed. 2018 – Validation of numerical analysis of dams and their equipment. ICOLD Volume 1. CRC Press.
- Giroud J.-P., Gourc J.-P., Bally P. and Delmas P., 1977 – Comportement d'un textile nontissé dans un barrage en terre. Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics, Session 6, Paris, France, April 1977, p. 213–218.
- Giroud J.-P. & Perfetti J., 1977 – « Classification des textiles et mesure de leurs propriétés en vue de leur utilisation en géotechnique », Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics, Session 8, Paris, Avril 1977, pp. 345–352.
- Giroud J.-P., 1990 – « Functions and Applications of Geosynthetics in Dams », Water Power and Dam Construction, Vol. 42, N° 6, June 1990, pp. 16–23.
- Giroud J.-P., 2010 – « Development of criteria for geotextiles and granular filters », based on Terzaghi Lecture, Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Guarujá, Brazil, May 2010, Vol. 1, pp. 45–64.
- Hujeux J.-C., 1979 – Calcul numérique de problèmes de consolidation élastoplastique. Thèse de doctorat de l'École Centrale, Paris.
- Le T. N., 2006 – Modélisations du comportement des barrages en terre sous séismes. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Nerinx N., Bonelli S., Cornacchioli F., Fry J.J., Herrier G., Mercier F., Puiatti D., Richard J.-M., Tachker P., 2018 – DigueELITE. Overflow resistant lime treated soils for dikes and earthdams, Prix de l'innovation, 26^e congrès de la CIGB, Vienne.
- Nerinx N., Agresti P., Bonelli S., Cochet P., Fry J.J., Herrier G., Lino M., Mouy V., Puiatti D., Touileb B., 2018 – Petits barrages et digues en sols traités : matériaux, concepts, comportement, retours d'expérience et innovation. 26^e congrès de la CIGB, Vienne, Autriche.
- Martin P., 1999 – Évacuateurs de crues à écoulement à surface libre sur barrages en terre. Barrages et Réservoirs. N° 9 septembre 1999. ISSN 1256 5202.
- Royet P., Girard H., Poulain D., Tisserand C., 2002 – Comportement des géomembranes dans les barrages français en remblai. Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; CEMAGREF, EAT. n° 31, 2002, p. 3–15 (hal-00465446).
- Touze-Foltz N., Croissant D., Farcas F., Royet P., 2011 – Performance hydraulique à long terme des géomembranes en bitume oxydé exposées et recouvertes. 8^{es} Rencontres Géosynthétiques, mars 2011, Tours, France. p. 349–356 (hal-00583600).
- Vincens E., Plassiard J.-P., Fry J.J., 2016 – Dry stone Retaining Structures. DEM modeling. ISTE Presse Elsevier 2016. 147 p. ISBN : 978-78548-080-5.

CHAPITRE
8

BARRAGES MOBILES ET BARRAGES EN RIVIÈRE

1. INTRODUCTION

Les premiers barrages mobiles ont été établis sur les rivières afin de permettre les échanges commerciaux dès le 16^e siècle, avec la naissance d'une véritable technologie du contrôle des masses d'eau, grâce aux barrages construits sur les cours d'eau et le creusement de canaux. La construction d'un barrage destiné à relever artificiellement le niveau d'eau à l'amont de l'ouvrage était nécessaire afin d'assurer le maintien d'un tirant d'eau suffisant pour les bateaux. Par ailleurs, la nécessité pour les bateaux de pouvoir franchir l'obstacle soit du bief haut au bief bas, soit réciproquement, avait conduit Léonard de Vinci à proposer le concept de l'écluse à sas, et la nécessité de laisser passer les crues a donné naissance au concept du barrage mobile, capable de s'effacer dès que la crue se présente.

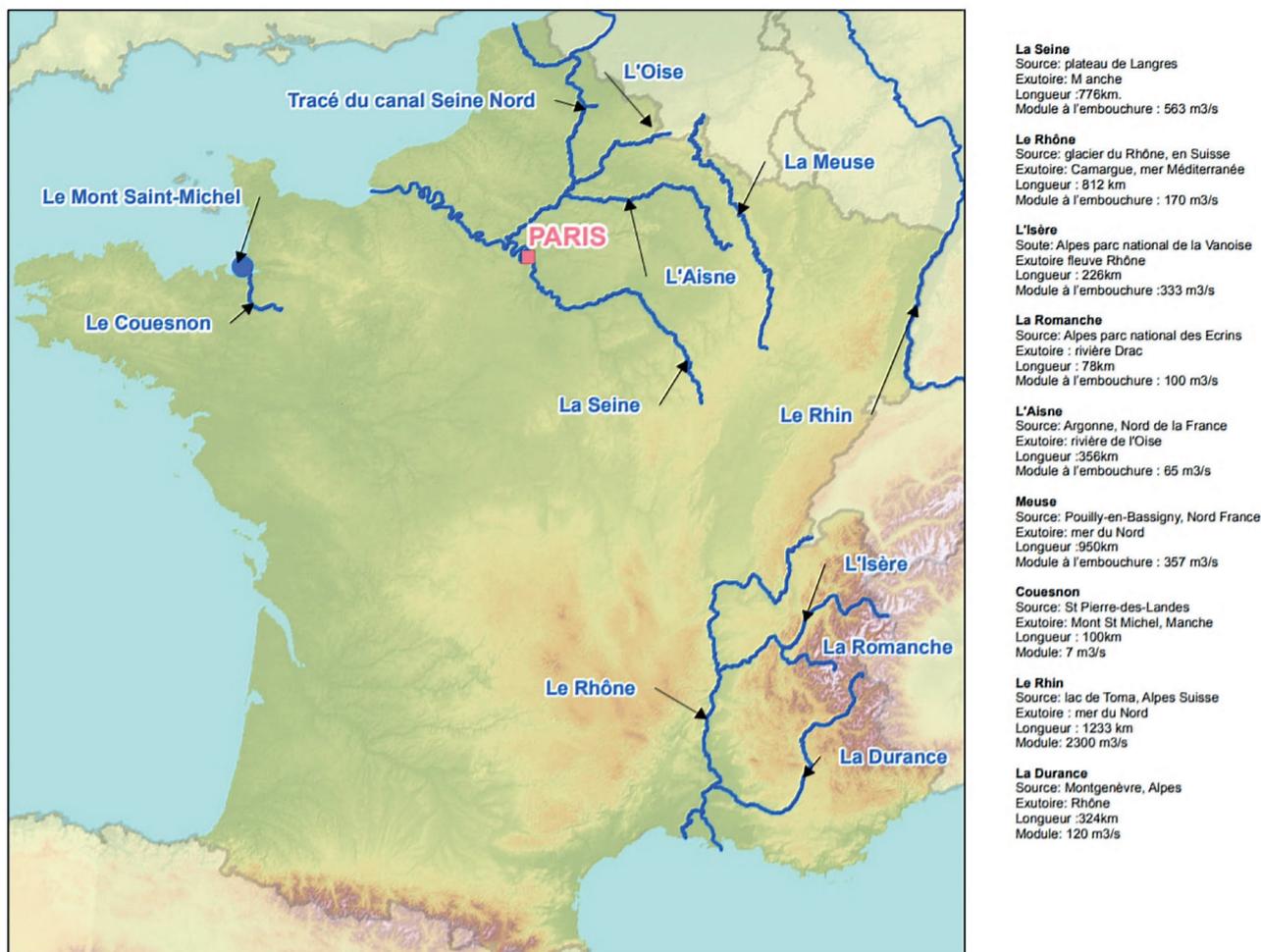
Auparavant, la création d'une chute exploitable par un barrage sur un cours d'eau avait permis l'utilisation de la force hydraulique par l'intermédiaire d'une roue, puis d'une turbine. C'est ainsi que les moulins ont, dès la fin de l'antiquité, accéléré le développement de ces barrages capables de créer cette chute.

Sur les fleuves ou dans la partie aval des rivières, les vallées s'évasent, les débits de crue augmentent et l'occupation humaine devient importante. Les barrages implantés dans ces lieux sont généralement conçus pour être effacés presque entièrement afin de permettre le libre passage des débits (liquides et solides) du cours d'eau pendant les crues. Ils intègrent nécessairement une part importante d'équipements hydromécaniques, permettant d'ajuster le taux d'obturation du cours d'eau ; ces barrages sont appelés des Barrages Mobiles en Rivière (BMR). De hauteur généralement modeste, ces aménagements, dits de « basse chute », assurent un nombre important de fonctions dans un environnement aujourd'hui souvent très urbanisé : gestions des niveaux d'eau (en crue, en période d'étiage), approvisionnement en eau potable, irrigation, activités touristiques, navigation, production hydroélectrique, etc. Dans les deux derniers cas, les BMR intègrent des écluses et des usines de turbinage, qui sont implantées soit dans l'alignement du barrage, soit sur un canal dans lequel une partie du débit est déviée.

En France, le parc des BMR est relativement ancien. Certains ouvrages encore en service ont plus de cent ans. Le vieillissement des aménagements, la modification et l'amélioration des voies de communication fluviales (alternatives aux nombreux atouts des autres modes de transport), les évolutions du marché de l'énergie, les évolutions réglementaires, environnementales (continuité piscicole et sédimentaire notamment) et sociétales, sont autant de facteurs à l'origine de profondes métamorphoses de ces ouvrages hydrauliques clés de l'aménagement du territoire français. Enfin, le multi-usage de l'eau est depuis toujours, et peut-être plus encore aujourd'hui, un des éléments incontournables dans la conception et l'exploitation de ces aménagements.

Ce chapitre présente quelques grandes réalisations françaises récentes ou à venir, en insistant sur la mise en œuvre de solutions nouvelles et ambitieuses dans un contexte de plus en plus complexe. Les projets présentés concernent la Seine, l'Aisne, la Meuse, la Romanche, l'Isère, le Rhône, le Rhin, la Durance, le Couesnon et le Canal Seine-Nord Europe. La situation des rivières ou canaux sur lesquels ces projets sont implantés peut se voir sur la carte ci-dessous.

Figure 8.1 – Localisation des rivières équipées décrites dans le chapitre



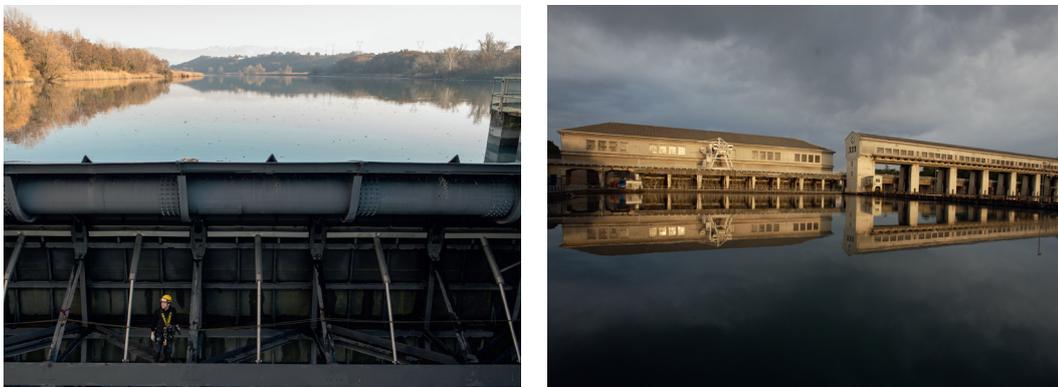
2. MAINTENANCE ET MODERNISATION DES AMÉNAGEMENTS EXISTANTS

2.1 Le remplacement des équipements de vantellerie

Programme de remplacement des vannes de la basse Isère. 15 vannes au total sur les 3 barrages hydroélectriques de la basse Isère (Pizançon, La Vanelle, Beaumont-Monteux) sont concernées. Les plus anciennes ont été mises en exploitation en 1921 (Beaumont-Monteux). Ces travaux ont démarré en juillet 2012 et s'étalent sur plus d'une dizaine d'années. Les vannes, de 15 et 18 m de largeur, de hauteur 10 à 14 m, pèsent entre 110 et 150 tonnes chacune. Il faut 8 à 14 mois pour changer une seule d'entre elles. Les travaux prévoient également le changement des organes de manœuvre (moteurs, chaînes, réducteurs) ainsi que la modernisation des équipements de contrôle-commande et des moyens de manutention des barrages (ponts roulants, portiques à batardeaux). Les vannes d'origine de ces barrages étant revêtues de peinture amiantée, elles sont entièrement recyclées par une filière spécifique. Les travaux nécessitant le batardage des

passes sur de longues périodes, le transit des débits et les dissipations d'énergie sur un nombre réduit de passes imposent une surveillance renforcée vis-à-vis des phénomènes d'érosion aval, par des bathymétries régulières et des scans laser.

Figure 8.2 – Aménagements de La Vanelle / © EDF-Philippe GROLLIER/PWP et Pizançon / © EDF-Franck ODDOUX/PWP



Programmes de maintenance et de remplacements des portes d'écluses du Rhin. La navigation sur le Rhin s'est développée depuis le 18^e siècle et trouve actuellement pleinement sa place dans les priorités européennes pour le transport. Premier fleuve commercial d'Europe aujourd'hui, le Rhin constitue un enjeu économique régional important pour l'Alsace et pour les États riverains (France, Allemagne, Suisse). Chaque année, 30 millions de tonnes de marchandises transitent sur la partie alsacienne du fleuve (placant Strasbourg et Mulhouse, deuxième et troisième ports intérieurs français).

Au-delà de la production d'énergie, les aménagements du Rhin ont pour mission d'assurer la navigation libre et gratuite des bateaux sur le Rhin, 24 h / 24 h, toute l'année. Huit écluses, situées entre Kembs et Strasbourg, permettent ainsi le passage de plus de 15 000 bateaux par an.

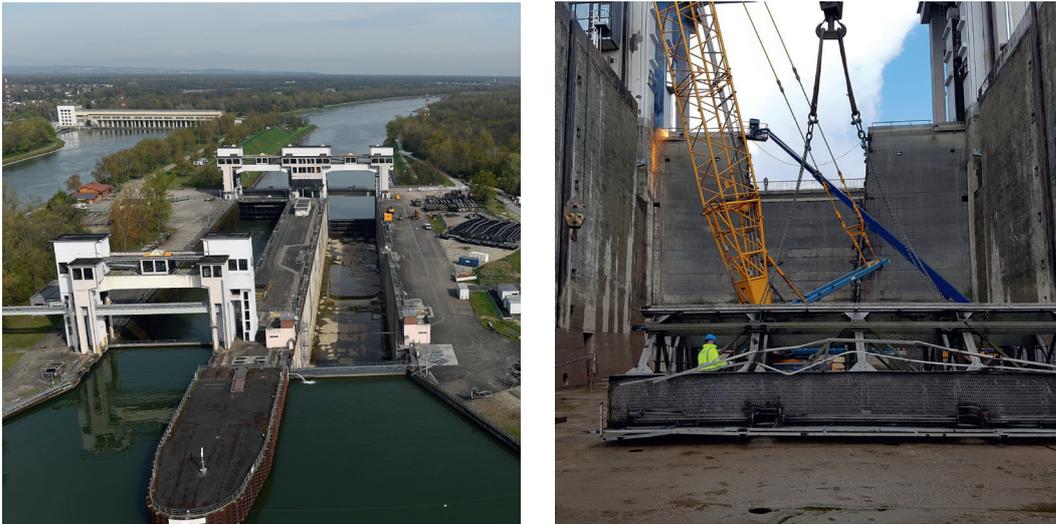
Un programme pluriannuel de modernisation des écluses du Rhin doit pérenniser ce mode de transport alternatif et écologique. Depuis quelques années, les opérations de maintenance et de modernisation majeures portent sur les écluses de Strasbourg, Fessenheim et Kembs. En 2016, la porte de l'écluse de Kembs datant de 1932 a été remplacée par un équipement de 26 m de large pour 18 m de haut et de 600 tonnes. L'équipement est conçu suivant les règles de conception à la fatigue afin de résister aux fortes variations de charges et au nombre de cycles de manœuvre très important (40 à 50 éclusées par jour pendant 70 ans). Le maintien du trafic fluvial durant les travaux est l'un des enjeux majeurs du programme.

Figure 8.3 : Navigation sur le Rhin - Écluse de Kembs

© EDF-Agence Rea/X. Popy & EDF-Lortscher



Figure 8.4 – Remplacement des portes aval des sas / © EDF-AIRDIASOL/Rothan & EDF

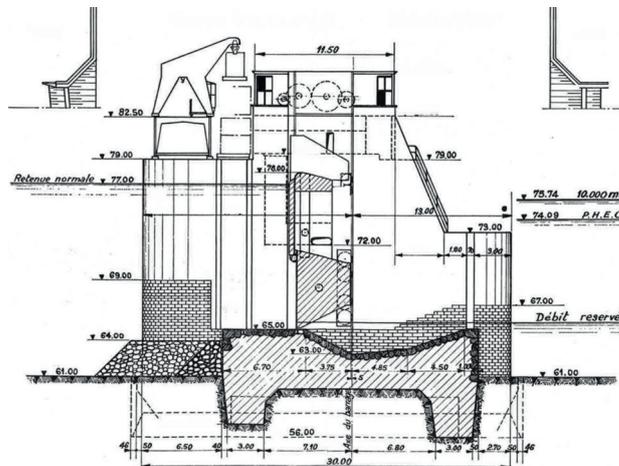


2.2 Les ouvrages de génie civil et le problème de l'érosion aval

Les premiers barrages mobiles construits sur le Rhône ont été ceux de Donzère et Rochemaure, tous deux fondés sur les marnes et le calcaire pour Donzère. Leur conception hydraulique, mise au point au laboratoire d'essais sur modèles physiques, avait abouti à fixer le ressaut hydraulique et la dissipation d'énergie associée dans un radier de type « auge ». Il n'était initialement pas prévu de protection spécifique en aval de ce radier.

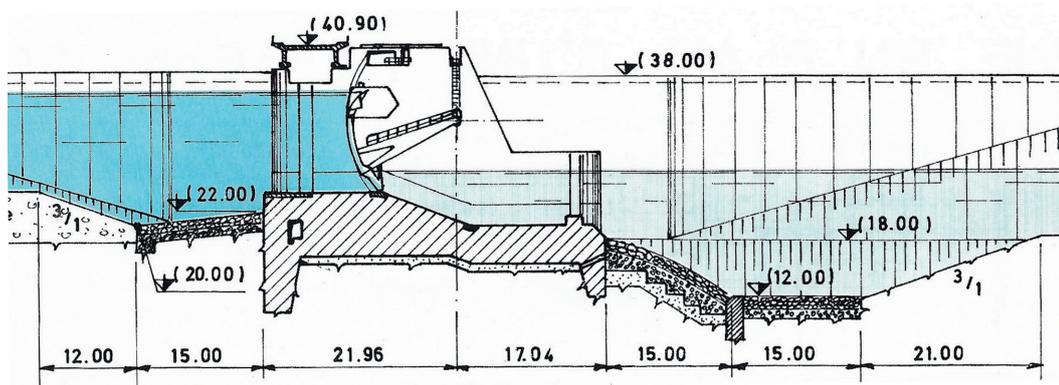
Figure 8.5 – Barrage de Rochemaure (aménagement de Montélimar – mise en service 1957) / © CNR

Les premiers retours d'expérience ont fait apparaître, très tôt, un phénomène d'érosion prononcée en aval immédiat du radier, laissant craindre son prochain sous-cavage. Des mesures de confortement ont été mises en œuvre, consistant en l'excavation, contrôlée cette fois-ci, de fosses profondes de quelques mètres et larges de 10 à 20 m en aval immédiat du radier, puis en leur remplissage par des enrochements de forte blocométrie.



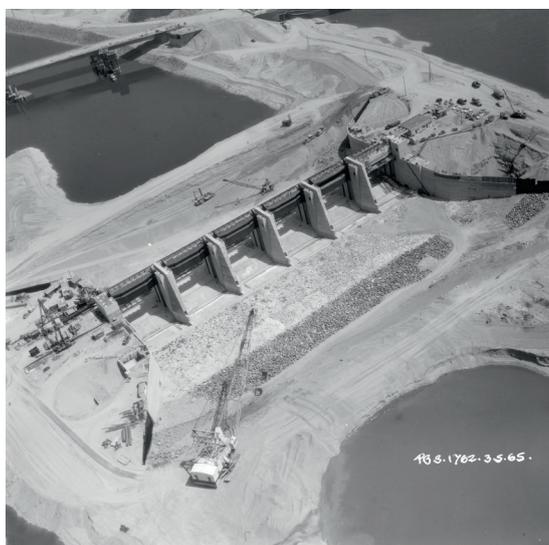
Dès lors, ces protections aval furent systématiquement étudiées sur modèle physique pour aboutir à une conception type, dite « Chatou », qui donna satisfaction jusqu'à la fin des années 60. Un tournant survint avec le barrage de la Roche-de-Glun qui, mis en service en 1968 avec ce type de protection, dut rapidement être conforté. Aussi, après quelques nouvelles recherches et étapes intermédiaires (barrage de Caderousse mis en service en 1975), la conception se stabilisa autour d'un nouveau type de radier / protection aval, dit « Gerland ».

Figure 8.6 – Barrage de Caderousse (aménagement de Caderousse – mise en service 1975) / © CNR



À l’occasion des études de l’aménagement de Péage-de-Roussillon, la conception hydraulique du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf (1977) a fait l’objet d’une innovation majeure. Plutôt que de chercher à fixer le ressaut hydraulique et à dissiper l’énergie associée dans l’auge prononcée du radier (impliquant un volume propre du radier assez important et des fouilles pour la fondation assez profondes), il a été proposé de le déplacer afin qu’il se brise à quelques dizaines de mètres en aval du radier. Dans cette zone, la création de fosses, correspondant à l’énergie résiduelle à dissiper, ne pose pas de problème structurel au barrage lui-même. La solution technique a consisté en un amincissement notable du radier qui présente toujours une légère auge et l’adjonction, sur sa partie aval, d’une « dent de dissipation ». Cette dernière est associée à un tapis de protection subhorizontal permettant de renvoyer le ressaut se briser suffisamment loin en aval de l’ouvrage. Dès lors, tous les ouvrages du Rhône furent conçus selon ce schéma qui a donné entière satisfaction à l’usage.

Figure 8.7 – Barrage de Pierre-Bénite / © CNR



L’évolution de la conception des radiers des BMR du Rhône illustre bien l’aspect crucial du dimensionnement de leurs protections aval et les progrès réalisés au fil des années en termes de conception. Le suivi de l’érosion aval peut mettre en évidence des évolutions qui nécessitent, dans certains cas, une re-conception d’envergure. L’utilisation de modèles numériques 3D permet d’optimiser le coût de conception et les délais associés, sans pour autant se substituer totalement à la modélisation physique et à l’analyse du retour d’expérience. Très récemment, le couplage modélisation physique et numérique a permis d’optimiser les travaux de protection aval du radier du barrage de Seyssel (1951) soumis à une lente érosion,

laissant craindre un sous-cavage du radier du barrage et du mur de séparation usine-déchargeur. Les 17 000 m³ d’enrochements nécessaires ont été mis en œuvre en 2015, approvisionnés par un chenal navigable de 1,8 km créé pour l’occasion.

Figure 8.8 – Barrage de Seyssel – vue aérienne & travaux d'enrochements / © CNR



L'aménagement de Beaumont-Montoux sur l'Isère a connu, depuis le début de son exploitation (1921), des phénomènes d'érosion aval du fait de son radier plat dépourvu de tout dispositif de dissipation d'énergie. Les confortements successifs réalisés pour stopper cette érosion n'ont pas permis d'assurer une protection pérenne. Des blocs de molasse ont par exemple été arrachés à l'aval du barrage lors des crues récentes de 2008 et 2010. Un modèle numérique 3D a permis de simuler les écoulements et de les analyser en termes de courantologie, pour définir les cas de fonctionnement dimensionnants du barrage. La complexité des phénomènes a nécessité de poursuivre les études avec un modèle réduit. L'ensemble de ces études a conduit en 2015 à la préconisation d'une solution anti-affouillement optimale combinant :

- une modification de la loi de gestion du barrage pour assurer des ouvertures symétriques de vannes et la répartition du débit évacué entre toutes les passes ;
- l'implantation d'un bassin de dissipation sur le radier, constitué de dents de dissipation en aval des vannes et d'un seuil releveur à son extrémité ;
- la stabilisation des zones affouillées par un tapis d'enrochements.

Figure 8.9 – Barrage de Beaumont-Montoux / © EDF-Philippe GROLLIER/PWP et vue du modèle physique / © Artelia

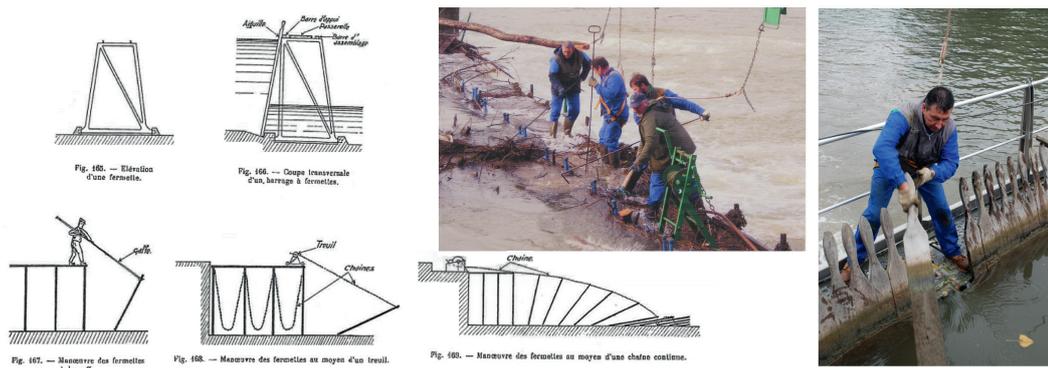


2.3 La modernisation complète des aménagements

Voies Navigables de France (VNF) gère des barrages qui ont pour fonction de maintenir la ligne d'eau en période d'étiage, pour la navigation et les autres usages (canoë-kayak, pêche, prélèvements, base de loisirs, production d'énergie hydroélectrique).

Une centaine de ces ouvrages date parfois du 19^e siècle et ne correspond plus aux besoins actuels d'exploitation. Ces barrages manuels (système Poirée, hausses Aubert...) ne permettent pas une régulation fine du niveau d'eau et perturbent la circulation des espèces piscicoles et des sédiments. En outre, leur exploitation présente des contraintes en termes de moyens humains à mobiliser, de dangerosité et de pénibilité pour les barragistes.

Figure 8.10 – Illustrations de manœuvres de barrages type Poirée / © VNF



Dans le cadre de la modernisation des infrastructures fluviales françaises, VNF a par conséquent engagé, en 2004, un programme pluriannuel de remplacement de ces barrages afin de permettre :

- de réguler de manière plus fiable le plan d'eau (réponse aux besoins de la navigation et aux prélèvements et rejets d'eau) ;
- d'apporter une réponse plus rapide et sécurisée vis-à-vis de l'effacement des barrages en crues ;
- de réduire les risques pour les exploitants intervenant sur les ouvrages ;
- de restaurer les barrages anciens en raison de leur mauvais état général ;
- de réaliser des ouvrages de franchissement piscicole, lorsqu'ils sont inexistantes ou non fonctionnels, afin d'améliorer la continuité écologique sur les cours d'eau.

Ces projets de modernisation peuvent se faire à l'échelle d'un barrage ou d'un itinéraire, c'est notamment le cas respectivement du barrage de Vives-Eaux et des barrages de l'Aisne et de la Meuse, exposés ci-après.

Le barrage de Vives-Eaux. L'itinéraire de la haute Seine, sur lequel le barrage de Vives-Eaux est implanté, comporte 8 barrages et 15 écluses.

Figure 8.11 – Ancien barrage en fonction depuis 1928, muni de hausses Aubert / © Artelia



Figure 8.12 – Barrage mis en service le 23 octobre 2019 / © Artelia – Hervé Abbadie



La rénovation de l'ensemble des barrages, à l'amont de Paris, a consisté à mettre en place des clapets commandés automatiquement par un système centralisé permettant leur effacement coordonné. Une modélisation hydraulique complète de l'amont de la vallée a permis la simulation de l'écoulement des crues jusqu'à Paris, et de définir, suivant le niveau de cette crue, le degré et le moment d'effacement des clapets, ainsi que les conditions de navigation lors de ces crues, en particulier pour identifier les niveaux conduisant aux interdictions de circulation.

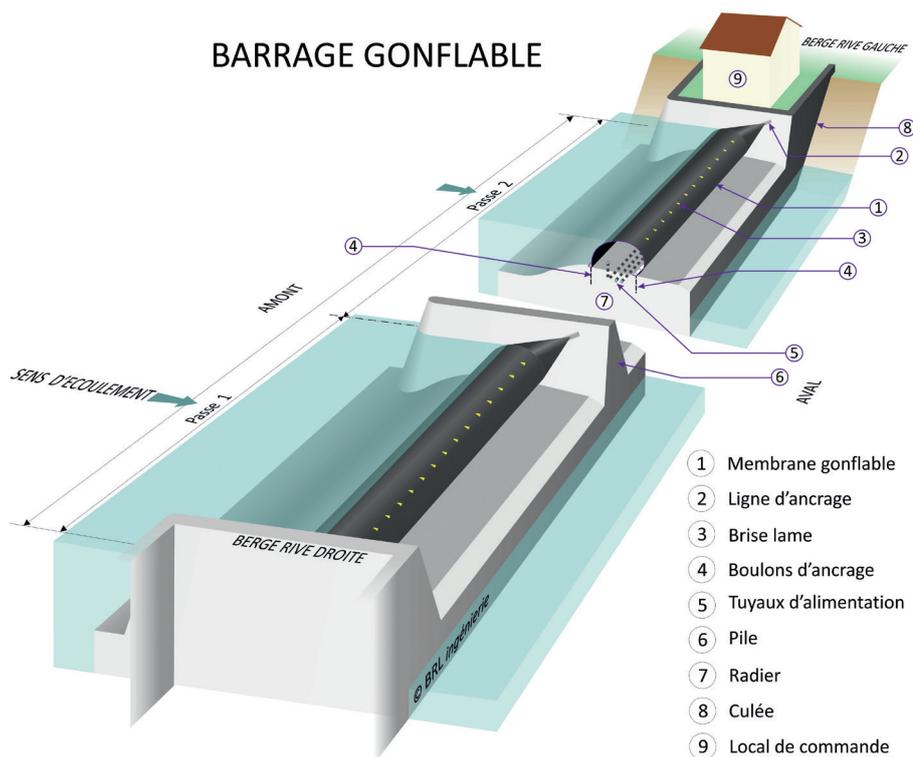
La réhabilitation de Vives-Eaux, construit en 1928, et déjà réhabilité avec des hausses Aubert dans les années 1970, a consisté en la construction complète à sec d'un nouveau barrage à l'amont de celui existant, tout en maintenant les conditions de navigation.

Les barrages de l'Aisne et de la Meuse. L'Aisne et la Meuse comprennent respectivement 6 et 23 barrages mobiles manuels à rénover. Pour répondre à des enjeux de massification, de standardisation et d'optimisation de la gestion de ces deux bassins versants, VNF signe, en 2013, un partenariat public privé (PPP) visant à remplacer en un seul projet les 29 barrages au plus tard en mars 2020 et à exploiter un parc de 31 barrages jusqu'en 2043.

Les aménagements réhabilités seront tous équipés de bouchures gonflables à l'eau, sur un linéaire cumulé de 2 km, ce qui est un record mondial. La mise en service de quatre centrales hydroélectriques au fil de l'eau fait également partie du projet.

La technologie des bouchures gonflables à l'eau se base sur le principe des vases communicants : plusieurs puits (colonnes d'eau) logés dans un local technique en rive permettent de collecter l'eau de la rivière, de rehausser le niveau d'eau via un pompage et de le mettre en relation avec la membrane au moyen d'une conduite d'amenée entraînant son remplissage, de vidanger la membrane au moyen d'une vanne, voire d'une pompe, selon qu'il existe ou non une différence de charge entre l'amont et l'aval du barrage.

Figure 8.13 – Schéma du fonctionnement d'un barrage gonflable à l'eau / © BRLi



Les bouchures gonflables à l'eau présentent de nombreux avantages :

- facilité d'exploitation ;
- mise en œuvre rapide : 4 ans pour installer 75 bouchures gonflables ;
- adaptées aux dimensions des passes mobiles, avec une standardisation possible (classes de largeur de 16,80 m à 34,80 m et classes de hauteur de 1,75 m à 2,86 m) ;
- intégration paysagère (absence de passerelle et d'organe de manœuvre externe) ;
- durée de vie de 30 ans des membranes (résistances à l'abrasion, embâcles, UV...) ;
- coût des travaux et d'exploitation souvent plus faibles que pour des clapets.

Figure 8.14 – Barrage de Fépin mis en service le 23 octobre 2018 / © BRLi



3. ADAPTATION DES AMÉNAGEMENTS EXISTANTS AUX NOUVEAUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIÉTAUX

3.1 Multi-usages de l'eau et électricité

Multi-usages de l'eau et adaptation aux nouveaux enjeux énergétiques : cas de la file Durance-Verdon. La file d'aménagements Durance-Verdon est exploitée par EDF. Elle est constituée de deux réservoirs de tête (Serre-Ponçon et Sainte-Croix). Elle est décrite dans le détail au chapitre 1 « Usages multiples des barrages ».

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est également la première région solaire de France. C'est pourquoi des expérimentations agrégeant des moyens de production hydraulique gravitaire et de production photovoltaïque sont réalisées sur le bassin de la Durance. Ces expérimentations permettent de lisser la production variable intermittente et de tester la régulation du système électrique.

Pour répondre aux enjeux de continuité sédimentaire très prégnants sur la Durance, un vaste programme a été construit au sein duquel de nombreuses études et diagnostics sont réalisés pour bâtir une stratégie de gestion globale (cf. paragraphe suivant).

3.2 Continuité sédimentaire

Pour répondre aux multiples enjeux liés aux sédiments sur les BMR (production, sûreté, environnement dans et en aval de la retenue, multi-usages de l'eau...), il est mis en œuvre sur le Rhône des levées « en continu » de la carte des fonds, à l'aide d'un bateau hydrographique, et un suivi du bon passage des crues par une équipe d'hydrauliciens dédiée. Ailleurs, d'autres solutions, comme la démarche d'état cible sédimentaire, sont déployées ; le concept consiste à définir l'état des fonds de la retenue compatible avec les fonctionnalités de l'aménagement. Des solutions (mode de gestion des ouvrages, travaux) sont ensuite recherchées et mises en place pour tendre vers cet état cible et le maintenir dans la durée. La réalisation d'un document de synthèse, incluant l'ensemble des enjeux liés aux sédiments, permet à l'exploitant d'avoir une gestion cohérente dans le temps. Ce document est par ailleurs un outil de communication entre toutes les parties prenantes. Un large programme de suivi par enregistrements est mis en œuvre pour comprendre les processus et évaluer l'efficacité des solutions. Une boucle de retour est instaurée afin d'adapter les solutions et les fonds cibles si besoin.

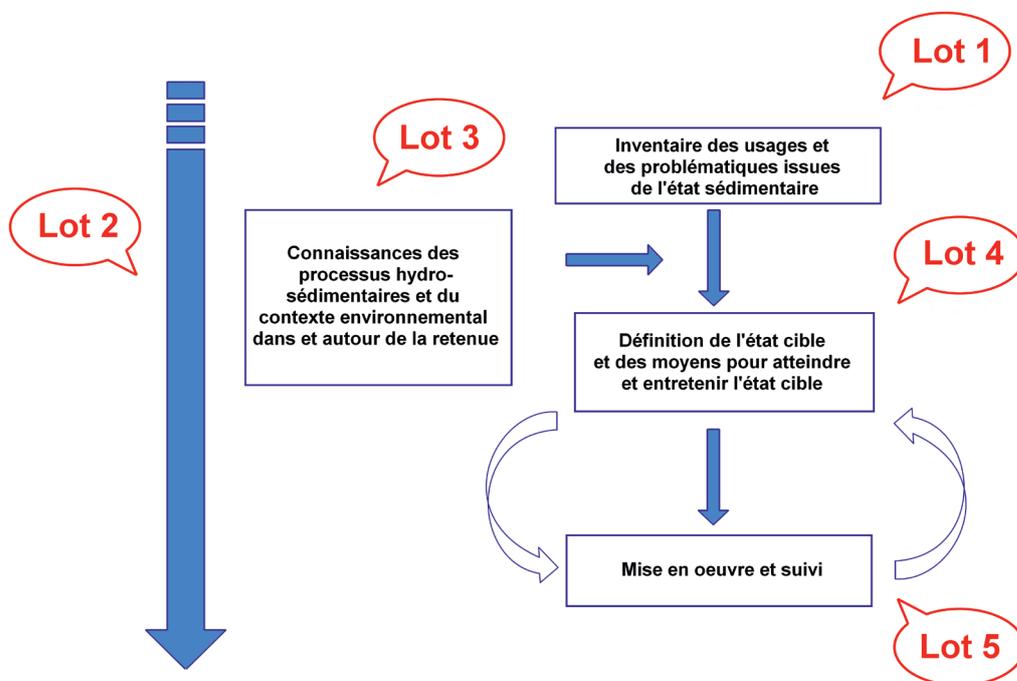
À titre d'exemple, sur la chaîne de la Durance, une gestion coordonnée des aménagements, entre Saint-Lazare et Mallemort, est mise en place pour l'exploitation des ouvrages tout en garantissant la transparence sédimentaire, la fourniture d'un support sédimentaire à la biologie et la non-aggravation des risques inondations.

Sur d'autres ouvrages, des actions de réinjections sont aussi réalisées pour compenser le déficit sédimentaire (voir l'exemple du Rhin au chapitre 4 « Retenues et Environnement »).

Sur l'Isère, l'exploitation de l'aménagement de Saint-Égrève a été adaptée au fil des années grâce à l'amélioration des connaissances du fonctionnement sédimentaire. Ainsi, la gestion par chasses hydrauliques a été complétée par plusieurs moyens permettant de maintenir les fonds de la retenue en deçà de cotes cibles zones par zones (maintien des chasses hydrauliques, dragages de zones particulières, manœuvres optimisées des vannes en crue, abaissement du plan d'eau et maintien efficient des mesures de suivi pour constituer des bilans réguliers).

Sur les aménagements de l'Arc, les moyens de gestion sédimentaire sont étudiés pour assurer la dispersion des cônes des affluents et lutter ainsi contre les inondations (voir l'exemple de l'Arc au chapitre 4 « Retenue et Environnement »).

Figure 8.15 – Illustration de la démarche État Cible / © EDF



3.3 Continuité piscicole

La transparence piscicole accompagne tout nouveau projet de barrages mais peut également constituer un programme à part entière dans le cas d'ouvrage existant non équipé. Le plan « Migrateur Rhône Méditerranée », lancé depuis plus de 15 ans, a vu la construction de nombreuses passes à poissons au droit des BMR du Rhône.

Une autre illustration de la transparence piscicole sur les BMR concerne le site de Notre Dame-de-la-Garenne sur la Seine, qui a été doté en 2011 d'une nouvelle passe à poissons au sein de l'îlot séparant le barrage mobile des écluses.

Cette passe est constituée d'une rivière artificielle, longue de 170 m, permettant aux diverses espèces de franchir la chute de 4 m. Elle est composée d'un chenal à faible pente, visant à se rapprocher des conditions d'écoulement rencontrées dans le milieu naturel. C'est la première rivière artificielle « à macro-rugosités » de cette ampleur en France.

Le principe de la rivière à macro-rugosités est de répartir de façon homogène la dénivelée totale de la chute du barrage sur l'ensemble du développé de l'ouvrage. Les plots (macro-rugosités) jouent le rôle de frein hydraulique ainsi que de refuge pour le poisson (zone à faible vitesse) en aval immédiat. La rugosité de fond vient compléter les possibilités de repos et permet au poisson de se repérer.

La singularité de l'ouvrage est d'être constitué d'un radier non bétonné et de macro-rugosités composées de segments de palplanches fichées dans le sol permettant de freiner les écoulements, mais également d'assurer la stabilité du fond de l'ouvrage. Afin d'obtenir un rendu plus « naturel », l'ouvrage a été calé pour que les palplanches soient en permanence recouvertes d'une faible lame d'eau reproduisant l'aspect d'un radier de rivière.

Figure 8.16 – Barrage, passe à poissons et écluses de Notre-Dame-de-la-Garenne / © VNF



Figure 8.17 – Photos des macro-rugosités hors d'eau et en eau / © BRLi



Cette rivière artificielle présente en aval un clapet de régulation pour maintenir une chute d'une vingtaine de centimètres garantissant l'attractivité de l'ouvrage. Ce clapet s'accompagne d'une rampe spécifique pour les petites anguilles (civelles) afin de faciliter leur passage.

4. NOUVEAUX PROJETS INNOVANTS

4.1 Le projet du canal Seine-Nord Europe

Le canal Seine-Nord Europe est le maillon central du projet prioritaire européen Seine-Escaut. Ce projet européen consiste en la réalisation d'une liaison fluviale à grand gabarit entre la France, la Belgique et les Pays-Bas au sein du corridor multimodal européen mer du Nord-mer Méditerranée. Il vise à relier plus efficacement, dans une logique multimodale, les autres modes de transport, les ports maritimes et les ports intérieurs du Nord de la France et de l'Europe.

Le projet de canal Seine-Nord Europe vise ainsi à lever le goulet d'étranglement entre la vallée de l'Oise et le canal de Dunkerque à Valenciennes. La liaison est assurée actuellement par le canal du Nord, dont le gabarit des bateaux limité à 700 tonnes, la présence d'un tronçon en galerie souterraine limitant les transits en toute sécurité et le nombre des écluses sont des

freins au développement du transport fluvial et à la création d'un réseau de ports intérieurs multimodaux. Le projet améliorera la circulation des biens par voie d'eau entre la France et les pays voisins, dans une perspective de développement des transports durables et plus soucieux des contraintes environnementales. Il permettra de créer et de consolider des plates-formes multimodales et des terminaux à conteneurs à l'échelle régionale, nationale et européenne, de manière progressive et sur le long terme.

La construction de cet important aménagement, de 107 km de longueur, 54 m minimum de largeur en plafond et 4,5 m de profondeur, comprendra six écluses de très grande hauteur et une écluse de jonction avec le canal du Nord existant, ainsi qu'un pont-canal de 1,3 km franchissant la Somme. Elle nécessitera 61 rétablissements routiers et ferroviaires et comprendra 4 plateformes d'activités avec des quais de transbordement ainsi que 3 autres quais de transbordement, 2 quais industriels de desserte pour les industries locales et 2 équipements pour la plaisance.

Un barrage, permettant le stockage de 14 millions de m³ d'eau, alimentera le bief de partage du canal. L'ensemble du projet nécessitera d'importants travaux de terrassements (près de 60 millions de m³ de terres déplacées) et comportera des remblais de plus de 20 m de hauteur sur des longueurs significatives de son tracé. Les études sont en cours depuis 2005 et la réalisation est prévue dans les années 2020–2026.

4.2 Reconfiguration complète d'une file d'aménagements sur la Romanche

Aux portes de l'Oisans, le projet Romanche-Gavet est le plus grand chantier hydroélectrique mené en France depuis 2011.

Plus puissant, mieux intégré au paysage et respectueux de l'environnement, ce nouvel équipement souterrain remplace les 6 centrales et 5 barrages actuels de la vallée de la Romanche. Ce projet optimise l'exploitation de la rivière. La nouvelle prise d'eau dérive les eaux dans un nouvel ouvrage d'amenée de 9,3 km, entièrement souterrain, qui remplace les kilomètres de canaux et de conduites forcées sillonnant aujourd'hui la vallée. La centrale, composée de 2 cavernes, est équipée de 2 groupes Francis pour une puissance maximale de 92 MW et un productible annuel moyen de 560 GWh soit 155 GWh de plus que les 6 centrales actuelles réunies. Cette augmentation de 30 % correspond à l'alimentation en électricité d'une ville de 60 000 habitants. L'aménagement a été inauguré en octobre 2020.

Figure 8.18 – Barrage-prise d'eau de Livet / © EDF-Christophe Huret

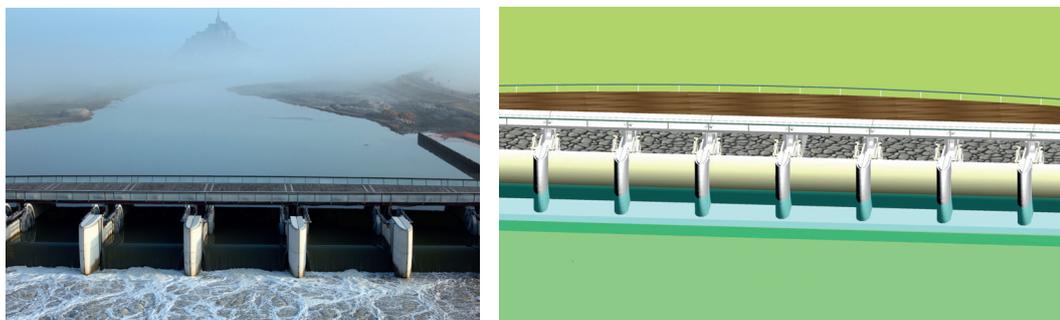


4.3 Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel

Le nouveau barrage de la Caserne sur le Couesnon témoigne d'une « démarche de développement durable du territoire préservant l'identité et la qualité du site ». L'ensablement au pied du Mont-Saint-Michel s'est accéléré du fait de la poldérisation, de la canalisation du Couesnon, de la construction de la route-digue conduisant à l'abbaye et d'un barrage « portes à flots » interrompant l'écoulement naturel du fleuve. Plutôt que de procéder à un curage mécanique de la tange, le nouveau barrage met à contribution le phénomène naturel des marées pour évacuer, jour après jour, le sable accumulé dans la baie au débouché du fleuve. La solution technique proposée, particulièrement astucieuse pour cet ouvrage unique au monde, consiste à créer un BMR, de huit passes hydrauliques consécutives de 9 m de large, équipées de vannes secteurs. L'aménagement est ouvert au public. Les coursives de piles, les organes de manœuvre et les grandes vannes sont exposés aux regards pour mettre à la vue de tous le fonctionnement, la technicité du barrage et le savoir-faire de l'ingénierie française.

Le barrage : le génie civil du barrage est étudié pour empêcher tout tassement différentiel de l'ouvrage compte tenu de la médiocrité des caractéristiques géomécaniques des sols sur lesquels il repose.

Figures 8.19 – *Barrage livré mi 2009*, © Thomas Jouanneau et Modèle 3D (2005) / © BRli

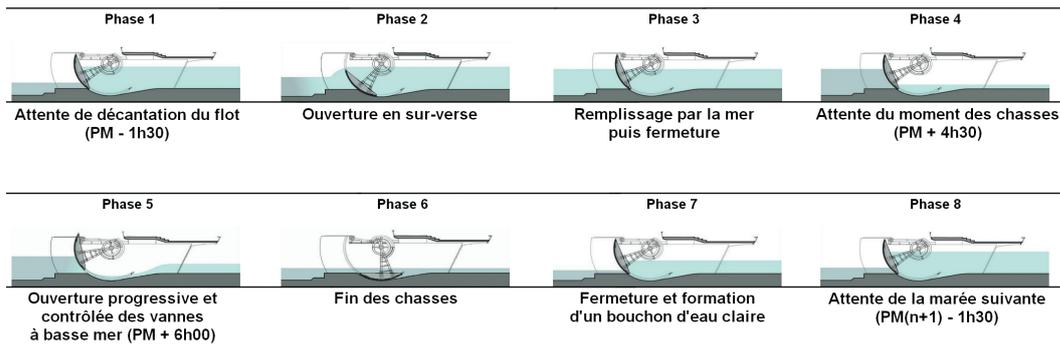


Les équipements. Les huit vannes secteurs du barrage sont montées en « ligne » et contrôlent près de 80 m de ligne d'eau tant lors des opérations de remplissage par la mer que de chasse hydraulique. Elles sont ancrées aux piles (hauteur maximale 8 m, épaisseur minimale de 1,8 m), à l'aide de tirants actifs précontraints. La principale particularité a été de positionner les vannes dans le sens inverse de ce qui a été fait jusqu'alors. Ce choix judicieux a permis une conception de barrage très compact avec un fonctionnement hydraulique optimum ; les vannes s'effacent dans le radier, leur mouvement étant sécurisé par l'évacuation des sédiments apportés par la marée, donnant par le fait une grande discrétion de l'ouvrage face au Mont-Saint-Michel. Enfin, le mouvement permanent des vannes calé sur le cycle des marées en fait un ouvrage hydraulique hors du commun.



Figure 8.20 – *Organes de manœuvre, bras et vérins des vannes, à marée haute* / © BRli

Figure 8.21 – Fonctionnement des vannes pendant un cycle de marée / © BRLi



5. RÉFÉRENCES

- Grégoire D. (2015) – Remplacement des vannes de crue des barrages de la Vanelle et Beaumont-Montoux. Colloque CFBR Chambéry – Vantellerie (Thème C : Remplacement et évolution des organes de vantellerie des barrages), décembre 2015, <https://www.barrages-cfbr.eu/2015-Vantellerie.html>
- Reverchon B., Claveirole P., Bouquier P.-G., Barthomeuf H. – Conception, exploitation et maintenance des évacuateurs de crues vannés d'Électricité de France. 25^e congrès de la CIGB, Stavanger, Norvège, Q97-R39.
- Dury J.-B., Gras G. – Remplacement des portes aval des deux sas de l'écluse de Kembs Colloque CFBR Chambéry – Vantellerie (Thème C : Remplacement et évolution des organes de vantellerie des barrages), décembre 2015, <https://www.barrages-cfbr.eu/2015-Vantellerie.html>
- Neymars M., Ferrière M., Roumieu P. – Increasing safety and reliability of Seyssel Hydropower Scheme. Congrès SHF Grenoble « Enhancing Hydropower Plants », 9–10 avril 2014.
- Vidal L., Lachère P., Bouchez E., Soudain S. – Reconstruction des barrages de Coudray et de Vives-Eaux. Vantellerie et contrôle-commande. Colloque CFBR Chambéry – Vantellerie (Thème B : Rénovations, maintenance des organes de vantellerie des barrages), décembre 2015, <https://www.barrages-cfbr.eu/2015-Vantellerie.html>
- Fouquet C. – Reconstruction du barrage de Vives-Eaux sur la Seine. Revue Travaux (Paris), n° 937, novembre 2017, pp 42–47.
- Société du Canal Seine-Nord Europe (CSNE) : <https://www.canal-seine-nord-europe.fr>

CHAPITRE
9

DIGUES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

1. INTRODUCTION

Les digues, aussi appelées levées, sont des structures en surélévation, principalement en terre, établies à proximité des côtes, des rivières et des voies de navigation artificielles, qui ne sont pas régulièrement remodelées par l'action des vagues et du courant, et dont l'objectif premier est de fournir une protection contre les inondations et / ou de canaliser les écoulements. Ce chapitre traite essentiellement des types de digues suivants :

- les digues de protection contre les inondations (fluviales, maritimes, torrentielles...) qui ont souvent également à comprendre une fonction de maîtrise de l'érosion ;
- les digues de rivières canalisées (exemples : Rhin, Rhône), qui ont souvent à la fois les fonctions de canalisation et de protection contre les inondations ; ces digues ont une charge permanente, bien que variable.

2. HISTOIRE DES DIGUES EN FRANCE

À l'instar de la plupart des pays développés, les digues de protection en France ont été construites, réparées, rehaussées à l'occasion d'événements d'inondation successifs, et bien souvent oubliées entre deux événements rares éloignés dans le temps. L'histoire récente, nationale et internationale, rappelle l'intérêt de ces ouvrages, de leur bonne conception et réalisation et surtout d'une continuité dans leur maintenance pour qu'elles puissent assurer leur fonction lorsqu'un événement hydrométéorologique rare les sollicite.

2.1 Histoire « ancienne »

En France, les actuelles digues de protection contre les inondations résultent d'un historique long et complexe, où la fonction de protection contre les inondations n'a pas toujours été la seule (ou la principale) et a pu évoluer au fil de l'aménagement de la vallée. Cela explique bien souvent le manque de connaissance sur leur composition interne et, partant, des difficultés liées à leur diagnostic.

Les digues fluviales ont souvent eu comme origine des ouvrages plus modestes, pas forcément étanches dans la masse ni composant des systèmes fermés, dont le but originel était de faciliter l'agriculture en diminuant les vitesses de l'eau dans les lits majeurs. Ces ouvrages ont été progressivement rehaussés au cours des siècles, généralement après chaque crue majeure. Au 19^e siècle, le développement de la navigation sur les cours d'eaux importants et, au 20^e siècle, le

développement de l'urbanisation ont entraîné des modifications liées à l'usage sur les ouvrages comme sur les systèmes qu'ils composent. Les digues servent alors également de voies de circulation, et sont souvent d'ailleurs dénommées également « chaussées », ce qui historiquement désigne aussi bien la fonction de circulation que celle de barrière hydraulique.

Les digues maritimes ont également évolué au cours de l'histoire, à partir d'ouvrages ayant différentes fonctions ou à partir de configurations naturelles : digues de poldérisation (conquête de terres sur la mer), digues de protection, séparation des eaux douces et des eaux salines ou lutte contre l'érosion marine, ouvrages portuaires, ou encore dunes. Elles ont pour origine l'usage croissant des terrains littoraux au bénéfice des activités humaines, d'abord pour des aménagements portuaires ou pour la conquête de terrains agricoles sur les terres marécageuses du littoral (poldérisation), avant que l'attrait touristique et le désir de rivage ne favorisent l'anthropisation et le renforcement des bords de mer aux abords des villes balnéaires. De modestes ouvrages en terre permettant la mise hors d'eau et la culture de terres en dehors des périodes de grandes marées, les ouvrages littoraux ont vu leur structure se complexifier pour lutter contre les effets souvent combinés de l'agitation et de l'érosion et pour asseoir un rôle multifonctionnel dans l'aménagement des territoires. Ils se sont ainsi progressivement développés sur l'ensemble des milieux de bords de mer (marais, dunes, plage...) pour favoriser le développement et la protection des activités humaines (industrie, agriculture, tourisme) contre les phénomènes météo-marins et la dynamique d'évolution des littoraux.

En milieu torrentiel (torrents et rivières torrentielles), les systèmes d'endiguement sont soumis à des aléas naturels violents, caractérisés par un fort transport solide (charriage, voire laves torrentielles). Ces phénomènes torrentiels sont susceptibles de provoquer des évolutions morphologiques importantes du lit durant les crues et sur ses berges en cas de débordements. Elles sont liées aux divagations, à l'engravement, aux érosions, ou encore aux flottants qui modifient fortement les conditions d'écoulement. À l'instar des digues fluviales, les digues torrentielles ont pour fonction principale d'empêcher les débordements des écoulements torrentiels vers les zones protégées, au minimum jusqu'au niveau de protection. Ce faisant, elles limitent, parfois fortement, les divagations du cours d'eau et doivent résister aux différents mécanismes de dégradation auxquels elles sont soumises (impacts, érosions externes, incision généralisée du lit, affouillements localisés, impacts et chocs localisés, surverse...). Elles sont ainsi exposées à des actions violentes résultant notamment du fort transport solide qui caractérise les écoulements torrentiels, mais aussi, potentiellement, à d'autres phénomènes spécifiques du milieu montagneux (avalanches, mouvements de terrain). Pour certaines digues torrentielles, la fonction de protection contre les érosions et reculs de berge peut même être la fonction principale.

2.2 Histoire récente (depuis 1993)

2.2.1 Les inondations de Camargue (1993–94), conséquences en termes d'organisation et de réglementation

Lors des crues du Rhône aval en octobre 1993 et en janvier 1994, de multiples brèches et autres désordres se sont produits sur les digues du secteur. Les brèches ont notamment causé l'inondation de l'île de Camargue (12 500 ha et 450 maisons touchés), entraînant de nombreux dommages dont la mort de nombreux taureaux et chevaux. Ce fut le point de départ d'une prise de conscience à l'échelle nationale de la nécessité de gérer de manière efficace les digues et de travailler sur le sujet spécifique des digues, aussi bien au niveau de règles de l'art de l'ingénierie que de la recherche et du développement et de l'organisation de l'État et des gestionnaires locaux.

2.2.2 Les principaux autres événements depuis cette date

Parmi les événements majeurs, on peut citer en particulier :

- crue de l'Aude de 1999 : des brèches sur la commune de Cuxac. Un lotissement fut inondé sous 2 m d'eau, plusieurs centaines de maisons inondées, 5 victimes (au total 25 victimes dans le département et 35 dans la région, pas toutes liées aux digues) ;
- crues de l'Agly de 1999, 2013 et 2014 : de nombreux désordres, zones de surverse et plusieurs brèches sont identifiées sur les digues ; les inondations résultantes causent d'importants dommages matériels ;

- crue du Gard et du Rhône de 2002 : des brèches à Aramon et à Comps, dans le département du Gard, ont pour conséquence l'inondation de zones habitées et causent de nombreuses victimes (dont 5 à Aramon) et des dégâts considérables (1 milliard d'euros) ;
- crue du Rhône de 2003 : des brèches provoquent l'inondation en rive gauche (nord d'Arles) et en rive droite (Camargue gardoise depuis le sud de Fourques jusqu'à la mer) du Rhône et causent un milliard d'euros de dommages dans la région du grand delta du Rhône et l'inondation de 12 000 personnes ;
- événement Xynthia de 2010 : la conjonction de vents violents et de fortes marées donne lieu à une onde de tempête et une submersion marine occasionnant d'importantes inondations dans certaines régions littorales (Charente-Maritime et Vendée principalement) ; les conséquences en sont très importantes : 49 morts, 2,5 milliards d'euros de dommages directs et 200 km de digues à reconstruire ;
- crues torrentielles de juin 2013 sur les départements des Hautes-Pyrénées et de la Haute-Garonne : c'est la plus récente des crues torrentielles ayant généré des dommages à l'échelle de deux départements (plusieurs dizaines de bâtiments détruits) ; plusieurs brèches par érosion se sont produites sur des digues torrentielles et ont conduit à la divagation des écoulements et à des changements de lits ; les dommages économiques ont été majeurs (près de 80 millions d'euros uniquement pour les routes et ouvrages d'art).

2.3 Le parc de digues en France

Le patrimoine de digues de protection contre les inondations a été estimé, en 2005, à environ 8 600 km [Mériaux, 2005] [CEPRI, 2011] et, depuis, les chiffres extrapolés de 9 000 km de digues fluviales et de 1 000 km de digues maritimes ont été régulièrement repris. Il s'agit là d'un ordre de grandeur issu d'un recensement et non pas du classement réglementaire des ouvrages ou des systèmes.

3. EXEMPLES DE SYSTÈMES DE PROTECTION

Les digues de protection contre les inondations fonctionnent au sein de systèmes qui assurent la protection d'une zone protégée jusqu'à un certain niveau. Ces systèmes peuvent comprendre des digues, d'autres ouvrages dont la fonction principale est, ou n'est pas, la protection contre les inondations, ainsi que des éléments naturels [Tourment, 2019]. Nous présentons, ci-après, plusieurs exemples de systèmes de protection qui illustrent la diversité des problématiques et des systèmes.

3.1 Le Rhône aval

Les digues du delta du Rhône (environ 250 km) ont été sensiblement rehaussées après les grandes inondations de 1840 et 1856 en lieu et place d'ouvrages plus anciens, dont certains remontent au 12^e siècle. Qualifiés d'insubmersibles à l'époque, ces ouvrages, qui protègent plus de 100 000 personnes et le triple en saison estivale, ont montré leur limite lors des crues de 1993, 1994, 2002 et 2003. Durant ces événements, 17 départs de brèche et 12 brèches, causés principalement par érosion interne ont été recensés [Mallet et al. 2019]. Au lendemain de la crue centennale de 2003, l'État et les régions ont mis en place un vaste plan de prévention des inondations à l'échelle du bassin versant, appelé Plan Rhône, qui prévoit notamment la rénovation complète des digues du delta du Rhône sur 20 ans.

Plutôt que de rehausser les digues, on a retenu une solution d'acceptation de l'inondation pour des crues rares (période de retour 100 ans en amont d'Arles et 50 ans en aval) tout en considérant la formation de brèches comme inacceptable jusqu'à des événements exceptionnels (période de retour 1 000 ans). Ce choix passe notamment par la réalisation de digue résistante à la surverse, qui consiste à renforcer avec des enrochements bétonnés le talus de digue côté val de manière à résister aux vitesses élevées en cas de surverse. En amont et aval, les digues sont calées 50 cm au-dessus de la crue millénale pour éviter tout risque de contournement en phase de déversement.

En sus des objectifs de sécurité et de protection, des objectifs environnementaux ont été définis et intégrés dès la conception des ouvrages. Les ouvrages construits en bordure du fleuve sont démontés et reconstruits entre 50 et 100 mètres du fleuve sur des zones dénuées d'enjeux environnementaux, évitant ainsi la destruction d'enjeux rivulaires. Dans l'espace redonné au fleuve, des zones humides sont restaurées ou créées et permettent à la ripisylve de s'étendre, fabriquant ainsi une « muraille » écologique vis-à-vis du risque d'affouillement des berges. La conception de l'ouvrage a été pensée de manière à garantir sa sûreté et sa durabilité pour les cent prochaines années. Le projet a été bâti de manière à optimiser le recyclage et le transport de matériaux et réduire, de ce fait, l'empreinte carbone du chantier. Sur les 400 millions d'euros d'investissement prévus, 50 % ont d'ores et déjà été réalisés.

Figure 9.1 – Recul stratégique au sud d'Arles (gauche) et réalisation d'une digue résistante à la surverse (droite) / © Symadrem



Figure 9.2 – Réalisation d'une digue résistante à la surverse avec tous les composants nécessaires à sa sûreté et sa durabilité (étanchéité, filtration, drainage, évacuation des crues) / © Symadrem



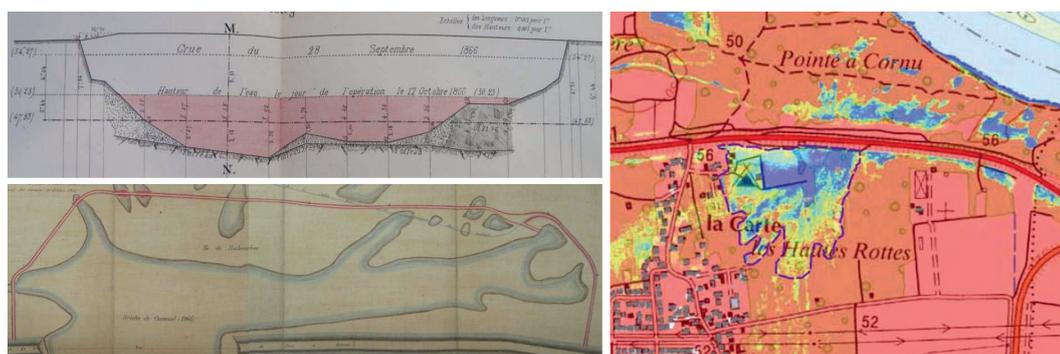
3.2 La Loire moyenne

La Loire est le plus long fleuve entièrement compris en France avec une longueur de 1 012 km. La Loire moyenne désigne le tronçon de fleuve depuis sa confluence avec l'Allier jusqu'à celle avec la Maine (depuis Nevers jusqu'à Angers). Elle est caractérisée par un lit mineur qui s'inscrit dans une large vallée presque complètement protégée par des digues, dénommées localement « levées ». Elles forment un endiguement quasi continu le long de chaque rive totalisant un linéaire de digues de plus de 500 m (ligne de défense principale). Ces ouvrages délimitent une quarantaine de zones protégées, abritant près de 300 000 personnes, avec des agglomérations importantes telles que Nevers, Orléans, Blois et Angers.

Ces ouvrages ont une histoire qui remonte au Moyen Âge [Dion, 1961] : la référence historique la plus ancienne est une ordonnance de Charlemagne de 779 concernant la Loire Angevine. Les premiers écrits corroborant le rôle des levées pour la protection contre les inondations datent du 12^e siècle, après une crue importante en 1150. De nombreuses crues jusqu'au 19^e siècle amènent à réparer, conforter et rehausser les digues jusqu'à fixer le dessin des systèmes de protection actuels. La base de données sur les brèches et désordres des digues de la Loire est certainement la plus riche de France, avec notamment l'identification de près de 390 « brèches »⁽¹⁾ à partir des crues majeures de la seconde moitié du 19^e siècle. L'histoire des digues de Loire a montré que l'inflation de construction d'ouvrages de protection ne permettait pas de protéger les populations et les biens des effets dévastateurs des crues majeures, voire participait à amplifier le phénomène.

C'est ainsi que, dès la seconde moitié du 19^e siècle, les réflexions concernant la « part de l'eau », c'est-à-dire la nécessité de permettre l'expansion des crues dans certaines parties de la zone protégée au moyen de déversoirs ou d'arasement de levées, ont été généralisées et accompagnées de la mise en œuvre d'un programme de fiabilisation des endiguements concerté avec les riverains.

Figure 9.3 – Brèche de 1866 dans la levée de Tours à Conneuil (250 m), profil en long, principe de réparation d'urgence et modèle numérique de terrain de la fosse d'érosion / © Archives départementales et DREAL Centre-Val de Loire



Un exemple de système de protection : la levée d'Orléans

La levée d'Orléans désigne un système de protection, composé de 43 km de digues de premier rang, de 5 à 7 m de hauteur (ligne de défense principale) et d'un déversoir en partie amont, sur la commune de Jargeau, créé après les grandes crues de la fin du 19^e siècle. La zone protégée du Val d'Orléans, située en rive gauche de la Loire et à la confluence avec le Loiret, représente une superficie de 16 700 ha et concerne 61 800 habitants et près de 21 000 emplois répartis sur le territoire de 16 communes. Quatorze brèches ont été décrites lors des trois grandes crues du 19^e siècle, la majorité ayant été causée par surverse. Les dimensions caractéristiques des brèches variaient de 50 m à 800 m de longueur, et de 5 m à 19 m de profondeur à partir du sommet de la digue.

(1) Les guillemets viennent du fait que la définition aujourd'hui clairement établie et partagée de brèche (ouverture complète de la digue d'un talus à l'autre) a pu, par le passé, désigner des désordres majeurs n'allant pas jusqu'à la brèche.

Figure 9.4 – Déversoir de Jargeau (Val d'Orléans 45) – De gauche à droite terrain non protégé, fusible, talus aval non érodable, zone de dissipation et val protégé /

© Rémy Tourment

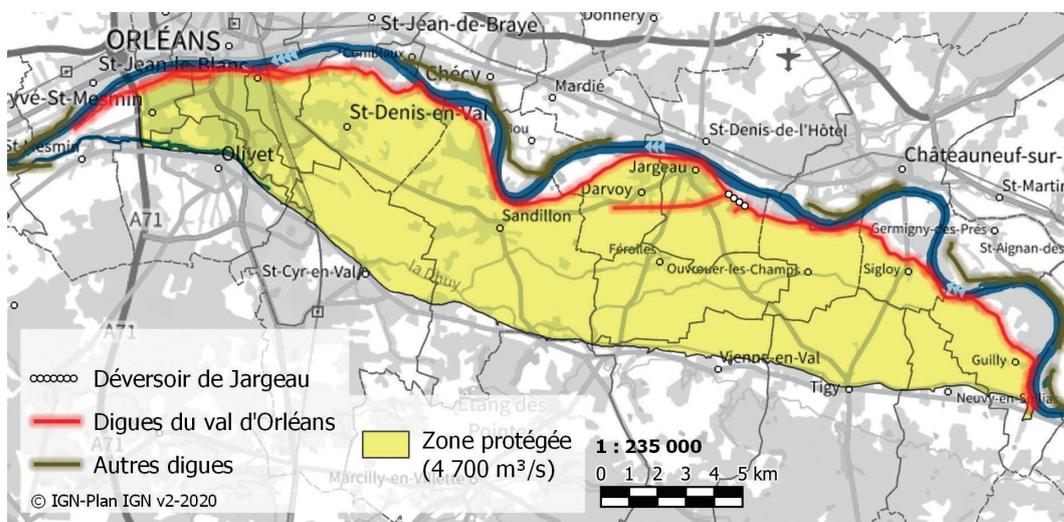


Sur le Val d'Orléans, l'étude de dangers de 2012 et les compléments apportés dans le cadre de l'autorisation administrative du système d'endiguement de 2019 (voir section 5) ont permis de définir, ou de préciser, les caractéristiques suivantes de la protection apportée par le système contre les crues de la Loire :

- en apparence et en ne considérant que la hauteur de crête des ouvrages, le val serait protégé (hors rupture avant surverse) contre les crues de la Loire jusqu'à une probabilité annuelle de 0,005 (période de retour de 200 ans) et il est ouvert en aval à la confluence avec le Loiret, ce qui exclut une partie du val de la zone protégée ;
- le niveau de sûreté des digues (probabilité de rupture devenant non négligeable) est estimé correspondre à une probabilité annuelle de crue de 0,014 (période de retour de 70 ans) ;
- un déversoir, situé en amont du bourg de Jargeau, a été construit à la fin du 19^e siècle afin de rendre le système résilient aux surverses ; néanmoins, les évolutions du lit depuis cette période font que des surverses se produisent à plusieurs endroits du système en même temps que la surverse sur le déversoir (période de retour 200 ans) ;
- compte tenu du niveau de sûreté des digues composant le système, le niveau de protection garanti dans la zone protégée est de 4,7 m à l'échelle de référence, soit un débit de 4 700 m³/s en Loire (période de retour 70 ans).

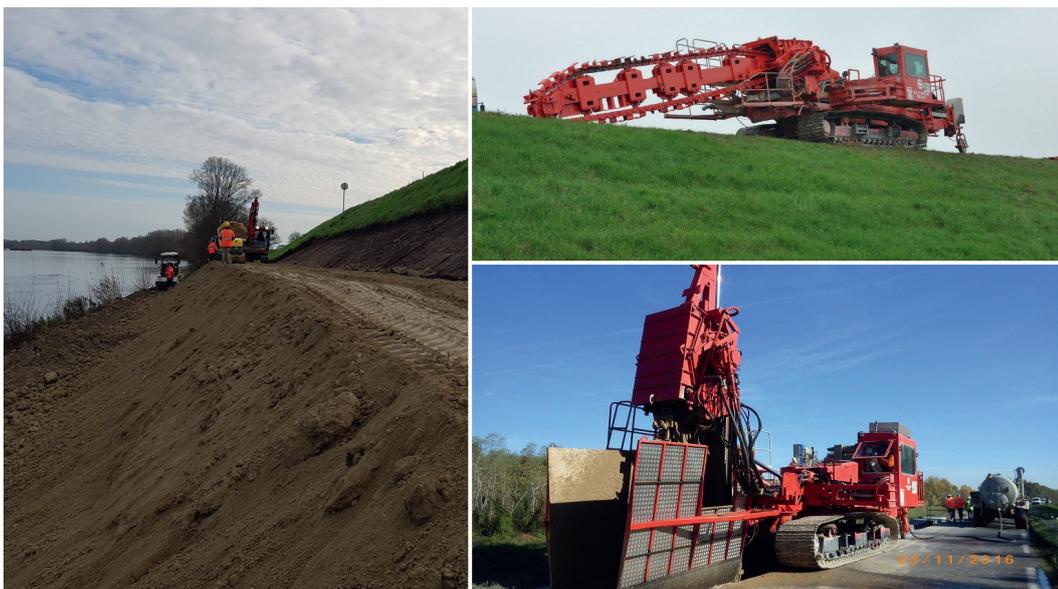
Figure 9.5 – Système d'endiguement du Val d'Orléans et sa zone protégée /

© DREAL Centre-Val de Loire



L'étude de dangers a également permis de définir un certain nombre de mesures de réduction du risque, entre autres des mesures de confortement des digues destinées à éviter leur rupture avant l'atteinte par la crue du niveau de crête des ouvrages (niveau de protection apparent).

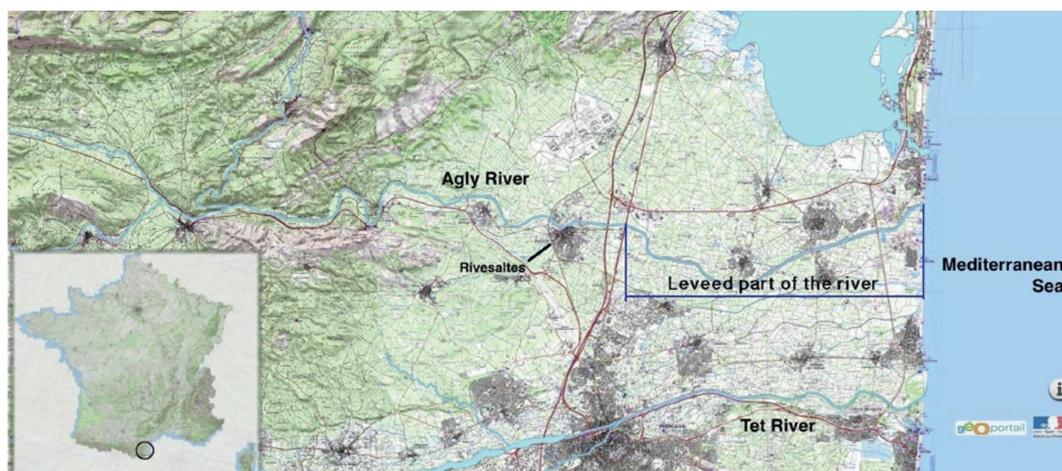
Figure 9.6 – Travaux de renforcement du talus côté Loire (à gauche) et écran étanche « deep soil mixing » dans la levée d’Orléans (à droite) / © DREAL Centre-Val de Loire



3.3 L’Agly

Les 13 derniers kilomètres aval du fleuve côtier méditerranéen Agly sont endigués. Le bassin à l’amont du couloir endigué a une superficie de 1 044 km². Entre 1969 et 1974, le lit a été recalibré en portant sa largeur de 30 m à 65 m, et un endiguement continu d’environ 3 m de hauteur a été érigé au sommet de chaque berge reprofilée. Ces ouvrages protègent aujourd’hui environ 30 000 personnes.

Figure 9.7 – Situation de l’Agly aval / © IGN Géoportail



Selon les études de conception (1967), l’aménagement était censé pouvoir contenir une crue de période de retour 25 ans, dont le débit était estimé à 1 250 m³/s, en disposant d’une revanche de 0,5 m par rapport à la crête de digue. Le projet initial prévoyait, à l’extrémité amont du couloir endigué, deux déversoirs de 600 m (un sur chaque rive) permettant de limiter le débit. Ces déversoirs n’ont jamais été réalisés.

Figure 9.8 – Brèche de 1999 sur les digues de l'Agly / © DREAL Occitanie



L'ouvrage a subi de nombreuses crues (7 fois en 18 ans) ayant causé des désordres [Tourment, 2018, 1]. À la suite de la crue de 1999 (plus forte crue connue par l'ouvrage avec surverse ayant entraîné une brèche majeure de 70 m de longueur et une dizaine d'amorces de brèche), des rehausses ponctuelles d'environ 0,5 m de haut ont été réalisées en crête, côté terre. Ces rehausses, implantées sur un linéaire cumulé d'environ un kilomètre, sont constituées de merlons en enrochements bétonnés.

Les crues de 2005 et 2006 ont généré de nouveaux désordres sans toutefois qu'il n'y ait de surverse. Ces crues ont conduit le gestionnaire à engager un diagnostic approfondi visant à statuer sur les niveaux de protection et de sécurité offerts. Ce diagnostic a mis en évidence :

- une capacité relativement faible du couloir endigué de l'ordre de 800 m³/s (près de deux fois moins que la valeur prévue par les études de conception) correspondant à une crue de période de retour comprise entre 5 et 10 ans ;
- une fragilité structurelle des ouvrages et de leur fondation dont les compositions sont hétérogènes avec la présence de matériaux graveleux perméables ($k \sim 10^{-3}$ m/s) et de sables fins propres uniformes particulièrement sensibles à l'érosion interne.

Les conclusions ont conduit à estimer que la rupture était quasi certaine pour une crue décennale. Ce point a été vérifié par la suite avec :

- la crue de mars 2013, qui a généré des surverses sur plusieurs kilomètres, deux brèches dont une de plus de 80 m de longueur et de nombreux désordres par érosion interne de la digue et de sa fondation (dont des centaines de tumulus de sable⁽²⁾, certains ayant généré des instabilités de talus) ;
- la crue de mars 2014, qui a conduit à de légères surverses et de nouveaux désordres par érosion interne ;
- la crue de janvier 2020, qui a encore une fois conduit à des surverses par-dessus les digues et de nouveaux désordres (érosions et tumulus de sable).

Pour ces trois dernières crues, les personnes résidant dans une bande de 300 m aux abords des ouvrages ont été mises en sécurité de manière préventive du fait des risques de brèche.

Un programme de confortement a été proposé dès 2014 avec un ou plusieurs déversoirs et sans modification du niveau de protection. Malgré la criticité du système, la probabilité de rupture et la gravité de la rupture étant toutes deux élevées, ce projet n'est pas aujourd'hui réalisé du fait de :

- la difficile acceptation sociale de déversoirs de sécurité ;
- la difficulté à récupérer le foncier nécessaire aux travaux pour limiter leurs impacts environnementaux ;
- l'importance du montant de l'investissement (estimé de l'ordre de 45 M€) au regard du niveau de protection obtenu (période de retour comprise entre 5 et 10 ans).

(2) En anglais : « sand boils ».

3.4 Saint-Malo

Le centre de la ville historique de Saint-Malo, située au nord-est de la Bretagne, est cerné de remparts médiévaux reconstruits après la seconde guerre mondiale. Il est implanté sur des îlots rocheux qui sont reliés à l'est aux falaises de Paramé par un cordon dunaire formant tombolo et anciennement séparés vers le sud par une zone marécageuse de l'îlot de la cité d'Aleth et de Saint-Servan. Le cordon protégeait ainsi une baie intérieure et un marais maritime rétro-littoral en rive droite de l'embouchure de la Rance. L'assèchement de cette dépression, à partir du 14^e siècle, et les endiguements progressifs depuis le 18^e siècle ont permis l'extension des quartiers du port et de la ville, notamment autour de la gare. Le littoral resté naturel jusqu'au 16^e siècle a ainsi été progressivement transformé par l'extension des activités portuaires et par de grands travaux aux 19^e et 20^e siècles conduisant à la fixation du trait de côte, à la poldérisation, aux aménagements portuaires et au développement de l'urbanisation balnéaire.

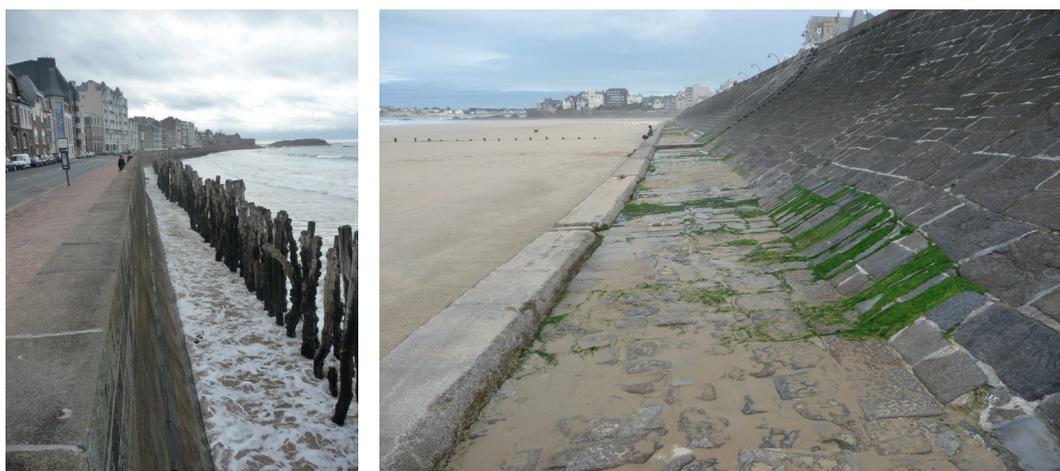
Le système d'endiguement de Saint-Malo est ainsi constitué d'une succession complexe d'ouvrages côtiers comprenant notamment :

- un cordon dunaire renforcé et totalement artificialisé par un linéaire de 3 km de digues (digues du Palmié, de Paramé et du Sillon) ;
- les remparts qui entourent la vieille ville sur près d'un kilomètre ;
- les installations portuaires insérées dans le tissu urbain, et caractérisées par la présence de 4 bassins à flots entourés de quais ;
- l'ensemble est complété d'ouvrages annexes, tels que des épis ou des pieux, visant à lutter contre les phénomènes d'érosion ou à diminuer l'agitation.

L'étude historique des événements météo-marins et hydrodynamiques révèle que les principaux phénomènes affectant le système d'endiguement de Saint-Malo sont, par ordre d'importance :

- les franchissements : ils concernent l'intégralité du linéaire des digues du Sillon et de Paramé ;
- les dégradations d'ouvrages et les érosions : ils concernent également les digues du Sillon et de Paramé, mais peuvent également affecter dans une moindre mesure certaines portions des remparts ;
- les débordements : ils concernent essentiellement les installations portuaires (Saint-Malo et Bas Sablons) jusqu'à l'anse de Solidor, du fait de leur faible altitude indispensable à leurs usages maritimes.

Figure 9.9 – Digue du Sillon et digue de Paramé / © Cerema



4. LE CORPUS TECHNIQUE

Les digues de protection contre les inondations, comme celles de canaux, sont des ouvrages hydrauliques comparables aux barrages, mais qui s'en différencient par des spécificités propres. Les disciplines de base, géotechnique, génie civil, hydrologie, hydraulique, etc., sont les mêmes mais utilisées différemment. Ainsi, l'abondante littérature consacrée aux barrages peut éventuellement servir aux digues, mais pas toujours directement et pas sans adaptation ou transposition. Le CFBR, en 2012, et plus récemment la CIGB [Tourment, 2018, 2] ont accueilli officiellement les digues au côté des barrages parmi leurs objets d'étude, ce qui, à terme, va permettre de disposer de recommandations applicables aux digues, de manière spécifique, ou bien commune aux barrages mais de manière explicite. Un des livrables attendus du nouveau comité technique LE de la CIGB sur les digues est un rapport d'intercomparaison barrages-digues qui permettra de clarifier les similarités et différences entre barrages et digues et d'initier des travaux futurs bénéficiant à l'ensemble de la communauté des ouvrages hydrauliques.

4.1 Recommandations du CFBR

Les recommandations du CFBR pour la justification des barrages et digues en remblai [CFBR, 2015] proposent d'harmoniser les pratiques de l'ingénierie relatives à la stabilité des ouvrages hydrauliques en remblai en France. Le format des justifications est homogène à celui des recommandations françaises relatives aux barrages-poids, conduisant finalement à un ensemble cohérent de recommandations professionnelles. Ces recommandations adoptent le format des méthodes semi-probabilistes aux états limites, à l'instar des Eurocodes, qui constituent un référentiel standard bien adapté pour une harmonisation des pratiques. Les ouvrages entrant dans le champ d'application du document CFBR comprennent de manière explicite les digues fluviales de protection contre les inondations et les digues à charge permanente (canaux, rivières canalisées). Les états limites, considérés dans la version actuelle du document, sont la stabilité d'ensemble (glissement), le soulèvement hydraulique en pied aval et le défaut de portance de la fondation / les tassements.

Ces recommandations applicables aux barrages et digues en remblai vont être étendues aux différents mécanismes de rupture par érosion interne et par érosion externe.

Le groupe de travail du CFBR sur les méthodes de confortement des digues publie, en 2021, le résultat de ses travaux. Basées sur une quarantaine de fiches, décrivant chacune une technique de réparation ou de renforcement appliquée aux digues, les recommandations sont organisées en chapitres consacrés chacun à une fonction ou à une problématique : étanchéité, drainage et filtration, stabilité y compris rehausse, protection externe, ouvrages inclus et traversants, transitions, végétation et animaux fouisseurs.

4.2 International Levee Handbook (ILH)

L'International Levee Handbook [CIRIA, 2013] est l'ouvrage international de référence sur les digues de protection contre les inondations. Publié en 2013, il a fait l'objet de cinq ans de travaux de la part de plus de 130 contributeurs principaux. Il comprend dix chapitres pour 1 350 pages au total. La France fut parmi les pays les plus actifs dans sa rédaction, aux côtés des USA et de la Grande-Bretagne, sans oublier les contributions importantes des Pays-Bas, de l'Allemagne et d'experts de plusieurs autres nations. Au-delà de sa participation au comité de pilotage, au comité éditorial technique, au pilotage de trois des dix chapitres, la France a organisé le séminaire final achevé par une cérémonie d'inauguration en mairie d'Arles. La traduction en français est parue début d'année 2020.

4.3 Autres initiatives

En réponse aux besoins de terminologie et d'approches communes pour la profession, le ministère en charge de l'Environnement a commandité un groupe de travail pour publier un « Référentiel digues » [MEDDTL, 2015] qui a pour ambition de constituer une base technique commune permettant une compréhension mutuelle des acteurs du domaine (gestionnaires d'ouvrages, services de l'État, bureaux d'ingénierie, autres gestionnaires du risque inondation ou

du territoire) au cours de leurs échanges. Il ne s'agit pas d'un document à caractère prescriptif ni réglementaire. Les concepts et principes présentés le sont dans un but de clarification et de partage de vocabulaire, voire de certaines méthodes.

Dans une histoire récente, les premiers guides publiés en France spécifiquement sur les digues de protection contre les inondations l'ont été à partir de l'an 2000 et faisaient état de travaux réalisés depuis les premières inondations de la décennie 1990 : [Lino, 2000] [Mériaux, 2004] [Fauchard, 2007] [Degoutte, 2012]. En complément de ces ouvrages, la profession dans son ensemble contribue à la dissémination des connaissances lors de colloques scientifiques et techniques, organisés régulièrement par le CFBR en lien avec des thématiques similaires aux barrages, par la Société Hydrotechnique de France (SHF) sur des thématiques liées à l'hydraulique et l'hydrologie, ou lors de trois colloques spécifiquement liés aux digues (2004 Orléans, 2013 et 2019 Aix-en-Provence).

4.4 Analyse de risques des systèmes

L'analyse de risques des systèmes de protection contre les inondations a fait l'objet d'un développement méthodologique récent [Tourment, 2019]. La méthodologie proposée permet de faire le bilan des aléas naturels, de la performance du système de protection et des conséquences des inondations dans la zone protégée. Il s'agit d'une des études les plus complètes sur un système faisant un bilan des connaissances et permettant d'orienter les décisions relatives à la gestion ou aux modifications du système. Une analyse de risques s'appuie, entre autres, sur un diagnostic des ouvrages composant le système, diagnostic hydraulique et diagnostic structurel.

Ce diagnostic doit permettre de déterminer :

- le niveau de protection du système (niveau d'eau dans le milieu naturel jusqu'auquel aucune entrée d'eau n'a lieu dans la zone protégée) à déclarer par le maître d'ouvrage et pour lequel il doit, en France, réglementairement assurer une probabilité de défaillance inférieure à 5 % ;
- le niveau de sûreté du système (niveau d'eau jusqu'auquel les ouvrages disposent de marges de sécurité quantifiables, correspondant à une probabilité de rupture négligeable, vis-à-vis de tous les modes de rupture) ;
- le niveau de danger (niveau au-delà duquel l'ouvrage ne dispose plus de marges de sécurité quantifiables ; il peut exister des marges cachées sans que l'ingénieur ne puisse les quantifier ; la probabilité de rupture devient significative (de l'ordre de 1/10 à plus suivant les auteurs) ;
- le niveau de sécurité des populations (niveau jusqu'auquel les populations de la zone protégée ne sont pas en danger).

En termes d'aide à la décision, une analyse de risques peut utilement être complétée par une analyse coûts-bénéfices et une analyse multicritère, comme par exemple décrites dans [Cheetham, 2016].

4.5 Déversoirs de sécurité et conception hydraulique des systèmes

Les digues et, plus précisément, les systèmes d'endiguement, protègent des inondations jusqu'à un certain niveau. Au-delà de ce niveau, que ce soit par débordement, par contournement ou par rupture, une inondation du territoire protégé va se produire.

La question du risque d'inondation résiduel dans les zones protégées par des digues est cruciale en matière de connaissance et de gestion du risque d'inondation de ces territoires.

Afin d'éviter des ruptures lorsque le niveau de protection d'un système de digue est dépassé, il convient que le système possède une certaine résilience à la surverse, et dans le cas des digues fluviales, cela passe par la définition de points bas (sans ouvrage) ou de déversoirs de sécurité, permettant une inondation « sous contrôle » de la zone protégée et donc une minimisation des conséquences de cette inondation. Un guide [Degoutte, 2012] présente les différents types d'ouvrages sur digues fluviales, il aborde leurs aspects fonctionnels, l'hydraulique, la morphologie fluviale, le génie civil et la gestion des situations de crues ; sa traduction en anglais sera publié en 2021.

On a longtemps essayé de concevoir des ouvrages « insubmersibles », ce fut le cas sur la Loire et sur le Rhône dans les siècles passés. Ce concept d'insubmersibilité est à bannir dans le vocabulaire car :

- il est ambigu (jamais submergé ou ne résistant pas à la submersion ?) ;
- à part des ouvrages pharaoniques, il n'est pas envisageable qu'un système complet de digues ne soit jamais dépassé ; de plus, sur un fleuve, toute rehausse du niveau de protection d'un système entraîne la remontée du niveau des crues et donc le risque de surverse sur les autres systèmes.

Les déversoirs, pourtant nécessaires à la sécurité de la population, sont difficiles à faire accepter auprès de celle-ci, qui préfère parfois se satisfaire de l'existence du risque d'inondations dévastatrices par brèche de manière aléatoire plutôt que d'une inondation contrôlée sur des secteurs dédiés à cet effet. La concertation et la pédagogie lors des réunions publiques sont de mise. Sur le Rhône aval, où 10 km de digues résistantes à la surverse ont été réalisées entre Beaucaire et Arles, plus d'une vingtaine de réunions ont été nécessaires sur 5 ans. La sémantique a évolué au cours des rencontres avec la population. On est ainsi passé progressivement du terme administratif de déversoir de sécurité à digue déversante pour finalement retenir digue résistante à la surverse.

Le dimensionnement de ces ouvrages peut se faire d'une manière analogue aux barrages en retenant une cote de protection pour l'évacuation des crues et en calant les sections non résistantes à la surverse à des cotes correspondant à l'atteinte de crues exceptionnelles (variable selon les enjeux) assorties d'une revanche. La longueur des sections résistantes à la surverse est souvent conditionnée à l'impact sur les niveaux d'eau en amont, en aval ou sur la rive opposée du cours d'eau. La non-aggravation des lignes d'eau, qui est un des principes fondateurs de la réglementation française, nécessite souvent la réalisation de grands linéaires déversants [Mallet, 2013].

Pour les petites zones protégées, de manière à ne pas caler les ouvrages ne résistant pas à la surverse à des occurrences exceptionnelles de crues, il peut être admis des dommages sur ces sections sous réserve d'avoir prérempli la zone protégée par les sections déversantes et de disposer d'un matelas d'eau suffisant en pied d'ouvrage au moment du déversement sur les sections non renforcées [Mallet, 2004].

Le dimensionnement hydraulique se fait à l'échelle du système complet : cours d'eau, système d'endiguement comprenant déversoir(s) et digues non résistantes à la surverse, zone protégée. Dans certains cas, il faut concevoir des systèmes complexes avec plusieurs rangs de digues et tenir compte des systèmes proches (amont, aval, rive opposée) [Cheetham, 2015]. Le dimensionnement fait appel à des modélisations, généralement bidimensionnelles⁽³⁾, dont les incertitudes doivent clairement être affichées et prises en compte dans le calage général et la conception : incertitudes propres au modèle, évolutions morphodynamiques à venir et développement de la végétation (dont les impacts peuvent être forts comme l'ont montré les études menées sur l'Agly [Salmi, 2017]).

Dans la mesure du possible, ces incertitudes peuvent être évaluées et doivent être réduites. Elles doivent faire l'objet d'un suivi avec un engagement fort des maîtres d'ouvrage en matière d'hydrométrie (pose d'échelles de mesures, jaugeages en crue, relevé de laisses de crues post-événement) et par un suivi de la végétation et de la bathymétrie. À ce titre, les développements récents en matière de jaugeage par caméra constituent une innovation particulièrement intéressante.

4.6 Zoom sur quelques techniques innovantes

4.6.1 Utilisation de drones pour la surveillance des digues

La surveillance et l'auscultation des digues, et plus particulièrement celles des digues de protection contre les inondations, posent des difficultés spécifiques dues à la longueur des ouvrages, à leur hétérogénéité et à l'absence de charge permanente. La surveillance des digues reste donc encore très largement basée à l'heure actuelle sur l'inspection visuelle. L'utilisation

(3) Bidimensionnelles au niveau de la géométrie et topographie du système, certains ouvrages de transfert (déversoirs, pertuis...) nécessitant parfois même une modélisation tridimensionnelle.

de moyens aéroportés pour le recueil de données topographiques (MNT LIDAR) et d'images voire de vidéos haute résolution, testée dès 2006 sur plusieurs systèmes de digues, permet un complément à cette méthode traditionnelle d'inspection.

Le projet DIDRO [Boggio, 2019] a pour ambition de fournir des solutions « clés en main » pour la surveillance des digues, aussi bien en période normale qu'en période d'événement hydrométéorologique (crue fluviale, surcote marine ou tempête), voire de crise (inondation de la zone protégée résultant d'une brèche et / ou d'une surverse) en associant plusieurs capteurs (photos HR, LiDAR, photogrammétrie, infrarouge thermique, proche infrarouge...) embarqués sur des drones ; DIDRO va jusqu'à une aide à la visualisation de ces données pour aider les experts du diagnostic et les gestionnaires d'ouvrages dans leurs rôles d'aide à la décision.

4.6.2 Fibre optique

La fibre optique est de plus en plus utilisée pour détecter précocement les infiltrations ou fuites d'eau. Diverses expériences ont été menées ou sont en cours. Sur le Rhône, 23 km de fibre optique ont été intégrés dans le drain de digues reconstruites en intégralité. Cette installation doit permettre de distinguer les infiltrations courantes des fuites évolutives traduisant l'érosion interne du remblai [Guidoux, 2019].

4.6.3 Un SIG pour la gestion des données des gestionnaires de digues

La gestion des digues et les tâches d'ingénierie associées (diagnostic, analyse de risque, projets de confortement) font appel à de très nombreuses données et en retour en produisent également une grosse quantité. Cette masse de données a un coût de production (ou de reconstitution) ; on parle à juste titre de « patrimoine de données ». Afin d'améliorer la gestion de ce patrimoine d'information de leurs digues, plusieurs gestionnaires se sont associés, sur la base d'une conception initiale du Cemagref, pour développer et déployer dès 2004 le SIRS⁽⁴⁾ Dignes [Maurel, 2004]. L'outil informatique, qui combine les fonctions d'un système d'information géographique (SIG) à celles d'une base de données, permet de gérer les informations sur les différents composants du système « digue » : structure et géométrie de la digue et du lit du cours d'eau, ouvrages hydrauliques, réseaux de communication, de flux et d'énergie, désordres, historique des crues, parcellaire foncier, travaux et études, organismes et intervenants. Il facilite donc l'ensemble des tâches du gestionnaire et des ingénieurs qui agissent pour son compte. L'association nationale des gestionnaires de digues, France Dignes, est désormais maître d'ouvrage du SIRS Dignes ; elle a procédé au développement de la version 2 et a la charge de sa maintenance ultérieure, en lien avec une base croissante de gestionnaires utilisateurs.

La nouvelle architecture modulaire de la version 2 permet d'envisager le développement de nouveaux modules : végétation (description et gestion), aide au diagnostic, etc.

4.6.4 Sol traité à la chaux

Le traitement des sols à la chaux est couramment utilisé pour l'amélioration et la stabilisation des sols limoneux et argileux, dans le cadre de la construction d'infrastructures. L'intérêt de cette technique pour les ouvrages hydrauliques en terre est croissant. En effet, il a été montré, lors de programmes de recherche, que le matériau sol-chaux pouvait efficacement remplir une série de fonctions pour les ouvrages hydrauliques : stabilité, faible niveau de perméabilité, résistance à l'érosion interne et de surface. Des expérimentations à l'échelle du laboratoire et sur des réalisations en vraie grandeur, ainsi que des retours d'expérience en France et à travers le monde, ont appuyé ces constats.

En France, le batardeau mis en place en amont du barrage de Pannecière (17 m) pendant les travaux de confortement (2011–2013) a été réalisé en arènes granitiques traitées au liant hydraulique routier. À la remise en eau, ce batardeau n'a pas été déconstruit mais a subi une surverse sans dommage apparent.

(4) SIRS : Système d'Information à Référence Spatiale. Le concept SIRS comprend les outils informatiques, les données, l'environnement de l'utilisateur est son mode de fonctionnement.

Figure 9.10 – Batardeau de Pannecière en construction et en surverse / © BETCGB/ISL

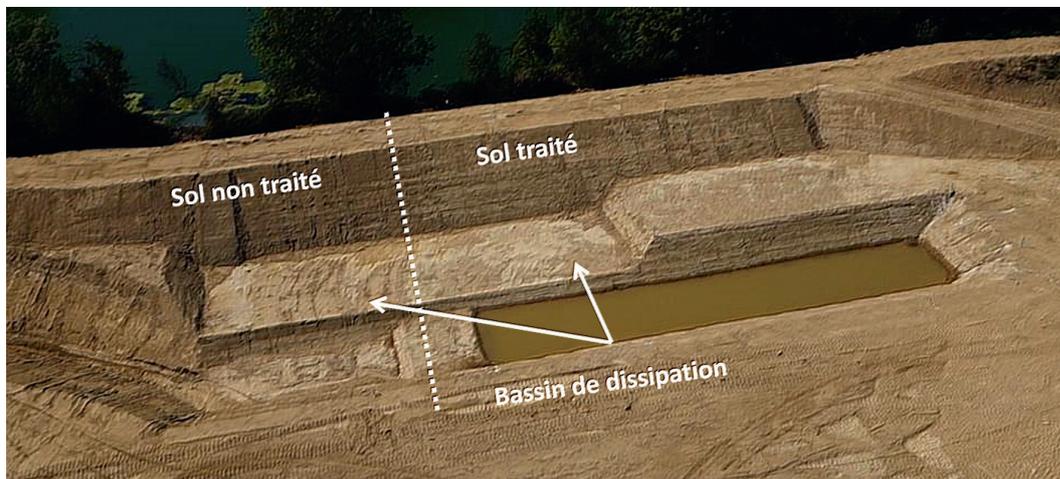


D'autres ouvrages significatifs plus anciens ont également eu recours au traitement des sols pour améliorer la maniabilité des matériaux et la stabilité. On peut citer le barrage de Fond Pignon (37,5 m – 1987–1990) constitué de craie traitée à la chaux, ou le barrage de Michelbach (22 m – 1982) dont le tapis d'étanchéité amont a été traité à la chaux.

Dans le but d'améliorer la connaissance des ouvrages hydrauliques en sol traité et d'envisager des conceptions innovantes de tels ouvrages, des projets d'innovation ont été lancés.

Entre 2013 et 2018, le projet de R&D DigueELITE⁽⁵⁾ s'est intéressé à la résistance à la surverse d'une digue en sol traité à la chaux le long de la rivière Vidourle (Gard). Cette résistance a pu être quantifiée à l'aide d'un dispositif d'essai de surverse in situ innovant, issu du projet. Ce projet, et en particulier le concept de digues et petits barrages déversant qui découle, a été lauréat d'un prix de l'innovation de la CIGB lors du congrès de Vienne en 2018.

Figure 9.11 – Vue aérienne du chantier DigueELITE / © INRAE



Concernant le projet DigueELITE, on peut aussi se reporter au chapitre 5 § 3.2 et au chapitre 7 § 2.9.

Depuis 2018, le projet DIGUE 2020⁽⁶⁾ a pour objectif de construire et suivre un ouvrage expérimental en sol traité à la chaux en milieu fluvio-maritime avec une méthode à haut rendement (traitement en place). Il permettra d'apprécier l'incidence de la salinité et d'étudier la résistance aux vagues et batillage, l'objectif étant de maîtriser les coûts de maintenance et construction des digues maritimes. La digue est en cours de construction.

(4) Cofinancé par Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Conseil Départemental 13.

(5) Cofinancé par Fonds Européen de Développement Régional, Fonds de l'État, la Région PACA et le Conseil Départemental 13.

Enfin, dans le cadre du projet du Canal Seine-Nord Europe, nouveau canal de navigation à grand gabarit de 107 km de long correspondant à un investissement de plus de 3 milliards d'euros, des plots expérimentaux en sols traités (à la chaux, à la bentonite et au ciment) sont prévus afin d'étudier la faisabilité d'une alternative économique pour étancher et protéger contre l'érosion des digues dont la hauteur peut avoisiner les 10 m.

5. LA RÉGLEMENTATION ET SES ÉVOLUTIONS

Préalablement à toute réglementation sur les digues de protection contre les inondations, l'État français a constaté la nécessité d'avoir une meilleure connaissance du parc d'ouvrages concerné et des enjeux associés. Dès 1999, un recensement a été entrepris à cette fin. Au vu de l'importance de ce parc, une réglementation a progressivement été mise en place : tout d'abord une circulaire demandant le classement des digues « Intéressant la Sécurité Publique » (2003), puis une réglementation plus complète (Décret et arrêtés d'application) sur la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques en 2007, qui définissait quatre classes de barrages et de digues ayant chacune leurs obligations, ensuite adaptée en 2015 suite à la mise en place de la compétence GEMAPI (Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations). Pour les digues, la réglementation de 2015 a précisé l'échelle de gestion : les systèmes d'endiguement.

5.1 Réglementation technique

Les aspects techniques de la réglementation ont pour objectif de préciser les obligations des responsables d'ouvrages (les gestionnaires des systèmes d'endiguement en ce qui concerne les digues) afin de permettre la sécurité des populations. Ces éléments permettent aussi une bonne gestion patrimoniale grâce aux éléments suivants :

- la connaissance et le suivi des ouvrages (dossier d'ouvrage, registre, consignes⁽⁷⁾, rapports de surveillance) ;
- les inspections visuelles détaillées (visites techniques approfondies) ;
- les études de dangers (EDD) comportant un diagnostic approfondi précédemment aussi revues de sûreté et examens techniques complets ;
- la déclaration aux autorités des événements ou évolutions mettant en cause ou susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens.

Dossier d'ouvrage, registre et consignes doivent être tenus à jour « en temps réel » ; inspections, diagnostics et analyses de risques doivent être effectués suivant une périodicité dépendant de la classe du système d'endiguement.

Une EDD réglementaire d'un système d'endiguement doit être basée sur une analyse du risque d'inondation de sa zone protégée (pour un exemple de méthodologie, voir 4.4), tenant compte de l'existence du système, de ses performances (et donc à l'inverse de sa possibilité de défaillance). Elle doit justifier le niveau de protection garanti par le système.

Par ailleurs, les bureaux d'études intervenant pour les gestionnaires ont l'obligation d'être agréés pour la réalisation des études de dangers, des diagnostics de sûreté ou des projets de création ou de modification d'ouvrages ; dans le cas de travaux, la maîtrise d'œuvre doit assurer l'intégralité de la mission (conception et réalisation).

5.2 Gouvernance

Une des principales difficultés pour la bonne gestion des systèmes de protection contre les inondations concernait l'absence de gestionnaires locaux :

- à l'échelle des systèmes de protection cohérents hydrauliquement ;
- dotés de moyens techniques, humains et financiers suffisants.

(7) Document décrivant l'organisation mise en place pour assurer l'exploitation de l'ouvrage, son entretien et sa surveillance en toutes circonstances.

La mise de place de la compétence GEMAPI (lois MAPTAM et NOTRe) répond à cette difficulté organisationnelle. Par ailleurs, le gestionnaire de digues est aussi le gestionnaire du milieu aquatique, ce qui répond à une demande de cohérence dans les actions.

L'association France Dignes, créée en 2013, regroupe des gestionnaires de digues et a pour mission, en les mettant en réseau de :

- diffuser et partager le savoir et les expériences de terrain ;
- renforcer les compétences métiers des gestionnaires ;
- représenter la profession de gestionnaire de digues ;
- fournir aux gestionnaires une assistance.

Elle regroupe aujourd'hui une cinquantaine de gestionnaires et le nombre est en régulière augmentation.

En complément du rôle de premier plan joué par les gestionnaires, l'État a un double rôle : au niveau central, le ministère en charge de l'environnement définit la réglementation, et au niveau local, les services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques vérifient l'application de la réglementation par les responsables d'ouvrages.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les digues, ouvrages pourtant très anciens, n'ont fait l'objet d'attentions organisées de la part des acteurs de la communauté des ouvrages hydrauliques (gestionnaires, pouvoirs publics, ingénieurs, scientifiques) que très récemment, moins d'une trentaine d'années en France et d'un même ordre de grandeur dans les autres pays connus au sein de la communauté internationale qui se met en place. Même si de nombreuses connaissances sont encore à acquérir ou à approfondir, d'énormes progrès ont été faits depuis les années 1990 en France :

- évolution des structures gestionnaires et professionnalisation, organisation d'une association ;
- recensement des ouvrages et des zones protégées associées ;
- mise en place d'une réglementation spécifique ;
- appropriation d'une approche « risque » (études de dangers, analyse de risques) ;
- publication de guides techniques ;
- nombreux travaux de recherche ;
- prise en charge des digues dans la communauté du CFBR.

D'autres communautés, plus spécialisées en termes de disciplines (SHF, CFMS...), s'intéressent également de plus en plus aux problématiques en lien avec les digues.

L'efficacité des ouvrages et la sécurité des populations s'en trouvent désormais renforcées, bien que de nombreux efforts soient à faire dans la durée, y compris pour la pérennité de la gestion et de l'entretien, condition sine qua non de la fiabilité des systèmes de protection lorsqu'un événement survient après une longue période sans qu'ils n'aient été sollicités.

7. RÉFÉRENCES

- Boggio D., Sorin J.-L., Pierrot-Deseilligny M., Tourment R., Rabatel G., Antoine R., Vanliempt, E., Biscay J.-F., Albouze B. – 2019. DIDRO, un outil intégré pour l'auscultation des digues par drone. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations. 3^e colloque. Dignes 20–21 mars 2019, Aix-en-Provence, FRA. Sous la direction de Rémy Tourment et Laurent Peyras. 6 p.
- CEPRI – 2011. La gestion des digues de protection contre les inondations. 58 p.
- CFBR – 2015. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. 260 p.
- Cheetham M., Mallet T., Chastel E., Tourment R., Robustelli P., Pelt P. – 2015. Building a resilient system of defence against flooding from the Rhône. Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Water Management, vol. 168, n° 2, p. 74–84.
- Cheetham M., Tourment R., Pelt P. – 2016. Risk assessment and economic appraisal of protection methods for the Tarascon-Arles railway embankment. 3rd European Conference on Flood Risk Management FLOODrisk 2016, 17/10/2016–21/10/2016, Lyon, FRA. E3S Web Conf. Volume 7, 2016. 3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016). 8 p.
- CIRIA, MEDDE, USACE – 2013. The International Levee Handbook. Igigabel M., Pohl R., Sharp M., Simm J., Tourment R., Van Hemert H., Wallis M. (ed.), CIRIA, Londres, 1 349 p.
- Degoutte G. (coord.) – 2012. Les déversoirs sur digues fluviales. Editions Quae, Versailles, 184 p.
- Dion R. – 1961. Histoire des Levées de la Loire, Paris. 312 p.
- Fauchard C., Mériaux P. – 2004. Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues. Cemagref Editions, Antony, 124 p.
- Fauchard C., Mériaux P. – 2007. Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dykes. Editions Quae, Paris, 124 p.
- Guidoux C., Mallet T., Courivaud J.-R., Chaussée D. Conception et installation d'un système de surveillance innovant pour les digues de protection contre les crues du Rhône. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations. 3^e colloque national. Dignes2019, 20–21 mars 2019, Aix-en-Provence.
- Lino M., Mériaux P., Royet P. – 2000. Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne. Cemagref Editions, Antony, 224 p.
- MEDDTL – 2015. Référentiel technique digues maritimes et fluviales. 191 p.
- Mallet T., Royet P. Cault J.-B. –Reconstruction de la digue d'Aramon après la crue de septembre 2002. Sécurité des digues fluviales et de navigation. 1^{er} colloque national, 25–26 novembre 2004, Orléans.
- Mallet T., Degoutte G., Royet P. – Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales : définitions, conséquences et responsabilités. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions. 2^e colloque national. Dignes2013, 12–14 juin 2013, Aix-en-Provence, p. 42–50.
- Mallet T. Salmi A., Billy P., Faure J.-B., Mériaux P., Provansal M. – Sécurisation des digues du delta du Rhône entre Beaucaire et Arles, conception hydraulique du système et des digues résistantes à la surverse 2^e colloque national. Dignes2013, 12–14 juin 2013, Aix-en-Provence.
- Mallet T., Fry J.-J., Tourment R., Mériaux P. – Accidentologie des digues du delta du Rhône de 1840 à nos jours. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations. 3^e colloque national. Dignes2019, 20–21 mars 2019, Aix-en-Provence.
- Maurel P., Tourment R., Romac A., Pinhas M. – 2004. Le SIRS digue, un système d'information pour les gestionnaires locaux de digue, cas du SYMADREM et de l'AD-Isère-Drac-Romanche. Colloque technique CFGB MEDD, Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans, 25–26 novembre 2004. p. 393–409.

- Mériaux P., Royet P., Folton C. – 2004. Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations : guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires. Cemagref Editions, Antony, 199 p.
- Mériaux P., Tourment R., Wolff M. – 2005. Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France d'après la base de données nationale des ouvrages. Ingénieries – E A T, n° Spécial Sécurité des digues fluviales et de navigation, p. 15–22.
- Mériaux P., Royet P. – 2007. Surveillance, maintenance and diagnosis of flood protection dikes. A practical handbook for owners and operators. Editions Quae, Versailles, 162 p.
- Salmi A., Sénéchal G., Rougé M. – 2017. « Incertitudes sur l'hydraulique et l'hydrologie des couloirs endigués ». Colloque technique CFBR-SHF – Hydraulique des barrages et des digues, 29–30 novembre 2017 – Chambéry.
- Tourment R., Beullac B., Poulain D., Vinet F. (ed.) – 2017. Structures for flood defense and management. Floods – Edited by Freddy Vinet, Volume 1. Risk Knowledge, Vinet F. (ed.), ISTE Press, Elsevier, London + Oxford, GBR, p. 193–208.
- Tourment R., Beullac B., Poulain D., Vinet F. (ed.) – 2017. Management and safety of flood defense systems. Floods – Edited by Freddy Vinet, Volume 2. Risk Management, Vinet F. (ed.), ISTE Press, Elsevier, London + Oxford, GBR, p. 31–44.
- Tourment R., Benahmed N., Nicaise S., Mériaux P., Salmi A., Rougé M. – 2018. Retour d'expérience sur les désordres des digues de l'Agly maritime. Analyse des phénomènes de « sandboils ». Commission Internationale des Grands Barrages. 26^e congrès des grands barrages 01/07/2018-07/07/2018, Vienna, AUT. 31 p.
- Tourment R. – 2018. Rapport Général de la Question 103 « Petits barrages et digues ». 26^e congrès de la Commission Internationale des grands barrages 01/07/2018-07/07/2018, Vienne, AUT. 26^e congrès International des Grands Barrages. 96 p.
- Tourment R., Beullac B., Berthelie E., Boulay A., Maurin J., Queffelec Y. – 2019. Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection – Application aux études de dangers. Tourment R., Beullac B. (ed.), Lavoisier, Paris, 356 p.

CHAPITRE
10

ÉQUIPEMENTS ÉLECTRO- MÉCANIQUES ET CONTRÔLES- COMMANDES

1. INTRODUCTION

Le parc de production hydroélectrique français est composé d'ouvrages datant pour les plus anciens de 80 ans. Pour la plupart ils sont conduits automatiquement et leurs contrôles-commandes ainsi que les équipements électromécaniques qui les composent doivent être rénovés régulièrement. Les rénovations doivent être réalisées en contrôlant les risques associés, en garantissant la sûreté hydraulique, la sécurité des personnes et des biens, tout en conservant, autant que possible, la continuité de la production électrique.

Le propos de ce chapitre est de partager des exemples d'organisation et de pratiques de rénovations menées par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et Électricité de France (EDF) dans les domaines du contrôle-commande et de l'électromécanique :

- pour CNR, la rénovation d'un ensemble de contrôles-commandes de six aménagements au fil de l'eau sur le Rhône ;
- pour EDF, la conception de contrôles-commandes de barrages.

2. RÉNOVATION DU CONTRÔLE-COMMANDE D'UN ENSEMBLE DES SIX AMÉNAGEMENTS AU FIL DE L'EAU (CNR)

La Compagnie Nationale du Rhône, filiale du groupe Engie, exploite 18 aménagements hydroélectriques le long du Rhône (6 sur le Haut-Rhône, entre la Suisse et Lyon, et 12 sur le Bas-Rhône entre Lyon et la Méditerranée). Le projet de rénovation du contrôle-commande de l'ensemble des 6 aménagements du Haut-Rhône a pris naissance dans un contexte de grands changements pour CNR qui devenait « producteur d'électricité indépendant ». L'entreprise venait de réaliser la téléconduite centralisée du Rhône français entre 2000 et 2001. De 1990 à 2004 CNR, via le projet R2000 mené avec EDF et le projet des Services Industriels de Genève, a maintenu et confirmé son expérience de rénovation des contrôles-commandes ainsi que de la conduite automatique des barrages et des usines.

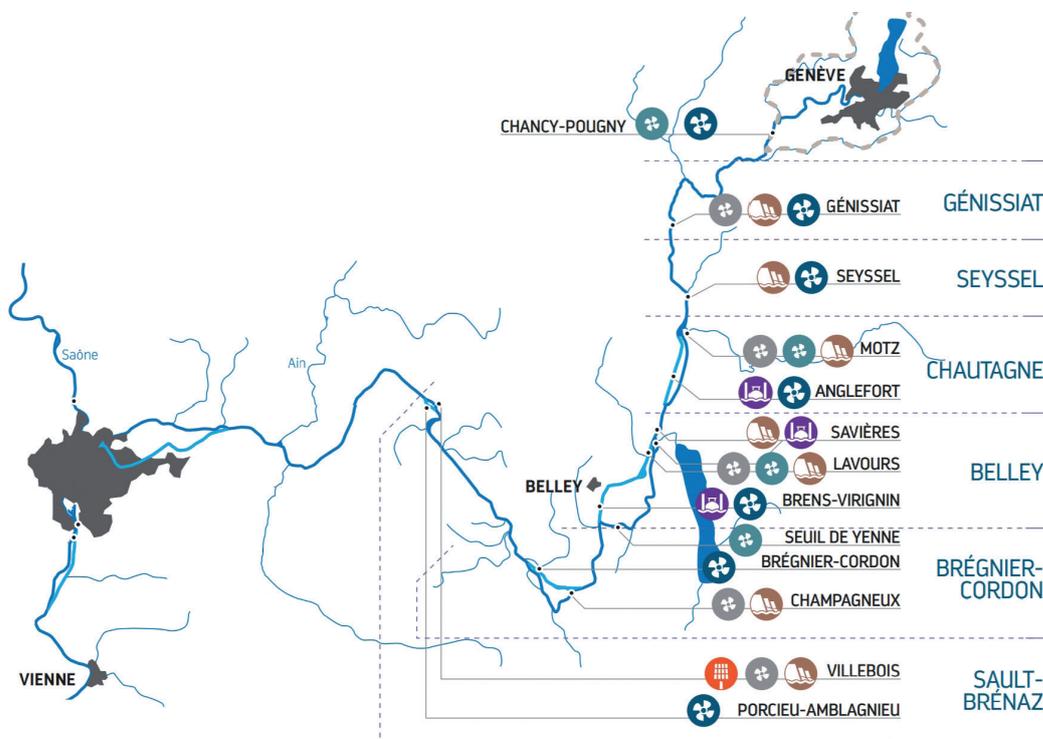
Les architectures de contrôle-commande du Haut-Rhône dataient pour les plus récentes des années 80, CNR n'avait progressivement plus accès aux compétences ou aux matériels nécessaires à leur maintenance. Faire évoluer fonctionnellement les architectures existantes et les intégrer durablement à la téléconduite du Rhône était évalué comme extrêmement risqué, voire inatteignable sans rénovation matérielle et logicielle.

En 2004, CNR a décidé d'engager un projet de renouvellement des systèmes de conduite et de contrôle-commande des 6 aménagements du Haut-Rhône.

2.1 Le contexte géographique

Le premier aménagement sur lequel l'équipe projet est intervenue, le plus ancien sur le Rhône, a été Génissiat, qui est l'aménagement de tête, celui qui conditionne les débits de la vallée. L'équipe a réalisé ensuite la rénovation de Seyssel, puis celles de Sault-Brénaz, de Chautagne, de Belley, pour finir par Brégnier-Cordon.

Figure 10.1 – Aménagements du Haut-Rhône / © CNR



2.2 Les objectifs principaux du projet

Un groupe, constitué de personnalités ayant travaillé sur l'automatisation dans les années 80, du Haut-Rhône, sur le projet Rhône 2000, sur le projet SIG et sur le projet de Téléconduite du Rhône, s'est réuni pour définir les grands choix techniques et l'organisation nécessaire à la restitution de l'expérience afin de répondre à deux grands objectifs :

1. respecter la sûreté hydraulique et la sécurité des biens et des personnes ;
2. contrôler les risques projet.

Pour atteindre le premier objectif, il a été décidé de :

- capitaliser l'expérience acquise par l'exploitation et la maintenance des vingt dernières années ainsi que par la réalisation des projets structurants menés par CNR en :
 - définissant une architecture cible de contrôle-commande d'un aménagement du Rhône ;
 - associant les « sachants » de l'ancienne architecture (exploitants, mainteneurs, contrôleurs électriques, ingénieurs...) de l'entreprise dans toutes les phases de conception, de tests et de validation ;

- fiabiliser les logiciels à développer par :
 - la mise en œuvre des plateformes de tests ;
 - l'élaboration et le déroulé de cahiers de tests, en concertation avec les « sachants » de l'entreprise ;
- limiter les perturbations de la rénovation en :
 - définissant un phasage des tranches de rénovation en concertation avec l'ensemble des acteurs concernés ;
 - montant la nouvelle architecture en parallèle de l'existante et en se dotant des moyens pour basculer aisément de l'une à l'autre ;
 - informant et en formant l'ensemble des acteurs utilisateurs et ce tout au long du projet ;
 - confiant le maintien de la nouvelle architecture à l'équipe projet pendant une phase probatoire d'environ un an ;
 - déposant l'ancienne architecture après la phase probatoire d'exploitation et la validation des fonctionnalités par les personnes habilitées par l'entreprise ;
- mettre en œuvre des régulations des retenues automatiques et enchaînées plus précises répondant aux enjeux de sûreté hydraulique et de production ;
- améliorer les interfaces de visualisation, de contrôle et de commande des aménagements.

Pour atteindre le deuxième objectif, il a été décidé de :

- définir et respecter un périmètre de rénovation concernant les matériels et logiciels ;
- établir une analyse de risques et mettre en œuvre les actions pour les limiter ;
- réaliser et respecter une planification coordonnée de tous les lots ;
- monter une équipe projet rassemblant les personnes ayant l'expérience de rénovation de contrôle-commande ;
- choisir des matériels robustes et éprouvés ;
- définir et mettre en œuvre une architecture modulaire, évolutive et cohérente avec l'ensemble des architectures de contrôle-commande des aménagements du Rhône.

2.2.1 Les principes fonctionnels

L'équipe projet a procédé à une rétro-ingénierie détaillée pour identifier précisément les fonctionnalités existantes, les porter dans la future architecture de conduite et mutualiser ainsi les acquis de plus de vingt ans de fonctionnement.

Une évolution de la consignation d'état a été apportée pour réduire la complexité de l'existant. La consignation d'état existante était caractérisée par un ensemble de fichiers de configuration répartis sur plusieurs équipements ce qui constituait une source d'erreurs et de difficultés de maintenance. De plus, une homogénéisation de la désignation des degrés d'alarme entre le Haut-Rhône et le Bas-Rhône a été mise en œuvre pour optimiser la téléconduite et réduire les risques d'erreur.

Pour réduire le risque d'hétérogénéité de la consignation d'état, sa configuration a été centralisée dans le calculateur de conduite aménagement. Pour obtenir une datation à la source des données et pour augmenter la précision de la consignation, CNR, en partenariat avec Schneider, a développé une carte de communication, appelée W315S, en protocole IEC104 implémentée dans chaque automate de l'architecture déployée. De ce fait, les données sont configurées en un seul point puis distribuées automatiquement vers les cartes de communication avec une datation synchronisée pour chaque automate.

Une évolution des interfaces homme-machine du calculateur de conduite standard a été décidée pour faciliter le contrôle et la commande des fonctions principales avec la création des vues suivantes :

- consignation d'état (possibilité de modifier les degrés et les libellés depuis le poste de conduite aménagement, de trier...) ;
- configuration aménagement ;
- état hydraulique de la retenue ;
- choix du plan de consigne en fonction des instructions temporaires en vigueur ;
- ...

Autant que possible, l'équipe projet a développé des modules logiciels standards avec pour objectif de simplifier la maintenance future et de cumuler les améliorations et les évolutions tout au long du projet sur l'ensemble des aménagements rénovés. Ce principe a été mis en œuvre à la fois pour les logiciels et pour l'ensemble de la documentation de maintenance et d'exploitation de la nouvelle architecture.

Fort de l'expérience de la rénovation du Bas-Rhône, CNR a construit la nouvelle architecture en parallèle de l'ancienne pour ne perturber ni la conduite automatique de l'aménagement, ni son exploitation. Cela gardait ainsi la possibilité de revenir sur l'ancienne architecture selon les besoins d'exploitation (par exemple une nouvelle situation hydraulique avant une nuit ou un week-end). Ce principe a réduit considérablement les indisponibilités.

Pour les deux premiers aménagements, Génissiat et Seyssel, CNR a décidé de ne pas renouveler le 1^{er} rang groupe à relais. Pour les quatre aménagements suivants les 1^{ers} rangs groupe déjà automatisés ont été rénovés.

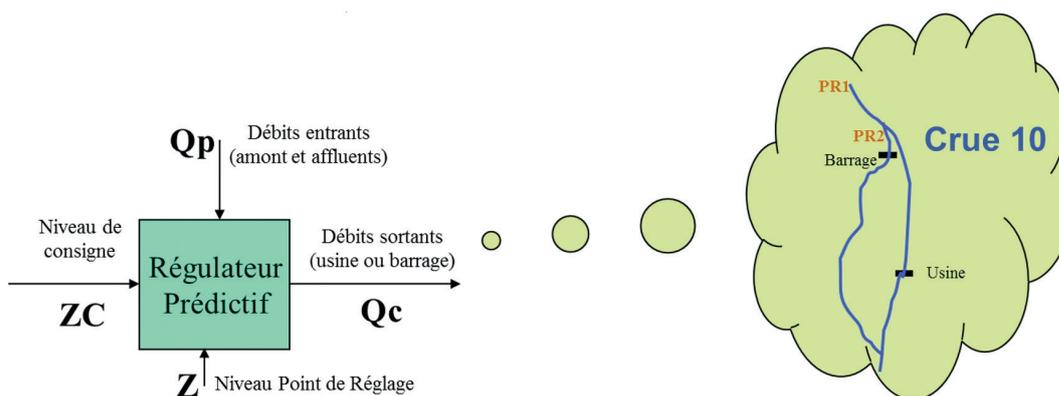
En amont du projet, les commandes des vannes barrages avaient été rénovées, ainsi que les commandes manuelles secours du barrage. En parallèle du projet, les automates de sauvegarde ont été mis en œuvre sur chaque aménagement avec comme particularité à Belley et Brégnier-Cordon de conserver et d'intégrer les fonctionnalités de la sécurité intrinsèque d'origine.

Pour réguler les plans d'eau des retenues, il a été choisi comme sur le Bas-Rhône, de déployer des régulations de type prédictif dont le principe avait été mis au point dans le cadre d'une thèse et avec le concours de l'entreprise de recherche ADERSA. CNR a fait le choix de retravailler le principe de régulation enchaînée du Haut-Rhône et de se doter d'outils de simulations adaptés.

2.2.2 Principe général de la régulation prédictive :

- régulation permettant de « prédire » quelle sera la valeur de la grandeur réglée (niveau) dans un laps de temps donné ;
- nécessité de connaître à l'avance les réactions du plan d'eau => intégration d'un modèle mathématique (logiciel de calcul d'écoulement à surface libre CNR : « CRUE 10 »).

Figure 10.2 – Principes fonctionnels de la régulation prédictive / © CNR



2.3 Les principes organisationnels

L'équipe projet a été constituée d'un noyau d'acteurs ayant de l'expérience sur les projets de rénovation antérieurs pour avoir la capacité d'améliorer les fonctionnalités et d'optimiser les délais. Cette équipe a, tout au long du projet, maîtrisé et géré les turnovers sur la durée en :

- ménageant des phases de recouvrement entre les personnes ;
- stabilisant l'équipe par un choix de personnel interne dirigeant les lots de chacune des disciplines concernées (électricité, automatisme, informatique industrielle et scientifique).

En ce qui concerne les principes fonctionnels, organisationnels et le phasage, les acteurs de l'exploitation ont été impliqués dès la conception puis tout au long du projet :

- phase de rétro-ingénierie, de spécification ;
- les étapes de validation, participation aux essais ;
- l'enrichissement des cahiers d'essais et de la documentation ;
- dispense aux exploitants des formations sur la nouvelle architecture au fur et à mesure de l'avancée du projet, avant et après les mises en service ;
- ...

Les instances décisionnelles ont été de plusieurs niveaux :

- aux côtés de l'exploitation : les réunions de validation et de suivi de chantier ;
- auprès de la maîtrise d'ouvrage : les comités opérationnels ;
- avec les directions concernées par le projet : les comités de pilotage du projet.

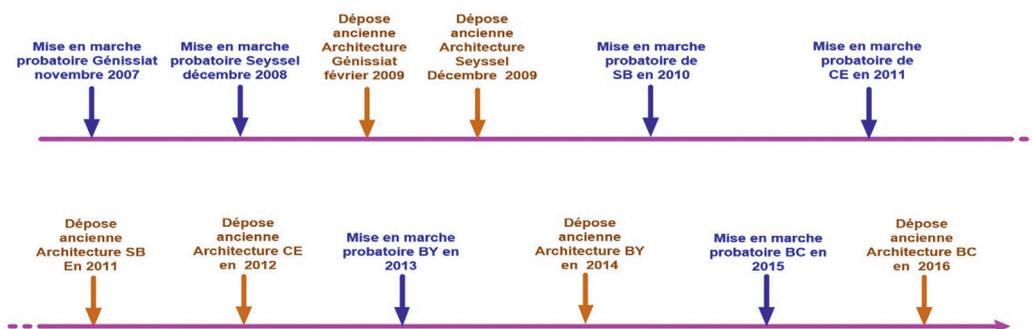
Pour maîtriser le risque lié au développement des logiciels, des plateformes de validation ont été élaborées et déployées en intégrant le calculateur de conduite, l'ensemble des automates, les simulateurs de la retenue et des organes de commande. De ce fait, en plateforme, des tests approfondis de l'architecture complète ont été réalisés dans le respect des cahiers d'essais de chaque logiciel. Les tests plateforme ont été menés, sur des durées de l'ordre de l'année, en fonction de la complexité des fonctionnalités de l'aménagement concerné. Cette démarche a apporté un gain de fiabilité et de temps de mise en service sur site (temps divisé par 5 par rapport aux expériences passées).

Le risque hydraulique a été considérablement réduit par la mise au point d'une plateforme de régulations prédictives des plans d'eau enchaînés. Il s'agissait de gérer au mieux l'impact des actions de l'amont sur l'aval et plus particulièrement la gestion complexe des champs d'inondation. Pour améliorer la fiabilité des logiciels, l'équipe a utilisé en plateforme des données réelles passées, enregistrées lors des différentes situations hydrauliques et en particulier en situation de crue. Par ailleurs, à la suite des mises en service, l'équipe projet a été chargée de la maintenance pendant une phase probatoire dont la durée a été fixée par l'exploitation. Tout au long de la phase probatoire, l'aménagement était conduit avec la nouvelle architecture avec la possibilité de revenir à tout moment sur l'ancienne architecture. Pendant cette phase, l'équipe projet était entièrement disponible pour accompagner l'exploitation dans la maîtrise des outils, des besoins de correctifs ou d'évolutions. Ces derniers se sont révélés mineurs.

2.4 Chronologie de déploiement de l'architecture cible

Les premières réflexions ont été menées début 2005. L'équipe projet a été constituée fin 2005. Génissiat a été mis en service fin 2007. Entre Génissiat et Chautagne 4 ans se sont écoulés et 4 aménagements ont été mis en service : Génissiat, Seyssel (2008), Sault-Brénaz (2010) et Chautagne (2011). Pour les deux aménagements restants, il a été décidé de travailler sur la rénovation d'un groupe par an. Cela a réduit l'indisponibilité pour la production, a donné du temps aux exploitants pour suivre d'autres chantiers et du temps à l'équipe projet pour développer les outils de simulation d'enchaînement des régulations des plans d'eau.

Figure 10.3 – Chronologie de déploiement / © CNR



2.5 Une nouvelle architecture

L'ancienne architecture était une architecture où toute l'intelligence était concentrée dans les calculateurs. Le contexte technologique et financier a donné l'opportunité de distribuer les fonctions sur différents équipements. CNR a ainsi obtenu une modularité qui simplifie la maintenance, la compréhension de l'architecture, et qui donne la possibilité dans le temps de faire évoluer l'architecture avec un impact maîtrisé. Pour limiter les risques de perdre la conduite distante des aménagements, CNR a choisi de doubler les calculateurs et d'avoir une redondance à chaud des calculateurs. Les principes généraux de l'architecture cible à fonctions distribuées sont représentés par la figure 10.4. La figure 10.5 représente la plateforme de validation de Brégnier-Cordon.

Figure 10.4 – Principes généraux de l'architecture du contrôle-commande / © CNR

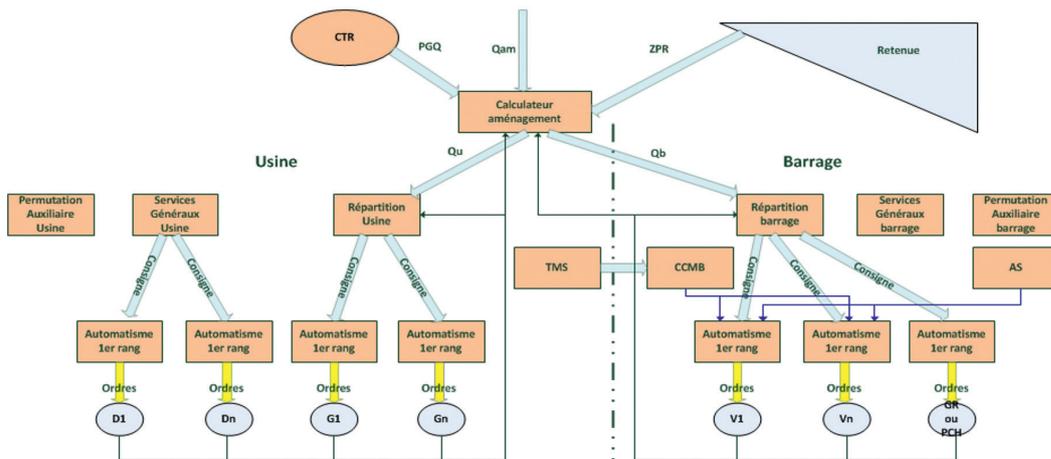
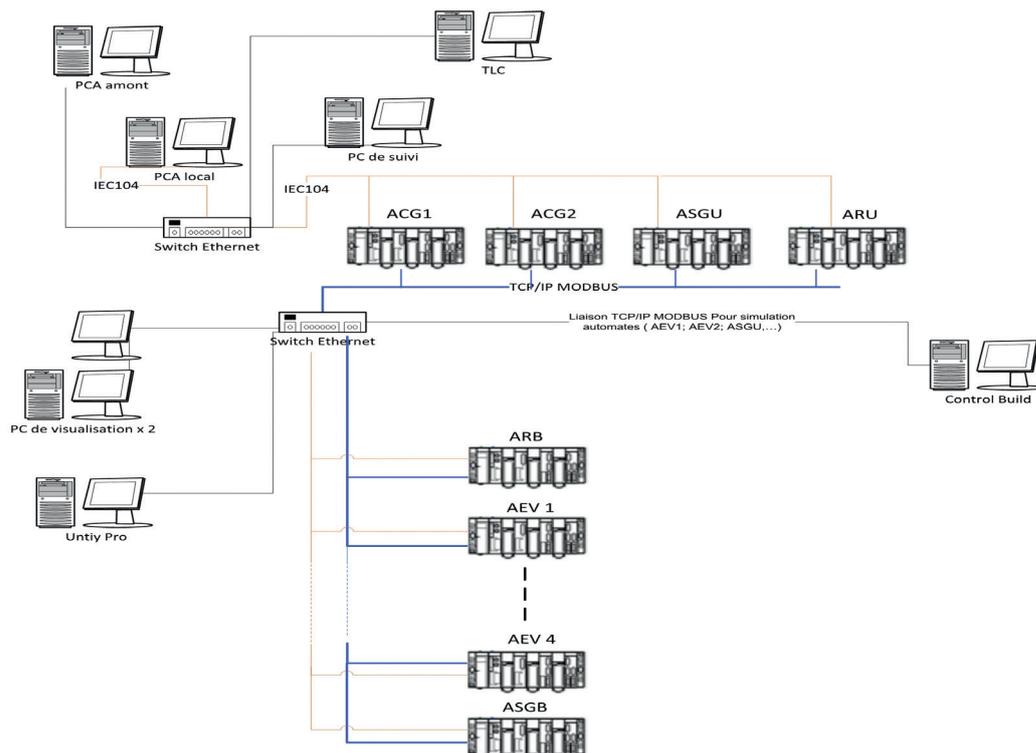


Figure 10.5 – Plateforme de validation de Brégnier-Cordon / © CNR



2.6 Une architecture de référence

La prise en compte des retours d'expérience de l'entreprise et la bonne connaissance des faiblesses de l'architecture à rénover ont contribué fortement à l'atteinte des objectifs. La stratégie de rénovation a été élaborée afin de maîtriser les risques hydrauliques, logiciels, et les risques liés à la planification et au budget. La mise en œuvre de la modularité fonctionnelle (un équipement / une fonction) a facilité l'intégration des futures évolutions, comme par la suite en 2015, la rénovation du 1^{er} rang de l'usine de Seyssel.

Par la suite, la validation fonctionnelle de la conduite enchaînée des 6 aménagements, à haut débit, a été réalisée avec succès lors de la crue du début du mois de mai 2015.

Ces bons résultats ont conforté le choix de travailler longuement en plateforme complète de simulation. La maîtrise et la connaissance de cette architecture cible en font une architecture de référence au sein de CNR. La méthodologie mise en œuvre a été capitalisée pour être déployée par les équipes projets de rénovation de l'entreprise lors des réalisations des projets de rénovation des contrôles-commandes.

3. CONCEPTION DU CONTRÔLE-COMMANDE DES BARRAGES (EDF)

EDF conçoit, construit des aménagements hydroélectriques depuis plus de 70 ans et exploite plus de 600 barrages, dont 220 grands barrages. Les évacuateurs de crues sont souvent équipés de vannes (1 400 environ), de toutes conceptions et types : wagon, segment, stoney, clapets, etc.

3.1 Règles de conception du contrôle-commande des barrages

Pour commander ces organes en toute sécurité, parmi son corpus documentaire de sûreté, EDF s'est doté de règles de conception dans un document appelé X-EL 01-20 « Commande des évacuateurs de crues – Prescriptions pour la sûreté d'exploitation des barrages – Règles de conception de leur contrôle-commande ».

Ces règles ont été élaborées à la suite d'un incident, en juin 1984, sur le barrage de la Croux situé sur le Tarn. Les 2 vannes principales se sont progressivement ouvertes en pleine nuit, provoquant une crue artificielle d'un gradient estimé à 400 m³/s/h. Cet incident, qui n'a causé aucune victime, a eu pour origine le dysfonctionnement de l'automate de crue du barrage qui venait d'être remplacé et dont le programme n'avait pas été totalement testé. Pour contrer les défaillances du contrôle-commande, les exigences de conception sont basées sur les principes suivants :

- après analyse de risques, fiabilisation de la conduite, manuelle ou automatique, par la mise en œuvre de redondances et l'élimination systématique des modes communs ;
- la sûreté intrinsèque est assurée par l'exploitant et, en situation dégradée, sans l'aide d'un système automatisé ;
- le maintien en condition opérationnelle des installations est assuré par une surveillance, des contrôles et essais périodiques.

Les manœuvres d'exploitation prioritaires sont notamment celles liées au passage des crues. Dans ce but, il faut :

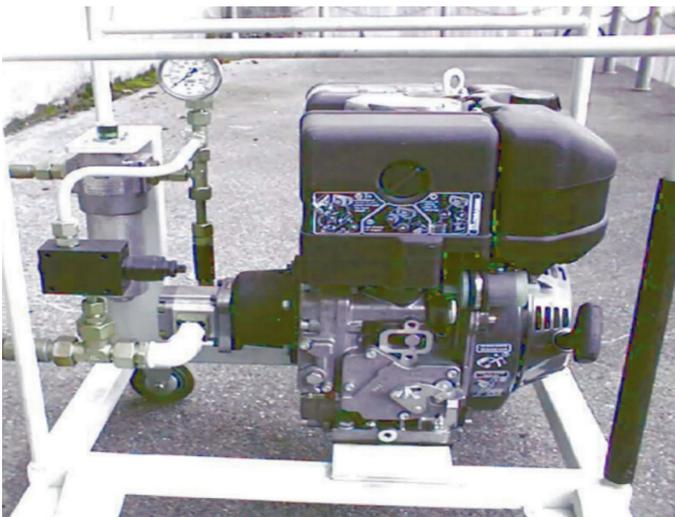
- adapter les règles d'exploitation selon le type d'ouvrage et l'environnement qui les abrite ;
- respecter les règles d'exploitation en intégrant les défaillances possibles de matériel ;
- adapter l'exigence de sécurité aux conséquences potentielles des défaillances (enjeu aval...).

En ce qui concerne les exigences de base de mise en œuvre des installations :

- la source principale alternative doit être secourue à partir d'un groupe électrogène dédié au barrage (n'alimente que les organes de l'évacuateur de crues, et les équipements essentiels à la sûreté d'exploitation du barrage). Sa conception est sécurisée pour cet enjeu spécifique ;

- la distribution de l'énergie alternative doit être traitée avec soin. Il faut en particulier éviter tous les points communs entre la source normale et celle de secours qui, en cas d'incendie par exemple, risquerait de priver l'évacuateur de son énergie de manœuvre. Les cheminements des câbles d'alimentation doivent être protégés des agressions externes éventuelles ;
- chaque organe de crue est équipé d'un automatisme, dédié et indépendant, assurant sa manœuvre et sa protection intrinsèque, ne dépendant que des seules sources d'énergie nécessaires à sa manœuvre. Cet automatisme doit comprendre un dispositif de commande par cran (dit également « par palier » ou « par pas ») ;
- la conduite du barrage est, a minima, prévue à partir de ces armoires individuelles de vannes. Une commande manuelle peut être mise en place depuis un poste de commande centralisée dans un local du barrage. Une ou plusieurs vannes peuvent aussi, le cas échéant, être commandées par un système de conduite automatique obligatoirement situé au barrage ;
- dans tous les cas, lorsque l'exploitant ne peut être sur place à temps, un automatisme de sauvegarde, totalement indépendant de tous les autres matériels, est mis en œuvre. Il intervient dès lors que les mesures de références s'écartent significativement des plages normales d'exploitation. Il fait partie des « sécurités intrinsèques » de l'ouvrage ;
- un dispositif d'ultime secours commun à l'ensemble des vannes permet, en dernier recours, de manœuvrer un organe d'évacuation de crues en cas de panne d'alimentation, de motorisation, du contrôle-commande voire en cas d'incendie généralisé. Le temps d'ouverture doit être compatible avec le gradient de débit considéré. C'est la barrière ultime à tout dysfonctionnement.

Figure 10.6 – Exemple de groupe motopompe d'ultime secours / © EDF



Nota : l'exploitation d'un barrage fait généralement appel à des mesures de niveau, de débit ou de position et nécessite dans tous les cas d'acheminer des alarmes vers les exploitants. Pour assurer la conduite de l'ouvrage en situation normale et dégradée, il est nécessaire que l'exploitant dispose dans tous les cas : de la cote du plan d'eau, de la position des organes et d'un éclairage adapté. La fiabilité et la sûreté des moyens de détection et de transmission sont donc essentielles. Les informations indis-

pensables pour assurer, en toute situation, l'exploitation du barrage (surveillance de l'ouvrage, conduite automatique ou manuelle du barrage et des organes réglants), doivent répondre notamment aux impératifs suivants : emploi de matériel très robuste et éprouvé par l'usage, doublement des points de mesure totalement indépendants, visualisation sur dispositifs autonomes et indépendants de l'automate de barrage, surveillance de la disponibilité de la mesure et de leur cohérence...

Le résultat de cet ensemble est que, outre le faible nombre d'écarts relevés en exploitation dans le cas d'ouvrages entièrement conformes à ces règles, l'exercice des études de dangers a pu confirmer l'excellente robustesse du dispositif puisqu'elles ne concernent que très rarement le chemin critique d' « événements redoutés centraux ». En effet, dans ce cas, seules les conduites automatiques, assez rares sur nos ouvrages, peuvent être concernées.

Ce document de règles internes est soumis à des mises à jour régulières soit du fait du retour d'expérience, soit des avancées techniques. Il est ainsi passé par plusieurs stades :

- à l'origine, il a été conçu pour représenter un corpus de règles avec des solutions de principe associées, dans un document à deux colonnes permettant de dresser un état des lieux de

l'existant en face de règles très définies ;

- une première mise à jour du document a été réalisée en 2009, permettant de préciser un certain nombre de points par suite du retour d'expérience, tout en renforçant l'aspect « risques à l'aval ». La double colonne a été supprimée, la pratique des analyses de conformité ne nécessitant plus cette disposition première ;
- une nouvelle mise à jour du document a été réalisée en 2019 avec une modification en profondeur. En effet, ce document devient un document d'exigences uniquement. Il insiste notamment sur les phases amont, d'expression de besoin et d'analyse fonctionnelle sûreté à réaliser à plusieurs métiers.

3.2 Référentiel ingénierie de conception du contrôle-commande des barrages et premières applications à différents sites

Devant la nécessité de rénover un nombre important de barrages dans les années à venir, l'ingénierie hydraulique d'EDF s'est dotée en 2018 d'un nouveau référentiel complet pour les installations de contrôle-commande de barrages (environ 90 documents sans compter les documents communs avec l'usine) avec :

- une note de synthèse avec un processus d'ingénierie et quelques guides ;
- des notes techniques : architecture, 1^{er} rang vannes d'évacuateur de crues (EVC), auxiliaires basse tension (BT) alternatifs & continus, groupes électrogènes, dispositif de sauvegarde, poste commun de conduite (PCC) situé au barrage, interface homme-machine barrage, automatisme 2^e rang ;
- des schémas types : 1^{er} rang EVC, auxiliaires BT, sauvegarde, PCC, services auxiliaires généraux ;
- des structures types et des modules standards pour les différents automates ;
- des documents contractuels pour les entreprises (spécifications techniques générales et matérielles).

Outre les solutions types et les programmes ou modules types d'automates, il a été nécessaire de cadrer la mise en place de fonctions d'acquisition d'informations par ces derniers par le biais de réseaux sans impacter la sûreté et les fondamentaux décrits ci-avant : un certain nombre de règles nouvelles ont ainsi été édictées :

- séparation des fonctions de sûreté par une sanctuarisation de l'automate de barrage, indépendant de l'automate des services généraux qui reçoit toutes les fonctions annexes ;
- limitation de l'emploi de réseau à des fonctions de conduite « de confort » tout en assurant la possibilité d'une conduite en manuel dans tous les cas (même en cas de panne des automates) ;
- emploi très strict de nouvelles protections...

À noter que l'ensemble du processus et des principes techniques a été validé en « commission technique sûreté contrôle-commande » (CTSCC) d'EDF ingénierie, qui est une instance de « sages » de la sûreté. Cette commission a été créée pour commenter et valider tout projet à composante sûreté à la fois sur la conformité mais également sur certaines solutions proposées différentes ou en complément du référentiel. En agissant ainsi en amont, au niveau d'un référentiel commun, cela permettra de ne plus avoir à revenir sur des détails de construction puisque réalisés à partir d'un référentiel complet et explicite, mais plus à vérifier les fondements de la rénovation, les données d'entrée qui sont souvent à l'origine des écarts constatés. Ainsi la revue de ces projets pourra se porter plus sur la validation des données d'entrée que sur la forme

de la mise en œuvre.

Ces schémas types sont utilisés dans toutes les configurations actuelles qui seront mises en œuvre sur plusieurs barrages du Rhin (4 sites), de la basse vallée de l'Ain (3 sites), du barrage de Montrignon dans les Alpes ainsi que sur les autres affaires à venir.

La figure 10.7 montre un des schémas qui a été retenu pour la mise en œuvre d'un contrôle-commande sur un barrage sur le Rhin intégrant des automates et des réseaux. La figure 10.8 représente la gestion des positions des vannes pour ce barrage.

Figure 10.7 – Exemple d'architecture (barrage de Marckolsheim) / © EDF

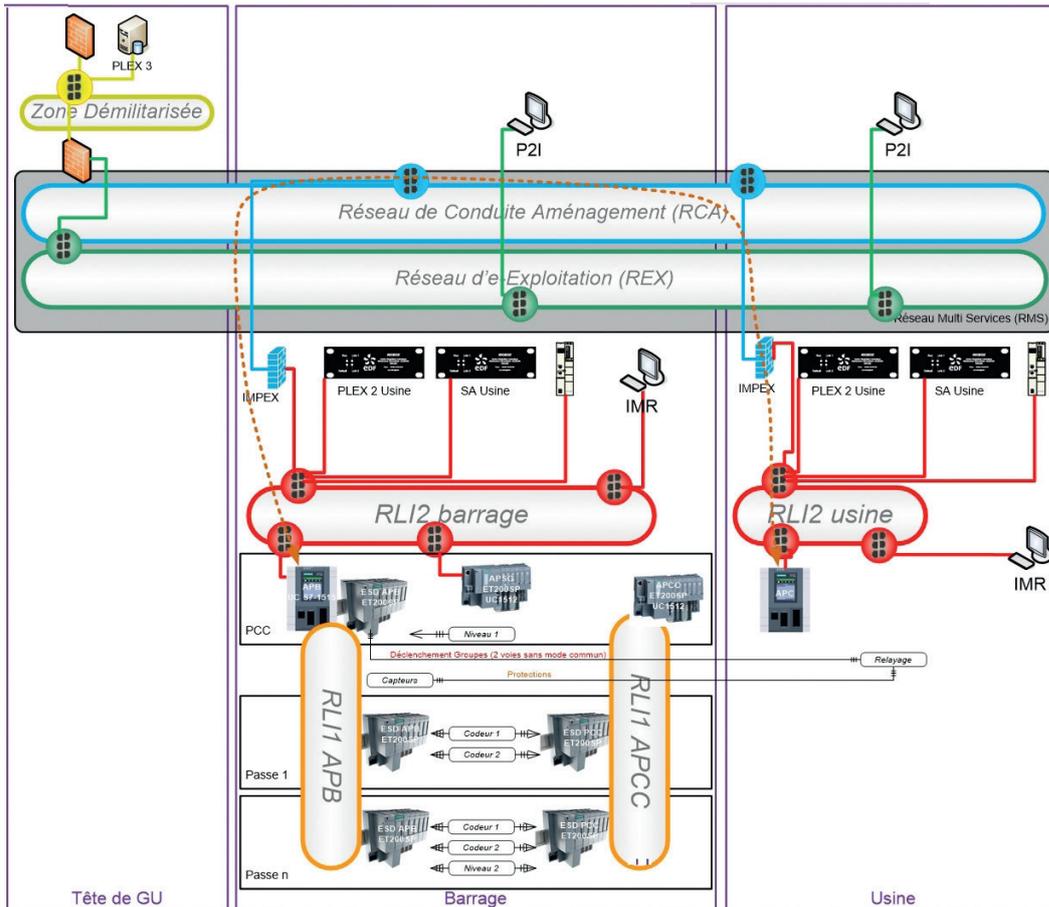
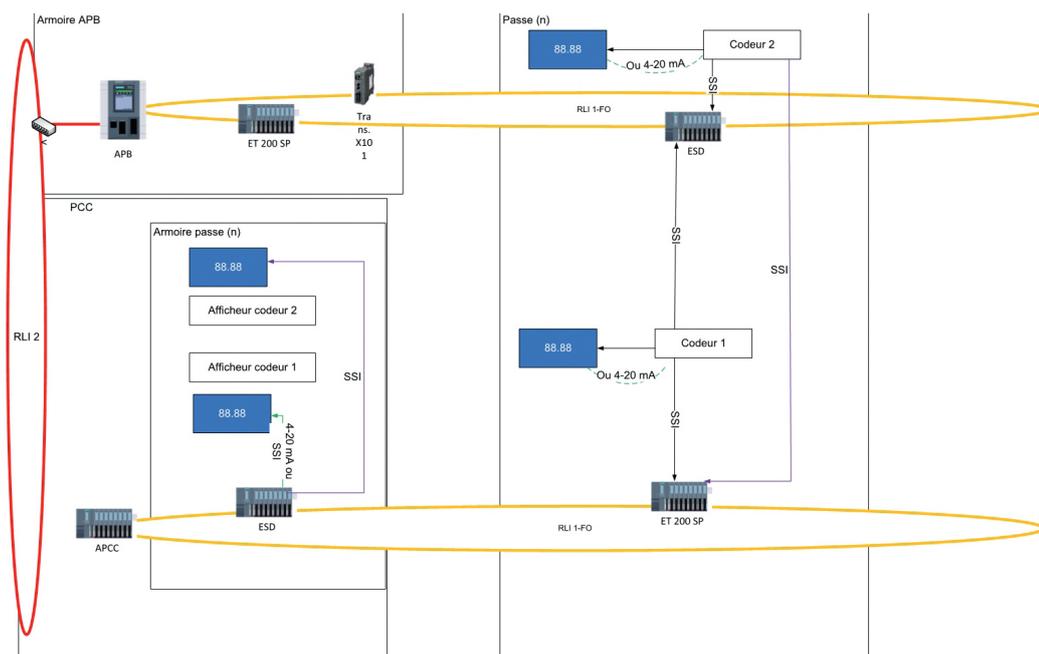


Figure 10.8 – Exemple d'acquisition des positions des organes / © EDF



À noter que les ouvrages du Rhin sont étendus et complexes. Ainsi, ces types de schémas peuvent être simplifiés pour s'adapter à la complexité et aux enjeux des sites.

3.3 Le référentiel complet

Les principes intangibles et les règles « fortement encadrées » sont confirmés au fil du temps et sont avérés fiables dans les analyses de risques des études de dangers. Chaque ouvrage fait l'objet d'une analyse de risques fine et spécifique de la fonction d'évacuation des crues du barrage considéré et des risques à l'aval, cette dernière étant validée en commission technique sûreté contrôle-commande d'EDF. Le nouveau référentiel complet, créé en 2018, intégrant jusqu'aux schémas et logiciels, aidera à encore plus de conformité à ces règles.

4. CONCLUSION

Pour l'ensemble de ces pratiques, nous pouvons mettre en avant la volonté de maîtriser le risque, de s'enrichir des expériences et de cadrer les interventions sur des ouvrages en fonctionnement. Avec des ingénieries intégrées, EDF et CNR, ont été en mesure d'élaborer et d'enrichir des doctrines et des méthodologies qui par leur caractère d'approche systémique puis d'application d'un standard, sont pleinement adaptées aux enjeux.

5. RÉFÉRENCE

- CFBR (2015) – Vantellerie, contrôle-commande, télécom et alimentations électriques pour des barrages plus sûrs. Colloque CFBR Chambéry, décembre 2015. <https://barrages-cfbr.eu/2015-Vantellerie.html>

CHAPITRE
11

AUSCULTATION ET SURVEILLANCE

À l'instar de beaucoup d'autres pays, la France n'échappe pas à ce constat général : ce sont les attentes sociétales et la recherche d'une protection toujours plus grande vis-à-vis des risques industriels qui font qu'aujourd'hui la très grande majorité des barrages sont auscultés et surveillés.

Pour autant, l'auscultation est dans notre pays une pratique ancienne qui répondait au besoin initial des concepteurs et constructeurs de barrages de valider par l'observation les progrès techniques effectués. Cette approche caractéristique de toute démarche scientifique a conduit les ingénieurs à mesurer, observer et analyser la réponse des structures aux différents types de sollicitations.

Pour cela, il a fallu très souvent adapter ou imaginer une instrumentation et des méthodes de traitement des données spécifiques. Par conséquent, en dehors de quelques techniques déjà bien maîtrisées par ailleurs (comme la topographie), de nouvelles solutions techniques ont fréquemment été proposées et mises en œuvre par les acteurs de la profession. En la matière, ce qui a été fait par nos prédécesseurs depuis des décennies s'est bien souvent révélé pertinent et pérenne.

En s'appuyant sur ces bases solides, la profession s'est toujours ouverte aux nouvelles technologies : elle a intégré les progrès en électronique et informatique dès les années 1960 et a continué à développer de nouveaux moyens et méthodes de surveillance. Ceux-ci ont considérablement modifié notre manière d'ausculter et surveiller les ouvrages ; et cette tendance est appelée à se poursuivre dans le futur. Dans cet environnement technique changeant, l'exploitant a également vu son métier évoluer ; il s'est adapté et conserve une place essentielle dans le processus de surveillance.

C'est cette histoire passée, son actualité et les prémices de son futur que nous vous proposons de découvrir ensemble dans ce chapitre.

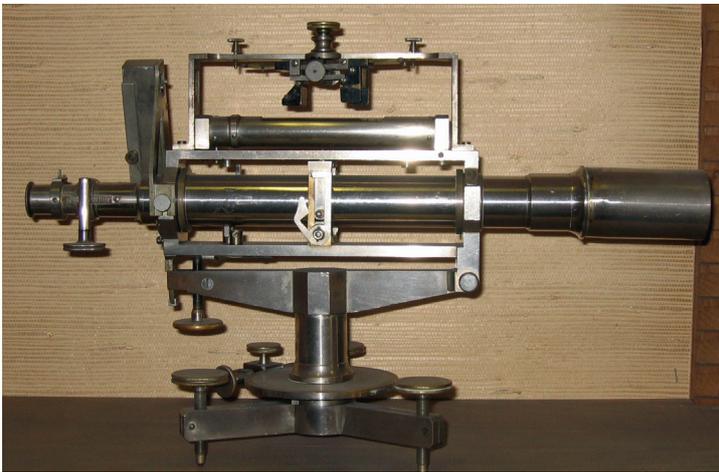
1. LES DÉBUTS DE L'AUSCULTATION ET DE LA SURVEILLANCE DES BARRAGES EN FRANCE

À ses débuts, la conception et la réalisation des barrages relevaient d'approches expérimentales du fait que l'on n'avait pas à disposition les outils de modélisation, et que la simple observation du comportement permettait de rassurer l'ingénieur. La surveillance des barrages pour s'assurer d'un niveau de sûreté suffisant s'appuyait donc soit sur l'examen visuel, soit sur l'auscultation par la mesure.

1.1 Les premières mesures sur les barrages en France

Les mesures les plus anciennes étaient, d'une part, des mesures de fuites afin d'évaluer l'étanchéité de l'ouvrage, et d'autre part, des mesures topométriques (nivellement, alignement...) afin d'apprécier les déplacements et donc indirectement la stabilité du barrage.

Figure 11.1 – Niveau A. Berthélémy 1883–1886 – Source : Bibliothèque patrimoniale numérique de l'École nationale supérieure des mines de Paris



Construit entre 1830 et 1838, le barrage en maçonnerie de Grosbois, en France, présentait de nombreux problèmes depuis sa mise en eau et avait fait l'objet de plusieurs confortements. Afin d'en apprécier l'efficacité, des relevés topographiques avaient été engagés dès 1852, à l'aide de l'exemplaire unique de lunette de visée disponible au laboratoire des Ponts et Chaussées.

1.2 Le développement d'instruments dédiés à l'auscultation

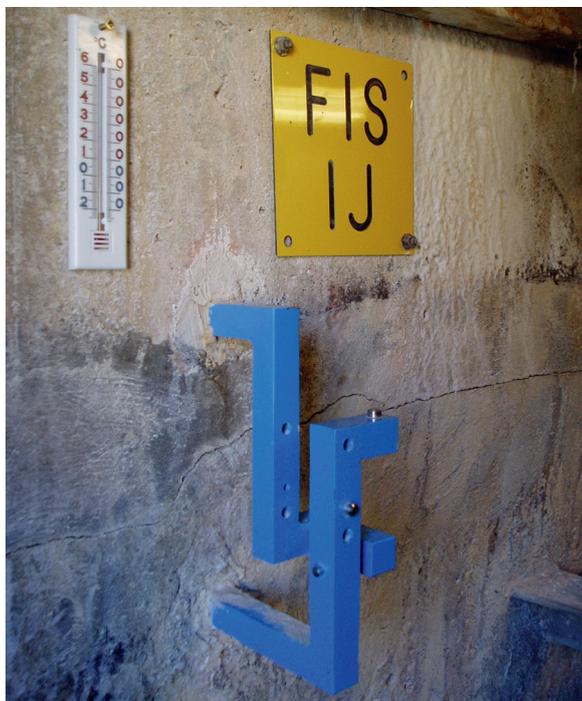
Le développement de dispositions constructives innovantes pour les barrages s'est traduit par un nombre croissant de questions de la part des concepteurs mais aussi des constructeurs afin d'appréhender le comportement des ouvrages et en assurer leur sûreté. Pour y répondre, l'innovation a porté sur le développement de capteurs, d'instruments mais aussi sur les méthodes de mesures.

C'est surtout dans l'entre-deux-guerres et après la seconde guerre mondiale, dans une forte période de construction, associée à la réalisation d'ouvrages de types et matériaux différents avec des hauteurs toujours plus importantes et des géologies plus complexes, que l'ingénieur audacieux a exprimé ses besoins en matière de mesures de contrôle. Pour valider ses calculs, les observations sur le comportement étaient certes primordiales, mais la quantification par la mesure était devenue indispensable, soit du fait des ordres de grandeur concernés, soit du fait que, située au cœur de l'ouvrage, la donnée n'était accessible que par un instrument posé au sein du barrage.

À titre d'exemple, André Coyne, concepteur de barrages-voûtes, a imaginé le dispositif de mesure de déformation dont il avait besoin mais alors inexistant sur le marché. Basé sur la technologie de la corde vibrante, il a ainsi développé, en 1931, le capteur extensométrique à corde vibrante dit aussi « témoin sonore » qui équipera le barrage-voûte de la Bromme (1930–1932), mais surtout le barrage-voûte à double courbure de Marèges (1932–1935).

Robuste, précis, et avec une bonne pérennité, le capteur à corde vibrante a également été employé dans la conception d'instruments de mesure de pression interstitielle en remplacement des cellules à contre-pression hydraulique. Les premiers grands barrages français à en être équipés sont le barrage de Serre-Ponçon (1958) et celui du Mont-Cenis (1965).

Figure 11.2 – Vinchon au droit d'une fissure / © EDF



Du fait de la complexité des mesures topographiques et de leur fréquence d'acquisition réduite, l'ingénieur a cherché à développer des instruments permettant de suivre les déplacements. À partir des années 1950, le pendule direct, « simple » fil à plomb, a permis de mesurer un déplacement différentiel entre une table de mesure et un point d'ancrage de la structure. Il a fallu attendre les années 1960 pour imaginer le pendule inverse, et la mesure du déplacement absolu en fondation. En 1973, EDF/FTM a breveté le dispositif de réalisation de forage vertical de diamètre réduit.

La détermination des ingénieurs à acquérir des mesures pour la surveillance des ouvrages a conduit à des instruments d'apparence simple mais ingénieux.

Le Vinchon, portant le nom de son inventeur, en est un bon exemple. Cet instrument permet un suivi précis des déplacements dans les 3 dimensions des joints ou des fissures d'ouvrage.

1.3 Deux jalons marquants de la réglementation pour la surveillance des barrages

Le renforcement de la réglementation dicté par l'accident tragique du barrage de Malpasset (1959), puis par des ruptures de digues de faible hauteur (début des années 2000), s'est traduit par une exigence croissante en matière de surveillance et d'auscultation des barrages. Les textes émis par l'administration (circulaire de 1927 et circulaire 70-15 de 1970) ont tout d'abord codifié les pratiques et l'organisation de l'auscultation en France, avec une attention particulière portée aux « grands barrages ». La loi sur l'eau de 2006 et les décrets qui ont suivi considèrent la dangerosité potentielle de barrages de grande taille mais aussi des plus modestes. Elle responsabilise plus fortement les gestionnaires de barrages, et conforte la mission de contrôle des services de l'État, avec des possibilités de recours accrues en cas de constat de défaillance.

Ces évolutions réglementaires rappellent la nécessité et l'importance des processus de surveillance, des dispositifs d'auscultation et de l'analyse régulière des données acquises.

2. LA SURVEILLANCE DES BARRAGES EN FRANCE AUJOURD'HUI

2.1 Les objectifs de la surveillance

La surveillance regroupe la mesure des dispositifs d'auscultation de l'ouvrage et les observations visuelles faites lors des visites techniques. L'exploitation de ces données a des finalités différentes liées à des temporalités différentes :

- un premier **enjeu court terme** : il s'agit d'alerter en cas d'anomalies significatives à évolution rapide par rapport aux comportements historiques qui pourraient mettre en jeu la sûreté. Des actions immédiates pour retrouver un niveau de sûreté acceptable peuvent se révéler nécessaires ;
- un second **enjeu moyen terme** : les données de surveillance sont exploitées par un bureau d'études agréé qui identifie les dérives lentes du comportement ou l'évolution des dégradations à moyen / long terme. L'analyse va porter sur la compréhension des phénomènes et sur leurs conséquences potentielles (perte de performance technique...). Cette analyse peut conduire à adapter la surveillance, à engager des travaux ou à approfondir l'analyse ;
- un troisième **enjeu long terme** : les dérives ou les pathologies lentes et/ou complexes qui nécessitent d'approfondir l'analyse au travers de modélisations et de calculs de vérification de la stabilité. Il s'agit d'anticiper les conséquences à long terme des évolutions constatées.

2.2 La définition des actions de surveillance

La surveillance contribue directement à la sûreté de l'ouvrage, en permettant la vérification permanente de l'équilibre entre les contraintes appliquées et la résistance de l'ouvrage, notamment au travers des variations des paramètres hydrauliques, mécaniques et des déplacements qui en résultent.

On définit le dispositif d'auscultation et les points de contrôle des visites en répondant aux deux objectifs suivants :

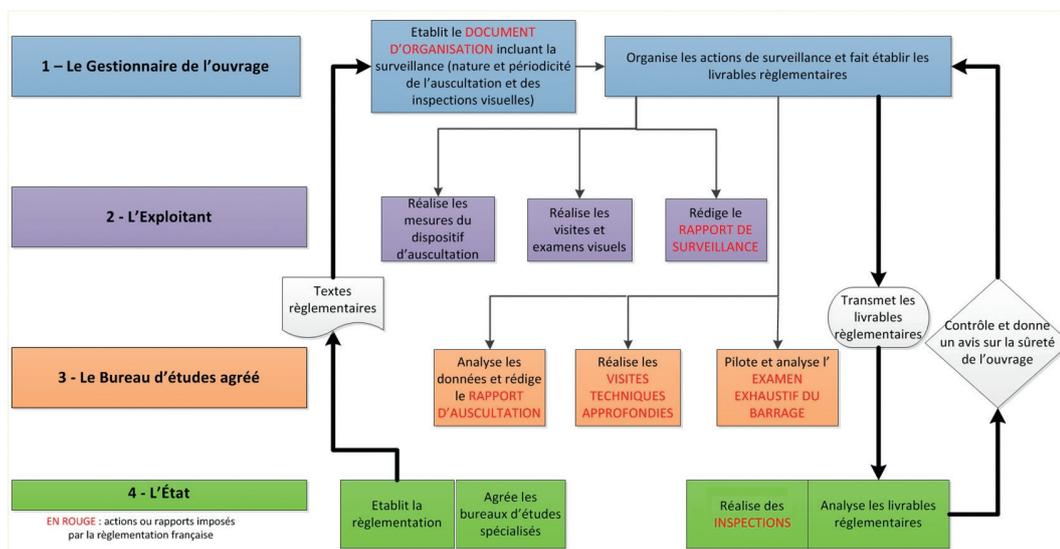
- vérifier que le comportement de l'ouvrage est conforme aux hypothèses de conception, du point de vue des contraintes qui lui sont appliquées (charge d'eau, sous-pression...) et de sa réaction (mouvements, déplacements, tassements...);
- détecter les signes de vieillissement, qu'il s'agisse des dysfonctionnements et des dégradations mineures comme des symptômes de pathologies (réactions de gonflement des bétons, érosion interne...).

Une fois définies selon cette logique, les actions de surveillance propres à l'ouvrage sont consignées dans un document d'organisation. Ce document décrit en détail la surveillance, en termes de périodicité de mesure des dispositifs d'auscultation et de périodicité des inspections visuelles de l'ouvrage, et ce pour les situations normales et lors d'événements particuliers (crues, séismes, périodes de grand froid...). Il s'agit du document central de l'organisation de la surveillance, document dont le contenu et la pertinence sont analysés tout au long de la vie de l'ouvrage afin d'adapter les modalités de surveillance au fil du temps.

2.3 Les acteurs de la surveillance, leurs rôles et responsabilités

Le logigramme de la figure 11.3 présente les quatre principaux acteurs de la surveillance des barrages et leurs responsabilités respectives dans les étapes du processus.

Figure 11.3 – Schéma d'organisation de la surveillance des barrages en France



Le gestionnaire de l'ouvrage est responsable de la sûreté du barrage, qu'il en soit propriétaire ou concessionnaire. Il s'appuie sur 2 entités distinctes pour assurer la surveillance :

- **l'exploitant local**, qui assure les missions de surveillance à forte récurrence et la maintenance des appareils du dispositif d'auscultation ;
- **les bureaux d'études agréés** spécialisés en ouvrages hydrauliques, qui ont pour rôles d'une part d'analyser les phénomènes observés ou mesurés avec un haut niveau d'expertise et d'autre part de piloter et analyser les actions de surveillance de récurrence faible (par exemple les visites techniques approfondies ou les opérations propres à l'examen exhaustif de l'ouvrage car, bien qu'il ne s'agisse pas d'une obligation réglementaire, c'est généralement le bureau d'études agréé qui conduit ce type d'examen compte tenu de la technicité qu'ils requièrent). La particularité de ces bureaux d'études est qu'ils sont indépendants et agréés par l'État, sur la base de leurs compétences et de leur expérience, pour être autorisés à mener ces missions.

L'État exerce sa mission de contrôle et son pouvoir pour garantir la sécurité publique. Il est représenté par un inspecteur qui veille à ce que le gestionnaire d'ouvrages hydrauliques respecte la réglementation et les obligations qui en découlent en matière de sécurité et de sûreté des ouvrages. L'inspecteur est l'interlocuteur privilégié du gestionnaire et à ce titre :

- il est le destinataire de tous les documents réglementaires que le gestionnaire est en devoir d'établir ;
- il effectue les inspections du responsable du barrage.

Le représentant de l'État a un pouvoir de police et peut demander en dernier recours l'arrêt de l'exploitation de l'ouvrage.

2.4 Les actions de surveillance et les documents associés

L'État a fixé dans la réglementation les périodicités des actions de surveillance pour chaque catégorie d'ouvrage selon le volume d'eau retenu et la hauteur de l'ouvrage.

Tableau 11.1 – Documents relatifs à la surveillance et à la sûreté exigés par la réglementation française

LIVRABLE EXIGÉ PAR LA RÉGLEMENTATION	Périodicité en fonction de la catégorie du barrage		
	Classe A (Grands Barrages)	Classe B (Barrages Moyens)	Classe C (Petits Barrages)
Rapport de surveillance : relate les événements intervenus sur la période (crue, travaux...) et présente les données issues de l'auscultation et des visites périodiques, ainsi que les résultats des essais (vannes, alarmes...) intervenus sur la période	1 an	3 ans	5 ans
Réalisation d'une visite technique approfondie : recense les dégradations pouvant impacter la sûreté, vérifie l'état des organes de sûreté et du dispositif d'auscultation	1 an*	3 ans*	5 ans*
Rapport d'auscultation : analyse les données d'auscultation sur la période et statue sur le comportement de l'ouvrage	2 ans	5 ans	5 ans
Examen exhaustif de l'ouvrage : examine toutes les parties immergées ou difficilement accessibles de l'ouvrage	10 ans	15 ans	/

* Périodicité minimale, complétée par des visites à l'occasion de tout événement ou toute évolution significative.

3. UN APERÇU DES NOUVELLES TECHNIQUES D'AUSCULTATION ET DE DIAGNOSTIC DES BARRAGES

L'auscultation classique est basée sur la mesure d'instruments choisis et positionnés afin de rendre compte du comportement de l'ouvrage et de son évolution. Le dispositif d'auscultation est conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage considéré. À ce titre, les appareils et méthodes d'auscultation installés sur les barrages en France sont conformes aux pratiques courantes de la profession, et sont cohérentes avec les recommandations des bulletins de la CIGB.

Du fait de leur robustesse et de leur longévité, les dispositifs classiques ont l'avantage de garantir une très bonne continuité de surveillance et ont vocation à perdurer. Mais de **nouvelles techniques** peuvent utilement compléter l'auscultation usuelle, en offrant notamment les spécificités suivantes :

- une couverture spatiale plus importante que ce que permettent les capteurs ponctuels ;
- une résolution et une densité d'informations plus élevées dans les zones auscultées.

Ces 2 spécificités permettent notamment d'identifier et de caractériser les pathologies lentes telles que les phénomènes d'érosion ou le gonflement des bétons dès les premiers symptômes,

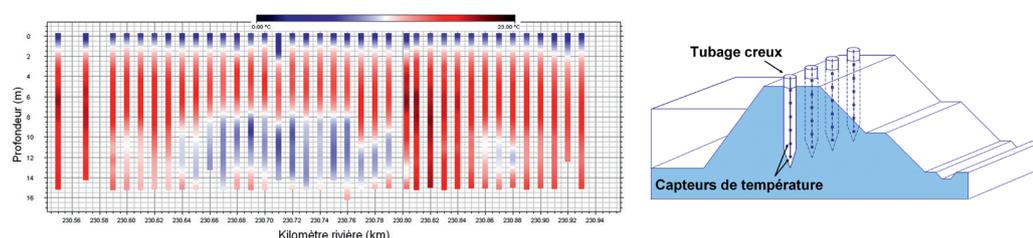
lorsque ceux-ci sont encore très localisés et de faible ampleur. Parmi les techniques récemment développées, plusieurs ont désormais atteint un stade de maturité opérationnelle : la mesure thermométrique dans les remblais, les méthodes géophysiques et de nouveaux moyens de mesures topographiques (terrestres, aéroportés et satellitaires).

Dans certains cas, le dispositif d'acquisition pourra être installé à demeure et permettre une auscultation continue du barrage.

3.1 Auscultation thermométrique dans les remblais

La détection d'anomalies dans le champ de répartition des températures au sein d'un remblai peut se faire à l'aide de chaînes de capteurs de température mis en place dans des tubages verticaux implantés selon un profil en long perpendiculaire aux écoulements internes. Cela permet de situer la zone de fuite mais aussi de quantifier les débits.

Figure 11.4 – Profil en long thermométrique – Principe d'implantation des capteurs et résultats de mesure d'une détection de zone de fuite / © CNR

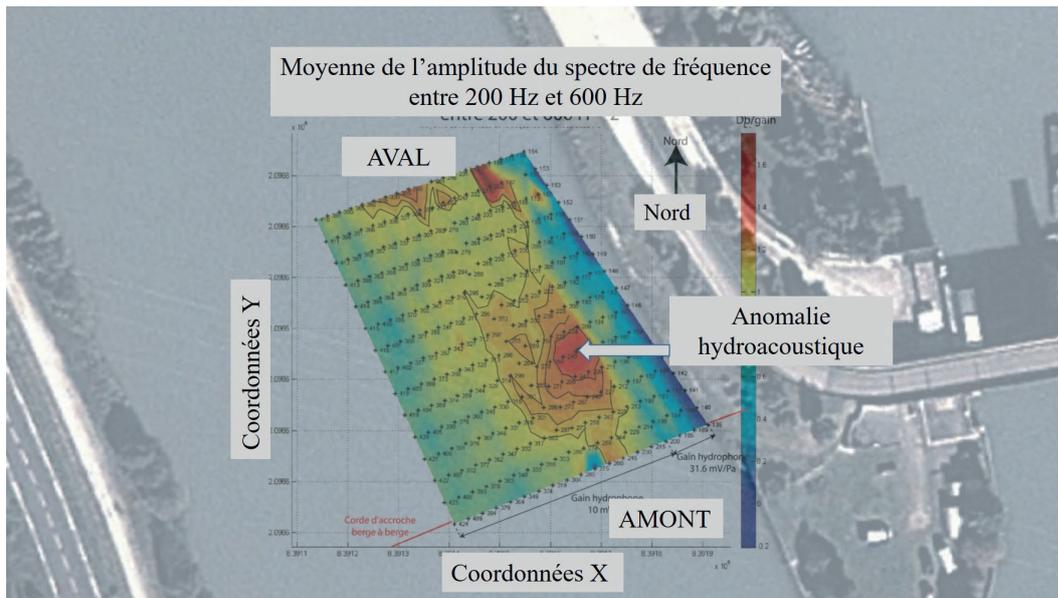


La mesure répartie de température par fibre optique, traitée avec un logiciel d'analyse spatiale et temporelle de ses variations, permet également de détecter et localiser des zones de circulation hydraulique préférentielles dans les remblais. Avec ce système, la surveillance des ouvrages de grand linéaire s'en trouve fortement améliorée et de nombreux ouvrages neufs, ou confortés, en sont désormais équipés. Des développements sont en cours pour élargir le champ d'application de cette technologie, en particulier pour déterminer les déformations dans les remblais et quantifier des vitesses d'écoulement (paramètre permettant d'évaluer plus précisément le risque d'érosion interne).

3.2 Auscultation par méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques consistent en la mesure d'une ou plusieurs propriétés physiques et / ou électriques du milieu de manière non intrusive. Elles donnent ainsi accès à des caractéristiques intrinsèques à l'ouvrage, mais sans altérer celui-ci. Cette particularité se révèle très utile pour « prendre le pouls de l'ouvrage », ou « suivre l'évolution de certains paramètres au cœur des ouvrages », lors d'examens de faible récurrence (5, 10 ou 15 ans par exemple). Des méthodes de mesure acoustique (figure 11.5) ou de tomographie électrique ont par exemple été adaptées à l'auscultation des écoulements internes aux ouvrages en terre. D'autres méthodes géophysiques ont été développées pour caractériser la densité des matériaux, et identifier son évolution à long terme en cas de pathologie.

Figure 11.5 – Illustration d'une application de méthode hydroacoustique : localisation d'une zone d'infiltration / © CNR



3.3 Topométrie automatisée

La surveillance tridimensionnelle de barrage peut être automatisée à l'aide de stations robotisées qui effectuent des mesures selon un cycle programmé. L'intérêt est de pouvoir augmenter la fréquence des mesures (au pas journalier voire horaire), par exemple lors de travaux de réhabilitation (injection, pose de tirants). La surveillance de la stabilité d'appuis ou de versants peut également nécessiter la mise en place de tels dispositifs.

L'évolution du matériel et des méthodes de traitement autorise désormais le levé par station robotisée sans cible, ce qui peut être utile pour répondre à certains besoins de surveillance dans l'urgence avec des difficultés d'accès à la zone auscultée.

3.4 Lasergrammétrie (LIDAR ou SCAN 3D)

Cette technique permet la détermination de nuages de points en 3 dimensions, avec une densité paramétrable et qui peut être très élevée. Elle permet ainsi une auscultation surfacique, et non plus ponctuelle, des zones à surveiller. Le relevé peut être réalisé à partir de lasers terrestres fixes ou aéroportés (hélicoptère ou désormais drones). Cette méthode ne nécessitant pas la pose de cible, elle est appropriée aux structures non monolithiques, déformables, pour lesquelles une auscultation topographique ponctuelle ne répond pas au besoin de détection de désordres locaux (fontis, tassements, déformations de parement en maçonnerie...).

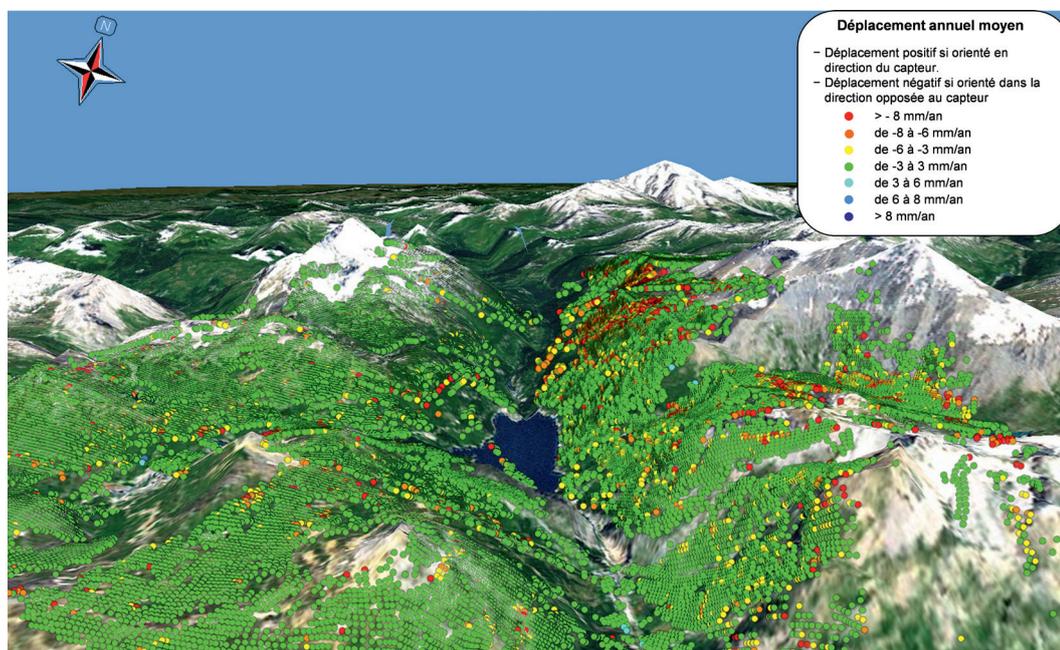
3.5 Interférométrie satellitaire radar

Le traitement d'images radar permet d'acquérir des informations sur les mouvements d'une zone, par comparaison entre les mesures radar effectuées à différentes dates depuis un satellite en orbite autour de la terre. Le paramètre surveillé est la variation de distance entre le satellite et une zone de réflexion au sol recherchée dans les différentes images par des algorithmes de traitement. Un intérêt majeur est que dans les zones couvertes par de tels satellites, on peut utiliser des images anciennes archivées par les agences spatiales.

Néanmoins, cette technique présente des limitations. Ainsi, la précision de la mesure de distance est dépendante du type de bande radar utilisé, du nombre d'images disponibles, ainsi que de la qualité de réflexion du signal émis (elle peut être très bonne sur des surfaces en béton planes, mais médiocre sur une pente recouverte de végétation ou de neige). Il est donc souhaitable de vérifier préalablement à la mise en place d'une surveillance sur le long terme que la précision recherchée pourra être atteinte avec les données disponibles et les traitements possibles.

Le lancement de nouveaux satellites et le développement de nouveaux services de surveillance en font une technique d'avenir adaptée à la surveillance de zones étendues : grands linéaires d'endiguements, versants...

Figure 11.6 – Identification de zones de glissements sur les versants de la retenue du barrage de Tignes [Boudon, 2012] / © EDF



En conclusion, sans remplacer les approches classiques, ces méthodes modernes viennent apporter une vision complémentaire et utile en matière d'auscultation.

4. L'ACQUISITION, LE TRAITEMENT ET L'ANALYSE DES MESURES D'AUSCULTATION ET DES DONNÉES DE SURVEILLANCE

Bien que certaines tâches se soient largement automatisées et informatisées, le processus de base de collecte et de traitement des données demeure inchangé : acquisition des lectures sur les ouvrages, transformation en valeurs de phénomènes physiques à partir de caractéristiques météorologiques et relevées lors de la pose, puis validation et intégration dans des bases de données. En fait, le défi principal pour des maîtres d'ouvrages est de maintenir dans la durée :

- un niveau d'exigence et de rigueur garantissant la bonne exécution de ces activités ;
- un niveau de surveillance toujours adapté aux enjeux et à la connaissance du comportement du barrage ;
- la maîtrise de la qualité des mesures en s'appuyant sur une conception robuste et pérenne des dispositifs, et une maintenance régulière ;
- la conservation des données.

Les technologies d'acquisition, de transmission, et de traitement informatique des données ont fourni des outils structurants pour l'auscultation. Elles facilitent et sécurisent l'exploitation et la sauvegarde des données. Mais elles ont aussi amené des possibilités nouvelles de visualisation, et d'analyse, renforçant ainsi considérablement la pertinence des diagnostics de comportement.

Désormais, tous les grands maîtres d'ouvrages et bureaux d'études français disposent de solutions matérielles et logicielles répondant aux besoins traditionnels de l'auscultation, auxquels s'ajoutent des outils de traitement plus sophistiqués afin de toujours « mieux faire parler les mesures ».

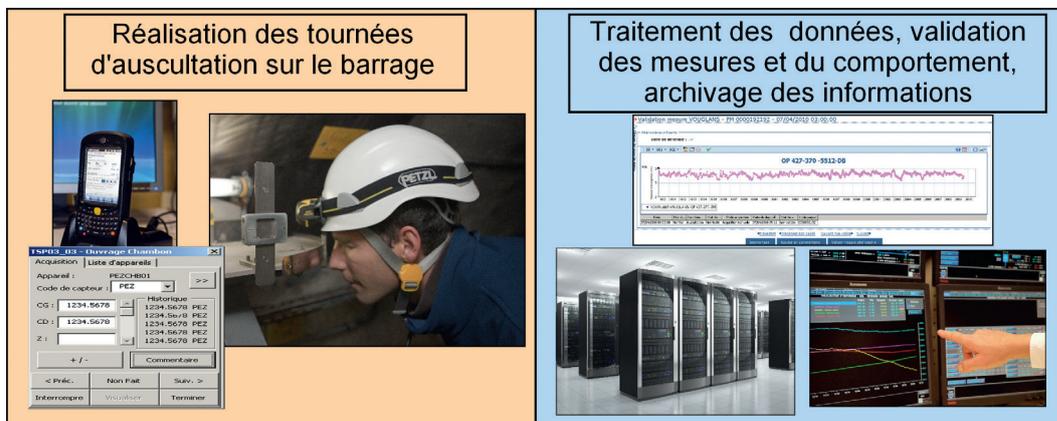
4.1 Acquisition et traitement de base des mesures

Les attendus et bonnes pratiques concernant l'acquisition et le traitement des données sont bien connus et partagés par la profession, et ne seront donc pas détaillés. Les développements récents ont surtout eu pour objectif de faciliter le travail des exploitants et de rendre plus robuste la chaîne d'acquisition et de traitement.

L'utilisation de smartphones et tablettes pour la saisie et la transmission des lectures est de plus en plus fréquente. Elle permet d'effectuer sur site le contrôle de la bonne réalisation des mesures et d'identifier au plus tôt des écarts éventuels.

Les logiciels d'auscultation intègrent la traçabilité des opérations et sauvegardent toutes les informations utiles : séries temporelles de lectures et de résultats de mesures, caractéristiques des dispositifs d'auscultation et des capteurs, résultats d'examen visuels et métrologiques... Les bases de données et les fonctions de visualisation et d'analyse de ces logiciels sont accessibles à de nombreux acteurs par intranet ou internet.

Figure 11.7 – Illustration du processus d'auscultation (collecte / traitement des données) / © EDF



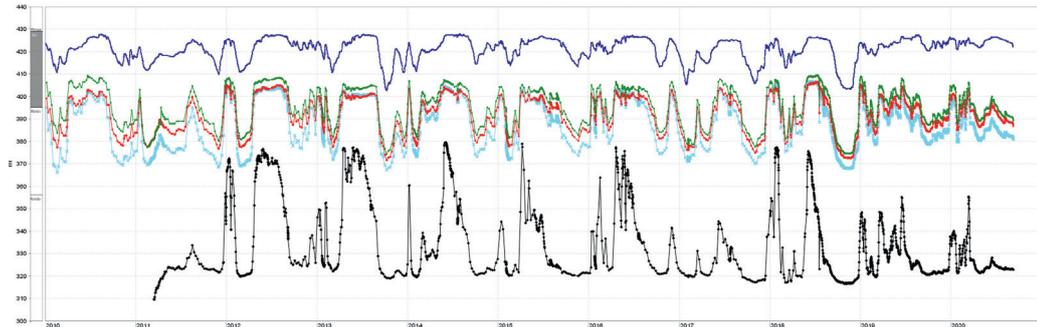
Cette automatisation ne doit cependant pas faire oublier toute l'importance accordée à la réalisation des mesures et des examens visuels in situ, ainsi qu'à la formation continue des personnels en charge des tournées. L'époque des barragistes installés à demeure sur les barrages est bien révolue, mais le maintien d'une relation de proximité entre le barrage et les exploitants demeure un élément clé de la surveillance.

4.2 Fonctions de visualisation et traitements statistiques couramment utilisés

Le premier niveau d'analyse des données d'auscultation s'appuie sur des **représentations graphiques**. Les plus communes sont :

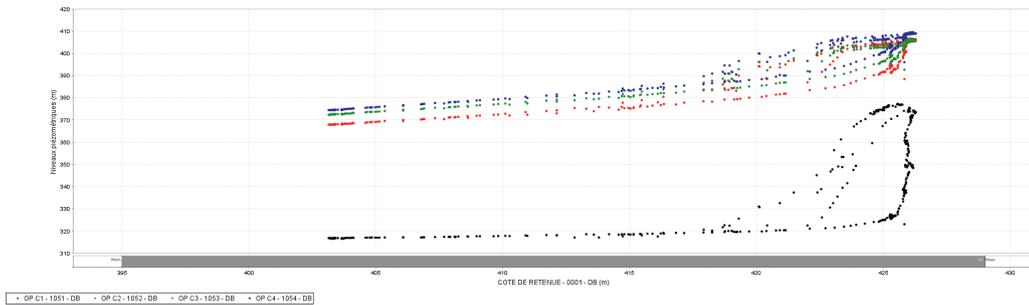
- la présentation de l'évolution des phénomènes physiques surveillés au cours du temps. Dans la figure 11.8, les pics de pression du piézomètre situé le plus à l'aval (OP C4, courbe noire) mettent en évidence le phénomène d'ouverture du contact béton-rocher d'un barrage-voûte à cote haute en période hivernale ;

Figure 11.8 – Mesures de la cote de retenue et de 4 piézomètres implantés sous le plot central d'un barrage-voûte (de OP C1 en vert à l'amont à OP C4 en noir à l'aval) / © EDF



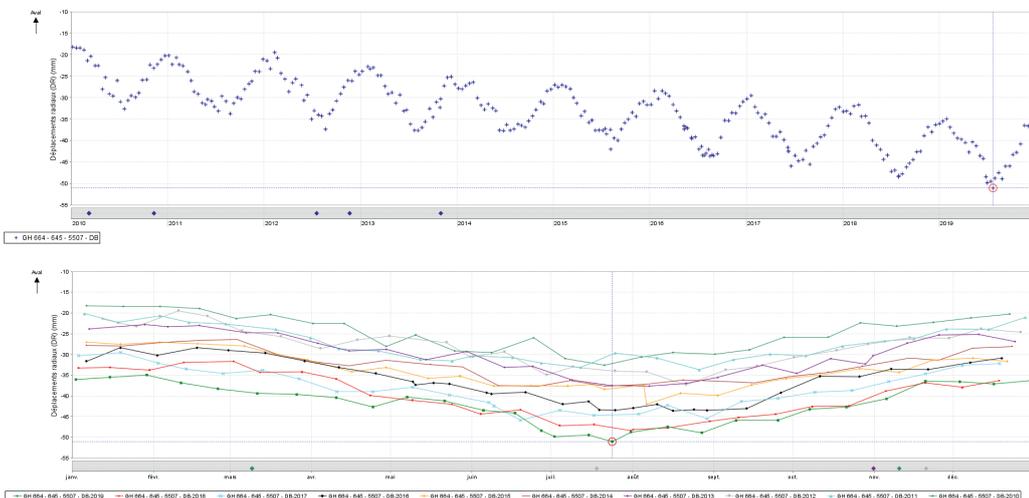
- la présentation de la variation des phénomènes physiques en fonction des sollicitations principales (hydrostatique, thermique et temporelle). Le premier exemple (figure 11.9) montre l'évolution des pressions des 3 piézomètres les plus amont (OP C1 à OP C3) de la figure 11.8 en fonction de la cote de retenue. La variabilité des sous-pressions au-dessus de la cote de retenue 418 traduit l'impact des conditions thermiques saisonnières au moment de la mesure.

Figure 11.9 – Corrélation des 4 piézomètres de la figure 11.8 avec la cote de retenue en 2018 / © EDF



Dans le deuxième exemple (figure 11.10), la représentation graphique du déplacement radial d'un barrage permet de visualiser clairement l'influence thermique de la saison et l'évolution temporelle liée au vieillissement du béton.

Figure 11.10 – Représentation du déplacement radial du plot central d'un barrage-voûte affecté d'une pathologie d'alcali-réaction : en fonction du temps (graphique du haut) et sur des périodes annuelles (graphique du bas) / © EDF



Ces relations entre les phénomènes physiques mesurés et les sollicitations principales trouvent une expression mathématique simple au travers du modèle HST (pour Hydrostatique, Saisonnier et Temporel), développé dans les années 1960 par EDF [Willm, 1967] et largement utilisé par les bureaux d'ingénierie agréés. À partir de la date de la mesure et de la cote de la retenue associée, ce modèle détermine les paramètres des fonctions de réponse du phénomène aux variations de saison et de cote, et sa loi d'évolution au cours du temps. Il permet ensuite de calculer et construire des séries temporelles de valeurs du phénomène corrigées des influences réversibles de la cote et de la saison. Ce type de modélisation est particulièrement utile pour la détection précoce d'anomalies de comportement et l'identification d'évolutions irréversibles à long terme. Ce modèle a été intégré à de nombreux logiciels d'auscultation.

Figure 11.11 – Évolution du déplacement radial de la figure 11.10 en fonction du temps – Valeurs brutes (en bleu) et valeurs corrigées des variations de la cote et de la saison (en rouge) / © EDF



La formulation initiale du modèle HST a, par la suite, été reprise sous différentes formes permettant de prendre en compte d'autres variables d'influence (la température de l'air ou du béton par exemple), ou en formulant différemment les fonctions de réponse du phénomène aux sollicitations. Parmi ces nouvelles modélisations, les plus intéressantes sont celles intégrant les effets différés des variations de la charge hydrostatique sur les écoulements dans les barrages en remblais [Simon, 2016] ou les effets thermiques différés sur les déplacements et déformations des barrages en béton [Penot, 2005].

4.3 Nouvelles méthodes d'analyse

Les différents **modèles statistiques** évoqués précédemment ont un nombre réduit de paramètres à déterminer (de l'ordre d'une dizaine) et ont une formulation physique qui les rend facilement interprétables. En revanche, leur principale limite est l'hypothèse d'indépendance et d'additivité des différentes sollicitations, ce qui n'est en réalité pas toujours le cas. Un biais classique est le couplage des effets hydrostatique et thermique : le déplacement vers l'amont d'un barrage-voûte, en période chaude, est plus marqué à cote basse qu'il ne l'est à cote haute.

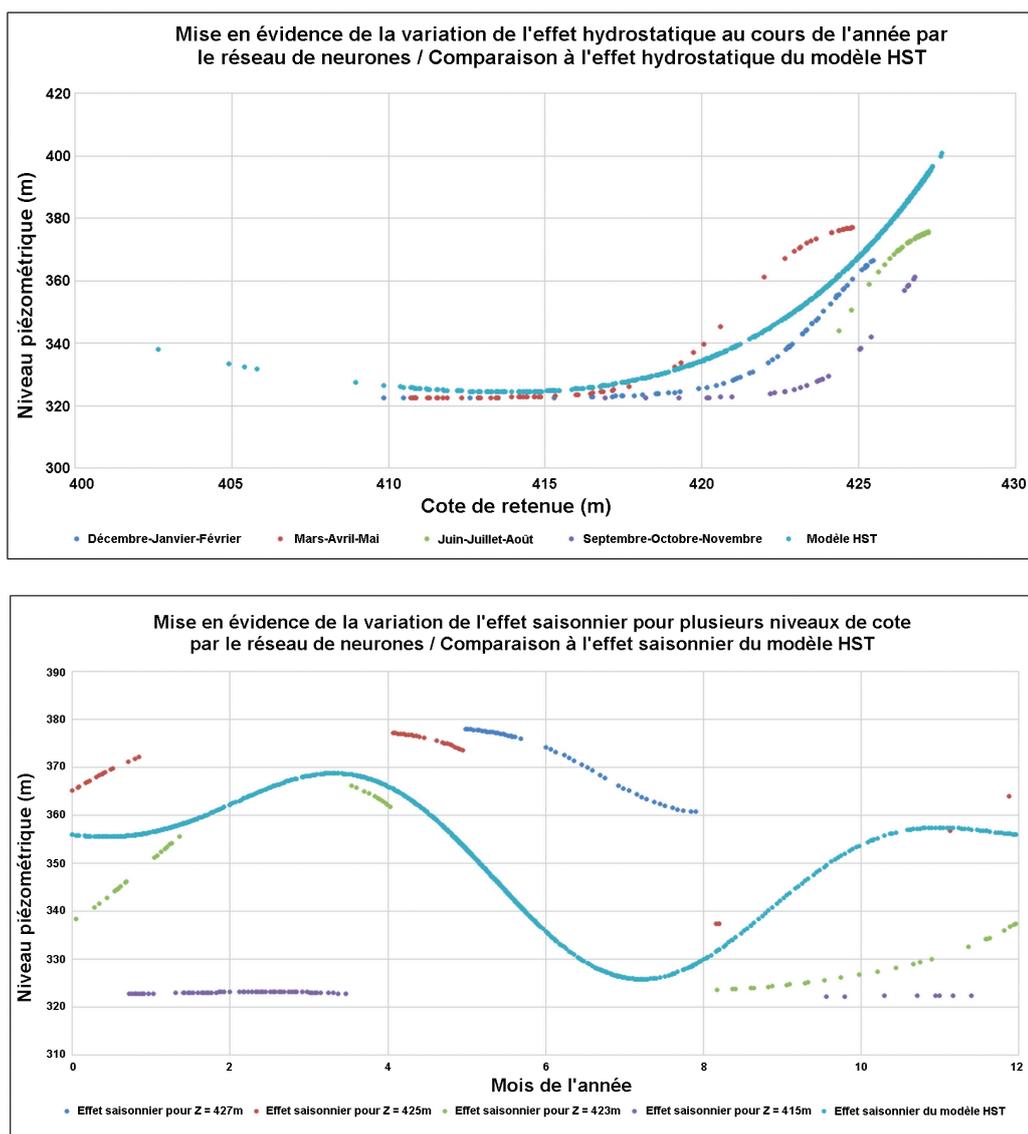
Ceci explique l'intérêt et l'usage récent, en France, des méthodes et algorithmes d'intelligence artificielle développés dans d'autres secteurs d'activités. Les méthodes les plus courantes, et les mieux maîtrisées, sont les réseaux de neurones [Simon, 2018], mais d'autres développements et recherches sont menés avec les techniques dites de SVM (Support Vector Machines), BRT (Boosted Regression Trees), RF (Random Forest), GA (Genetic Algorithms)... Il s'agit de méthodes purement statistiques, offrant une grande souplesse de calage, et s'affranchissant des limites des modèles classiques. Leur mise en œuvre et leur interprétation sont cependant complexes, avec un nombre de paramètres à calculer très important (couramment de l'ordre de 50), et ne permettant pas d'extrapoler les variations du phénomène physique étudié en dehors du champ des mesures disponibles.

L'exemple ci-dessous illustre l'intérêt d'une modélisation par les réseaux de neurones pour interpréter la variation de la pression d'eau mesurée au contact béton-rocher d'un barrage-voûte. Le réseau de neurones a été utilisé pour mettre en évidence les variations du piézomètre OP C4 de la figure 11.8, dont on sait qu'elles dépendent du couplage des sollicitations hydrostatiques et saisonnières. Le graphique du haut montre la variation des pressions pour une même cote à différentes périodes de l'année : les pressions sont plus élevées en période froide (courbe rouge) lorsque le contact est ouvert. Le graphique du bas montre la variation des pressions en fonction

de la saison pour différents niveaux de cote : à cote basse (courbe violette), le contact est fermé et le piézomètre ne réagit pas aux variations de cote.

Les influences hydrostatiques et saisonnières calculées par le modèle HST sont représentées par les courbes bleues quasi continues. On perçoit ainsi les limites de ce type de modèle qui détermine une « influence moyenne », non représentative du comportement réel du barrage. A contrario, le réseau de neurones peut déterminer un effet hydrostatique variable selon la saison ou un effet saisonnier variable selon le niveau de la cote de retenue.

Figure 11.12 – Analyse par réseau de neurones des variations du piézomètre OP C4 de la figure 11.8 / © EDF



4.4 Traitement des informations issues de la surveillance et des examens exhaustifs

Les examens exhaustifs des barrages des classes A et B, effectués à l’occasion des études de dangers, se font dans des conditions d’accès et d’environnement souvent difficiles et potentiellement dangereuses, avec des coûts parfois élevés en regard du périmètre à inspecter et du niveau de qualité attendu. Pour répondre aux besoins et enjeux des maîtres d’ouvrages, de nouveaux moyens techniques et offres de services sont apparus ces dix dernières années.

Ainsi, le recours aux drones pour les inspections aériennes et la cartographie 3D des ouvrages

est désormais courant. La rapidité d'inspection et l'automatisation du traitement des images constituent des atouts majeurs. Et les nombreuses possibilités de restitutions et de visualisations graphiques offertes par les logiciels de traitement d'images facilitent la lecture, l'analyse et la présentation des résultats des examens.

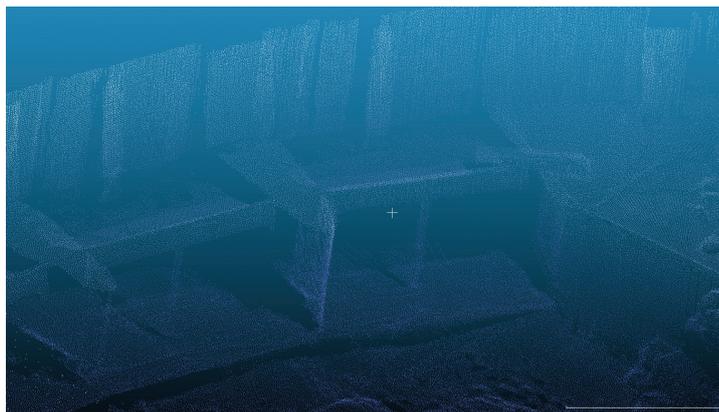
Figures 11.13 et 11.14 – Exploitation de prises de vues par drone : à gauche modèle 3D et à droite tracé des résultats d'inspection sur orthophoto 2D / © EDF



Pour des examens sans vidange de la retenue, l'emploi de robots sous-marins équipés de différents types de capteurs pour les inspections des structures et des organes hydromécaniques se systématisent. Ces inspections sont généralement complétées par un relevé bathymétrique de la retenue afin de suivre l'évolution de son état d'envasement.

Les relevés 3D aériens et sous-marins peuvent être facilement fusionnés pour fournir une modélisation et une cartographie complète du barrage et de sa retenue.

Figures 11.15 et 11.16 – Exemple de fusion de levé 3D aérien (en haut) et bathymétrique (en bas), pour surveiller l'érosion à l'aval d'un barrage / © EDF



5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES SUR LA SURVEILLANCE DES BARRAGES

Surveiller et ausculter les barrages est aujourd'hui une évidence en France. Ce résultat est l'aboutissement d'une histoire technique riche de développements et d'innovations, mais aussi d'accidents. La réglementation sur la sûreté des barrages a toujours su intégrer ces changements et événements. Nos barrages sont aujourd'hui plus et mieux suivis qu'ils ne l'étaient par le passé, avec une surveillance adaptée aux différents enjeux, et des bases de données et de connaissances qui sont de plus en plus complètes. Les bureaux d'études agréés ont vu leur action renforcée sur le diagnostic et la maîtrise de la sûreté des ouvrages en service. Pour autant, l'exploitant conserve un rôle primordial pour la détection précoce des anomalies de comportement et la mise en œuvre éventuelle des actions de mise en sécurité du barrage.

Comme on l'a vu tout au long de ce chapitre, de nombreuses évolutions et développements ont accompagné nos pratiques de surveillance au fil du temps. Elles ont amené des compléments utiles aux moyens classiques d'auscultation, pour la surveillance et le diagnostic. Leur usage doit être encouragé lorsque cela est utile : pour cela, le CFBR joue un rôle de premier plan en favorisant le partage des nouveaux développements et des résultats d'expérimentation.

Pour finir, et encourager la dynamique de progrès toujours présente, quelques lignes sur les perspectives d'évolutions que l'on peut entrevoir ou imaginer pour le futur :

- la généralisation de l'utilisation des outils de réalité augmentée (ou virtuelle) pour la surveillance sur site ;
- la surveillance en temps réel avec des capteurs connectés à distance ;
- le recours à des algorithmes de traitement et d'analyse des données toujours plus performants, facilitant la compréhension et l'interprétation des données de surveillance ;
- l'assimilation dans des modèles globaux (notion de « jumeau numérique ») de toutes les informations utiles à une évaluation continue et prédictive de critères de sûreté : mesures d'auscultation, données de surveillance, données d'exploitation et environnementales...

6. RÉFÉRENCES

- Bordes J.-L. (2011) – « Barrages et essais en vraie grandeur : auscultation et surveillance ». Documents pour l'histoire des techniques, 20 | 2011, 97–106.
- Boudon R., Berni S., Koudogbo F., Urdiroz A. (2012) – Lasergrammétrie et interférométrie radar : des techniques topographiques innovantes pour l'auscultation d'ouvrages hydrauliques. Colloque du CFBR sur l'auscultation des barrages et des digues.
- Courivaud J.-R., Fry J.-J., Pinettes P., Cassard A., Miceli J., Artières O. (2012) – Systèmes d'auscultation de digues basés sur des mesures de température et des déformations par fibre optique. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives ».
- Scholtes P., Leroy R. (2012) – Concept de l'auscultation topométrique de la théorie à la pratique. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives ».
- Beck Y.L., Khan A.A., Cunat P., Guidoux C., Artières O., Mars J., Fry J.-J. (2010) – Thermal Monitoring of Embankment Dams by Fiber Optics. 8th ICOLD European club symposium.
- Boudon R., Rebut P., Mauris F., Faure P.-H., Tournadre V., Pierrot-Deseilligny M. (2015) – Les nouvelles techniques topographiques 3D surfaciques pour optimiser le suivi des ouvrages hydrauliques. Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages, Stavanger 2015.
- Brothier C., Martinot F., Garandet A. (2018) – Techniques nouvelles d'auscultation et de surveillance des digues de grands linéaires. Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages, Vienne, 2018.
- Garandet A., Duchesne L., Dornstädter J., Heinemann B., Frappin P. (2012) – Approches comparées de la thermométrie et des mesures de résistivité pour caractériser les écoulements d'une digue. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives ».
- Tamagnan D., Beth M., (2012) – État de l'art des techniques récentes en auscultation topographique. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives ».
- Hochard G., Ranvier F. (2012) – Auscultation par satellite pour la surveillance des ouvrages : application de la méthode d'interférométrie radar satellitaire pour la modélisation, la surveillance et la détection d'anomalies. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives ».
- Willm G., Beaujoint N. (1967) – Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricité de France, problèmes anciens et solutions nouvelles. Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages, Istanbul, 1967.
- Simon A., Guilloteau T. (2016) – Analysis method for the monitoring of pore water pressure in embankment dams. réunion annuelle de la Commission Internationale des Grands Barrages, Johannesburg, 2016.
- Penot I., Daumas B. et Fabre J.-P. (2005) – Monitoring behaviour. Water Power dam Constr., vol.57, p. 24:27, 2005.
- Simon A., De Granrut M., Guilloteau T. et Follut G. (2018) – Analysis and interpretation of dam monitoring: the use of artificial neural networks in an industrial context. Third International Dam World Conference, Brazil Foz do Iguaçu, 2018.
- Recueil du colloque CFBR 2012 : thème « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives ».
- Recueil du colloque CFBR 2018 : thème « Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages », sous-thème « Auscultation ». https://barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/colloque2018_maintenance.pdf

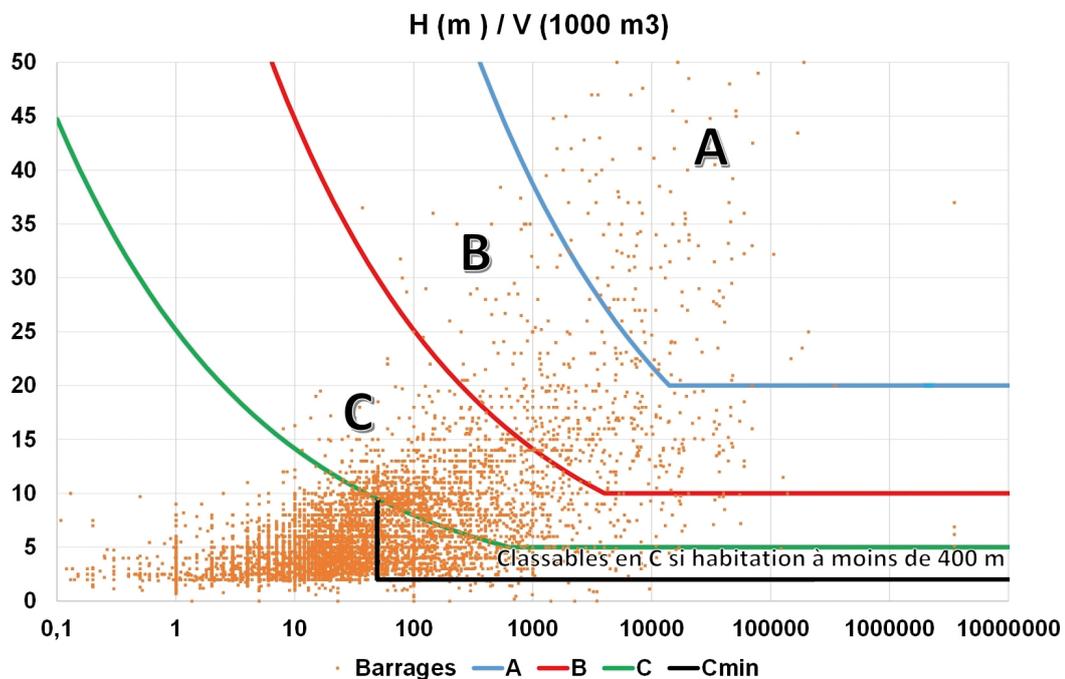
CHAPITRE
12

SÛRETÉ ET ANALYSE DE RISQUES

1. INTRODUCTION

La France possède 722 grands barrages selon les critères du registre mondial de la CIGB. Dans la réglementation française, les barrages français sont répartis en trois classes (A, B et C), en fonction du coefficient $H^2V^{0,5}$ prenant en compte la hauteur du barrage au-dessus de ses fondations (H) et son volume de retenue (V exprimé en million de m^3). Les classes A et B concernent les plus grands barrages (classe A : $H \geq 20$ m et $H^2V^{0,5} \geq 1\,500$; classe B : $H \geq 10$ m et $H^2V^{0,5} \geq 200$) et comportent 631 ouvrages. La classe C concerne 1 466 barrages de plus petite importance ($H \geq 5$ m et $H^2V^{0,5} \geq 20$ ou $H > 2$ m et $V > 0,05$ s'il existe une habitation à l'aval). Le graphique 12.1 ci-dessous rassemble ces informations.

Figure 12.1 – Classes de barrages en France



Le propriétaire (ou concessionnaire) entretient et surveille son ouvrage. Selon la loi, il est responsable de son ouvrage. L'État, par l'intermédiaire de ses services régionaux chargés du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques, doit s'assurer que les barrages dont il autorise l'existence respectent la réglementation afin de ne pas menacer la sécurité publique. L'autorité contrôle donc l'action du propriétaire ou du concessionnaire, en vérifiant qu'il remplit bien ses obligations et s'assure que le niveau de sécurité de l'ouvrage est adéquat.

Le propriétaire doit définir sa politique de sûreté et son système de gestion de la sécurité. Le code de l'environnement fixe les exigences réglementaires en termes de sécurité des barrages, et leur sûreté repose sur quatre principes : une conception sûre, une surveillance et une exploitation sûres, la prévention des risques de rupture par des plans d'alerte (appelés plans particuliers d'intervention — PPI) pour certains barrages, et des analyses de risques et de sûreté régulières à travers des études de dangers.

1.1 Une conception sûre

Jusqu'à une période récente, le dimensionnement des barrages et la vérification des barrages existants étaient basés uniquement sur des règles de l'art professionnelles. À cet égard, les recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) constituent une source essentielle.

En 2018, une réglementation spécifique fixant des exigences essentielles sur la sécurité des barrages (arrêté du 6 août 2018) a introduit les sollicitations réglementaires à prendre en compte dans la conception. Cette réglementation introduit trois exigences essentielles de sécurité pour les barrages, relatives aux conditions normales d'exploitation, en cas de survenue d'un aléa naturel, ou en cas d'un incident sur l'ouvrage (défaillance d'une vanne par exemple). Elles s'appuient sur deux annexes techniques spécifiant notamment les crues et séismes exigés par la réglementation. La particularité de la réglementation française en matière d'exigences essentielles de sécurité est de distinguer les barrages existants des barrages neufs, avec des exigences moindres pour les premiers que pour les seconds. La réglementation fixe également des délais pour que le parc de barrages français soit en conformité avec ces exigences (avant 2035 pour tous les barrages).

Les autres caractéristiques nécessaires pour la conception des barrages, notamment les propriétés de résistance, les coefficients partiels et les conditions d'états limites, relèvent des recommandations professionnelles, notamment celles du CFBR.

Enfin, l'État agréé des bureaux d'études sur la base d'un dossier démontrant leurs compétences. En fonction des capacités du bureau d'études candidat, un agrément, décliné selon l'importance des barrages, est donné pour les différentes prestations d'ingénierie (auscultation, études, et surveillance des travaux).

1.2 Une surveillance et une exploitation sûres

La réglementation française exige que ces activités soient décrites dans plusieurs documents, leurs périodicités dépendant du type d'activité et de la classe de l'ouvrage :

- le registre du barrage et le document d'organisation : un registre doit être présent sur chaque barrage et l'exploitant doit y renseigner toutes les actions réalisées et tous les événements survenus sur l'ouvrage. Le document d'organisation comprend les procédures de l'exploitant pour la surveillance et l'auscultation du barrage, ainsi que celles relatives à l'action de l'exploitant lors des événements exceptionnels ou accidentels (consignes de crues par exemple) ;
- le rapport périodique d'exploitation et de surveillance et les visites techniques approfondies : le responsable de l'ouvrage décrit l'exploitation de son ouvrage sur la période (événements particuliers, crues, gestions des incidents...) et rend compte de l'état de son ouvrage et de ses équipements (visibles) au travers des inspections visuelles courantes et des visites techniques approfondies couvrant la structure du barrage, les organes hydromécaniques et les équipements de contrôle-commande ;
- le rapport d'auscultation : à partir des dispositifs d'auscultation équipant l'ouvrage, le propriétaire doit réaliser un rapport analysant le comportement à la fois mécanique (déplacements, déformations...) et hydraulique (fuite et piézométrie) de l'ouvrage et sa fondation.

En plus de ces documents, les propriétaires doivent déclarer à l'autorité de contrôle les incidents et accidents qui ont pu se dérouler sur leurs ouvrages et équipements.

1.3 La prévention des risques de rupture d'ouvrage par les plans d'alerte

En France, et pour tous les grands barrages de classes A dont la hauteur est supérieure à 20 m et avec un volume de plus de 15 millions de m³, un plan d'alerte (plan particulier d'intervention ou PPI) est mis en place. Une analyse de risques et une onde de submersion du scénario de rupture doivent être réalisées par le propriétaire de l'ouvrage. Dans la zone de proximité immédiate, il doit également installer et gérer des dispositifs d'alerte (sirènes). Les services de l'État sont chargés de l'élaboration du plan d'alerte et de la diffusion des informations relatives à la population (via les mairies).

1.4 L'analyse de risques et l'analyse de la sûreté des barrages au moyen des études de dangers

Tous les aspects ayant trait à la sûreté des barrages détaillés ci-dessus sont repris au sein d'une étude de dangers, qui constitue une véritable analyse de risques du barrage. La réglementation française donne un rôle central à l'étude de dangers dont le but est l'examen de la sûreté et l'analyse de risques du barrage, à périodicité régulière (10 ans et 15 ans respectivement pour les barrages de classe A et B). Les grands principes de cette étude de dangers sont détaillés ci-après.

2. LES ÉTUDES DE DANGERS POUR LA MAÎTRISE DES RISQUES DES BARRAGES

La réglementation française a introduit, en 2007, l'obligation de réaliser des analyses de risques pour les grands barrages (classes A et B) à travers les études de dangers. Au cœur du dispositif de prévention des risques, l'étude de dangers constitue une base de travail essentielle dans l'élaboration des stratégies de prévention. Réalisée sous la responsabilité du propriétaire ou concessionnaire de l'ouvrage, elle s'attache à identifier les risques, quantifier leur occurrence et leurs conséquences et démontrer comment sont gérés les risques d'accidents majeurs associés au barrage et aux ouvrages annexes. Les études de dangers sont réalisées par des chargés d'études — bureaux d'études, services techniques du responsable de l'ouvrage — agréés par l'État pour leurs compétences démontrées. Elles sont soumises à l'examen de l'autorité de contrôle de l'État.

Les études de dangers exigées par la réglementation française se réfèrent explicitement à l'analyse de risques et aux méthodes de la sûreté de fonctionnement associées. Les méthodes d'analyse, incluant l'évaluation de la sûreté et des enjeux, sont laissées au choix du responsable de l'ouvrage et de son chargé d'études, en fonction des caractéristiques de l'ouvrage à étudier. Les étapes des études de dangers sont détaillées ci-après.

2.1 Les données d'entrée des études de dangers des barrages

Une analyse de risques nécessite d'avoir la meilleure connaissance possible du barrage, de son environnement, de son comportement, ainsi que de l'état de fonctionnement et du niveau de performance de ses organes et systèmes de sécurité. Ainsi, la réalisation des études de dangers en France intègre en préliminaire la recherche des données d'entrée, dont les principales sont synthétisées dans les tableaux suivants.

Tableau 12.1 – Les données d'entrée des études de dangers

Nature des données collectées au début de l'analyse de risques	Descriptif
Données de référence descriptives des ouvrages et matériels	Caractéristiques de la retenue et de la géologie du site. Notes de calculs génie civil et vanterrie / plans. Schémas et/ou notice de fonctionnement des matériels et systèmes. PV de réception, d'essais ; rapport de mise en eau. Dossiers des études et travaux associés aux principales modifications.
Données d'exploitation, de surveillance et de maintenance	Rapports d'exploitation intégrant les événements exceptionnels (crues, séismes, vidanges...) Fiches d'incidents. Résultats et rapport des inspections périodiques. Résultats et rapports d'auscultation. Résultats des essais périodiques.
Documents d'organisation et procédures d'exploitation	Note d'organisation de la gestion de la sécurité. Procédures et instruction d'exploitation (en particulier pour la gestion en crues et la surveillance des ouvrages).

La collecte des données d'entrée est complétée par une analyse critique des études caractérisant les aléas naturels susceptibles d'avoir un impact sur la sûreté du barrage. Si besoin, des études sont reprises ou engagées en cas d'absence.

Tableau 12.2 – Liste des aléas naturels étudiés

Identification et caractérisation des aléas naturels (éventuellement actualisés pour les besoins de l'analyse de risques)	Aléas hydrologique et sismique. Risques de mouvements de terrain et d'avalanche. Risques liés au vent, à la foudre, aux feux de forêt, au gel, à la neige, à l'envasement, à l'érosion et aux modifications du lit de la rivière.
--	---

Pour compléter ces données collectées, un examen exhaustif des ouvrages et de leurs équipements est effectué. Il vise à fournir l'image la plus complète et précise possible de leur état et de leur fonctionnement. Celui-ci est réalisé par des spécialistes (génie civil, mécanique, contrôle-commande), avec des moyens adaptés au contexte d'exploitation (avec vidange, retenue pleine ou avec abaissement partiel du plan d'eau qui constitue le cas le plus fréquent). Les photos ci-après illustrent la diversité des examens menés au cours de cette phase de diagnostic.

Figure 12.2 – Vérification de la position des poires d'alarme dans un puits / © EDF



Figure 12.3 – Inspection par caméra de l'état d'un drain / © EDF



Figure 12.4 – Examen de l'état de la lentille d'une vanne papillon dans un conduit de vidange / © EDF



Figure 12.5 – Examen de l'état de la chaîne Galle de manœuvre d'une vanne d'évacuateur de crues / © EDF



2.2 L'analyse fonctionnelle

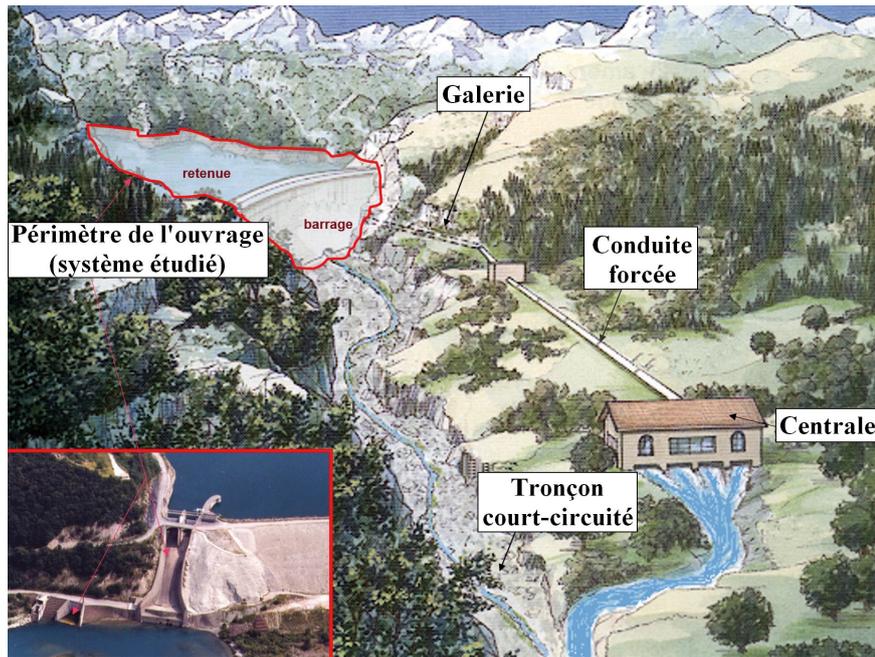
Les études de dangers en France comportent une analyse fonctionnelle. Celle-ci permet de recenser et caractériser les fonctions du barrage, afin de fournir les informations nécessaires à la recherche des modes de défaillance. Elle décrit les usages assurés par le barrage étudié : stockage d'eau, production hydroélectrique, écrêtement des crues, soutien d'étiage. Elle définit les fonctions des différents composants ainsi que les interactions entre le barrage et son environnement.

L'analyse fonctionnelle définit le périmètre d'étude (figure 12.6) qui comprend le barrage et tous les ouvrages et matériels associés contribuant directement aux fonctions de sécurité.

Elle identifie les fonctions accomplies par les composants du barrage : les fonctions principales qui représentent la fonction majeure du composant pour laquelle il a été conçu, et les fonctions technologiques que le composant doit remplir pour maintenir son intégrité et garantir sa performance.

L'analyse fonctionnelle décrit les interactions entre l'environnement en amont et en aval et le barrage lui-même. Cela permet d'identifier les facteurs d'agression externe de l'ouvrage ou les aléas, et les enjeux potentiels en termes de sécurité.

Figure 12.6 – Illustration du périmètre d'étude



2.3 L'analyse des modes de défaillance

Sur la base de l'analyse fonctionnelle, les études de dangers mettent en œuvre une analyse des modes de défaillance des barrages, qui visent à déterminer les événements initiateurs, intermédiaires et redoutés des scénarios de défaillance. Les deux principales méthodes utilisées en France sont l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE).

La méthode d'APR, utilisée dans 77 % des études de dangers, repose sur une analyse simple des risques basée sur une appréciation experte : l'identification des dangers est effectuée grâce à l'expérience et aux connaissances du panel d'experts constitué pour l'étude. La méthode est pertinente pour les barrages, dans la mesure où le jugement de l'expert reste essentiel pour la détermination d'un certain nombre de dégradations et de défaillances. Il faut noter qu'en l'absence de normalisation de la méthode, on constate une grande variabilité dans les APR produites. Ainsi, certaines APR apparaissent très complètes dans l'analyse des modes de défaillance et s'apparentent finalement plus à des AMDE.

Tableau 12.3 – Exemple d'application de l'APR pour un barrage-voûte

Élément de l'ouvrage	Conditions d'exploitation	Mode de défaillance	Fonction affectée	Conséquences	Cinétique post-accidentelle	Gravité	Type d'événement	Commentaires
Barrage	Toutes conditions	Rupture	Retenir l'eau	Onde de submersion à l'aval. Baisse soudaine du niveau de la retenue	Rapide	Grave	Événement Redouté	Séisme non retenu : barrage en zone de sismicité faible et REX globalement très favorable sur le comportement des barrages-voûtes au séisme.

La méthode AMDE, employée dans 23 % des études, permet d’aboutir à une analyse détaillée des modes de défaillance du barrage. Dans un cadre normalisé, son avantage est la précision et la qualité de l’analyse. La méthode AMDE constitue donc une analyse exhaustive des modes de défaillance des composants du barrage, après une analyse fonctionnelle de qualité. Elle est donc bien adaptée à une analyse de risques complète, voire quantitative ultérieure.

Tableau 12.4 – Exemple d’application de l’AMDE pour la recharge amont d’un barrage en enrochements

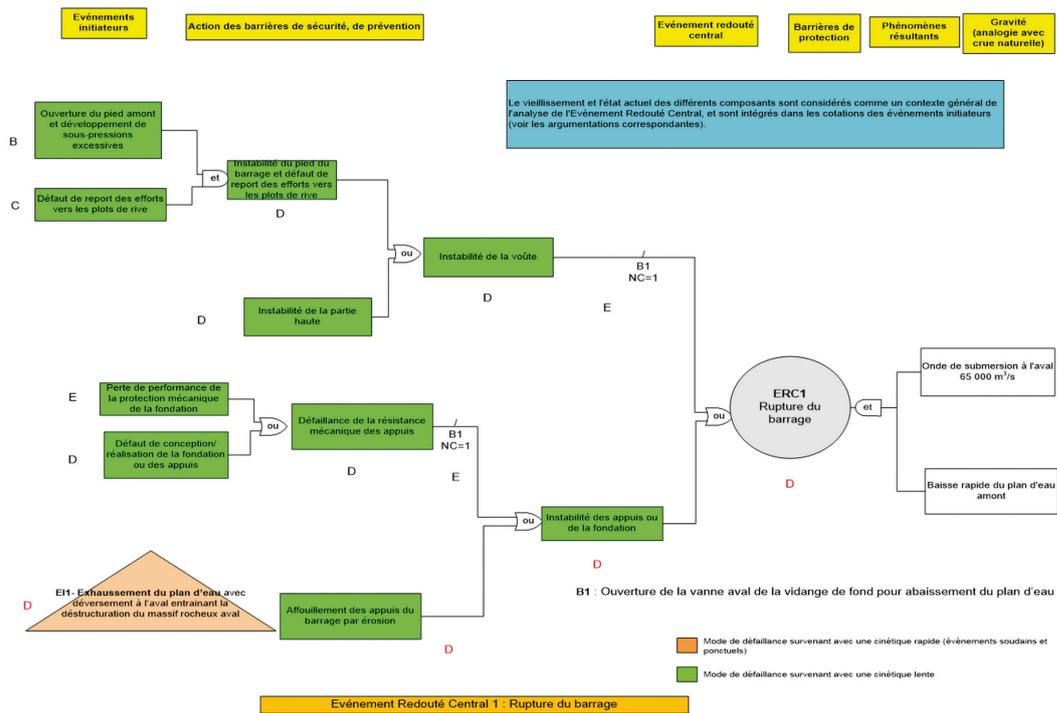
N°	Analyse fonctionnelle (rang 1)			AMDE (rang 1)		
	Composant rang 1	Fonctions principales	Fonctions techniques	Modes de défaillance	Causes	Effets
1	Recharge amont	Assurer la stabilité amont et du noyau. Résister aux sollicitations mécaniques. Ne pas glisser.	Résister aux sollicitations hydro-dynamiques (vagues).	Glissement de la recharge amont – Rupture d’ensemble.	Sollicitations sismiques excessives, déplacements de la fondation et / ou de l’interface excessifs	Glissement du talus amont et du noyau.
				Érosion du talus amont.	Batillage excessif, dégradation excessive des enrochements, perte de matériaux.	Érosion dans la zone de marnage.

2.4 Représentation des scénarios par des méthodes arborescentes

Sur la base de la connaissance des modes de défaillance, l’étude de dangers produit une représentation des scénarios de défaillance à partir de méthodes arborescentes. Ces méthodes reposent sur une visualisation graphique des séquences accidentelles susceptibles de se produire sur l’ouvrage. Dans les études de dangers, les méthodes mises en œuvre sont :

- la méthode des arbres d’événements : elle décrit les scénarios de défaillance à partir d’un événement initiateur, conduisant à la défaillance d’un composant ou d’une partie du système pour déterminer les événements qui en découlent. On détermine l’enchaînement des modes de défaillances jusqu’à l’occurrence d’un accident potentiel, par une démarche inductive ;
- la méthode des arbres de défaillances : elle décrit les combinaisons possibles d’événements qui permettent la réalisation d’un événement redouté préalablement défini. Le point de départ de la construction d’un arbre de défaillances est l’événement redouté lui-même et le principe est de définir des niveaux successifs d’événements tels que chacun est une conséquence d’un ou plusieurs événements du niveau précédent, à travers une démarche déductive ;
- la méthode du nœud papillon : elle combine un arbre de défaillances et un arbre d’événements autour d’un même événement redouté central (ERC). Les ERC sont des situations dangereuses conduisant principalement à la perte d’intégrité partielle ou totale de l’ouvrage ou d’un de ses éléments (vanne de fond ou de surface, bouchon de galerie...). Le nœud papillon permet d’avoir une vision globale des différents scénarios d’accidents et de leur conséquence sur leur environnement. La méthode du Nœud Papillon est utilisée de façon prépondérante dans les études de dangers (90 %).

Figure 12.7 – Exemple de nœud papillon relatif à la rupture d'un barrage-voûte par dépassement de sa cote de danger



2.5 Évaluation de la sûreté

Le principe consiste à évaluer individuellement les probabilités de défaillance des événements élémentaires d'un scénario, puis de les agréger par des règles mathématiques adaptées à la méthode choisie, permettant d'obtenir finalement la probabilité globale du scénario.

Dans les études de dangers des barrages en France, la pratique la plus utilisée dans l'évaluation des probabilités pour les défaillances consiste en une approche semi-quantitative d'évaluation de la sûreté, dans laquelle les évaluations sont obtenues au moyen de grilles d'analyse faisant correspondre des dires d'experts à des intervalles de probabilité (tableau 12.5).

Une autre pratique moins fréquente consiste en une approche quantitative probabiliste d'évaluation de la sûreté, dans laquelle les évaluations se font au moyen de modèles probabilistes, d'analyses statistiques, ou à défaut par jugement expert.

Quelle que soit l'approche adoptée, l'évaluation de la sûreté est produite en s'appuyant sur un groupe de travail regroupant un panel d'experts et d'exploitants. Ce panel assure le contrôle et la validation de la modélisation des scénarios, l'évaluation des probabilités des défaillances sous forme d'un intervalle de probabilité ou d'une probabilité unique et la validation de l'évaluation de la probabilité du scénario dans son ensemble, notamment par l'intercomparaison avec les évaluations des différents scénarios et leur hiérarchisation entre eux.

Tableau 12.5 – Exemple de grille semi-quantitative pour l'évaluation des événements

Échelle de probabilité	E	D	C	B	A
Qualitative (si le nombre d'installations et le REX sont suffisants)	« Événement possible mais extrêmement peu probable » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations	« Événement très improbable » : s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité	« Événement improbable » : un événement similaire déjà dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	« Événement probable » : s'est produit et / ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation	« Événement courant » : s'est produit sur le site considéré et / ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctives
Semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'art. 4 de l'arrêté				
Quantitative (par unité et par an)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	

Les études de dangers identifient des barrières de sécurité dans les scénarios. Ces barrières sont des éléments techniques ou organisationnels assurant une fonction de sécurité. Les études de dangers considèrent essentiellement des barrières de prévention qui sont les mesures visant à diminuer la probabilité d'un événement indésirable. Une barrière doit être indépendante de l'événement redouté, fiable, avoir un temps de réponse en adéquation avec la cinétique de l'événement redouté et doit pouvoir être testée.

2.6 Évaluation de la gravité des scénarios

Dans les études de dangers en France, l'évaluation générale de la sûreté du barrage est traduite, pour chaque scénario de défaillance, en termes de conséquences sur les enjeux humains, matériels, organisationnels et environnementaux à l'amont et à l'aval du barrage et de sa retenue. Les conséquences de chaque accident potentiel sont caractérisées par les débits et volumes relâchés à partir de l'ouvrage, l'intensité, la cinétique et la durée de ces effets. Cela permet l'évaluation de la gravité des conséquences pour la zone touchée, notamment au droit des enjeux importants.

Les investigations mises en œuvre sont adaptées à l'importance des enjeux pour la sécurité des personnes et des biens et permettent :

- la modélisation hydraulique de l'onde de submersion pour les accidents identifiés ;
- la cartographie des phénomènes hydrauliques (cartographie des zones submergées à une échelle adaptée (1/25 000) et mentionnant les principales caractéristiques de l'onde de submersion ;
- l'évaluation de la population impactée selon un ordre de grandeur global suffisant pour les besoins de protection civile (populations à l'hectare des zones d'habitation, commerciales, industrielles...).

Au moyen d'une grille de gravité (tableau 12.6), il est ensuite attribué une classe de gravité à chaque scénario, selon l'impact le plus pénalisant sur le territoire concerné en aval du barrage.

Tableau 12.6 – Exemple de grille d'attribution de classes de gravité

Classes de gravité des conséquences (par ordre décroissant)		Nombre de personnes exposées en zone à cinétique rapide	Nombre de personnes exposées en zone à cinétique lente
5	Désastreux	plus de 1 000	plus de 10 000
4	Catastrophique	100 à 999	1 000 à 9 999
3	Important	10 à 99	100 à 999
2	Sérieux	1 à 9	10 à 99
1	Modéré	—	1 à 9

2.7 Analyse de la criticité des scénarios

Une fois déterminées la gravité des conséquences et l'occurrence des scénarios, les études de dangers croisent ces deux informations afin d'établir la criticité des scénarios. Pour cela, la pratique française s'est largement appuyée sur des matrices de criticité, consistant en un affichage et une hiérarchisation des différents scénarios dans un tableau synthétique. On retrouve ainsi les deux entrées « gravité » et « occurrence » des scénarios potentiels, comme l'illustre la figure 12.8 suivante :

Figure 12.8 – Exemple de grille de criticité avec affichage des limites d'acceptabilité

Probabilité	Désastreux	A					
	Probable	B	ERC4				
	Peu probable	C			ERC2, ERC3		
	Rare	D					
	Extrêmement rare	E					ERC1
			Mineure	Significative	Sévère	Critique	Catastrophique
Gravité							

	Risque inacceptable
	Risque à surveiller
	Risque acceptable

En définitive, ce travail doit permettre au responsable de l'ouvrage de proposer des mesures permettant de maîtriser ou réduire les risques aussi raisonnablement que possible (principe ALARP). Les objectifs atteints sont représentés dans une matrice de criticité résiduelle qui tient compte de l'apport des différentes mesures de réduction.

3. LES APPORTS DE L'ANALYSE DE RISQUES POUR LA SÛRETÉ DES BARRAGES EN FRANCE

3.1 Les apports des études de dangers

Les analyses de risques menées à travers les études de dangers en France, réalisées de manière systématique sur les quelque 631 grands barrages du parc français, ont eu, de l'avis de tous les acteurs, des impacts positifs majeurs pour la sûreté des barrages. Parmi ces apports, on peut citer :

- la sûreté des barrages a longtemps été examinée essentiellement sous l'aspect « génie civil ». Les études de dangers ont permis une nouvelle approche fonctionnelle multi-métiers, par opposition au cloisonnement qui pouvait exister entre chaque métier ;
- une amélioration notable de la connaissance sur les ouvrages. L'étude de dangers constitue une excellente synthèse documentaire et descriptive de la connaissance du barrage. Les données s'y trouvant ont fait l'objet d'une critique et d'une validation formelle ;
- une identification et un interclassement des scénarios de défaillance et des risques majeurs vis-à-vis de la sûreté. Des défaillances potentielles qui n'étaient pas nécessairement appréhendées ont parfois pu être mises en lumière en examinant des scénarios complexes associant des défaillances des organes hydromécaniques, du contrôle-commande avec des scénarios hydrologiques pouvant conduire à la rupture de l'ouvrage ou à des accidents de moindre importance (rupture ou ouverture intempestive d'une vanne). Les études de dangers ont permis de disposer d'une vision globale des risques sur un barrage, avec une proposition de hiérarchisation, constituant ainsi un outil précieux d'aide à la décision pour les mesures à mettre en œuvre par le responsable d'ouvrage.

3.2 Communication autour des études de dangers

Les études de dangers viennent compléter de manière significative la connaissance des risques majeurs et autres risques liés à l'exploitation des barrages. Avant la mise en place des études de dangers, les seuls éléments connus relatifs aux risques des barrages provenaient des plans d'alerte prévus pour les plus grands barrages. Elles sont donc, pour le public et pour les collectivités, une approche nouvelle.

Pour les acteurs œuvrant sur les barrages, les études de dangers donnent du sens à certaines actions de maintenance ou d'auscultation et peuvent amener à revoir certaines pratiques pour mieux prendre en compte les risques. Les études de dangers aident fréquemment à mieux comprendre, et donc accepter, les contraintes de disponibilité des organes de sûreté par exemple. Les études de dangers permettent alors un nouveau cadre de référence de l'exploitation des ouvrages pour tous les acteurs de l'exploitation et de la maintenance.

3.3 Vers une deuxième génération d'études de dangers

Les études de dangers sont désormais en France un document essentiel, par lequel le responsable de l'ouvrage démontre la sûreté de son barrage en toutes situations d'exploitation. Il s'agit d'un document utile à tous les acteurs, y compris à l'autorité de contrôle, qui permet d'identifier les points critiques de la sûreté du barrage.

Avec l'évolution de la réglementation en 2015, l'État a voulu réaffirmer et renforcer le rôle de l'étude de dangers. Un nouvel arrêté consolide le plan et le contenu des études de dangers au travers de l'approfondissement des données d'entrées (un examen exhaustif des ouvrages et équipements, un bilan de leurs états, de leurs comportements et de leurs conceptions sont désormais demandés explicitement en préalable de l'analyse de risques), des éléments plus précis sur la gestion de la sûreté du barrage (gestion de la sous-traitance, définition des responsabilités...) et une meilleure évaluation des risques, avec notamment une fourniture systématique des ondes de submersion au format 1/25 000, y compris pour les scénarios autres que celui de la rupture du barrage mais pouvant conduire à des conséquences graves.

4. RÉFÉRENCES

- CEA (2000) – A guide to dam risk management. Canadian Electricity Association. Dam safety interest group, December 2000.
- CFBR 2001 – Sécurité. Colloque CFBR Lyon, mai 2001.
- CFBR 2016 – Sûreté des barrages et enjeux. Colloque CFBR Chambéry, décembre 2016. <https://barrages-cfbr.eu/2016-Surete-des-barrages-et-enjeux.html>
- CFBR 2020 – Analyse de risques. https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2020_analyse_de_risques.pdf
- CIGB 2005 – Commission Internationale des Grands Barrages. CIGB / ICOLD (2005). Bulletin n° 130 – Évaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage.
- CIGB 1995 – Bulletin 99 : Dam Failures – Statistical Analysis. Paris : ICOLD.
- DIEUDONNE et al. 2016 – Dieudonné S., Peyras L., Beullac B., Gastaud C., Prévot G. Retour d'expérience de la première génération des études de dangers en France : analyse méthodologique et comparaisons à l'accidentologie. Colloque CFBR 2016 « Sûreté des barrages et enjeux ».
- INERIS 2011 – Bolvin C., Balouin T., Vallée A., Flauw Y. (2011). Une méthode d'estimation de la probabilité des accidents majeurs de barrages : la méthode du nœud papillon. Colloque technique CFBR / AFEID « Pratique des études de dangers des barrages », novembre 2011, Lyon, France. pp. 33–40.
- INRAE 2010 – Peyras L., Boissier D., Carvajal C., Bacconnet C., Becue J.-P., Royet P., 2010 – Analyse de risques et Fiabilité des barrages – Application aux barrages-poids en béton. Ed. Universitaires Européennes. Berlin. 201 p.
- Kaplan S., 1997 – The Words of Risk Analysis. Risk Analysis, Vol. 17, n° 4.
- MEDAD 2007, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2007) – Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques. Journal officiel de la République Française (13/12/2007).
- MEDDE 2015, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2015) – Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques. Journal officiel de la République Française (14/05/2015).
- Mortureux Y. (2002) – L'analyse préliminaire de risques. Techniques de l'Ingénieur 2002. Réf. : SE4010 v1.
- NF EN 31010 2010, Norme NF EN 31010 – « Gestion des risques – Techniques d'évaluation des risques », juillet 2010.
- Villemeur A. (1988) – Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels – fiabilité – facteurs humains – informatisation. Paris : Eyrolles.

INDEX DES AUTEURS

Coordination

François Delorme et Patrick Le Delliou.

Préface

Michel Lino (ISL – Président du CFBR).

Chapitre 1 – Usages multiples des barrages

Luc Deroo (coord. ISL), Patrick Le Delliou (CFBR), Laurent Bessadi (EDF), Pierre-Yves Subtil (Saint-Étienne Métropole), Marc Vincent (Seine Grands Lacs), Christophe Brachet (OIEau), Jérémy Savatier (ISL).

Chapitre 2 – Géologie, fondations et traitement des fondations

Gilbert Castagnier (coord. EDF-TEGG), Bernard Couturier (CTPBOH), Pierre Antoine (ex-CTPBOH), Christophe Vergniault (EDF-TEGG), Maurice Douaillat (Razel-Bec), Fabrice Guyoton (Géolithe).

Chapitre 3 – Hydrologie et évacuateurs de crues

Luc Bazerque (coord. Artelia), Pierre Jehanno (Artelia), Frédéric Laugier (EDF-CIH), Christian Odeyer (Artelia), Emmanuel Paquet (EDF-DTG), Paul Royet (CTPBOH), Julien Vermeulen (EDF-CIH).

Chapitre 4 – Retenues et environnement

Agnès Barillier (coord. EDF-CIH), Christophe Peteuil (CNR), Jean-Luc Pigeon (TRACTEBEL).

Chapitre 5 – Barrages-poids

Luc Deroo (coord. ISL), Paul Royet (CTPBOH), Michel Guérinet (Eiffage), Emmanuel Robbe (EDF-CIH), François Morel (EDF-CIH), Patrick Lignier (TRACTEBEL).

Chapitre 6 – Barrages-voûtes

Alain Carrère (coord. TRACTEBEL), Emmanuel Robbe (EDF-CIH), Guirec Prévot (PoNSOH).

Chapitre 7 – Barrages en remblai

Jean-Jacques Fry (coord. EDF CIH), Roger Albert (consultant), Laurent Ballut (CACG), Stéphane Bonelli (INRAE), Annette Esnault-Filet (Soletanche Bachy), Jean-Pierre Giroud (consultant), Daniel Puiatti (consultant), Bernard Tardieu (consultant), Claude Tisserand † (OEHC).

Chapitre 8 – Barrages mobiles et barrages en rivière

Pierre Cochet (coord. Artelia), Anne Clutier (EDF-CIH), David Graveleine (EDF-CIH), Thomas Pinchard (EDF-CIH), Laurent Thareau (CNR), Julien Vanwareghem (BRLi).

Chapitre 9 – Digue de protection contre les inondations

Rémy Tourment (coord. INRAE), Thibaut Mallet (SYMADREM), Akim Salmi (ISL), Yann Deniaud (CEREMA), Sébastien Patouillard (DREAL Centre-Val de Loire), Yann Queffélec (ONF).

Chapitre 10 – Électromécanique et contrôle-commande

Anne Audibert-Archenault (coord. CNR), Pascal Boronat (EDF), Gilles Ouriet (CNR), Rénate Lamberet (CNR), Gilles Perrin (CNR), Henri-Pierre Châtelain (CNR), Jean-David Valles (CNR), Sylvain Bonnard (CNR), Romain Planche (CNR), Jean-Pierre Chelle (CNR), Jérôme Trionfini (CNR), Alain Mollard (CNR).

Chapitre 11 – Auscultation et surveillance

Thierry Guilloteau (coord. EDF-DTG), Christophe Picault (CNR), Eric Vuillermet (BRLi).

Chapitre 12 – Sûreté et analyse de risques

Laurent Peyras (coord. INRAE), Michel Poupart (expert indépendant), Thomas Adeline (consultant ISL), Catherine Casteigts (SCP), Benjamin Delaruelle (Artelia), Thierry Guilloteau (EDF-DTG), Frédéric Laugier (EDF-CIH), Jean-Charles Palacios (SAFEGE/SUEZ Consulting), Gladys Pavaday (CNR), Guirec Prévot (PoNSOH), Agnès Vallée (Ineris), Eric Vuillermet (BRLi).

RELECTEURS

Agnès Bader (EDF), Amélie Maurin-Dumouchel (CFBR), Charlotte Crawcour, (Adelink), Jean-Michel Tinland (CFBR), Patrick Le Delliou (CFBR), Stéphan Aigouy (PoNSOH).





Le Comité Français des Barrages et Réservoirs a été créé en 1926 et il a été parmi les membres fondateurs de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) au sein duquel il a été et est toujours très engagé et actif. Riche de plus de 500 membres, le comité a une longue tradition de partages, d'échanges auprès de ses membres et, plus largement auprès de l'ensemble des intervenants du domaine des barrages et, plus récemment, des digues.

« Barrages, le savoir-faire français », édité à l'occasion du 27^e congrès de la CIGB s'inscrit en droite ligne dans cette tradition d'échanges et de communications. Au travers de 12 chapitres abordant de nombreux champs d'activité, il présente l'histoire, les savoir-faire, les expériences, les innovations et les axes de recherches que le Comité Français des Barrages et Réservoirs choisit de partager avec l'ensemble de la profession.



WWW.BARRAGES-CFBR.EU

60 €



ISBN 979-10-96371-11-2