

Les barrages

Les barrages sont profondément insérés dans notre environnement naturel et social, et les angles d'observation en sont multiples.

Après un éditorial d'Adama Nombé, Président de la CIGB, le dossier qui suit privilégie une approche rétrospective, remontant le temps de l'avenir au passé.

L'avenir se dessine dans sa dimension internationale. Bernard Tardieu s'intéresse à l'évolution des techniques ainsi qu'au partage du savoir, garant d'une maîtrise de la sécurité.

Trois jeunes ingénieurs nous disent l'épanouissement qu'ils trouvent au bout du monde dans l'acte de construire en équipe. Jean-Pierre Chabal rappelle quelques conditions nécessaires à l'inscription d'un projet de barrage dans la perspective du développement durable. Maryse François-Xausa montre enfin l'innovation et la haute technologie nécessaires à la production et au stockage de l'hydroélectricité.

Le présent et le passé récent, c'est notamment l'amélioration de l'outil que nos prédécesseurs nous ont légué. Henri Jacquet-Francillon explique, prenant l'exemple d'Electricité de France, l'importance de l'hydroélectricité dans la transition énergétique, tandis que Bruno Mathex décrit le modèle de la Compagnie Nationale du Rhône, modèle qui intègre les différents usages de l'eau et l'articulation avec les nouvelles énergies renouvelables.

Patrick Le Delliou présente l'appareil réglementaire et législatif régissant en France la sécurité des ouvrages hydrauliques. L'environnement social est abordé par Armelle Faure, qui décrit l'inscription des barrages dans la vallée de la Dordogne, avec le témoignage de riverains qui se souviennent.

Tous ces ouvrages nous renvoient au passé. Comme l'explique Jean-Louis Bordes, ce passé est cependant bien vivant, et le patrimoine peut être considéré comme un atout pour l'avenir. Bernard Goguel clôt cette revue en revenant à la nature, dont l'immobilité n'est qu'apparente, et qui peut être source de dangers considérables.

Jean-Louis Bordes (58)

Éditorial

Chers Centraliens,

C'est pour moi un grand honneur et un grand plaisir que de vous présenter ce numéro de votre revue, numéro consacré aux barrages hydrauliques. En effet, l'École centrale est cette école qui a fourni à la France et à de nombreux pays dans le monde et en particulier en Afrique des ingénieurs talentueux et ingénieux comme leur nom l'indique, qui ont contribué et contribuent à la mise en place et à la gestion d'infrastructures qui améliorent fondamentalement les conditions de vie de millions d'êtres humains tout en préservant et en protégeant notre mère la nature.

Parmi les ouvrages d'art, les barrages se distinguent par plusieurs aspects. Leur conception requiert une grande ingéniosité et la collaboration de plusieurs disciplines scientifiques et techniques pour en garantir la sécurité, l'efficacité économique et la durabilité. Leur impact sur le milieu naturel et sur les sociétés locales sont souvent significatifs. Enfin, leur utilité se révèle essentielle. Ils permettent en effet de mobiliser les ressources en eau et de les contrôler pour favoriser l'irrigation, de produire de l'électricité propre en quantité et moins chère, de stocker de l'eau destinée aux usages domestiques et industriels, de lutter contre les inondations, de faciliter la navigation fluviale, voire de créer des plans d'eau de loisir et aussi, souvent, de restaurer la nature et les écosystèmes dans les pays arides et semi-arides. Ces ouvrages, dont on dénombre environ un million de petits et cinquante mille classés comme grands barrages, sont parmi ceux qui ont permis les transformations révolutionnaires du 20^e siècle en Europe et en Amérique. Ils sont aujourd'hui en train de transformer l'Asie. Ils changeront l'Afrique demain en permettant aux populations de passer de la nécessité à une certaine liberté.

Vous trouverez dans les pages qui suivent des articles décrivant le rôle historique et l'actualité de ces ouvrages. Mais quand on parle de barrages, on parle surtout d'avenir. Bien sûr le potentiel est d'ores et déjà largement exploité dans les pays développés, mais le parc vieillissant et les nouvelles demandes en termes de protection contre les inondations, de stockage de l'énergie intermittente et le renouveau du transport fluvial en Europe posent des enjeux nouveaux à la profession. Le potentiel reste immense dans les autres parties du monde. Pour prendre un exemple qui m'est cher, celui de l'Afrique, on estime que le potentiel hydroélectrique n'y est exploité qu'à hauteur d'environ 7 à 8 %. Or les deux tiers de la population y sont privés d'électricité, avec tout ce que cela représente en termes de manque d'éclairage, de déficit en eau potable, de médiocres possibilités d'éducation, de frein à l'activité économique. Du fait de la faible mobilisation de l'eau, seulement 10 % des terres arables en Afrique sont sous irrigation, avec comme conséquences des famines récurrentes et une malnutrition chronique pour la majorité des enfants et des femmes en grossesse. Un projet comme celui du Grand Inga sur le fleuve Congo, d'une puissance installée de 40 000 MW, pourrait pourtant produire de l'ordre de 280 TWh/an, et ceci au coût extrêmement modique de 0,02 Dollars par kWh, alimentant ainsi une bonne partie du continent.

Convenablement maîtrisée quant à ses conséquences environnementales et sociales, la construction de barrages représente un vaste champ d'action dans toutes les régions émergentes, régions qui se développent aujourd'hui à vive allure.

Leur mise en œuvre continue à faire appel à de belles innovations technologiques, ce qui veut dire que les Centraliens y ont toute leur place et y trouvent de grandes satisfactions professionnelles. ■

Je vous souhaite une bonne lecture.

Bien cordialement à vous,

Adama Nombé

Président du Comité National
des Barrages du Burkina

Président de la Commission Internationale
des Grands Barrages (CIGB-ICOLD)



Sommaire

- p 18 Partager les savoirs** constituer l'expérience collective, faire émerger l'expertise
- p 20 Le bonheur des expatriés** Témoignages de trois jeunes ingénieurs en poste au Nigéria, en Équateur et au Népal
- p 24 Barrages et développement durable**
- p 27 Le rôle de l'énergie hydraulique** dans le mix énergétique
- p 30 Évolution actuelle** et avenir de l'hydroélectricité
- p 32 Le « modèle CNR »** porteur du développement durable des territoires
- p 35 Les barrages français et la sûreté**
- p 38 Déplacements de populations** et construction de grands barrages
- p 42 Les barrages, un patrimoine essentiel,** ou l'avenir du passé
- p 44 Les barrages naturels**

Partager les savoirs, constituer l'expérience collective, faire émerger l'expertise



Pérou 2011 - Olmos. Barrage CFRD, 85 m de hauteur, construit en deux étapes.

La spécificité du barrage

Il faut réunir des compétences nombreuses et variées pour se lancer dans un projet de barrage. La première tâche consiste à définir l'ampleur et les grandes lignes du projet en fonction des objectifs poursuivis et des contraintes sociétales, environnementales et financières. Le schéma global est toujours celui du développement durable équilibrant environnement, économie et société. Dans ce cadre, et une fois retenue l'option de construire un barrage, l'équipe de projet choisit le meilleur site, conçoit les ouvrages, constitue le système contractuel qui réunit les partenaires de la construction et de la fourniture et du démarrage des équipements. Comment faire pour que les compétences nécessaires se renouvellent, s'améliorent, se fertilisent avec le temps? On entend beaucoup parler d'amélioration continue dans les programmes de qualité, mais on s'interroge bien peu sur la manière de constituer des équipes qui apprennent de l'expérience des autres et qui valorisent au mieux leur propre expérience. L'amélioration continue suppose que les procédures d'apprentissage et d'échange soient

considérées comme plus importantes que les procédures de contrôle surtout si celles-ci sont essentiellement documentaires. Par chance, les barrages sont considérés dans pratiquement tous les pays du monde comme relevant des règles de l'art et des bonnes pratiques et non pas du contrôle de la bonne application des règlements. L'expérience de Coyne et Bellier montre que dans les ouvrages architecturaux exceptionnels comme dans les barrages, la simple application des règlements surtout si elle est dépourvue de vision systémique globale ne met pas à l'abri d'incidents ou d'accidents. Il nous est arrivé qu'un maître d'ouvrage ou un assureur nous demande de jouer un rôle de contrôle global en superstructure des systèmes de contrôle habituels. C'est bien une approche systémique globale qui est souhaitée, le fait qu'elle soit globale n'exclut pas bien au contraire que les « détails » de la construction soient d'autant plus scrutés qu'ils sont inhabituels. C'est le mode de fonctionnement normal dans le domaine des barrages.

Les acteurs

La grande majorité des barrages sont construits dans les pays dits émergents. Selon la géographie et les besoins, ils sont utilisés pour produire de l'électricité ou pour stocker de l'eau pour l'irrigation ou l'approvisionnement en eau. Il existe d'autres usages. Dans ces pays, les premiers projets ont été conçus et réalisés avec l'aide des pays industrialisés: ingénieries, entreprises de génie civil, fabricants de matériel hydro et électromécanique, puis des capacités nationales se sont constituées. Les entreprises de génie civil sont en général les premières à se développer, avec une rentabilité directe parfois faible ou négative pour les premières constructions. Les vannes et les équipements hydromécaniques sont souvent construits totalement ou partiellement sur place, tandis que les turbines et les parties électriques sont généralement importées à partir d'un nombre réduit de fabricants (Alstom est leader mondial), certains implantés dans les grands pays émergents (Brésil, Argentine, Chine Etc). L'ingénierie a un visage particulier, parce que la relation

1. Commission Internationale des grands Barrages International Commission on Large Dams qui fédère les Comités Nationaux d'une centaine de pays.
2. CFBR: Comité français des barrages et réservoirs.

entre le Maître d'ouvrage et l'Ingénieur a un caractère relationnel marqué et parce que c'est bien l'ingénieur qui comme l'architecte dessine le projet. Si un projet est bien conçu, c'est-à-dire simple et explicite dans ses fonctions, si les spécifications techniques et le contrat sont bien rédigés par des ingénieurs expérimentés, si la géologie est bien comprise et interprétée, alors un entrepreneur même peu expérimenté, bien guidé sur le terrain peut réussir une bonne construction.

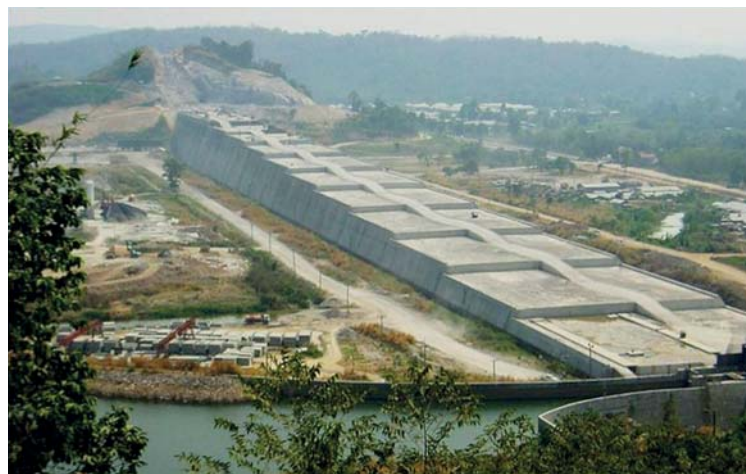
La formation des équipes

Comment constituer de bonnes équipes de conception et maîtrise d'œuvre ou d'assistance technique, et comment constituer des maîtres d'ouvrage expérimentés et aptes à prendre de bonnes décisions? La formation reçue compte un peu, mais moins que l'apprentissage par l'expérience et que le développement du goût d'apprendre et d'approfondir. Il y a beaucoup de métiers qui demandent moins d'efforts intellectuels que l'ingénierie des barrages. Il faut donc sélectionner celles et ceux qui font le choix conscient de ce métier que souvent ils feront toute leur vie, par goût. Ensuite, il faut favoriser la constitution de références communes qui sont en premier lieu celles qui sont constituées par les barrages déjà construits dans le pays ou conçu par la société qui les emploie. Curieusement, dans bien des cas, les jeunes et moins jeunes ingénieur(e) s ne connaissent pas les barrages de leur propre pays même en photo. On n'imagine pas un architecte qui ne connaîtrait pas les grandes références architecturales. Il en est de même pour les barrages car l'architecture globale, systémique, d'un barrage se perçoit en le regardant surtout si cette lecture des références est faite avec l'aide d'ingénieurs plus expérimentés. On a déjà dit que le développement de système de contrôle purement documentaire néglige et parfois détruit la formation des plus jeunes et dilue le contrôle mutuel de la compétence par l'expérience. La constitution de l'expérience commune, richesse incomparable, suppose un vrai travail en équipe qui inclut des visites communes sur le terrain, la présentation orale collective de ce qu'on a fait et la revue structurée de la conception proposée par chaque ingénieur(e) à son niveau. Il faut un formalisme de la constitution de l'expérience collective. Pour chaque pays, la constitution des archives et la constitution d'un fond de documentation nationale sont fondamentales. Les comités nationaux de la CIGB (ICOLD) ¹ ont cette vocation par leur fonctionnement national comme lieu d'échange, de partage et d'élaboration des bonnes pratiques. Ils ont aussi vocation à déléguer des ingénieur(e) s dans les comités techniques chargés d'élaborer les bulletins techniques qui exposent de façon courte les bonnes pratiques internationales dans à

peu près tous les domaines. Ces ingénieurs acquièrent dans ces groupes des connaissances nouvelles qui irriguent leur propre pays. Ces échanges denses dans chaque pays permettent d'éviter que les bonnes pratiques ne se perdent et que l'accumulation d'ingénieurs successifs et insuffisamment expérimentés et compétents conduisent à projeter des conceptions de plus en plus compliquées, inutilement, à des surépaisseurs, à des aciers inutiles et en même temps à des impasses graves par exemple en hydraulique à grande vitesse à surface libre. Encore heureux, dans ce dernier domaine, quand le pays dispose d'un laboratoire de modèles réduits hydrauliques qui permet de tester à l'échelle réduite les dispositions adoptées et de montrer les dysfonctionnements prévisibles.

Nouvelles pratiques et circulation du savoir

Le rôle de ces comités et de ces échanges est très important lorsque se constituent de nouvelles pratiques. Les barrages sont régis par des règles de l'art, des bonnes pratiques et de l'expertise partagée. Toutes se constituent en permanence ou s'oublent. Un exemple en est la pratique des barrages en enrochement avec un masque en béton qui s'est développé très rapidement il y a vingtaine d'années. Un massif d'enrochement présentant un angle de frottement interne élevé, permettant donc des pentes de talus raide est étanché à l'amont par une dalle en béton armé dont l'épaisseur varie de 0,30 m à plus de 1 mètre selon la hauteur du barrage. Les promoteurs de cette technologie ont beaucoup dit que ce sont les barrages les plus sûrs et les plus faciles à réaliser, sans calculs complexes, disaient-ils, même dans les vallées très étroites aux parois très raides. Beaucoup ont été construits, beaucoup ont souffert de fuites considérables difficiles à réparer. Cette constatation parfois douloureuse a conduit à utiliser un peu mieux les modèles mathématiques qui avaient été développés mais étaient peu exploités faute d'incitation à affiner l'approche de la conception et de la réalisation. Autre exemple, le Béton Compacté au Rouleau, béton pauvre en ciment, pauvre en eau, mis en place avec des bulldozers et des compacteurs vibrants est devenu un matériau essentiel de la construction des barrages. Le BCR a conquis une place considérable grâce à son coût et surtout à la vitesse de construction qu'il permet. Les barrages en BCR ont remplacé les barrages à contreforts et les élégants barrages à voûtes multiples. Les barrages appelés poids sont en général rectiligne avec un parement amont vertical et un parement



Tha-Dan, Thaïlande, 2004. Barrage en BCR, hauteur 95m, le plus volumineux de ce type au monde à cette date, 4,5 millions de mètres cubes de béton.

aval penté à environ 0,8 horizontalement pour 1 verticalement. Dans les régions sismiques, ces barrages se comportent bien jusqu'à un certain niveau de sollicitation, puis glissent sur leur fondation. S'il s'agit de quelques millimètres, ce déplacement se produit par une certaine dislocation du rocher de la fondation sans risque de rupture (on admet pour les séismes extrêmes que le barrage ait subi des dommages à condition que ces dommages ne conduisent pas à la perte de contrôle du lac de retenue). Depuis plusieurs années, la pratique s'est développée de courber ces barrages, retrouvant le comportement exemplaire des barrages-voûtes sous contrainte dynamique. Bien que ces ouvrages soient construits au bulldozer, il faut les équiper de joints de retraits qui séparent la masse en plots verticaux indépendants qui sont solidarisés en fin de chantier par injection de ces joints qui agissent comme des vérins de mise en place. Il se révèle alors nécessaire de raviver les connaissances parfois éteintes dans la science élégante des barrages-voûtes en l'adaptant aux nouvelles technologies.

Pour faire émerger l'expertise collective, il faut assurer l'équilibre entre la pratique du chantier et la rigueur et la complexité de la conception. Il faut que les concepteurs soient suffisamment présents sur les chantiers car ce sont eux qui connaissent les raisons qui justifient chaque détail constructif aussi bien que les grandes lignes. Et ceux qui sont surtout présents sur les chantiers doivent être invités à donner leur avis durant la période de conception.

C'est cette expérience collective et l'émergence de cette expertise qui sont les meilleurs garants de la qualité et donc de la sûreté des barrages. ■

Bernard Tardieu (67)
Académie des Technologies
Président honoraire
du CFBR²
Ancien vice-président
de la CIGB



Le bonheur des expatriés

Témoignages de jeunes ingénieurs en poste au Nigéria, en Équateur et au Népal

Tous trois appartiennent à Tractebel Engineering (France)/Coyne et Bellier, un leader mondial de l'ingénierie des barrages et usines hydroélectriques.

Nous leur laissons la parole.

NIGERIA

Abuja

Ibadan

Lagos

Thomas Blanié

Je suis entré chez Coyne et Bellier début 2007, fraîchement diplômé d'un double diplôme de l'Ecole Centrale Marseille et de l'Université Polytechnique de Madrid. Je souhaitais vivement partir travailler à l'étranger et je me suis donc orienté vers un Volontariat International en Entreprise (VIE) dans les domaines qui m'intéressaient, à savoir l'eau et les énergies renouvelables.



Au Nigéria, les joies du football.



Thomas Blanié devant le barrage de Gurara (Nigéria).



Thomas Blanié

Agé de 31 ans, il a récemment passé trente mois au Nigéria sur le chantier de Gurara. Ce grand barrage est destiné à assurer l'alimentation en eau de la capitale fédérale, Abuja, ainsi qu'à fournir de l'électricité et à favoriser l'irrigation.

C'est véritablement à ce moment-là que j'ai choisi de travailler sur les projets de grands barrages et d'usines hydroélectriques. Il y a dans ce métier quelque chose de magique qu'il est difficile de transcrire... En sus de la technique c'est un quotidien mêlé d'aventures et de contacts humains. Il y a probablement aussi un peu de fierté à collaborer à la construction de ces grands ouvrages.

Je suis parti pour un an au Nigeria pour superviser la construction d'une usine hydroélectrique et j'y suis finalement resté deux ans et demi. Le barrage de Gurara, où j'ai travaillé,

est un barrage à buts multiples: eau potable, irrigation et hydroélectricité. Je travaillais en tant qu'ingénieur en hydro électromécanique pour le client. Nous étions une vingtaine de personnes organisées en joint-venture, avec plus de 50 % de Nigériens.

Déjà à l'époque, le pays avait « mauvaise presse » au regard des problèmes de sécurité. Sans nier leur réalité, c'est loin de refléter la vie au quotidien. Tout d'abord, j'étais sur un site, au nord d'Abuja, en plein milieu de la forêt, ce qui est une chance. En effet, et c'est différent en ville, les inégalités sociales y sont gommées. Tout le monde travaille pour le même projet et tout le monde y trouve son compte.

En pleine activité il y a eu sur site jusqu'à 3 000 personnes, dont 95 % de main-d'œuvre locale. On peut imaginer cela comme une grande fourmilière avec, chez les expatriés, un patchwork de nationalités: Éthiopiens, Égyptiens, Indiens, Italiens, Brésiliens, Sud-Africains, Néo-Zélandais, Suisses, Canadiens...

L'élément le plus fédérateur a été le sport. Presque tous les soirs, je jouais au volley-ball, un sport que les Nigériens découvraient, ou au football, un sport où les Nigériens excellent! Certains matchs étaient organisés le dimanche contre des équipes des villages voisins et il m'arrivait souvent d'être le seul blanc sur le terrain. Même sans avoir un bon niveau, le succès est alors assuré.

Ces deux ans et demi m'ont beaucoup apporté sur le plan personnel et professionnel, même si la vie quotidienne n'est pas toujours facile: beaucoup de travail, des contacts difficiles avec la famille et les amis... Mais il y a aussi dans l'expatriation quelque chose de grisant; vous êtes là pour amener une compétence qui n'est pas disponible dans le pays. Les opportunités sont plus nombreuses.

L'activité constante sur le chantier, qui fonctionnait six jours sur sept, ainsi qu'un certain degré d'isolement, pousse à l'autonomie et aux prises de décisions. Il est en effet parfois bien difficile d'attendre pendant quelques jours une réponse du siège. Le rythme et les priorités y sont bien différents.

Les deux premières années sont passées très vite et la période critique est arrivée entre la deuxième et la troisième année. Il y a alors un choix de vie à faire car avec le temps on se coupe de sa famille et de ses amis, et ce en dépit d'internet et des retours pour les vacances.

Pour ma part j'ai décidé à ce moment-là de rentrer, mais je garde en tête de repartir en famille dans quelques années. Même s'il est vrai que cela ne remplace pas l'expérience acquise par l'expatriation à plein-temps, je continue aujourd'hui à effectuer beaucoup de missions à l'étranger, à raison de plus de quatre-vingts jours par an.

Louis Bouzat

Ce qui m'a conduit à me spécialiser dans le domaine de la construction en dernière année à Centrale était l'envie, assez communément partagée par mes camarades d'option, de voir mon travail donner des résultats concrets et durables. J'ai retrouvé en dernière année et durant mon stage un goût pour les problèmes techniques complexes, et j'ai donc cherché à rejoindre une entreprise possédant une expertise technique avancée dans son domaine, par exemple Soletanche-Bachy ou Coyne et Bellier justement.

Les constructions de barrages et projets hydroélectriques m'ont particulièrement attiré. D'abord, la perspective de participer à des projets de développement d'une importance souvent nationale, ayant trait à un sujet aussi sensible que la gestion des

ressources en eau, est réjouissante et motivante. Sur le plan technique, les projets de barrages couvrent un très large spectre de disciplines: le génie civil, de la mécanique des roches aux structures en béton armé, l'hydraulique, les machines tournantes, le transport d'électricité et les réseaux. Enfin j'apprécie particulièrement les aspects de stratégie contractuelle et de négociations pour débloquer des situations complexes.

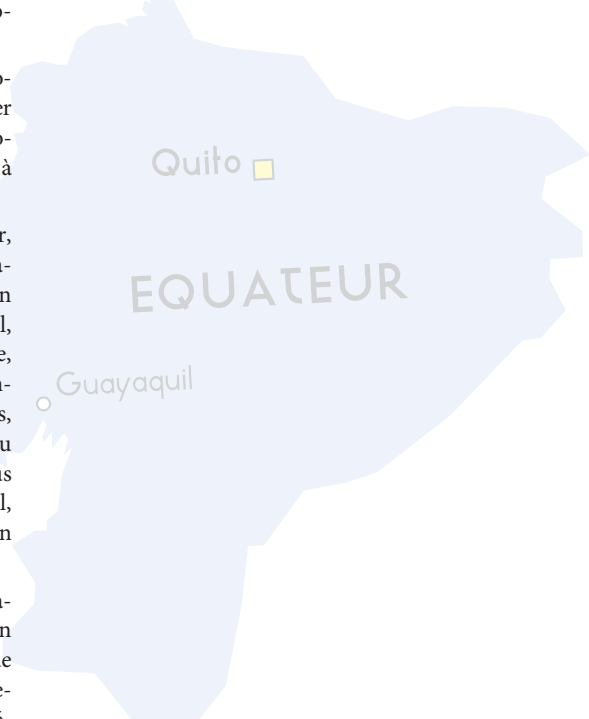
Le mode de travail au sein des unités de projets hydroélectriques chez Coyne et Bellier m'a tout de suite convenu: il s'agit d'être autonome et généraliste, ce qui correspond bien à la formation que développe l'Ecole Centrale.

D'un point de vue personnel, il faut bien sûr, pour postuler à des missions en expatriation, avoir l'envie de voyager et de partir un peu à l'aventure. Sur le plan professionnel, je pensais, et cela s'est confirmé par la suite, que l'on progresse plus vite en se confrontant seul à des situations problématiques, sans le soutien immédiat de la structure du siège. Je pense revenir au siège en étant plus autonome, plus efficace dans mon travail, et avec une meilleure gestion de la relation avec nos clients.

La mission à laquelle je participe en Équateur a été lancée très vite; il n'y a eu qu'un mois entre les premières négociations de contrat et notre arrivée sur place. L'entreprise nationale chinoise de projets hydroélectriques Sinohydro, un client que nous connaissons bien, faisait face pour son projet Coca-Codo Sinclair à d'importants retards d'approbation du design. Elle a fait appel à nous pour leur fournir une assistance technique dans le but de débloquer les situations les plus critiques. C'était un enjeu stratégique pour Sinohydro car il s'agit de leur première grande réalisation en Amérique Latine. Le projet est très motivant par sa taille et sa complexité: des ouvrages de prise construits sur une fondation difficile,



Louis Bouzat (à gauche) et Yifeng Lin, ingénieurs à Tractebel Engineering (France)/Coyne et Bellier, sur le chantier Coca-Codo Sinclair (Equateur).



Louis Bouzat (ECP 2008)

Il a près de 29 ans. Il réside actuellement à Quito (Equateur), au sein d'une équipe assistant l'entreprise chinoise

Sinohydro pour la construction du projet Coca-Codo Sinclair, ouvrage hydroélectrique de 1 500 MW situé sur le versant oriental de la Cordillère des Andes.



Travaux souterrains à Coca-Codo Sinclair (Equateur).

un tunnel d'amenée de 24,8 km de long excavé par deux tunneliers (Tunnel Boring Machines), deux conduites forcées souterraines comportant un puits vertical de 550 m de profondeur, une usine souterraine avec huit groupes Pelton pour une puissance installée totale de 1 500 MW.

Lors de la première partie de notre mission, nous avons identifié les sujets les plus critiques en termes d'impact sur le planning, nous en avons revu le design, puis nous avons organisé des discussions avec le maître d'ouvrage public équatorien et son ingénieur mexicain dans le but de parvenir à un accord. Les principaux points de désaccord résolus, Sinohydro a souhaité prolonger nos prestations de service. Nous nous attachons maintenant à accompagner les activités de design et de construction les plus complexes, de manière à éviter de nouveaux blocages. Nous fournissons également une assistance contractuelle pour la préparation des demandes de Sinohydro visant à des compléments de rémunération ainsi que pour l'argumentation correspondante.

Les sujets techniques que nous traitons sur place sont très variés. Au début de notre mission, il s'agissait plutôt de questions de design conceptuel non résolues, comme par exemple le dimensionnement hydraulique du bassin de dessablage ou l'accélération sismique à prendre en compte pour le dimensionnement de l'usine souterraine. Par la suite nous nous sommes impliqués dans les problèmes de suivi de construction et d'adaptation de design car l'organisation du projet souffre d'un manque de coordination études chantier.

Une première particularité de ce travail sur site est que le rythme est dicté par les urgences du chantier, alors que le travail depuis le siège en est forcément un peu déconnecté et doit se planifier plus en avance. Par conséquent, on est amené à résoudre seul et rapidement une partie des problèmes techniques. On apprend à effectuer sa propre recherche bibliographique et à identifier des références pertinentes pour proposer une solution technique sur un sujet qui ne nous était pas forcément familier au départ.

En expatriation, l'autonomie dont il faut faire preuve peut être un peu déconcertante au début, mais on y prend vite goût. On se déconnecte du quotidien du siège, des nouveaux projets, des nouvelles organisations. Le retour au siège passera forcément par une étape de transition, mais que je ne vois pas vraiment comme une difficulté. Ce sera une période pour reprendre ses marques.

En travaillant au quotidien auprès des équipes des différentes parties prenantes, on apprend leurs préoccupations respectives, qui ne sont pas forcément celles de l'ingénieur de design. Cela s'avère très utile par la suite pour adapter son discours à l'interlocuteur dans le but de les convaincre ou de trouver un accord, et c'est une aptitude que je pense avoir développée sur ce projet.

Les différences culturelles entre les équipes sont très importantes: maître d'ouvrage équatorien, assistant mexicain au maître d'ouvrage, constructeur chinois, sous-traitants internationaux... J'ai été témoin d'incompréhensions totales sur certains sujets. En tant que partie tierce, il est intéressant de développer un avis indépendant et de chercher une troisième voie pour mettre les parties d'accord.

Mais même si le travail est accaparant, les meilleurs souvenirs se font en dehors des heures de bureau. De temps en temps, je laisse tous les problèmes en cours derrière moi pour descendre la face occidentale des Andes en voiture avec quelques amis, direction les plages de la côte, les ceviches frais et les nuits de salsa costeña. Ou à l'inverse, je pars avant le lever du soleil pour m'attaquer à l'un des nombreux sommets qui entourent Quito, les choses étant plus calmes à 5 000 mètres d'altitude.

Je suis content de rentrer bientôt en France pour revoir plus souvent ma famille et mes amis après un an et demi-passés en Équateur, mais je sais que l'envie de repartir pour un autre projet dans un nouveau pays me rattrapera vite.

Marie L'Hostis

Le domaine des barrages est un univers passionnant! Il conjugue des enjeux techniques, économiques, sociaux et environnementaux, le tout dans des pays magnifiques et sur des sites d'exception. Ma fascination provient principalement du fait que chacun de ces ouvrages est unique. Il va dépendre de la topographie du site, de l'hydrologie, de la géologie, des matériaux disponibles, etc. Ce sont tous des prototypes qui regorgent de défis techniques et humains! De plus, il est incroyable de voir à quel point l'homme est capable de modeler son environnement, de créer ces lacs artificiels et d'utiliser la puissance de l'eau afin de produire l'énergie dont il a besoin. Enfin, plus généralement, je crois beaucoup en l'énergie hydroélectrique. Même si ces projets sont bien souvent controversés, je suis convaincue que, à la condition que les impacts environnementaux et sociaux soient bien étudiés, ils ont un impact très positif sur le développement des pays.

L'expatriation est un virus qui s'attrape très vite. Ingénieur Civil des Mines de Nancy, j'ai terminé mes études par un échange universitaire à Rio de Janeiro au Brésil, pays où l'hydroélectricité fournit quasiment 90 % de la production d'électricité. Après cette expérience, commencer ma carrière professionnelle à l'étranger était devenu une évidence. J'ai eu la chance d'entrer dans la vie professionnelle par le biais d'un VIE d'un an au Laos sur le projet de Theun Hinboun. J'ai vécu en base-vie, entourée de dizaines de nationalités différentes pour suivre la construction d'un barrage et de son usine hydroélectrique. Cette expérience a répondu à toutes mes attentes: un enrichissement technique intense pour faire face à la réalité du chantier et ce dans un environnement multiculturel.

Notre métier nous demande d'être polyvalents. On doit maîtriser tous les concepts du design mais aussi les techniques de construction. Ainsi, après cette expérience de chantier, je suis rentrée au siège pour développer ces aspects théoriques sur un projet fascinant: Gibe III en Éthiopie, le plus haut barrage en Béton Compacté au Rouleau (BCR) en cours de construction au monde (250 m), avec une usine qui fournira la troisième plus grosse production hydroélectrique en Afrique, soit 6 330 GWh/an!

Mais après un an et demi à Paris, l'envie de repartir se faisait sentir de plus en plus... Et à nouveau, on m'a offert une opportunité incroyable que j'ai saisie sans hésiter: j'ai été retenue pour un poste d'expatriée au Népal,

LAOS

où je suis actuellement depuis quelques mois et pour une durée totale d'un an.

Pourquoi partir? Une envie d'aventure, la curiosité, un besoin d'apprendre, une ouverture d'esprit mais aussi un tremplin pour ma carrière professionnelle, telles sont les multiples raisons qui m'ont amené aujourd'hui à Katmandou.

Je travaille sur un projet de faisabilité et des études détaillées qui doivent déboucher sur la construction d'un des plus hauts barrages du Népal (220 m), associé à une usine hydroélectrique qui va doubler la capacité installée du pays. Ce projet est une priorité nationale car le Népal manque cruellement d'électricité et des coupures de courant sont programmées tous les jours. Un comble pour un des pays les plus riches en eau et reliefs du monde!.. On pourrait d'ailleurs croire ces coupures intempestives, mais pas du tout. Il existe même une application sur smart phone appelé BattiGayo qui en donne les horaires tous les jours selon les quartiers. Pratique pour savoir quand allumer la machine à laver!

Mes missions sont diverses et variées. J'assiste le chef de projet, également expatrié, dans les tâches administratives de tous les jours et je fais aussi la coordination avec nos experts qui sont aux quatre coins du globe.

C'est la première fois que je travaille sur un projet en cours d'études « amont ». C'est excitant et effrayant à la fois. Je ressens ça comme une page blanche où on nous dit « dessine-moi un barrage ». La technique est omniprésente. Je dois jongler avec des connaissances dans des domaines très variés, allant de la géologie à la géotechnique, en passant par l'hydrologie et l'hydraulique mais sans oublier la partie génie civil ou encore l'hydromécanique et la production d'énergie, le tout saupoudré d'une dose de planning et d'évaluation des coûts. Je prends également beaucoup à cœur la partie environnementale et sociale. Nos visites hebdomadaires sur le site et les discussions avec les personnes habitant dans l'emprise du futur réservoir nous confrontent à la réalité du projet: beaucoup de personnes vont devoir être déplacées.

Le fait de travailler loin du siège comporte son lot de problèmes, à savoir la communication à distance, la disponibilité des experts, le décalage horaire, le rythme des vacances et des jours fériés, etc. Les relations avec le siège ne sont pas toujours évidentes, un peu selon le vieil adage « loin des yeux, loin du cœur ». On déploie ici une plus grande énergie à faire ce qu'on aurait fait rapidement au siège en passant voir un collègue dans le bureau d'à côté. Nous avons en revanche la chance d'accueillir

beaucoup de missions d'experts de tous horizons. Ce sont des moments privilégiés où la transmission de connaissances est à son maximum. Jamais en restant au siège je n'aurais eu l'occasion de passer dix jours en continu à échanger et à apprendre de leur expérience. Et l'avantage de faire cette étude sur place est aussi qu'on est en contact direct avec le client, ce qui facilite la communication et nous amène à prendre des décisions plus rapidement.

Nous avons la chance de travailler avec un partenaire népalais qui, au-delà de son travail efficace, a tout fait pour faciliter notre installation et notre adaptation à cette culture si différente. Les Népalais sont tout simplement adorables et bienveillants. C'est un plaisir de travailler avec eux. Cela compense les conditions de vie un peu rudes à Katmandou. Nous ne sommes que deux Français installés dans les bureaux de notre partenaire népalais, une immersion dans laquelle je m'épanouis. Je vis cette expatriation à pleines dents, autant au niveau professionnel que sur le plan humain. J'ai même commencé à prendre des cours de Népalais. Étant expatriée, c'est à moi de m'adapter aux gens et à leur culture et non l'inverse. Cela commence donc par faire l'effort de parler leur langue.

Des difficultés, oui il y en a. Tout est compliqué ici: l'accès à l'eau potable est difficile, il y a des risques de tremblements de terre, une administration très lente, des grèves à répétition dans un climat politique tendu, la pollution, la poussière, les embouteillages, le bruit. Mais ce qui m'a le plus étonné, ce sont ces coupures de courant programmées tous les jours à Katmandou. En saison sèche, elles peuvent atteindre quatorze ou seize heures par jour! J'ai alors compris que c'était un grand privilège que d'avoir accès à l'électricité. En France, on n'y pense même plus quand on enclenche l'interrupteur. Mais une fois qu'on ne l'a plus, on se sent totalement démuné: plus de télévision, plus d'internet, plus de lumière, plus de frigo, plus de machine à laver... Et puis on s'adapte! Cela donne encore plus de sens à mon travail ici.

Thomas Blanié,
Louis Bouzat (08),

Marie L'Hostis
Tractebel Engineering (France)/
Coyné et Bellier.



Theun Hinboun (Laos). Marie L'Hostis devant une turbine Francis de 30 MW.



Marie L'Hostis avec Philippe Cazalis, directeur de projet, dans la vallée de la Budhi Gandaki (Népal).



Marie L'Hostis

Agée de 27 ans, elle participe à Katmandou aux études de ce qui sera le plus grand barrage du Népal par sa taille, avec plus de deux cents mètres de haut. Elle avait auparavant été en poste sur les chantiers des barrages de Theun Hinboun, au Laos, et de Gibe III, en Ethiopie.

Barrages et développement durable

Ingénieurs, encore un effort
si vous voulez être écologiquement corrects



Embouchure du fleuve Mono (Togo-Bénin).
Les barrages modifient le régime des rivières, induisant des impacts sur le milieu naturel et social à l'aval, impacts qui doivent être étudiés avec soin.

Barrages et développement durable... Sur le territoire français, la question ne fait plus guère débat. On n'y construit peu de nouveaux ouvrages. Ceux qui existent appartiennent peu ou prou au patrimoine national. Certains lacs artificiels, comme par exemple en Champagne celui du Der-Chantecoq, relèvent même de zones humides classées au titre de la convention de Ramsar, qui vise à la protection des oiseaux. Des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux sont progressivement mis en vigueur dans chaque bassin-versant, protégeant les milieux et assurant une mise en valeur équilibrée de la ressource.

Dans beaucoup d'autres régions du monde, on assiste en revanche à une ruée sur l'hydroélectricité, véritable or blanc du XXI^e siècle. Selon l'International Hydropower Association, environ 30 000 Mégawatts de nouvelle puissance installée sont mis en service tous les ans. Cela signifie la construction de nombreux barrages, sans parler des nouveaux projets nécessaires à l'irrigation et à

l'alimentation en eau. Une simple enquête sur Internet montre que ces chantiers ne se réalisent pas sans fréquentes polémiques.

Des impacts sur l'environnement naturel et social

Pour contribuer au développement durable, et comme n'importe quel ouvrage, un projet de barrage doit être conçu de façon à maîtriser ses impacts sur le milieu naturel et sur les sociétés locales. C'est une tâche délicate, car les effets des barrages sur l'environnement composent une sorte de panorama de l'impact environnemental, tant ces effets sont divers et parfois violents. Citons par exemple le changement des régimes liquide et solide de la rivière, les effets sur la flore et la faune terrestre et aquatique, les incidences sur la qualité des eaux. Dans le domaine social, il faut mentionner la vaste question de la réinstallation des personnes déplacées, le respect particulier à porter aux populations considérées comme « indigènes », sans oublier les impacts sur les communautés vivant dans la vallée à l'aval, en relation souvent étroite avec un fleuve dont le régime est modifié par l'ouvrage.

L'évolution des normes et procédures

Les sociétés publiques d'électricité, convaincues d'être investies de l'intérêt général, ont longtemps agi, et ceci partout dans le monde, en maîtres et possesseurs des fleuves et rivières.

Dominées par une culture d'ingénieurs, ces entreprises tendaient à faire passer la production hydro électrique avant tout autre usage de l'eau et avant le respect du milieu naturel. Des remises en question ont eu lieu, qui ont poussé le balancier très loin dans l'autre sens.



Vallée de la rivière Papeiha (Tahiti).
 Identification de sites de barrages réalisée par Tractebel Engineering (France)/Coyne et Bellier pour Electricité de Tahiti.
 Camp de base pour la reconnaissance du milieu naturel.

C'est ainsi que la Commission mondiale des barrages, installée en 1997 par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature et par la Banque mondiale, a rendu en l'an 2000 un rapport final plutôt maximaliste et qui a été très critiqué. Les procédures préconisées auraient en effet signifié un frein considérable à toute construction.

Des normes et directives équilibrées existent néanmoins. Elles émanent notamment du groupe Banque mondiale. Qu'elles soient respectées, et les projets seront à notre avis très convenables et contribueront au développement durable.

Le rôle croissant de nouveaux bailleurs de fonds, qu'ils soient arabes ou surtout chinois, tend cependant à redistribuer les cartes. Ces nouveaux financiers se prononcent évidemment, comme tout le monde, pour le progrès et pour la vertu, mais leurs procédures sont moins rigoureuses et leurs résultats souvent moins convaincants. Il faut donc les accompagner. Nos entreprises peuvent y jouer un rôle essentiel. Elles s'emploient notamment à aider les partenaires chinois à réaliser leurs ambitions dans les meilleures conditions, que ce soit en Afrique subsaharienne ou en Amérique latine.

Il faut parfois renoncer à construire

Maîtriser les impacts des barrages sur l'environnement naturel et social, cela veut dire dans certains cas renoncer à construire. Certains ouvrages sont en effet potentiellement très dommageables. Il existe des critères de bon sens pour distinguer le bon grain de l'ivraie. Il est par exemple probable, au regard des normes actuelles, que tel grand réservoir africain, qui date des années 1960, ne serait plus construit de nos jours. Avec ses 8 500 kilomètres carrés de retenue pour une usine d'un millier de Mégawatts, il présente en effet un très médiocre ratio

de plus de huit cents hectares noyés par Mégawatt installé.

Arrêtant la quasi-totalité des sédiments charriés par le fleuve, cet ouvrage a en outre un considérable effet négatif sur la tenue du trait de côte à l'aval.

Ne le répétez pas, mais on assiste hélas encore aujourd'hui, ici ou là, à la construction de quelques barrages sur la base d'études erronées ou scandaleusement optimistes, sans concertation qui vaille avec les ayants droit locaux, parfois dans un but de promotion politique, ou peut-être pour favoriser les intérêts financiers de certains responsables.

Il se révèle difficile de rectifier les pires décisions une fois qu'elles ont été prises, la simple information devenant alors inaudible, et tel projet peu recommandable étant de ce fait mené à son terme comme emporté par son inertie. Construire par exemple un barrage réservoir qui se remplira de sédiments en quelques décennies, comme on s'y expose en région semi-aride, cela ne relève pas du développement durable. Citons aussi cette retenue qui devait stocker cinq cents millions de mètres cubes pour l'alimentation en eau, dans un pays que nous ne nommerons pas, retenue créée en 1993 sur la base d'une hydrologie un peu trop créative, et qui depuis lors resta le plus souvent presque vide.

« Bon barrage » ? « Mauvais barrage » ?
 Chaque projet doit donc être évalué au regard de ses qualités propres et de ses défauts particuliers.



Région du barrage de Fomi (Guinée).
 En vue de contribuer au développement durable, les aménagements hydrauliques font l'objet de consultations locales approfondies.



© Tractebel Engineering (France)/Coyne et Bellier

Chutes de la Nawa, près de Soubré (Côte d'Ivoire). L'Administration a opté ici pour un barrage de taille relativement modeste, ce qui facilite sa mise en œuvre dans un contexte de forte pression foncière.

Des projets de qualité

Pour une société d'ingénieurs comme Tractebel Engineering (France)/Coyne et Bellier, qui mène en parallèle une trentaine de chantiers de grands barrages aux quatre coins du monde, et qui se veut à la recherche de l'excellence, le défi consiste à atteindre simultanément tous ses objectifs. Nos clients souhaitent pour leurs ouvrages économie et rapidité de construction. Il faut



© Tractebel Engineering (France)/Coyne et Bellier

Berké (Turquie). Le barrage de Berké, d'une puissance de 510 MW, présente d'excellents ratios environnementaux, avec moins de deux hectares noyés et moins de deux personnes déplacées par Mégawatt installé.

dans le même temps produire des projets respectueux du milieu naturel et des sociétés locales, faute de quoi nature et populations se révolteront, ternissant au passage la réputation de notre entreprise et risquant de mettre à mal sa pérennité. Les barrages eux-mêmes, de mieux en mieux conçus, sont plus sûrs qu'autrefois. Les déboires et catastrophes qui nous menacent désormais sont plutôt d'ordre écologique ou social. Ces déboires et catastrophes, il nous faut les éviter par la qualité de nos projets.

Les maîtres d'ouvrage sont de plus en plus conscients de la nécessité du respect des territoires ainsi que d'une gestion équilibrée des ressources en eau. Le vocabulaire a évolué. S'agissant de déplacement de populations, on ne parle plus en Afrique francophone de

déguerpis, et c'est tant mieux. On parle hélas encore parfois de *recasement*, alors qu'en équité il ne s'agit pas de fournir des *cases*, mais bien de réinstaller des personnes humaines, et ce dans leurs propriétés bien entendu, mais aussi dans leur ressources et dans leur dignité.

C'est une grande satisfaction de voir nos clients approuver telle ou telle disposition qui nous paraît ingénieuse. C'est ainsi que les Autorités ivoiriennes ont préféré pour le barrage de Soubré, actuellement en chantier sur le fleuve Sassandra, une taille relativement modeste. La puissance de l'usine sera inférieure de onze pour cent à ce qu'elle aurait été dans une autre variante, comportant un ouvrage de plus grande hauteur. Mais le nombre de personnes à déplacer en est réduit de moitié, ce qui facilite la mise en œuvre du projet. Dans d'autres cas, il suffit de déplacer le site prévu pour un barrage pour obtenir un effet similaire, comme nous l'avions naguère obtenu de notre client Électricité du Vietnam.

Les barrages, outils du développement durable

En dépit de ses difficultés, la construction de barrages intelligents reste une nécessité du développement économique de nombreuses régions du monde. La FAO estime en effet qu'en 2010 plus de neuf cents millions de personnes souffraient de la faim, d'où la nécessité de développer l'irrigation. Plus d'un milliard quatre cents millions d'hommes sont aujourd'hui privés d'électricité. L'énergie hydraulique reste la plus prometteuse des énergies renouvelables. Elle contribue en outre, notamment par le biais des stations de transfert d'énergie par pompage, à pallier le caractère aléatoire de l'éolien et du solaire. Les besoins en eau potable et industrielle croissent également très vite. La population mondiale devrait dépasser les neuf milliards d'êtres humains dès l'an 2050. Les besoins sont immenses. Il faut donc continuer à mettre en œuvre les grands barrages. Le potentiel inexploité reste considérable. N'est-ce pas en définitive la non-construction de ce type d'ouvrages qui mettrait obstacle au développement durable ? ■

Jean-Pierre Chabal (ECP 73)

Directeur Technique,
Tractebel Engineering
(France)/Coyne et Bellier
Président du Comité de
l'Environnement,
Commission Internationale
des Grands Barrages
(CIGB-ICOLD)



Le rôle de l'énergie hydraulique dans le mix énergétique

L'accès à l'énergie : le défi du 21^e siècle

A l'aube du 21^e siècle, l'accès à l'énergie est un défi majeur. Il faut faire face à des besoins de plus en plus importants liés à l'accroissement de la population et au développement des pays émergents. Aujourd'hui près de 1/5^e de la population n'a pas encore accès à l'électricité et on sait combien ce besoin est clef pour le développement d'un pays. Par ailleurs il faut aussi gérer la problématique du réchauffement climatique et de la limitation des ressources.

Le développement des énergies renouvelables est une des solutions qui permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. En 2010 ces énergies représentaient 20 % du mix énergétique et devraient atteindre 31 % à l'horizon 2035, tout en prenant en compte l'augmentation des besoins.

En ajoutant les contraintes de la crise, les pays sont confrontés à l'équation impossible: comment produire de l'électricité peu chère pour préserver la croissance et en même temps en produire plus; tout en gardant le maximum d'indépendance énergétique et en assurant la réduction des émissions de gaz à effet de serre?

Un élément de réponse est l'hydroélectricité: une solution prouvée, moderne et efficace.

L'hydro électricité peut apporter plus de production grâce à de nouvelles installations et dans une moindre mesure à la réhabilitation des machines existantes, elle permet aussi le stockage.

Les nouvelles installations

L'hydroélectricité utilise le cycle de l'eau et transforme l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique puis électrique.

Elle représente aujourd'hui 80 % des 20 % d'énergies renouvelables produites dans le monde. C'est déjà un acteur clef du développement durable. Elle présente de nombreux avantages.

- C'est une des énergies les moins chères grâce notamment à des rendements de plus de 90 % qui permettent une utilisation maximale de l'eau
- Elle est disponible, modulable, et est de ce fait un complément indispensable aux énergies intermittentes tels que le solaire ou l'éolien
- Elle permet une indépendance énergétique.

Mais l'investissement de départ est important et les délais de mise en œuvre sont longs: souvent de l'ordre de 10 ans. Cela demande une bonne anticipation des besoins à venir et un certain niveau de planification.

Aujourd'hui environ 1000 GW sont équipés ce qui représente seulement un tiers des sites économiquement réalisables.

Source: International Hydropower Association. 2007

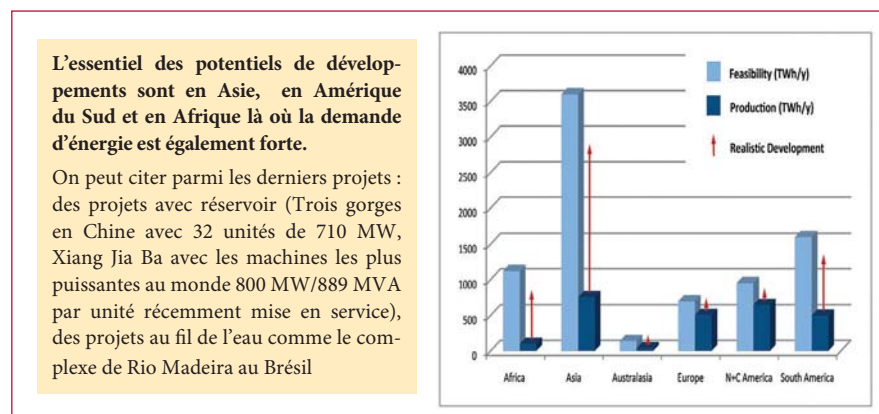


Figure 1- Estimation de l'évolution de la production hydroélectrique

Un autre aspect de l'hydroélectricité est la possibilité d'exploiter des réservoirs dédiés à d'autres usages de l'eau. La commission internationale des grands barrages répertoriait 33 112 barrages à destinations diverses: irrigation, besoin de navigation, réserve d'eau... La plupart ne sont pas équipés et pourraient en plus de leur usage permettre une production d'électricité (tableau 1).

Tableau 1

Source : ICOLD – registered dams list

Capacity in millions of m ³	Number of units	Without hydroelectric equipment	ratio in %	With hydroelectric equipment	ratio in %
1 to 5	10069	8769	87,09%	1300	12,91%
5 to 20	6841	5032	73,56%	1809	26,44%
20 to 50	2844	1750	61,53%	1094	38,47%
50 to 100	1630	940	57,67%	690	42,33%
100 to 1000	2745	1329	48,42%	1416	51,58%
> 1000	1004	183	18,23%	821	81,77%

La réhabilitation

Les centrales hydro électriques ont une durée de vie qui dépend des modes d'opération et notamment du nombre de démarrages et d'arrêts, de la qualité de l'eau, du type de technologie.

La durée de vie moyenne était de l'ordre de 40 ans mais les nouveaux besoins du réseau nécessitent une adaptation permanente à la demande et donc des modes opératoires plus sévères. Les améliorations de performances contribuent à accélérer la décision de moderniser les machines plus souvent.

Deux types d'amélioration sont possibles (séparément ou combinées) :

- Une amélioration du rendement qui permet une meilleure utilisation de l'eau et une performance supérieure grâce à une plus grande génération d'énergie. (figure 2)
- La possibilité de produire plus de puissance ce qui permet de mieux répondre à la demande de pointe (figure 3).

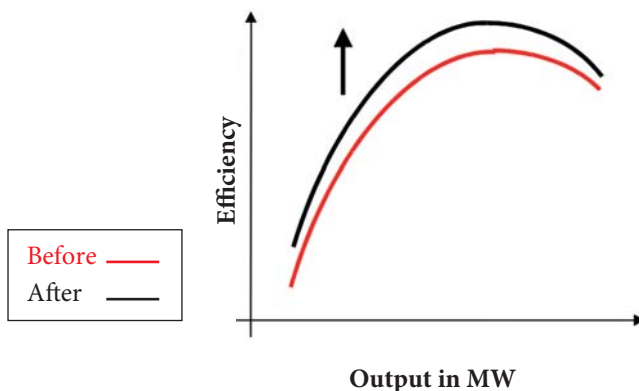


Figure 2

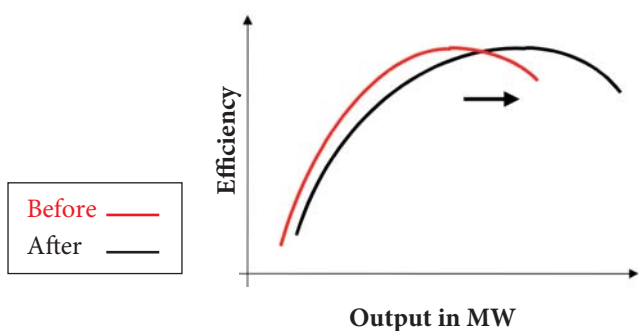


Figure 3

La modernisation des centrales permet en moyenne un accroissement de l'énergie produite de l'ordre de 5 %. Donc chaque fois que l'on modernise 20 GW d'hydraulique on bénéficie de 1000 MW de plus d'énergie renouvelable disponible et prédictible.

Intégration de l'énergie renouvelable intermittente

En lien avec les besoins croissants d'énergie propre, la part de nouvelles énergies renouvelables est de plus en plus significative. En 2011, 95 GW d'énergie éolienne¹ étaient installés en Europe et 25 GW de solaire PV en Allemagne seule. L'IEA (agence internationale de l'énergie) prévoit un doublement de la capacité de production en éolienne d'ici 2020 et environ 300 GW en 2035.

Contrairement aux énergies thermiques et hydrauliques, les nouvelles énergies renouvelables sont intermittentes par nature et non prédictibles. Un stockage complémentaire est indispensable pour adapter la production à la consommation.

Seule l'hydroélectricité offre de grandes capacités de stockage. Elle joue donc un rôle de plus en plus important pour assurer l'adéquation entre la consommation et la production des autres énergies renouvelables.

Hydro turbines pompes, la solution aux énergies renouvelables intermittente

Le turbinage pompage (STEP) est aujourd'hui le moyen à grande échelle le plus efficace et le plus flexible pour stocker l'énergie. Cette technologie a déjà fait ses preuves et contribue à l'équilibre du réseau électrique.

Quand la production est supérieure à la demande électrique, l'eau est pompée dans le réservoir supérieur et stockée ce qui permet une utilisation maximale des énergies intermittentes. Quand la consommation est supérieure à la demande, l'énergie stockée est turbinée vers le réservoir inférieur à un moment où le prix de l'électricité est élevé (voir figure 4 ci-contre).

Au cours du cycle global, plus de 80 % de l'énergie consommée est récupérée.

Les STEP fournissent une réponse rapide aux besoins de l'énergie de pointe, et offrent la possibilité d'équilibrer le réseau à tout moment. En novembre 2006, 15 millions

de ménages européens ont été privés d'électricité lors d'un incident sur le réseau électrique européen. Cette panne aurait pu devenir un black-out généralisé sans le secours de l'hydraulique pour rétablir la situation. Les centrales alpines françaises ont pu fournir environ 4000 MW en 10 minutes, soit l'alimentation d'environ 4 millions de foyers, les STEP de Grand Maison (Isère) ont fourni à elles seules de 25 à 30 % de cette énergie.

Il y a plus de 127 GW de turbinage pompage opérationnels dans le monde. En lien avec les besoins de flexibilité du réseau en Europe, en Amérique du Nord et en l'Asie, le marché de turbinage pompage augmente. L'Europe représente un quart de ce marché; les opportunités sont surtout concentrées dans les régions alpines (Suisse, Autriche, Allemagne), en Espagne et au Portugal.

Les STEP à vitesse variable: une innovation pour plus de flexibilité

La vitesse variable est la dernière innovation majeure dans le domaine de l'hydroélectricité.

L'exploitant pourra ajuster la puissance en mode pompage et turbinage, alors que sur les STEP traditionnelles cela n'est possible qu'en mode turbinage. Il bénéficiera aussi de services auxiliaires comme la capacité de s'adapter aux besoins du réseau en quelques secondes.

Cette nouvelle possibilité assure la flexibilité nécessaire à l'exploitation des nouvelles énergies renouvelables et l'optimisation des moyens de productions.

Maryse François-Xausa
Vice-présidente R&D
Global et Produit
Alstom Hydro



Conclusion

Les enjeux énergétiques des 30 prochaines années peuvent sembler impossibles à atteindre tellement ils sont ambitieux et complexes.

Aucune solution ne pourra à elle seule satisfaire tous les besoins.

L'hydroélectricité, renouvelable par essence, éprouvée, efficace, flexible et stockable possède une combinaison unique d'avantages.

Elle offre un potentiel de ressource toujours très significatif et participera aux solutions d'avenir.

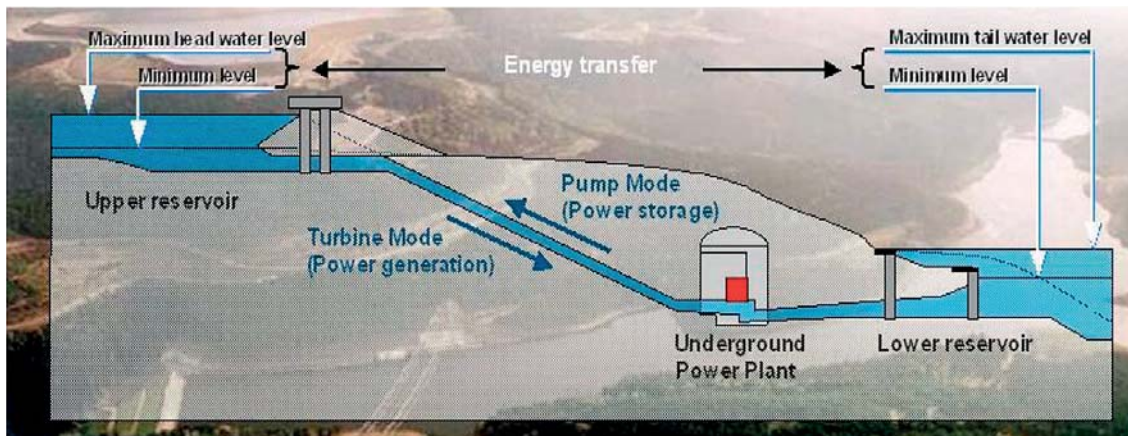


Figure 4: Schéma de centrale de turbinage pompage

1. International Energy Agency world energy outlook 2012

Évolution actuelle et avenir de l'hydroélectricité

L'hydro-électricité, facteur clé de réussite de la transition énergétique

LES PRINCIPAUX SITES DE PRODUCTION HYDRAULIQUE DU GROUPE EDF EN FRANCE



stockant de l'eau dans de grands réservoirs par gravité et par pompage reste le premier moyen utilisé pour assurer à tout instant l'équilibre entre production et consommation d'électricité.

La France métropolitaine dispose d'environ 9 milliards de m³ de réserves d'eau, dont les principales se trouvent dans les bassins-versants du Rhône, de la Durance et du Verdon, de la Garonne, de la Dordogne, et de la Loire, qui en ne considérant que la part du Bassin du Rhône située en France totalisent de l'ordre des deux tiers des réserves. Dans ces bassins, une vingtaine de grands barrages chacun à l'amont de plusieurs centrales hydroélectriques les font bénéficier de réserves totalisant 4,5 milliards de m³ (cf. carte des principales centrales).

Les 10 barrage usines sur le Rhin fournissent environ 10 % de la production hydroélectrique, sans réserve significative.

Disposer de réserves d'eau est également primordial pour assurer l'irrigation de vastes périmètres (Durance, Verdon, Garonne), et en situation de stress hydrique la qualité de l'eau (dans la plupart des bassins) et le refroidissement de certaines centrales nucléaires (Rhône, Vienne).

Quel rôle joueront-ils demain ?

Le talent des ingénieurs hydrauliciens vise aujourd'hui à rendre compatible l'apport crucial des barrages au plan énergétique : fournir de l'énergie de pointe mobilisable rapidement et sous une forte puissance, avec les autres usages de l'eau. Sans un stockage d'énergie électrique accru, l'augmentation considérable de la part des énergies renouvelables intermittentes prévu dans l'Union Européenne par développement de l'éolien et du photovoltaïque, augmentation nécessaire pour limiter les émissions de CO₂, mettrait en péril l'équilibre entre production et consommation d'électricité.

En France, à l'horizon 2030, l'éolien pourrait atteindre de 25 à 35 Gigawatt (GW), et le photovoltaïque de 20 à 30 GW, à comparer à un total d'environ 10 GW aujourd'hui.

Un barrage c'est certes aux yeux de l'ingénieur un ouvrage d'art, mais pour la société c'est en premier lieu un outil essentiel de gestion de l'eau. En France, une quinzaine de vallées équipées de grands barrages, pour la plupart gérés par EDF, rendent un service essentiel de production d'électricité, souvent de pointe, et de gestion intégrée de l'eau (irrigation, navigation, soutien des étiages). Moderniser l'aménagement de ces vallées permet une meilleure utilisation énergétique de cette ressource en eau et est aussi le meilleur moyen d'accompagner un fort développement de l'éolien et du photovoltaïque pour réussir la transition énergétique.

Quel rôle jouent les barrages en France aujourd'hui ?

L'hydroélectricité est la première source d'énergie renouvelable, qui apporte environ 65 Giga Wattheure par an avec une hydraulité moyenne. Durant les 50 dernières années, sa contribution à la fourniture d'énergie électrique a diminué de 50 % à 10 %, mais la puissance hydroélectrique a cru d'environ 15 000 à près de 25 000 Mégawatts (MW), du fait notamment de la construction de 5 000 MW de Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEPs). 25 000 MW, c'est 25 % de la puissance totale installée en France. Aujourd'hui, la souplesse de l'hydroélectricité obtenue en

Ce très fort développement devra d'abord être accompagné par une adaptation des matériels et du fonctionnement des installations hydroélectriques bénéficiant des réserves actuelles: des exemples en sont donnés ci-après. Quelques réserves nouvelles seront également nécessaires pour ajouter à des aménagements existants une Station de Transfert d'Énergie par Pompage.

En Asie, Afrique et Amérique du Sud, contrairement à l'Europe et à l'Amérique du Nord, un potentiel hydroélectrique considérable reste à exploiter: sa mise en valeur nécessitera la construction de nouveaux barrages.

Comment EDF agit-elle pour préparer cet avenir ?

Les moyens de rendre davantage de services en modifiant les installations hydrauliques existantes sont très variés.

En voici 3 exemples en cours de réalisation :

➤ Roselend et La Bathie

Cette centrale, l'une des plus puissantes de France (500 MW), peut grâce aux 200 millions de m³ stockés dans le barrage de Roselend et à sa chute très élevée (1 200 m) fournir à la demande plus d'un TéraWattHeure d'énergie de pointe. Ceci permet par exemple de « remplacer » un grand parc éolien offshore, 100 éoliennes de 5 MW, pendant 2 000 heures, dans les périodes – aléatoires – où ce parc ne produit pas faute de vent.

L'amélioration des performances des 6 groupes par remplacement des roues et injecteurs des turbines Pelton et reconstruction des alternateurs permet de porter la puissance à 600 MW, et de gagner de l'énergie renouvelable par accroissement du rendement. Ces groupes sont dans une usine souterraine (cf. photo 1).

Les débits turbinés rendus à l'Isère augmentent de 20 %, mais un bassin latéral ajouté au canal de fuite permet de continuer à démarrer la centrale en quelques minutes avec une variation de débit dans l'Isère rendue très progressive.



Photo 1 : La Bathie, usine souterraine.



Photo 2: Romanche Gavet, zone usine

➤ Romanche-Gavet

Dans le bassin de la Romanche, affluent du Drac, se trouvent deux réserves importantes, celle du Chambon (50 millions de m³) et celle de Grand-Maison (115 millions de m³).

À l'aval de ces réserves, depuis la fin du XIX^e siècle, le cours moyen de la Romanche est équipé de 6 chutes en série sur un dénivelé total de 300 m environ. Une centrale unique à Gavet – en cours de construction – les remplacera. Grâce à des pertes de charge réduites, à un meilleur rendement et à une disponibilité accrue cette nouvelle centrale procurera de l'ordre de 150 Gwh d'énergie renouvelable supplémentaire. C'est l'énergie électrique obtenue en posant 20 m² de panneaux photovoltaïques sur 50 000 maisons.

Ce chantier – le plus important chantier hydraulique en France aujourd'hui (cf. photo 2 zone usine) améliorera l'aspect de la vallée en substituant à des ouvrages apparents obsolètes des ouvrages souterrains, et rétablira un débit de base plus régulier dans le cours moyen de la Romanche. Ce débit de base ne variera pas en cas de déclenchement des groupes grâce à un dispositif original de dissipation d'énergie à côté de la centrale qui assure la continuité de l'écoulement dans les adductions.

La déconstruction des anciennes installations est une opportunité pour rétablir les continuités écologiques aquatiques et terrestres, revégétaliser les berges et replanter des espèces favorables à l'installation des espèces animales locales.



Photo 3: Le Cheylas, puits groupe.

➤ Le Cheylas

L'Arc, affluent de l'Isère, bénéficie d'une réserve de tête importante, au Mont-Cenis (260 millions de m³), valorisée par plusieurs chutes d'un dénivelé total d'environ 1 600 m, dont la plus en aval est le Cheylas. Le Cheylas améliore le placement des apports de l'Arc par pompage turbinage entre deux bassins journaliers. Le bassin aval (4 millions de m³) assure une restitution sans à-coup des débits dans l'Isère.

La centrale est équipée de deux groupes réversibles de 240 MW, mis en service en 1979. Ces groupes sont installés dans des puits (cf. photo 3) afin d'obtenir l'enfoncement nécessaire à la marche en pompe.

Il y a 35 ans, des machines électriques de grande puissance à vitesse variable n'existaient pas. La vitesse fixe oblige lors du fonctionnement en pompe à fonctionner en « tout ou rien », alors que les groupes hydrauliques en turbine peuvent par réglage hydraulique et non électrique changer très vite (en quelques dizaines de secondes) leur puissance et contribuer ainsi au réglage de la fréquence du réseau.

L'un des groupes du Cheylas sera en 2016 converti à vitesse variable. Les bénéfices attendus de cette conversion sont un rendement turbine plus élevé et un domaine de fonctionnement plus étendu en pompe qui, avec le passage à vitesse variable de la machine électrique, permettra de disposer d'une plage de réglage de 80 MW (la plage de réglage en pompe au Cheylas sera est un peu plus étendue). Une telle plage permettra de compenser – la nuit, période durant laquelle il y a moins de groupes de production en fonctionnement – les variations de production d'une centaine d'éoliennes. ■

Henri Jacquet-Francillon (79)

Chargé de mission auprès du Directeur Délégué Développement de la Division Production Ingénierie Hydraulique d'EDF



Le « modèle CNR » porteur du développement durable des territoires

Concessionnaire du plus puissant fleuve français, la CNR en assure l'aménagement et l'exploitation selon 3 missions financièrement solidaires : la production d'hydroélectricité, la navigation, l'irrigation des terres agricoles. Depuis la libéralisation du marché de l'énergie, la CNR développe un mix énergétique basé sur l'hydraulique, l'éolien et le photovoltaïque, qui la positionne en leader français des énergies renouvelables. Son développement tant en France qu'à l'international s'appuie sur son modèle d'entreprise, exemplaire et unique, qui associe performance économique et redistribution aux territoires.

Le contexte rhodanien avant 1920, l'émergence d'une stratégie

Le Rhône a été et reste une artère de communication empruntée pour des échanges économiques avec la Suisse, et surtout le nord de la France et même l'Europe, via la Saône.

Son caractère tumultueux est à l'origine de travaux d'amélioration des conditions de navigation, les plus ambitieux et efficaces étant l'installation des ouvrages Girardon (à la fin du XIX^e) fixant un lit mineur au détriment de la mobilité latérale du fleuve. Cependant, le développement du rail concurrence la navigation souvent tributaire des caprices du fleuve.

Au début du XX^e siècle, des ambitions et des pressions diverses entre usagers et politiques ralentissent les projets de valorisation du fleuve. La navigation seule ne suffit pas à enclencher une dynamique autour de la voie d'eau.

Après la première guerre mondiale, la prise de conscience nationale de la richesse que constitue l'hydroélectricité (loi de 1919) va véritablement orienter les projets d'aménagement du fleuve vers trois objectifs, la navigation, l'irrigation et la production d'électricité dont la valorisation permettra le financement des autres objectifs.

Ainsi, après beaucoup de tergiversations, cette stratégie d'aménagement du territoire ne sera pratiquement plus remise en

cause. Bien au contraire, elle s'avère même avant-gardiste. Les enjeux perceptibles de développement pour la vallée conduisent les acteurs politiques à s'emparer du projet.

La CNR du XXI^e siècle, la réalisation de la stratégie et une nouvelle mutation

Il faudra la persévérance de Léon Perrier et D'Édouard Herriot pour aboutir à la promulgation de la loi du 27 mai 1921 appelée « Loi Rhône » approuvant un programme d'aménagement du fleuve, de la frontière suisse à la mer, pour développer les forces motrices, la navigation et les usages agricoles de l'eau.

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR), société anonyme d'intérêt général, est créée quelques années plus tard, en 1933, sur le modèle d'une société où se côtoient intérêts publics et privés, une première en France et dont le premier Président sera Léon Perrier.

La CNR reçoit en 1934 la concession unique du fleuve. L'aménagement du Rhône devient alors possible. Les premiers travaux concernent la plaine de la Crau, le port Edouard Herriot à Lyon et la construction de Génissiat, premier grand barrage hydroélectrique d'Europe à sa mise en service en 1948. 18 autres aménagements seront mis en service jusqu'en 1986 (*Carte ci-contre*). Pendant un demi-siècle, ces ouvrages seront exploités énergétiquement par EDF du fait de la nationalisation de l'électricité en 1946.



Terminal conteneurs
Port de Lyon Édouard Herriot.

À la suite de la loi du 10 février 2000 sur l'ouverture des marchés de l'électricité en Europe, qui libéralise en France la production d'électricité, la CNR est reconnue comme producteur indépendant d'électricité. Elle devient, en 2003, producteur de plein exercice et est dotée de nouveaux statuts. Son capital s'ouvre avec l'entrée de GDF SUEZ, via Electrabel, aux côtés des collectivités locales et de la Caisse des Dépôts et Consignations.

En juillet 2003, un avenant au cahier des charges général de la concession de la CNR confirme les missions historiques, impose une redevance de 24 % sur le chiffre d'affaires de la production d'électricité et ajoute un schéma directeur de missions d'intérêt général (MIG) à la concession du Rhône. Ce dernier sera décliné en plans à 5 ans regroupant des actions autour de l'énergie renouvelable, de la navigation, de l'environnement et de l'ancrage local.

En l'espace d'une décennie, l'entreprise s'est imposée sur le marché de l'énergie. Elle a modernisé et optimisé son outil industriel avec un haut niveau de sécurité, développé un mix énergétique 100 % renouvelable basé sur l'hydraulique, l'éolien et le photovoltaïque et a su combiner croissance rentable dans les énergies renouvelables et contribution au développement économique de son bassin.

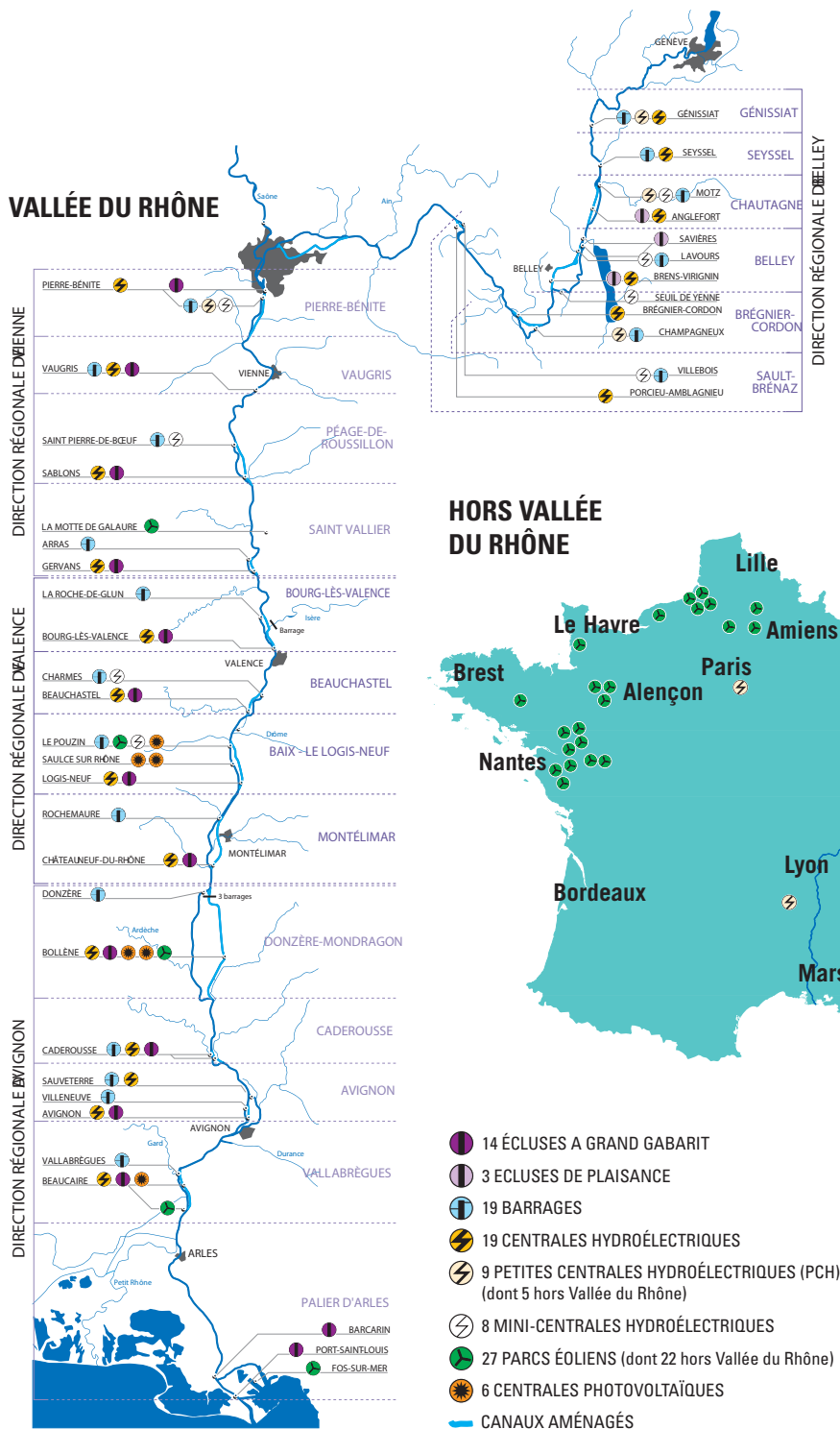
Les atouts du « modèle CNR », acteur du développement durable des territoires

Atouts économiques

La CNR a démontré qu'elle répond, aussi bien à sa vocation première d'aménageur du territoire qu'à sa mission industrielle de producteur d'électricité. Elle a su associer les enjeux de la vallée, portés par les décideurs des collectivités locales traversées par le fleuve, avec la dimension économique et industrielle de sa concession, dans une stratégie « partenariale et solidaire » comme le souhaitent ses fondateurs.

Le fleuve soutient aujourd'hui le développement économique de la Vallée du Rhône:

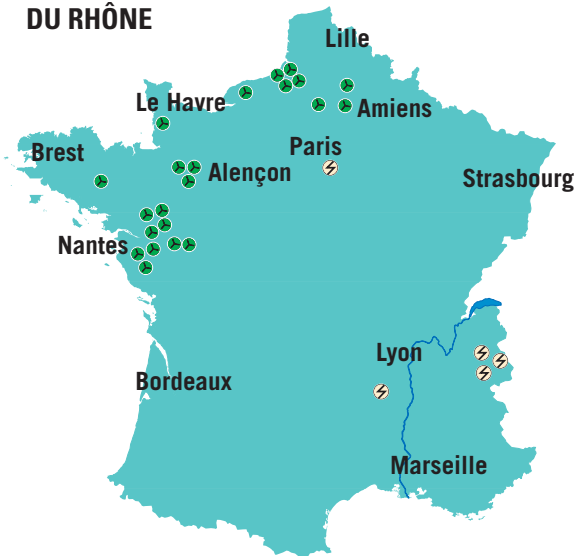
- 5 millions de tonnes de marchandises transitent sur le fleuve via les 14 écluses à grand gabarit ouvertes 355 J/an



CARTE DES AMÉNAGEMENTS DE LA CNR
01/09/2013

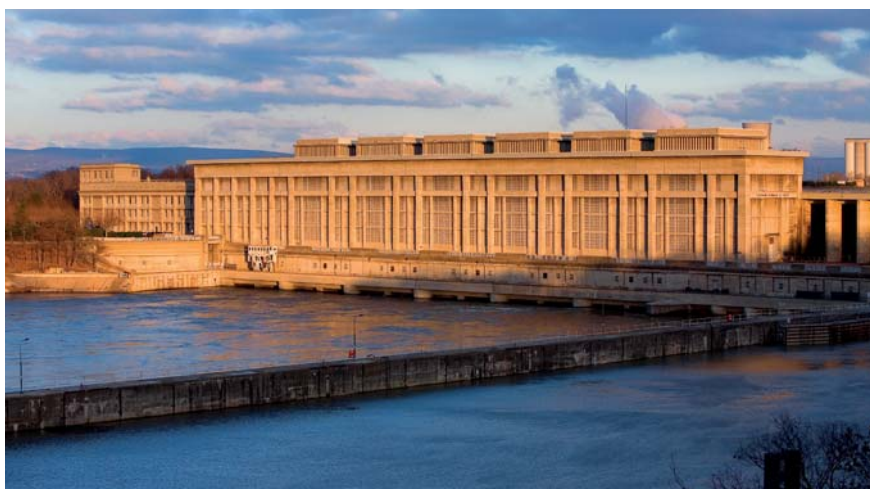
- 29 sites industriels et portuaires maillent le corridor rhodanien, générant plus de 4500 emplois
- 120 000 hectares de terres agricoles sont irrigués
- 25 % de l'hydroélectricité nationale, soit la consommation de 6 millions d'habitants est issue du Rhône.

HORS VALLÉE DU RHÔNE

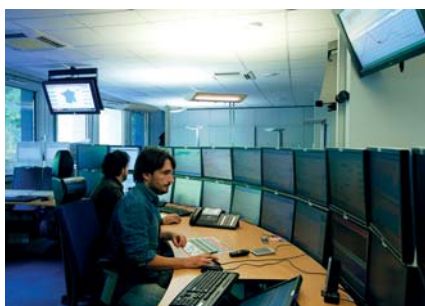


- 14 ÉCUSES A GRAND GABARIT
- 3 ÉCUSES DE PLAISANCE
- 19 BARRAGES
- ⚡ 19 CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES
- ⚡ 9 PETITES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES (PCH) (dont 5 hors Vallée du Rhône)
- ⚡ 8 MINI-CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES
- ⚡ 27 PARCS ÉOLIENS (dont 22 hors Vallée du Rhône)
- ☀ 6 CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES
- CANAUX AMÉNAGÉS

Cette dynamique est financée par la pérennité d'origine qui concilie depuis longtemps intérêts économiques et intérêts sociaux et donne toute sa force au modèle CNR. Un modèle qui a donc fait ses preuves, bien avant les ambitions que l'on voit poindre en accompagnement de nouveaux projets hydroélectriques.



Centrale-écluse de Bollène.



Le Centre de Téléconduite du Rhône ajuste, en temps réel, la production des centrales hydroélectriques.



Construction de la petite centrale hydroélectrique et de la passe à poissons à Rochemaure.

Atouts énergétiques et industriels

La CNR a choisi d'associer son développement à celui des énergies renouvelables, convaincue qu'elles représentent, grâce aux nouvelles technologies, un moyen d'atteindre les objectifs climatiques tout en contribuant à la sécurité d'approvisionnement et à l'indépendance énergétique.

Utilisant les technologies les plus avancées, l'entreprise a développé de nombreux outils informatiques concourant à la modernisation et à l'optimisation de la production électrique. Ces nouveaux moyens permettent d'augmenter la fiabilité, la disponibilité et la souplesse de la production journalière qui peut être ajustée en infra-journalier, en fonction d'éléments externes (météo ou incidents) ou de signaux du marché.

L'expertise acquise dans le domaine de l'hydrométéorologie, déclinée au vent et au soleil, permet, dès aujourd'hui, de mettre en œuvre des programmes de production qui combinent hydraulique « souple », production éolienne, production solaire et stockage d'énergie (comme par exemple la recharge de véhicules électriques au moment opportun). Cette approche globale de la « responsabilité d'équilibre » permet, par l'anticipation et le foisonnement, de diminuer de façon très importante l'un des inconvénients le plus souvent cité dans le déploiement des énergies renouvelables : l'intermittence de la production.

L'entreprise consacre ses efforts de recherche, d'innovation et de développement à favoriser la souplesse des actifs hydrauliques mais aussi à toutes les technologies vers « l'aval » permettant, par le biais des technologies internet, de gérer tout type de consommation « souple », palliant l'intermittence du renouvelable.

Atouts territoriaux

Les missions d'intérêt général (MIG), dont le contenu est basé sur la concertation, traduisent l'évolution et l'adaptation de l'entreprise aux problématiques et attentes de la société actuelle.

Les MIG se répartissent selon quatre volets : l'énergie, la navigation, l'ancrage local et l'environnement. Sur les dix dernières années, ce sont plus de 30 m€ par an qui ont été investis au profit des politiques territoriales.

4. Le « modèle CNR » pour le futur

Aujourd'hui, l'inflexion brutale donnée en Europe par les différentes « transitions énergétiques » se traduit par l'introduction d'une masse considérable d'énergie renouvelable dans le système électrique européen. Cette énergie fluctuante semble fragiliser les grands équilibres structurels du réseau interconnecté. Les grands opérateurs historiques, centralisés, doivent faire face à l'arrivée de ces nouveaux moyens décentralisés et diffus.

La CNR montre qu'elle gère efficacement, à une échelle régionale et locale, la volatilité du photovoltaïque et de l'éolien, en les adossant à des moyens de production hydraulique et qu'elle répond efficacement au marché. Ses résultats financiers en sont la preuve.

Peut-on s'inspirer de ce « modèle CNR », résolument moderne, souple et capable encore de s'adapter aux évolutions futures ?

Il répond à la logique de décentralisation qui prévaut au développement des ENR, dans la stratégie européenne des objectifs climat-énergie (20/20/20) et dans une gestion de l'intermittence qui prend en compte de façon efficace la chaîne aval. Il assure une redistribution locale de la valeur, issue de matières premières locales (le vent, le soleil et la pluie), ce dont nos territoires ont grand besoin dans le contexte économique actuel.

Pour nous, ce modèle contribue à répondre aux défis énergétiques et économiques de la transition énergétique. Il est porteur de progrès et d'innovation ; il est vertueux car inscrit dans une logique d'adaptation continue au développement et est une valeur sûre pour les territoires qui sont associés à sa gouvernance.

Bruno Mathex
(CNR)
Directeur



Guy Collilieux
(CNR)



Les barrages français et la sûreté

1. Un rapide aperçu de la réglementation française relative à la sûreté des barrages

La réglementation traduit et organise les attentes collectives. Même si la mémoire de la société se dissipe dans le temps, les grandes catastrophes passées restent présentes dans les mémoires et/ou réapparaissent périodiquement. Tel ou tel article sur l'état du patrimoine, telle émission de télévision sur des événements passés remet en lumière les grandes catastrophes et, pour la France, la rupture en décembre 1959 du barrage de Malpasset n'est jamais très lointaine. Même lorsque des barrages ne sont pas directement concernés, une inondation majeure, surtout lorsque ces effets sont amplifiés par la rupture d'une digue, participe à l'émergence de la notion de risque associé aux ouvrages hydrauliques. La société française moderne attend que les risques ne soient pas cachés, qu'ils ne relèvent plus du domaine privilégié des ingénieurs, mais qu'ils soient, au contraire, identifiés, connus, affichés et, bien entendu, maîtrisés. Les attentes de la société s'expriment bien entendu aussi au travers du travail parlementaire et législatif. La loi sur l'eau et les milieux aquatiques de décembre 2006 ouvrait les voies en prévoyant certaines des dispositions mises en œuvre ultérieurement comme la nécessité de réaliser des études de dangers pour certains ouvrages. Elle renvoyait vers un décret publié en 2007 et dont on présentera les grandes lignes ci-après. On peut également citer le rapport publié par le député Christian Kert, au nom de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques.

Le cadre réglementaire concernant la sécurité des barrages est finalement totalement renoué par un décret signé le 11 décembre 2007; ce décret traite à la fois des barrages et des digues de protection contre les inondations.

Le décret 2007-1735 introduit ou confirme plusieurs aspects fondamentaux :

- ▶ Les propriétaires des barrages sont responsables de la sécurité de leurs ouvrages;
- ▶ Les petits barrages représentent des potentiels de dangers non négligeables;



Voies Navigables de France utilise le barrage de Torcy-Neuf (Saône et Loire) pour l'alimentation en eau du Canal du Centre. Construit dans les années 1880, cet ouvrage a été conforté en 2008-2010, sur la base d'un projet approuvé par le CTPBOH, avec notamment construction d'un nouvel évacuateur de crues.

- ▶ La démonstration, par le propriétaire d'un ouvrage, du niveau de sécurité implique le respect de certaines obligations dont l'importance dépend des enjeux et de la taille des ouvrages;
- ▶ Les études de dangers voulues par le législateur constituent un outil privilégié, pour les barrages importants, d'identification des risques et des moyens permettant une maîtrise et une réduction de ces risques.





Le barrage de Pannecière (Nièvre), ouvrage à voutes multiples de 49m de haut, participe à la protection de Paris contre les inondations. Géré par l'Établissement Public Territorial de Bassin Seine Grands Lacs, il a fait l'objet en 2011-2013 d'un confortement destiné à en améliorer la sûreté.

Le décret, complété ultérieurement par plusieurs arrêtés et circulaires, introduit notamment :

- ▶ Une classification des barrages selon leur taille (la hauteur du barrage au-dessus du terrain naturel) et le volume d'eau qu'ils peuvent retenir. Les classes vont de A (les barrages les plus importants, d'au moins 20 m de hauteur) à D (petits barrages d'au moins deux mètres de hauteur). Il y a 320 barrages de classe A, autant de barrages de classe B, 1 300 barrages de classe C et des dizaines de milliers de barrages de classe D. La classe d'un barrage peut également être modifiée si l'importance des enjeux à l'aval le justifie. La figure 1 ci-dessous synthétise les règles de classement des barrages.

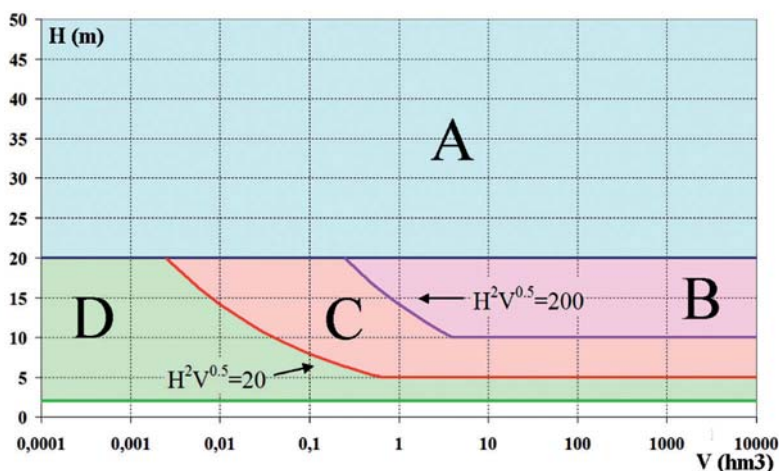


Figure 1: Classement des barrages

- ▶ L'idée que la sûreté d'un barrage passe par l'implication de son propriétaire (son organisation, l'établissement de consignes précises pour sa surveillance et pour le passage des crues...)
- ▶ Les études de dangers, obligatoires pour les plus grands barrages (classes A et B) et remises à jour tous les dix ans, explicitent les scénarios possibles de défaillance, mettent en évidence les points critiques, les barrières qui concourent à la sûreté. Elles étudient la probabilité, la vraisemblance des scénarios. Les conséquences des accidents potentiels sont estimées. Les scénarios sont positionnés en termes de risques et les moyens de maîtrise et surtout de réduction des risques sont identifiés.
- ▶ Les barrages de classe A sont soumis à des visites techniques approfondies annuelles dressant un bilan du barrage et de ses organes de sécurité. Pour les autres classes de barrages, la périodicité est diminuée.
- ▶ Certaines opérations de conceptions, de maîtrise d'œuvre, de diagnostics, d'analyse du comportement et ou encore l'établissement des études de dangers imposent le recours à des bureaux d'études spécifiquement agréés par l'État.

Les barrages sont, dans le domaine du génie civil, des ouvrages particuliers: la structure elle-même est totalement et directement dépendante des caractéristiques précises de la géologie locale, des fondations... Ceci explique pourquoi il n'existe pas réellement de barrages types comme il existe des ponts types et pourquoi la réglementation technique, qui suppose une certaine forme de standardisation, est dans ce domaine très peu abondante. Un arrêté ministériel, encore au stade de projet, se limitera à fixer les cas les plus importants en renvoyant aux règles de l'art pour ce qui est du détail des méthodes de vérification du niveau de sûreté.

2. Le contrôle par les services de l'État

L'État, garant de la sécurité publique, fixe par la réglementation des prescriptions auxquelles chaque propriétaire de barrages doit minima répondre. Ce sont les études de dangers, les consignes, les visites périodiques, les dispositifs d'auscultation... Cités précédemment. Par ailleurs, l'État peut, en complément des dispositions générales, imposer des prescriptions particulières.

Sous l'impulsion de la Direction Générale de la Prévention des Risques du ministère chargé de l'écologie, les services déconcentrés de l'État (les DREAL: directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement), sous l'autorité des préfets, veillent au respect des obligations générales ou spécifiques qui s'imposent au propriétaire de chaque barrage.

Il s'agit avant tout d'un contrôle régalien de conformité; dans le cas de non-conformité, la réglementation prévoit des suites possibles à l'encontre des propriétaires.

D'une certaine manière, ce contrôle constitue aussi un contrôle de deuxième niveau de la qualité de l'action du propriétaire. Ce contrôle va au-delà du strict respect des échéances, de l'existence formelle des dossiers et des documents obligatoires. Sans diminuer la responsabilité du propriétaire, les services de l'État portent aussi un regard technique parallèle sur le contenu des justifications présentées en les approuvant ou en les critiquant, sur l'état de l'ouvrage à l'occasion d'inspections périodiques (qui permettent de juger de l'efficacité de l'entretien, la maintenance et la surveillance mis en œuvre par le propriétaire et l'exploitant local).

Par ailleurs, lorsque la sûreté de l'ouvrage n'est pas garantie, les services de l'État peuvent prescrire la réalisation de diagnostics particuliers de sécurité qui permettent de définir et réaliser les éventuels travaux de confortement qui seraient nécessaires. Il s'agit d'une procédure dite de révision spéciale qui prescrit non seulement des études mais aussi des délais pour la mise en œuvre des travaux de confortement.

3. Les compétences et l'expertise

On l'a vu, le domaine des barrages est peu couvert par une réglementation technique comme c'est le cas dans d'autres secteurs du génie civil: pas d'Eurocodes, pas de DTU, pas de normes... Concevoir, construire, surveiller, contrôler: toutes ces opérations relèvent du champ de la compétence, voire de l'expertise et de règles de l'art. Ces dernières sont formalisées parfois mais pas toujours.

Dans ce contexte, les associations professionnelles jouent bien entendu un rôle primordial. Elles servent de relais d'expériences, d'échanges. Bien entendu, le Comité Français des Barrages et Réservoirs



Site CFBR.

(CFBR – www.barrages-cfbr.eu), l'un des tout premiers comités nationaux et un des fondateurs de la Commission Internationale des Grands Barrages, fournit l'effort essentiel en ce domaine. Par son activité au sein de la CIGB, en étant activement représenté au sein des comités techniques de la CIGB ainsi que par des communications à l'occasion des congrès et symposiums organisés par la Commission, il est l'un des vecteurs de la diffusion des méthodes françaises (notamment auprès des pays francophones) et inversement du partage de l'expérience des autres pays.

De plus, le CFBR a entrepris un effort majeur d'harmonisation des pratiques dans des domaines essentiels comme par exemple le calcul des barrages-poids ou des barrages en remblai ou encore le dimensionnement des évacuateurs de crues. Ces recommandations constituent en quelque sorte les règles de l'art collectif du CFBR et elles sont un support important et prometteur pour alimenter la formation des jeunes ingénieurs.

Enfin, le CFBR s'est donné comme objectif, depuis plusieurs années, d'organiser des colloques techniques, des symposiums ouverts à l'ensemble des professionnels. Le succès des manifestations récentes montre tout l'intérêt qui trouve la profession.

La France possède aussi, au sein de l'administration, d'une structure d'expertise sinon unique, du moins peu fréquente dans les autres pays: le CTPB, créé par un décret du 20 juin 1960 et devenu CTPBOH (comité technique permanent des barrages et ouvrages hydrauliques) en 2007 par le décret déjà cité. Ce comité d'experts émet des avis systématiques sur les projets d'ouvrages neufs importants, sur leurs réparations ou renforcements. Ceci construit, au fil du temps, une autre approche des règles de l'art. Grâce à la confrontation de l'avis du CTPBOH, des rapporteurs auprès de ce comité et des représentants des maîtres d'ouvrage et bureaux d'études, se dégagent des lignes directrices communes qui marquent la pratique française. Par ailleurs,

les membres du CTPBOH sont présents au sein de la commission exécutive du CFBR. La France identifie, comme bien d'autres pays, la question du passage de la compétence entre générations comme essentielle. Les formations spécialisées en hydraulique, en génie civil « barrages » existent fort heureusement dans bon nombre d'école ou organismes de formation. La formation continuée apporte les compléments nécessaires au cours de la vie professionnelle des ingénieurs. La relance déjà signalée des colloques et symposiums organisés par le CFBR est un élément très prometteur. Le Comité Français des Barrages et Réservoirs fait en outre un effort particulier pour faire adhérer et participer les jeunes générations à ses travaux.

Patrick Le Delliou
 Directeur du BETCGB¹
 Président honoraire
 du CFBR



1. BETCGB: Bureau d'étude technique et de contrôle des grands barrages, MEDDE/DGPR/SR/NH/STEEGBH

Déplacements de populations et construction de grands barrages

100 témoins parlent des aménagements de la Dordogne

Les travaux des Sciences Humaines et Sociales (SHS) coexistent avec ceux des ingénieurs pendant toute la vie des barrages, au moins lorsque ces barrages sont construits depuis une trentaine d'années en suivant les normes internationales.



© Photo A. M.

Le château de Val, finalement épargné par le barrage de Bort, dont la hauteur a été revue à la baisse. Il était vu en contre-haut depuis la rivière, la route et le chemin de fer.

Le besoin des SHS est reconnu comme vital et obligatoire par la Banque Mondiale¹ et la Société Financière Internationale, par la Commission mondiale des barrages (WCD) et la Commission internationale des grands barrages (CIGB/ICOLD), sans oublier les Principes Equateur adoptés par 10 banques commerciales internationales, pour ne citer que les organismes les plus connus.

À l'échelle nationale française, l'accompagnement des grands travaux d'infrastructures par les SHS, à commencer par les grands barrages, est assez discret, pour ne pas dire absent. Un programme de SHS se déroule actuellement autour des barrages de la Dordogne, il met en valeur le passé pour améliorer l'avenir.

André Coyne et la vallée de la Dordogne

Pour les bâtisseurs de barrages, la vallée de la Dordogne est la Vallée d'André Coyne. On retrouve la marque de ce brillant ingénieur et architecte au long des gorges de la Dordogne, dans les 5 grands barrages construits entre 1932 et 1957 : Marèges, l'Aigle, Bort-les-Orgues, le Chastang et le Sablier d'Argentat.

Jean-Louis Bordes souligne les nombreuses innovations du barrage de Marèges « alors le plus haut barrage-voûte à double courbure d'Europe (90 m) », sur lequel André Coyne réalise le système d'auscultation de la voûte par témoins sonores qui est toujours en usage, l'évacuation des crues par « saut de ski », et met en place des tirants à grande capacité pour assurer la stabilité de la culée poids en rive droite². Pendant la guerre, Coyne construit un second barrage-voûte, à l'aval de celui de Marèges où était installé l'occupant. Il concentre pour la première fois au barrage de l'Aigle « les fonctions barrage, déversoir, usine hydroélectrique, avant de le faire à ceux de Saint-Etienne-Cantalès, Bort-les-Orgues et Monteynard ». (Bordes 2010). La position de ces barrages dans le paysage en fait un patrimoine

architectural et industriel enchâssé dans leur écrin de verdure au milieu des bois, ils vous surprennent au tournant des routes forestières des gorges de la Dordogne. Pourtant, sait-t-on à quel point ces barrages ont transformé la vie des anciens riverains ?

Pour les populations locales également, le nom d'André Coyne résonne toujours autour du barrage de l'Aigle, surnommé le barrage de la Résistance. On montre la maison de Crouzit-Haut, où Coyne vécut avec sa famille pendant près d'une décennie. Deux anciens ouvriers du barrage de l'Aigle vivant à Chalvignac témoignent : « c'était un saint, toujours prêt à nous soutenir » ; « je suis tombé d'un échafaudage et il est venu me voir le jour même à l'infirmerie ». Une dame de Mauriac, institutrice retraitée et mère de jumeaux, parle avec chaleur d'André Coyne. Il venait au Moulin de ses parents à Spontour pour choisir les fruits et les légumes du repas familial. « Il avait reçu au barrage de l'Aigle une vingtaine de jeunes Polytechniciens venus de Paris. Nous déjeunions tous à la même cantine d'Aynes. Monsieur Coyne a proposé aux jeunes ingénieurs d'aller dire bonjour aux jumeaux : « Allons rendre visite aux futurs Polytechniciens ! Dit-il. »³ L'aimable boutade est devenue un heureux oracle car les deux enfants furent de la promotion 1963 de l'X.

Les archives orales des barrages

Ces témoignages font partie de la campagne d'archives orales en cours sur la vie avant et pendant la construction des barrages de la Dordogne. L'initiative est venue des maires du Plateau Bortois pendant la fête des 60 ans du barrage de Bort-les-Orgues en été 2011. Comme chaque décennie, l'exploitant hydroélectrique fêtait la prouesse technique que représente ce barrage. Comme pour les célébrations précédentes, les « gens de la vallée » et leurs amis à Bort, à Lanobre et à Port-Dieu, regrettaient que la commémoration continue

à ignorer les populations sacrifiées « au progrès ». Or, l'attachement au territoire de ces familles expropriées entre 1946 et 1950 est tel qu'un grand nombre est resté sur place, perpétuant leur ressentiment contre le lac qui a englouti leur passé familial. 120 familles ont été expropriées d'une vallée fertile où certaines propriétés approchaient les 100 hectares, la moyenne était de 15 à 25 ha. Cette vallée était prospère grâce à la liaison directe avec Paris par le train, et par la desserte de 4 petites gares issues du Plan Freycinet de la III^e République. Le chemin de fer est désormais sous le lac. Le chef-lieu d'arrondissement de Port-Dieu n'a été reconstruit à Confolent qu'après une longue lutte de ses habitants, aidés par H. Queuille, mais trop tard. Il n'a pas pu accueillir les malheureux déplacés qui ne voulaient partir à aucun prix. Le château de Val, joyau médiéval d'Auvergne, a perdu toutes ses terres agricoles, rendant son entretien par la famille d'Arcy impossible.

Mesdames les maires ont donc pensé qu'il était urgent de donner la parole aux invisibles, aux oubliés de l'histoire de ces barrages. Effectivement, la plupart des témoins avaient entre 10 et 30 ans à l'époque du déplacement « involontaire » de leur famille et ils avancent en âge. Le regard comparatif porté par un anthropologue s'est imposé. Il était pertinent de transposer une expérience internationale à une échelle régionale pour chercher à comprendre ce qui s'était passé, localement, « chez nous ». Le groupe EDF a accepté de jouer le jeu avec Armelle Faure, anthropologue qui possède une expérience de 30 ans sur les barrages, dont près de 20 ans de travaux effectués avec la Banque Mondiale auprès des populations locales, dans les plans de réinstallations en Afrique, en Chine et à Madagascar.

Localement, il était nécessaire de rénover l'image de cette infrastructure hydroélectrique auprès des populations riveraines. Les Conseils Généraux de la Corrèze et du Cantal ont établi un partenariat avec le Groupe EDF



© Photo R. G.

et avec l'anthropologue pour créer un fonds qui n'existait pas auparavant dans les archives départementales. Il est composé aujourd'hui des témoignages oraux et des documents privés que les familles souhaitent déposer pour préserver cette mémoire de la vallée (dossiers d'expropriations, photos, lettres, dessins etc.). Le caractère officiel de la démarche renforce le sentiment de reconnaissance symbolique pour les déplacés. Les expropriés passent du statut de victimes du progrès, négligés par l'industriel et oubliés par le pouvoir central, à celui d'acteurs de l'histoire, porteurs d'une parole qui permettra de ne pas oublier leur vallée, ni la vie de leurs ancêtres. Leurs récits participent désormais à la grande histoire de la performance énergétique.

Le programme a considérablement arrangé les relations entre l'exploitant et les populations locales. Pour la première fois de leur vie (peu d'entre eux avaient parlé de ce choc auparavant) les témoins ont accepté d'exposer ce qu'a signifié pour leur famille ce déplacement « involontaire ». La France de l'époque n'était pas riche. Elle sortait de la seconde guerre mondiale et il fallait financer la guerre d'Indochine. En outre, l'inflation monétaire a provoqué une érosion continue des indemnités compensatoires d'expropriation. Les familles qui ne parvenaient pas à s'arracher au plus tôt du bord de la Dordogne et à s'extirper du projet familial de leurs parents, celles qui sont restées jusqu'à la submersion de leurs fermes et de leurs maisons, n'ont pas trouvé de terres de substitution d'une valeur équivalente à ce qu'elles possédaient. Beaucoup ont préféré rester là, par affection, malgré une forte baisse de leurs ressources. Pour ces populations, la problématique posée fut la suivante : comment passer du paysannat, et du

Mme Bonhomme, née Rivière. Sa famille a perdu son exploitation de 65 ha de terres agricoles sous le lac de Bort.



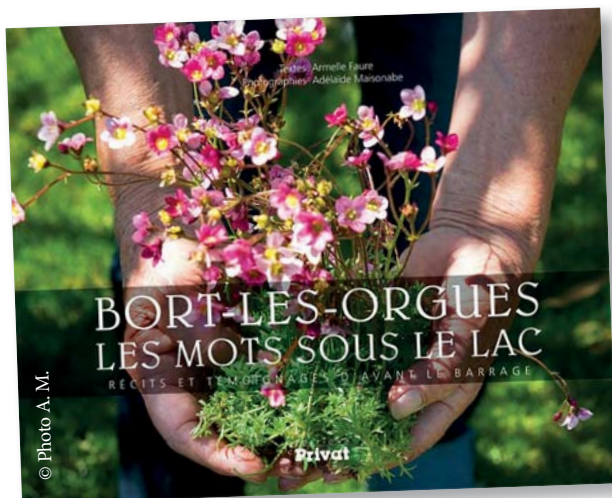
© Photo A. F.

Mr Farges, Argentat. Son père a fait exploser leur maison et leur auberge, à l'expropriation causée par le barrage du Sablier.

1. A commencer par la fameuse OP. 4.12 « Involuntary Resettlement » sur les déplacements de population, qui associe la réinstallation et la réhabilitation des ressources au delà d'un simple et traumatique déplacement « involontaire ».

2. <http://centrale-histoire.centraliens.net/divpdf/barrages-JLB.pdf>

3. Extraits d'Arch. dép. Corrèze : Cotes 11AV61 et 11AV62. Arch. dép Cantal : Cotes 4 AV 496/1 et 4 AV 496/2.



Couverture du livre
« Bort-les-Orgues, les Mots sous le Lac »

projet familial opiniâtre de transmettre la maison, la ferme et l'activité agricole, à d'autres sources de revenus? Quelques-uns, au contraire, ont su saisir les opportunités qui se présentaient. La génération suivante a quitté le paysan

pour devenir entrepreneurs, ou grâce aux études supérieures, ils/elles ont pu embrasser des professions de notabilité (mais ailleurs, sans racines, toujours considérés comme étrangers).

Un beau livre a été publié, reprenant ces témoignages, avec les photographies d'A. Maisonnabe, une jeune Toulousaine: « Bort-les-Orgues, Les mots sous le lac »⁴. Le livre et les CD des enregistrements ont fait l'objet d'une remise officielle aux témoins et à leurs familles, à la Chapelle des manants, en présence de 5 agents du groupe EDF et des archives départementales. Une série d'actions s'en sont suivies (des émissions de radio, de télévision, avec les témoins, des conférences, des visites d'universitaires; une pièce de théâtre et un film ethnographique sont à l'étude), qui ont permis aux anciens expropriés d'avoir le sentiment réconfortant que leur vallée et leur histoire ne seraient pas oubliées. L'exposition des photos des témoins en grand format sur les murs de l'usine de Bort a « réparé » l'oubli antérieur. Ces actions symboliques ont eu un effet local fortement positif dont l'impact s'étend au-delà des descendants des 500 personnes qui ont dû quitter le bord de la Dordogne. Le programme a offert un apaisement et un soutien.

Les enseignements du passé

De cette expérience on retiendra bien sûr qu'il est moins risqué de bien préparer un programme de réinstallation avec l'accompagnement des déplacés dès le début du projet (Cerna 1985, Scudder 2005) que de fournir une simple somme d'argent aux déplacés. Le cas de Bort-les-Orgues montre aussi qu'il est parfois indispensable de traiter la question en ex-post. Les industriels, lorsqu'ils doivent rester longtemps sur un territoire, ont intérêt à interroger le passé, même s'il est douloureux, même lorsqu'il faut entendre des remarques désagréables. Pourquoi accumuler ces ressentiments, lorsque

les SHS ont les outils pour les réduire, par leurs connaissances des traitements symboliques? Revenir sur le passé n'est pas régressif pour un industriel, bien au contraire, il peut être nécessaire de faire face à la mémoire locale pour promouvoir les aménagements dans l'avenir. Dans cet esprit, il paraît indispensable et urgent de réaliser les archives orales de Tignes, ainsi que de collecter les témoignages des anciens habitants d'Ubaye, village disparu sous les eaux du lac de Serre-Ponçon, pour ne mentionner que deux fameux exemples français. Les SHS utilisent une approche cognitive, participative et symbolique, et fournissent des produits culturels.

EDF a accepté d'étendre la campagne SHS d'archives orales aux anciens riverains des autres barrages à l'aval de Bort, jusqu'à Argentan et Monceaux sur Dordogne, avec l'appui des collectivités territoriales. Pour le barrage du Chastang, travailler avec la mémoire locale permet aussi d'aménager l'avenir. Le village de Spontour, dernier village des gorges de la Dordogne qui n'ait pas été englouti sous les barrages, pourrait trouver une opportunité de développement local avec la construction de la station STEP de Redenat (Station de Transfert d'Énergie par Pompage). Les enfants des derniers gabarriers y vivent toujours, ils parlent avec enthousiasme d'une rivière anciennement « marchande », apte au transport des bateaux de charge jusqu'à Bergerac ou Bordeaux. L'étude de perception et des savoirs locaux a été faite par Armelle Faure, en comparant l'expérience locale des riverains de la station de pompage de Montézic/Couesque sur la Truyère (en fonctionnement depuis 30 ans) et le futur projet de station STEP de Redenat/Chastang sur la Dordogne. L'étude montre que l'attachement des habitants de Spontour à la rivière Dordogne est tel qu'il faudra aménager un plan d'eau stable pour obtenir leur adhésion au projet. Spontour a 43 résidents permanents et plus de 200 habitants pendant l'été, un pont actif entre Auvergne et Limousin, et on y trouve la continuité anthropologique des mêmes familles sur les bords de la Dordogne depuis des siècles.

L'objectif du projet de la vallée de la Dordogne est de réaliser 100 témoignages, ce qui représente une masse critique significative pour un fond d'archive orale (Descamps, 2001). Ce fonds sur « la vie avant les barrages et pendant leur construction » est le premier

à l'échelle mondiale d'après le Professeur Thayer Scudder, du California Institute for Technology. Le Professeur Scudder assure le suivi d'impact social de nombreux barrages à travers le monde, dont celui de Nam Theun 2 au Laos. Il mène le Gwembe Tonga Project autour du barrage de Kariba en Zambie depuis 1956 auprès des peuples nomades Tonga. C'est une expérience remarquable de suivi de l'impact humain des barrages sur le long terme. Les SHS fournissent du savoir et le transmettent, comme les ingénieurs « baragistes » ont l'habitude de le faire, en accumulant et en transmettant du savoir sur la résistance des matériaux, sur la mécanique des roches, sur la composition des bétons etc.

Ingénierie et anthropologie, un binôme porteur de sens

Les barrages de la Dordogne contribuent à la construction du savoir SHS sur les barrages à travers le monde. Les ingénieurs offrent, avec la revue *Centraliens*, l'opportunité d'un pont, décloisonnant les disciplines autour des ouvrages, pour relier ingénieurs et anthropologues, le social et le technique. Les SHS favorisent la mise en valeur des savoirs (Lévi-Strauss 1962), elles peuvent mettre en perspective la volonté des aménageurs avec celle des habitants, et devenir un outil d'aide à la mise en œuvre de futures infrastructures.

L'anthropologue conceptrice et réalisatrice de ce programme saisit l'opportunité de cette audience offerte par la revue *Centraliens* pour faire un appel à témoignage du côté des ingénieurs et des dirigeants. Les barrages hydroélectriques ont une inscription locale qui est largement mise en valeur dans ce projet. Les barrages sont construits par la nécessité d'augmenter la puissance énergétique et économique du pays. Ce fonds d'archives orales des barrages de la Dordogne recherche des ingénieurs qui ont participé à la construction, ils parleront de leur jeunesse comme les autres témoins. On recherche d'anciens dirigeants qui voudront témoigner de la volonté d'indépendance énergétique de la France, cause première de leur construction, ainsi que de la capacité à exporter nos savoirs. Un ingénieur des mines apporte un premier témoignage à ce fonds Dordogne. Il a vu construire le barrage de Marèges en suivant son père, directeur, ses souvenirs datent des années 1930-1935.



Tableau de Sonia Delaunay « le Prisme électrique »
(droit de propriété intellectuelle non connu)

La mise en perspective de ce « fonds », enregistré depuis le terroir des riverains, en passant par le génie civil, jusqu'aux voix des prises de décisions, aura ainsi l'originalité d'appréhender différentes échelles de savoirs. Elle confrontera les acteurs d'hier pour fusionner leur réconciliation dans la mémoire, reconstruite 60 ans après les faits. Les « 100 voix » du fond d'archives de la Dordogne composeront une centaine d'espaces chromatiques et sonores juxtaposés et fusionnés, à l'image du fameux tableau de Sonia Delaunay « le Prisme Électrique ». On répondra alors à la question : « comment faire d'une série de barrages hydroélectriques un dialogue entre les populations locales et les ingénieurs ? », comme André Coyne l'aurait souhaité pour la vallée de la Dordogne. ■

Armelle Faure
Ethnologue
(consultante internationale)



4. Il est présenté sous forme de vidéo courte sur le site web de Corrèze Télévision : http://www.correze-television.fr/videos/litterature-armelle-faure-bort-les-orgues-les-mots-sous-le-lac_1213.html

Bibliographie

- **Bordes Jean-Louis, 2010**
« Les barrages en France du XVIII^e à la fin du XX^e siècle. Histoire, évolution technique et transmission du savoir. », « Pour mémoire », la revue du Comité d'histoire, revue du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. N° 9, hiver 2010, p. 70-120.
- **Cernea Michael (Ed.), 1985**
Putting People First. Sociological Variables in Rural Development, Washington D.C., The World Bank.
- **Descamps Florence, 2001**
L'historien, l'archiviste et le magnétophone. De la constitution de la source orale à son exploitation, Paris, Comité pour l'histoire économique et financière de la France, 864 pages. Avant-propos de Dominique Schnapper.
- **Faure Armelle et Adélaïde Maisonnabe, 2012**
Bort-les-Orgues, les mots sous le lac : Récits et témoignages d'avant le barrage, Toulouse, Editions Privat, 96p.
- **Lévi-Strauss, Claude, 1962**
La pensée sauvage, Paris, Plon, 393 p.
- **Scudder Thayer, 2005**
The future of large dams: dealing with social, environmental, institutional and political costs, Earthscan Publications Ltd., pp. xvii + 389 pp.

Les barrages, un patrimoine essentiel, ou l'avenir du passé

Le cas de la France

Un grand barrage est probablement l'ouvrage d'art par excellence, le plus complexe, à la fois objet technique et monument. Les grands barrages existant sur le territoire français et les aménagements hydrauliques, dont ils sont un des maillons essentiels, constituent un patrimoine industriel, économique, technique, monumental et environnemental¹. Ce patrimoine toujours vivant, exceptionnel pour sa durée de vie très longue, est profondément inséré dans le territoire, l'économie et la société.



Digue de Jugon-les-lacs dans les Côtes d'Armor attestée dès 1240 - Vue aérienne Eole.

Il évolue en fonction des finalités qu'il satisfait, finalités qui varient dans le temps. Sa conservation, son adaptation et son entretien requièrent des moyens techniques et économiques conséquents. La réglementation publique agit au plan de sa sécurité qu'il faut assurer par la mise en pratique de procédures résultant de l'expérience et des progrès techniques. Cette réglementation agit aussi au plan des finalités avec les évolutions des lois sur l'eau par exemple. Si le développement de nouveaux barrages en France est limité par différentes contraintes et en premier lieu par le manque de sites, la connaissance de l'histoire du patrimoine apporte de nombreux enseignements précieux pour l'avenir.

L'inventaire

Il n'y a pas que des grands barrages (quelque 600 unités en ce début du XXI^e siècle), c'est-à-dire d'une hauteur supérieure à quinze mètres au-dessus du niveau de fondations

suivant cette valeur « raisonnable » retenue par la Commission Internationale des Grands Barrages. Des milliers de digues, en général en terre, mais aussi en maçonnerie, en moyenne de cinq à dix mètres de haut ont été construites depuis des siècles. Elles sont souvent organisées en système hydraulique, à l'échelle d'un ou plusieurs bassins-versants. L'histoire nous apprend que leur nombre a fluctué dans le temps au gré des évolutions industrielles et des pratiques de l'occupation de la terre. La dernière variation en France est l'explosion de leur nombre dû à la multiplication des lacs collinaires, conséquence de la Politique agricole commune (PAC). Ils ont servi à l'évolution technique par l'enseignement tiré de l'observation de leur comportement sur plusieurs siècles. Les plus anciens grands barrages français n'ont qu'un peu plus de trois siècles d'âge, alors qu'en Espagne deux grands barrages sont toujours en service, depuis près de deux millénaires. Les grands barrages se sont développés en France au XIX^e siècle mais surtout au XX^e siècle après 1920, principalement à des fins énergétiques.

Les données de l'histoire

L'histoire de ces ouvrages constitue donc une donnée fondamentale, tant dans le domaine technique qu'économique et social. Elle nous renseigne sur les raisons de leur existence, dont certaines dépassées ne sont plus explicites, et nous demeurent cachées. Au plan technique, elle participe à leur connaissance physique en vue d'une meilleure gestion, par le suivi de leur comportement. Sa transmission importe au plus haut point pour la sécurité des barrages, au titre des retours d'expérience. La connaissance technique et scientifique de ce type d'ouvrage participe d'une démarche collective internationale de type expérimental qui s'inscrit dans la durée. Chaque nouveau progrès naît d'un

apport précédent. Ce qui est vrai pour le progrès scientifique et technique est vrai aussi pour la naissance et l'élaboration des ouvrages eux-mêmes. Un barrage est le produit d'une méthode par approximations successives, qui est peut-être la meilleure à la fois pour trouver une bonne solution technique et la faire accepter par tous les acteurs concernés. Suivant l'échelle adoptée et l'angle d'observation, les auteurs d'un barrage et plus encore d'un aménagement sont nombreux. Personne ne peut se prévaloir d'être le père unique d'un ouvrage. L'histoire qui naît de la lecture du patrimoine nous enseigne cette alchimie subtile.

L'évolution des finalités

Le rôle des barrages pour la gestion de l'eau dans le monde reste essentiel. Mais chaque pays en a une pratique propre à sa géographie et à son histoire industrielle. L'importance de l'hydroélectricité en France s'inscrivait dans le prolongement d'une utilisation de l'énergie hydromécanique vieille de plusieurs siècles, et très tôt dans la recherche d'une indépendance énergétique. La conscience de la rareté de nos ressources en énergie fossile est prise dès le tout début du XIX^e siècle. Si cette finalité n'est plus autant soulignée dans les raisons de construire pour aujourd'hui, le capital existant demeure un atout qu'il faut préserver. L'hydroélectricité représentait encore 95 % des énergies renouvelables en France en 2008. Le développement de l'hydroélectricité est préconisé non seulement par le suréquipement des ouvrages existants mais aussi avec l'addition de nouveaux usages en dehors de la production d'énergie, et enfin par la réalisation de nouveaux barrages pour autant qu'ils ne contrarient pas les efforts en faveur de la biodiversité. Il est vrai que plus d'un siècle après ses premiers déve-

loppements, l'énergie hydroélectrique n'a rien perdu ni de son intérêt économique ni de ses avantages dans le domaine environnemental. L'hydroélectricité est en effet un des moyens de valorisation des énergies renouvelables à production intermittente comme l'éolien ou le photovoltaïque, qui sont en cours de développement. À partir de l'eau stockée dans les retenues, son délai de mobilisation de production est de l'ordre de quelques minutes. Le stockage d'énergie par pompage (STEP) est le seul moyen confirmé de stockage de l'énergie électrique. C'est aussi le champ de la mise en œuvre de très hautes technologies, ce qu'ont oublié ses détracteurs et une partie du grand public.

La connaissance technique

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

Le paysage, son appropriation et son évolution

Ces ouvrages, petits comme grands, ont façonné le paysage français. À la différence de tous les autres, ils viennent s'inscrire dans les lignes de force du paysage commandées par la géologie. Ils retiennent et guident l'eau. Ils transforment le paysage en effaçant celui d'origine. Mais leurs concepteurs ne sauraient le faire au mépris des lois de la nature, car « leur simple objectif technique serait déjà manqué » (André Coyne). Beaucoup, parmi les plus anciens et particulièrement les milliers de digues en terre, passent, aux yeux d'un public non averti, pour « naturels », alors que plus de 95 % des plans d'eau français de toutes dimensions sont le fait de l'homme. Il y a pour les grands barrages des caractéristiques monumentales qui en font de véritables créations architecturales, trop souvent sous estimées. La cicatrization des bouleversements appor-

tés au paysage et aux écoulements réserve des surprises. Hommes, animaux et plantes colonisent les nouveaux lieux, bouleversant les prévisions des aménageurs pour le meilleur et quelquefois le pire.

Un exemple en guise de conclusion²

Identifié dès 1857, dans le cadre d'une politique de lutte contre les crues à la suite des grandes inondations de 1856, le site de Serre-Ponçon sur la Haute Durance, fut le lieu d'études, de reconnaissances, l'objet de propositions non abouties pendant près d'un siècle. De 1952 à 1960 était réalisé un barrage en terre de 129 m de hauteur, stockant un volume de 1270 millions de mètres cubes, qui permettait une régularisation du cours de cette rivière impétueuse et son équipement énergétique jusqu'à l'étang de Berre au moyen de quinze usines en escalier représentant 25 % de l'énergie de pointe disponible en France.

Cet aménagement fut successivement envisagé pour le stockage des crues et pour l'irrigation. C'est la finalité énergétique qui permit, à partir de 1911, de bâtir un projet combinant fourniture d'énergie, réduction des crues, développement de l'irrigation, fourniture d'eau potable et plans d'eau pour les loisirs. L'impact bénéfique de Serre-Ponçon se fait sentir à l'échelle d'une région, de Gap à Marseille et Toulon. L'eau turbinée plusieurs fois sert ensuite à l'irrigation ou à la fourniture d'eau potable. Le marseillais qui se lave les dents ne peut imaginer le circuit de l'eau qu'il utilise.

Implanté dans un site particulièrement difficile pour le génie civil, Serre-Ponçon marque les débuts de la géologie appliquée aux barrages. C'est le lieu du transfert technologique des pratiques américaines de construction des barrages en terre, mais aussi de la réussite des injections des sols alluviaux. Cette technique, dans laquelle les Français sont passés maîtres, visait à constituer le barrage souterrain, élément indispensable à l'existence même du corps du barrage en élévation, selon un schéma répété de nombreuses fois à travers le monde.

Le barrage de Serre-Ponçon constitue, tant dans son existence avec toutes ses implications que par son histoire technique, économique et sociale, un patrimoine exceptionnel d'avenir. ■

Jean-Louis Bordes (58)
Docteur en Histoire



Le barrage de Grandval sur la Truyère, 1959, un exemple de l'élégance d'un barrage à voûtes multiples, hauteur 85 m.



Barrage de Serre-Ponçon sur la Durance, 1962 EDF.



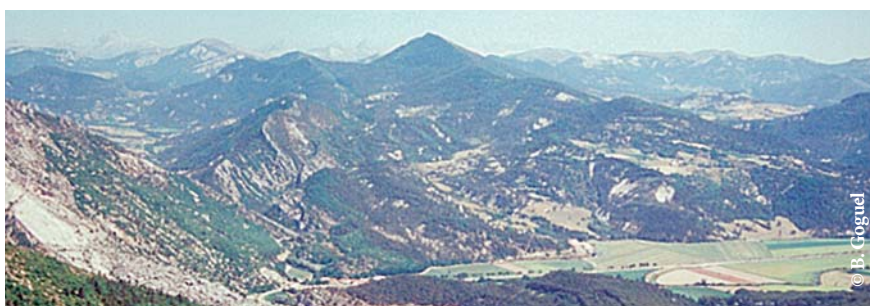
Lac de Serre-Ponçon, EDF.

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

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

Les barrages naturels

En plus des 50 000 grands barrages réservoirs construits par l'homme dans le monde, la nature en produit elle-même par glissements de terrains ou éboulements de flancs de montagnes, barrant des vallées et créant des lacs de retenue aux effets multiples. On en comptait 500 il y a une vingtaine d'années. Et le recul des glaciers laisse des milliers de lacs perchés, parfois menaçants.



1 - Le Claps et le Grand Lac.



1A - Le Claps

Exemples en France

Le **Claps de Luc-en-Diois** a barré la vallée de la Drôme **en 1442**, après glissement et dislocation d'un banc rocheux haut de 400 m. Le lac de retenue s'est rempli d'alluvions sur 70 m de haut en trois siècles, formant une plaine alluviale. Le contrôle des eaux par une galerie de trop-plein, libérant ces terres pour l'agriculture, fut imaginé dès 1752. Il a fallu 50 ans de négociations et travaux pour ce "saut de la Drôme"; le plateau cultivé s'appelle toujours "le Grand Lac".

La catastrophe de **Saint-Gervais en 1892** fit 175 morts: 200 000 m³ d'eau lâchés par le **glacier de Tête-Rousse** ont raviné les pentes en dessous et s'y sont enrichis en matériaux, formant ce qu'on appelle une *lave torrentielle*. Le flot ainsi épaissi a étalé 800 000 m³ de sédiments dans la plaine du Fayet, 12 km plus loin et 2,6 km plus bas. Dans ce glacier

toujours surveillé, une nouvelle poche d'eau fut détectée par géophysique (radar, résonance magnétique nucléaire) puis drainée par forages et pompages **en 2010**.

Au **glacier de Rochemelon**, un risque analogue fut paré d'urgence par siphonage en 2004: l'abaissement du glacier formant barrage de retenue allait libérer 650 000 m³ d'eau à 3 200 m d'altitude, par surverse puis érosion accélérée. Le lac fut vidé complètement l'été suivant.

Dans cette même Haute Maurienne, à l'amont de **Lanslevillard** se trouve un ancien barrage naturel haut de 250 m qui a fermé la vallée par éboulement de son flanc Sud après retrait du glacier Würmien. Son volume est estimé à 125 millions de m³, 8 fois le barrage du Mont-Cenis construit par EDF en 1968. Le **Col de la Madeleine** (alt. 1750) marque la crête du barrage d'éboulement, derrière lequel se sont accumulés les sédiments de la plaine de Bessans à 1700 m d'altitude. L'Arc a mis assez de temps à tailler sa gorge, pour que l'alluvionnement amont ait pu remplir la retenue sur 200 m d'épaisseur.

Quelques cas marquants dans le monde

Le tableau ci-dessous montre la diversité des volumes glissés ou éboulés, barrant les vallées sur des hauteurs H et des longueurs L. Les volumes de retenues sont très variables.

Nom	Pays	Volume	H (m)	L (km)	Date	Commentaires
Flims	Suisse	12 km ³	400	10	10 000 BP	Rheinschlucht
Usoy Dam	Tadjikistan	2,2	650	4	xx.02.1911	Lac Sarez
La Josefina	Equateur	0,035	90	1	29.03.1993	a tenu 33 jours
Yi Gong	Tibet	0,300	75	2	09.04.2000	a tenu 63 jours
Tangjiashan	Sichuan	0,020	120	0,8	12.05.2008	a tenu 29 jours
Attabad	Pakistan	0,050	130	2	04.01.2010	coupe la KKH

Le *Grand Canyon Suisse* (Rhin supérieur, **Flims**, Grisons) entaille un glissement record post Würm. En 1911 un séisme au Tadjikistan a déclenché un autre glissement record, qui retient aujourd'hui 17 milliards de m³ d'eau en tête de vallée à 3 265 m d'altitude, 45 m sous le débordement : le **lac Sarez**. Il continue à se remplir lentement malgré 50 m³/s de fuites.

En Équateur, en 1993, le glissement **La Josefina** a imposé une course contre la montée du lac pour abaisser le niveau de déversement en creusant un chenal d'évacuation; avec calculs de simulations de l'écoulement et de la rupture pour optimiser la forme du chenal et planifier l'évacuation des populations aval. Le débordement est survenu 15 m sous la crête initiale, après 33 jours de crise. La brèche s'est vite creusée et élargie, lâchant alors 170 millions de m³ d'eau avec une crue de débâcle dévastant la vallée, jusqu'à être encaissée par la retenue d'un grand barrage hydroélectrique situé plus loin, préalablement vidée.

15 ans plus tard, le séisme du Wenchuan (Ms 8.0) a déclenché 257 glissements créant des barrages naturels dans les vallées très encaissées de l'escarpement Est du plateau tibétain, en saison de pluies donc de hautes eaux. Études express de terrain, calculs d'inondations, analyses de risques et instrumentations guidèrent les stratégies de protection civile.

Une trentaine de barrages naturels furent entaillés d'urgence pour limiter les crues de débâcle et les inondations aval inévitables. À **Tangjiashan** il a fallu héliporter des engins pour abaisser à temps la retenue maximale de 10 m, la ramenant de 315 à 240 millions de m³; dont 160 furent relâchés à la rupture (photo 2).



2 - Tangjiashan.

Sur la **Yi Gong** (30°11'N, 94°57'E) en 2000, la rivière a forcé sa route toute seule dans la langue terminale d'une avalanche rocheuse descendue de 5200 à 2200 m d'altitude, sur 9 km. La crue de rupture a été jusqu'en Inde, inondant les hautes plaines du Brahmapoutre.

Aux confins Nord du Pakistan, la Karakorum Highway (**KKH**) suit la vallée de la Hunza vers la Chine dans une zone tectoniquement active de montagnes jeunes, raides, instables. Elle est coupée sur 20 km par le glissement et le lac d'**Attabad**. Depuis son débordement le 29 mai 2010, il n'a pas réussi à entailler le barrage. Un chenal profond de 24 m y a été creusé d'urgence (photo 3), puis élargi à 60 m et approfondi de 30 m par étapes, en trois campagnes hivernales de travaux à bas débits.



3 - Attabad © J. Environ. Treat. Tech.

Le chenal atteint 675 m de longueur en 2013, et permet de limiter les inondations amont. Mais 25 000 personnes restent isolées: le lac, encore profond de 76 m, coupe toujours cette vallée très encaissée et la KKH.

On craint souvent la crue de débâcle à la surverse. Ici le verrou est si épais, qu'il semble loin de lâcher tout seul. Mais cela s'était produit en Août 1858 à la débâcle d'un lac similaire, long d'une trentaine de kilomètres, dans la même vallée de a Hunza, créé par un éboulement rocheux plus localisé survenu en hiver 1858 à seulement 2 kilomètres en aval de ce site d'Attabad, depuis l'autre rive (gauche).

Plus bas dans la vallée de l'Indus, en Juin 1841, au pied du Nanga Parbat, la rupture d'un grand barrage rocheux formé



4 - Dig Tsho (Népal) en 2009. La rupture de ce barrage morainique en 1985 a causé plus de 3 millions de dollars de dégâts, et bouleversé les populations en aval pendant plusieurs mois.



5 - Lac Paron en 1968.

fin 1840, fut catastrophique : le lac, long de 65 km, se vida en 24 heures, relâchant 6 milliards de m³ d'eau et ravageant la plaine à 400 km de là [1].

Barrages et lacs glaciaires

Le retrait des glaciers laisse des moraines frontales et latérales retenant des lacs dangereux, car ce sont des barrages relativement minces, de constitutions internes complexes, avec des granulométries exposées à l'érosion interne, et des inclusions de glace qui les désorganisent en fondant.

Ils ne résistent guère aux débordements.

L'acronyme anglais GLOF (*Glacial Lake Outburst Flood*) s'est imposé depuis une vingtaine d'années après la rupture de **Dig Tsho** en 1985, à

12 km au NW de Namche Bazar au Népal (photo 4). On en compte en Himalaya 3 par an en moyenne, de toutes tailles. Les aménageurs de sites hydroélectriques dans les vallées sont de plus en plus attentifs à ces menaces particulières liées au réchauffement climatique [2].

Tsho Rolpa, 45 km à l'WSW de l'Everest, avec 86 millions de m³ de retenue, est une menace identifiée et surveillée de longue date. Ce lac a été abaissé de 3 m en 2000, avec l'aménagement d'un déversoir vanné de surface. Voir aussi (d'un clic sur Google Earth) **Imja Tsho** à 10 km au Sud de l'Everest, ou **Thuglagi** à 10 km au SW du Manaslu. Un lac chinois de moraine, rompu en 1981 suite à une avalanche de glace, a causé une crue dévastatrice au Népal avec de gros dégâts dont **Sun Koshi Hydro**.

Des ruptures catastrophiques au Pérou en 1941 (**Palcacocha**, 6 000 morts à Huaraz) et 1945 y ont activé les études et recherches de mesures palliatives. En 1951, une chute de séracs fit déborder le lac de moraine d'**Arteson**; sa rupture complète fut heureusement absorbée par le lac Paron juste en dessous qui, en saison sèche, était alors à bas niveau.

Le **lac Paron**, joyau de la Cordillère Blanche à 4 200 m d'altitude, domine Caraz située 2 000 m plus bas, à 15 km de distance. Retenu par la moraine d'un glacier latéral, il était près de déborder en 1968 avec 60 millions de m³ d'eau (photo 5). L'ingénierie française a développé là un projet original de contrôle du lac par galerie longue de 1,2 km et vannes de fond. Depuis sa mise en œuvre dans les années quatre-vingt le lac est exploité en toute sécurité à niveau abaissé, en soutien d'étiage pour les irrigations et la production électrique dans la vallée.

Le barrage glacio-morainique a été étudié par géophysique, sondages, balises topo, mesures des débits de fuites selon les variations saisonnières de remplissage. Outre les bathymétries, une plongée record à 60 m de profondeur a été reconnaitre la zone de la prise d'eau sous-lacustre, dans les granites de la rive droite. ■

Bernard Goguel (ECP 69)

Consultant, Président honoraire du Comité de la Surveillance des Barrages à la CIGB



Conclusion

La nature offre des opportunités d'aménagements exploitées par les constructeurs de barrages.

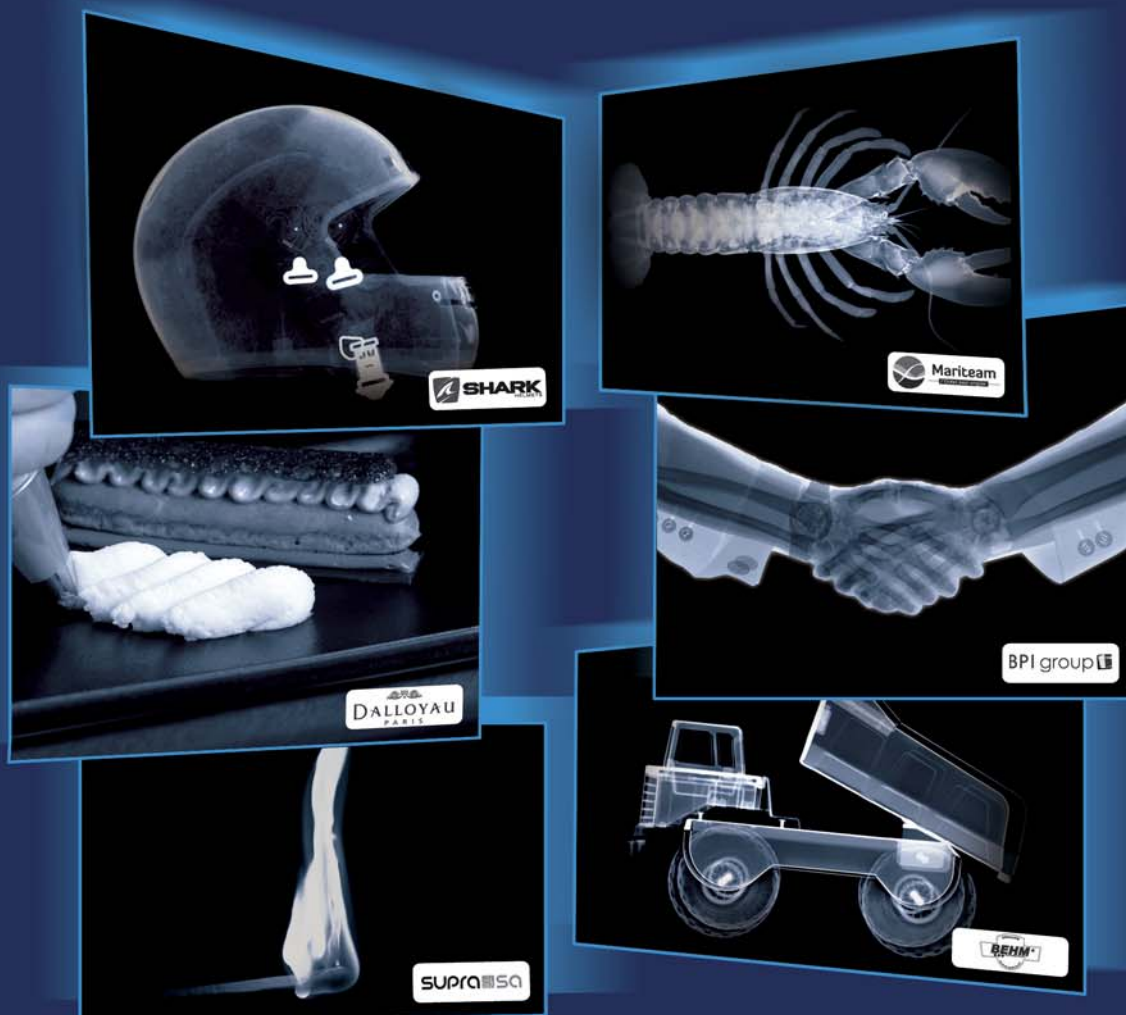
Elle impose aussi ses conditions, remodelant les paysages en construisant elle-même des barrages réservoirs de toutes tailles; avec des crises soudaines aux effets considérables.

Nous devons composer avec les barrages naturels, pour parer leurs dangers et maîtriser leurs impacts; en mobilisant tous les acquis de l'ingénierie des barrages, ainsi que les leçons de l'histoire et de la glaciologie.

[1]. Evans S.G., Hermanns R.L., Strom A., Scarascia-Mugnozza G. Editors (2011), *Lecture Notes in Earth Sciences, Natural and Artificial Rockslide Dams*, Springer, 642 p.

[2]. ICIMOD (2011) *Glacial lakes and glacial lakes outburst floods in Nepal*. Kathmandu : ICIMOD

Révéler les beaux projets d'entreprises dans les moments difficiles est notre métier



Toute entreprise peut être confrontée un jour à des difficultés face à des enjeux qui absorbent l'essentiel de ses ressources.

Perceva intervient auprès de sociétés françaises temporairement fragilisées pour leur permettre de rebondir.

Elle consacre chaque année plusieurs dizaines de millions d'euros au soutien en fonds propres de belles aventures d'entreprises.

Son objectif n'est pas la rentabilité financière à court terme mais la poursuite d'un projet viable et pérenne.

Agir rapidement pour la mise en place d'une solution durable en valorisant le capital humain est notre méthode.

Behm International, BPI Group, Dalloyau, Mariteam, Shark Trophy, Supra SA en sont les plus belles preuves.

Nos équipes partagent les mêmes valeurs de travail, d'effort, de respect des autres, d'intégrité et de courage.