Bulletin de la Sabix

Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de
l'École polytechnique

56 | 2015

**Deux innovateurs dans le domaine du génie civil :
André Coyne et Henri Vidal**

André Coyne, de la Dordogne au Zambèze, la passion de construire

Jean-Louis Bordes et Bernard Tardieu

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/sabix/1452>

ISSN : 2114-2130

Éditeur

Société des amis de la bibliothèque et de l'histoire de l'École polytechnique (SABIX)

Édition imprimée

Date de publication : 1 mai 2015

Pagination : 8-53

ISSN : 0989-30-59

Référence électronique

Jean-Louis Bordes et Bernard Tardieu, « André Coyne, de la Dordogne au Zambèze, la passion de construire », *Bulletin de la Sabix* [En ligne], 56 | 2015, mis en ligne le 12 juillet 2018, consulté le 08 septembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/sabix/1452>

André Coyne, de la Dordogne au Zambèze, la passion de construire

Jean-Louis Bordes, Bernard Tardieu

Introduction	11
Origine familiale et formation	11
La première Guerre mondiale	11
Le début de la carrière, premiers brevets	12
La Dordogne, Marèges, une méthode, un style, une équipe	14
STGB : collecte et diffusion du savoir et début de la consécration internationale	22
La guerre encore	23
L'ingénieur, l'homme, un humaniste	27
L'ingénieur conseil à la conquête du monde	31
Les 55 voûtes d'André Coyne, le projeteur et l'innovateur	36
Une fin de vie tragique	37
La poursuite de l'aventure	39
Des idées audacieuses, une postérité féconde	40
Une leçon pour notre époque	48
 Annexe	 49
 Bibliographie	 50

Introduction

Une poignée d'ingénieurs formés dans une vallée du Massif Central, sous la direction d'un des plus grands ingénieurs de génie civil du ^{xx}^e siècle, ont pu au sortir de la deuxième guerre mondiale, en moins de 15 ans s'imposer sur la scène internationale au point d'y concevoir deux des plus grands barrages au monde avant de continuer leur épopée sur les cinq continents. Qui était cet homme qui anima cette petite phalange, dont la postérité plus de cinquante ans après sa mort, est encore féconde et le souvenir très vivant auprès de ceux qui l'ont connu ? Quels étaient son message, et les ressorts de son action ? Les pages qui suivent racontent l'itinéraire de cette personnalité exceptionnellement riche dont l'action a modifié notre environnement, en créant de nouveaux paysages, en France et bien au-delà des mers dans le monde.

Elles retracent l'histoire de ses réalisations dans leur cadre historique, analysent l'élaboration d'une doctrine et sa transmission. Elles font le portrait de l'homme et, autant qu'il est possible présentent les valeurs qui l'animaient.

Origine familiale et formation

André Coyne est né le 10 février 1891 à Paris¹ dans le quartier d'Auteuil. Sa famille paternelle originaire de Montauban dans le Sud-Ouest avait été ruinée par l'épidémie de phylloxera des années 1880. Son père d'abord installé à Paris comme négociant, poursuivit une activité de professeur de piano. Sa mère originaire d'Alsace était aussi une excellente musicienne. André Coyne combinait dans son caractère le sérieux alsacien avec l'imagination et la fantaisie propres au Sud-Ouest de la France

Il était fils unique, orphelin de père. Elève au Lycée Janson de Sailly, il fit preuve de dons dans toutes les matières. C'était un excellent dessinateur. Des croquis d'ingénieurs trouvés ça et là dans les archives, sont à ce titre révélateur de son talent, malgré des sujets ardues. C'était aussi un très bon violoniste. Il ne put par la suite pratiquer le violon comme il l'aurait souhaité, mais ne craignit pas lors du congrès des grands barrages de Paris de jouer dans une formation réduite.

Engagé volontaire le 1^{er} octobre 1910, il entre 6^e à l'École polytechnique en octobre 1911, dont il sortit en octobre 1913, 17^e, dans le corps des Ponts et Chaussées. Sous-lieutenant de réserve du Génie au 5^e régiment du génie en octobre 1913, il fut nommé élève ingénieur à l'École des Ponts et Chaussées, le 1^{er} octobre 1914.

La première Guerre mondiale

Il fut mobilisé en août 1914, et participa à la campagne contre les puissances centrales, d'abord comme officier du génie puis comme pilote aviateur à partir du 16 mai 1917, (détachement à l'aéronautique) dans l'armée d'Orient, puis l'armée du Danube. Il fut décoré de la Croix de guerre avec 3 citations, de la Distinguished Flying cross, de la Valeur Italienne. Il fut nommé chevalier de la Légion d'honneur à titre militaire le 16 juin 1920.

1. Fichier Richard, ENPC, dossier École polytechnique, et B. Renaud dans André Coyne, Hommage solennel du 16 mai 1966, salle d'Iéna, sous la présidence d'Albert Caquot, allocutions d'A. Caquot, B. Renaud, A. Decelle, M. Mary, A. Laprade, Paris, Comité français des grands barrages, 1966, 21 p.

Un extrait de citation permet d'avoir une idée de son action et de sa conduite à la fois responsable, efficace et très courageuse :

Armée d'Orient- citation à l'ordre de l'Armée – ordre n° - octobre 1918

Le capitaine COYNE, André, pilote aviateur commandant l'escadrille 510.

Pilote d'élite, officier d'une très haute valeur morale. A la tête d'une escadrille de grande reconnaissance et de bombardement qu'il commande avec un allant personnel, une méthode et un esprit de sacrifice qui font l'admiration de tous, vient d'obtenir les plus brillants succès.

A renseigné parfaitement le Commandant sur les mouvements ennemis, grâce à de nombreuses reconnaissances lointaines, dont il a exécuté lui-même les plus difficiles. Par ses bombardements et ses mitraillages à faible altitude, a porté le désordre à l'arrière du champ de bataille, fait sauter des dépôts de munition, incendié des établissements militaires distants de 100 kilomètres des lignes. Par la discipline de vol qu'il a imposé à ses pilotes, a toujours tenu en respect l'aviation ennemie à laquelle il a infligé des pertes dans toutes les rencontres qu'il a eues avec elle. »

Cette expérience d'aviateur qui exige courage détermination, pour dominer la solitude, et faire corps avec un appareil technique au cœur d'éléments naturels dans lequel il vole, a certainement marqué durablement son comportement.

Le danger et les missions à remplir ne l'empêchaient pas de goûter la beauté des paysages antiques en Grèce au retour d'opérations, comme l'ont rapporté plusieurs de ses camarades. L'escadrille 510 était basée à Salonique.

1. André Coyne aviateur pendant la guerre de 1914-1918

Le début de la carrière, premiers brevets

Après être retourné à l'École des Ponts et Chaussées en 1919, il est affecté en avril 1920 au service maritime à Brest, arrondissement de l'Ouest (ports, phares et balises), service difficile et périlleux. Très sensible aux beautés de la nature après avoir connu les griseries de l'air, il apprit à aimer la mer. Il va très rapidement marquer cette période par son intervention dans les projets et réalisations suivantes :

- Cale du Moulin à mer (1927),
- Construction de terre-plein à l'Est de la jetée de l'Est avec réalisation de murs à échelle (1928, brevet Coyne²),

2. Procédé original de soutènement des terres qui n'est pas sans rappeler le mécanisme de la Terre Armée, voir page 55, ci-après.

- Consolidation du phare de la jument d'Ouessant,
- Pont Albert-Louppe construit de 1926 à 1930 sur l'Elorn (Entreprise Limousin E. Freyssinet) record mondial en son temps de portée des arcs en béton, 186,4 mètres, Cette opération fut l'occasion d'un contact avec Eugène Freyssinet (1879-1962), autre très grand ingénieur du génie civil au xx^e siècle, inventeur du béton précontraint. A Coyne le citait comme un de ses maîtres. On notera le rôle important d'A. Coyne alors agissant en tant que membre de l'administration dans la défense du projet de Freyssinet³ et l'aide apportée dans l'étude de la résistance des bétons à l'eau de mer. Sur la plaque commémorative de cet ouvrage classé au Patrimoine du xx^e siècle par le ministère de la Culture, le nom d'André Coyne figure dans l'équipe de direction des travaux. D'une façon générale, on verra dans la suite du déroulement de la carrière d'A. Coyne et dans ses écrits, la similitude de leur pratique du métier dans la conduite des études et réalisation des ouvrages, à savoir l'importance capitale accordée aux mesures et à l'observation du comportement des structures, ainsi qu'aux conditions et procédés d'exécution.

2. Pont Albert-Louppe sur l'Elorn

Il semblerait qu'il ait été nommé membre de la commission des barrages de grande hauteur du Conseil général des Ponts et Chaussées en 1924 (?). Mais on ne sait pas quand il intervint pour la première fois dans le suivi de l'auscultation du petit barrage voûte de Savenay (1925), construit en 1917 par l'armée américaine, près de Donge. Cette démarche s'inscrivait dans le cadre du transfert technologique de la maîtrise des barrages voûtes⁴, mené par l'administration française.

Enfin il participa à des études et réalisations pour la récupération de l'énergie de la houle. On note des « usines » construites sur la côte (dans le cadre de tentative de Coyne à Brest, en 1926, basée sur le principe du « trou du souffleur »⁵).

On peut vraisemblablement au sein de toute cette activité, inscrire l'élaboration du brevet des témoins sonores, extensomètres à corde vibrante. Le brevet déposé en 1931, laisse à penser que la conception du capteur se situe bien avant, et a peut-être été provoquée par les mesures entreprises sur le barrage de Savenay. On reviendra ultérieurement sur l'intérêt exceptionnel de cet appareil.

Son action au cours de ces années lui valut une lettre de félicitation du ministre en date du 12 février 1926.

3. Freyssinet E., (1993). *Un amour sans limite*, Paris, Éditions du Linteau, 187 p., p. 95-96. A Coyne était secrétaire du jury du concours pour l'adjudication de l'ouvrage.

4. Barrage voûte de Savenay construit par l'armée américaine en 1918 en béton, près de Donges, servant de barrage expérimental sous la direction d'un comité d'études et de recherches scientifiques. voir des documents de 1926 : programme, méthode et demande de crédit, opération ajournée en 1929, vidange impossible. Archives Coyne et Bellier.

5. Archives Coyne et Bellier.

La Dordogne, Marèges, une méthode, un style, une équipe

La Dordogne, un hasard ?

Pour obtenir l'avancement que son talent lui permettait d'espérer, André Coyne ne pouvait rester sur place. Il fut nommé chef du service spécial d'aménagement de la Haute Dordogne avec résidence à Paris le 15 juin 1928 (prise de poste le 1^{er} juillet 1928) en remplacement de Maurice Degove, en poste depuis 1924 très prématurément décédé (1887-1928). Il quitta la Bretagne et la mer non sans regret et appréhension. Il consulta A Caquot (1881-1976) un de ses éminents anciens du corps des Ponts et Chaussées sur l'intérêt de cette nouvelle orientation de sa carrière. Ce dernier, alors impliqué dans la conception du barrage-voûte du Sautet (1932) sur le Drac, l'encouragea à accepter cette offre, compte tenu du contexte économique et technique. André Coyne sut répondre au hasard des circonstances qui décident pour partie d'une grande carrière pour autant qu'il s'y était préparé depuis longtemps et pour partie de façon inconsciente.

Pour comprendre tous les enjeux de la destinée d'André Coyne, à ce moment-là, un peu d'histoire est nécessaire. Il entra en effet dans une longue histoire technique française aux aspects multiples, celle du génie civil appliqué à l'eau, une des plus riches d'Europe, vieille de plusieurs siècles. Il allait la marquer de quelques réussites éclatantes par la mise en œuvre des solutions techniques nécessaires à la politique de mobilisation de l'énergie hydroélectrique. Pour une mise en perspective plus complète nous renvoyons à un texte décrivant l'histoire des barrages en France sur les trois derniers siècles⁶. Nous n'évoquerons que la période à partir de la première guerre mondiale, en nous limitant au Massif central.

Le cours de l'histoire

La carrière d'A. Coyne s'inscrit dans le cadre défini par la politique énergétique en France après la première guerre mondiale qui se confirmera après la seconde guerre mondiale par la sortie progressive du charbon et le recours à l'énergie hydroélectrique (la houille blanche) puis l'énergie nucléaire. Plus que dans d'autres pays, la réalisation de grands barrages en France est inséparable de sa politique d'équipement hydroélectrique. En dehors des moyens de transport, l'énergie nécessaire à la première industrialisation a été fournie par les systèmes hydromécaniques fixes. Ils en fournissaient en effet le deux tiers encore en 1860. Mais les besoins énergétiques de l'industrie grandissant, ce type d'énergie sans disparaître a été supplantée par celle déjà fournie par les machines à vapeur qu'il était plus facile de réaliser dans les usines consommatrices d'énergie mécanique. En 1881 la révolution induite par l'électricité était à l'origine de la deuxième industrialisation. Elle fournissait une énergie divisible et transportable, c'est-à-dire qu'il devenait soudain possible de réaliser une production d'énergie sous forme électrique puis de transporter cette énergie électrique jusqu'aux différents lieux de consommation. Il devient alors rentable et efficace de construire des usines hydroélectriques sur les meilleurs sites avec des puissances hydroélectriques importantes pour l'époque. L'apport de l'énergie hydroélectrique était d'autant plus précieux que la France manquait cruellement de sources d'énergies fossiles. La loi sur l'eau d'octobre 1919⁷ précisait dans son préambule :

« Nul ne peut disposer de l'énergie des marées des lacs et des cours d'eau, quelque soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'État.

Toutefois aucune concession ou autorisation ne sera accordée sans avis préalable des conseils généraux des départements représentant des intérêts collectifs régionaux, sur le territoire desquels l'énergie est aménagée. »

6. Bordes J.L., (hiver 2010). « Les barrages en France du XVIII^e à la fin du XX^e siècle, histoire, évolution technique et transmission du savoir », *Pour mémoire*, Revue du comité d'histoire du ministère de l'Écologie et du Développement durable, n° 9, p. 70-120

7. Colli J.C., (1986). « Cent ans d'électricité dans les lois », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, Association pour l'histoire de l'électricité en France. Beltran A., (1998). « La politique énergétique de la France au XX^e siècle : une construction historique », *Annales des mines, Réalités industrielles*, août.

Cette loi véritable nationalisation de l'énergie des cours d'eau, allait permettre la mise en place d'une politique d'indépendance énergétique. Sa nécessité s'était fait sentir depuis très longtemps, mais la première guerre mondiale avait mis en évidence de façon dramatique la dépendance énergétique de la France. L'hydraulique n'était qu'une des composantes de cette politique qui fut poursuivie de façon très cohérente jusqu'à nos jours et dont le programme électro-nucléaire de 1973 est la continuation, et n'en est que le dernier avatar.

Le rôle particulier du Massif Central dans la mise en valeur du potentiel hydroélectrique français⁸

A la différence des massifs alpins et pyrénéens, le Massif Central n'avait pas de traditions industrielles qui fussent à l'origine d'une utilisation importante de l'énergie hydroélectrique sur place, elle-même faisant suite à une utilisation hydromécanique : papeterie, métallurgie, etc. A cette utilisation correspondait un modèle pyrénéen ou alpin qui consistait en la combinaison de lacs de haute montagne constituant le réservoir avec une grande hauteur de chute. Par contre, dans le massif Central dès les débuts de l'électricité, se sont créées des sociétés ayant pour but l'éclairage des villes et le transport par tramways, qui construisirent des barrages réservoirs, en haut des bassins versants des rivières qui descendaient de ce qui était considéré comme le château d'eau de la France.

la Bourboule
Rochebut

Queuille (la Sioule)
Les Fades

3. Premiers barrages dans le Massif central

Ce fut le cas de Clermont et Riom, pour lesquelles furent construits les barrages de Queuille (1905) et des Fades (1917), de la Bourboule qui eut son barrage dès 1896, ou de Vichy et Thiers alimentés par l'usine du barrage de Sauviat (1903). Tous ces ouvrages étaient encore de dimensions modestes. La première opération d'envergure fut celle de Rochebut (1909) sur le Cher, qui est le premier exemple de barrage réservoir à des fins d'électricité commerciale. Cet ouvrage de 50 m de hauteur permettait de turbiner sous une hauteur de chute variant de 26 à 44 m un débit de 3,35 à 5,47 m³/s qui alimentait une usine développant une puissance entre 4.000 et 10.000 CV (3 et 7,35 MW). La retenue de 30 millions de mètres cubes dont 20 millions utiles, avait un effet de régulation significatif. Cet aménagement devait permettre l'alimentation de la ville de Montluçon située à 15 km.

8. Bordes J.L, (2005). *Les barrages-réservoirs en France du milieu du XVIII^e siècle au début du XX^e siècle*, collection Histoire et Techniques, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 448 p.

4. Sauviat en dérivation de la Dore

5. Tuilière sur la Dordogne (Bergerac)

A peu près en même temps que Rochebut, à Tuilière (1905-1908) sur la Dordogne près de Bergerac, l'Énergie électrique du Sud-Ouest (EESO) fit construire un barrage mobile de 17 m de haut avec une usine de 20.000 CV (environ 15 MW) associée à une usine thermique, pour l'alimentation électrique de Bordeaux. Dès 1911 Adrien Palaz (1865-1929) ingénieur conseil suisse très introduit en France, concepteur de Tuilière, commença la prospection du cours de la Dordogne jusqu'en Haute Dordogne. L'EESO faisait une demande de concessions en 1917 pour l'exploitation de plusieurs sites.

Malgré ce type de réalisation, avant la guerre de 1914, le potentiel hydroélectrique du massif Central était largement sous exploité en comparaison avec celui des massifs alpins et pyrénéens.

La mise en valeur du Massif Central devait venir de son utilisation pour l'alimentation de la traction électrique, combinée à celle de la région parisienne, modulée par la production des centrales thermiques de la région parisienne. Tout cela fut rendu possible par les progrès dans les lignes de transport et les techniques d'interconnexion, mais aussi parce que le stock énergétique du Massif central était beaucoup plus « liquide » et donc mobilisable en hiver que celui des Alpes constitué en grande partie par la neige et les glaciers, et donc peu mobilisable avant la fonte des neiges au printemps.

Le barrage d'Eguzon et quelques autres

La première réalisation notable de l'après-guerre est celle du barrage d'Eguzon sur la Creuse. Elle est le résultat du projet du PO (Compagnie du Paris-Orléans) d'électrifier 503 km de voie ferrée, et la volonté de l'UDE (Union de l'Électricité) propriétaire des centrales thermiques de la région parisienne dont celle de Gennevilliers, de combiner l'énergie hydraulique et l'énergie thermique. Le site avait fait l'objet d'un projet dès 1903. Les choses se précipitèrent pendant la première guerre en 1915 sous la pression de la crise énergétique. A partir de la société PDTE créée en 1913 par Léon Chagnaud, (Production, Distribution, et Transport de l'Électricité) un projet est bâti pour alimenter les arsenaux de Bourges. Les travaux commencèrent en 1917, et furent freinés par d'énormes difficultés de main d'œuvre. Les difficultés s'accumulèrent. La loi de 1919 débloqua la situation. Il s'agit du premier barrage en béton construit en France, béton cyclopéen. Le volume de ce barrage poids est de 210 000 m³, nettement au dessus de tout ce qui avait été fait jusqu'alors en France, et à l'époque un des plus volumineux au monde. Ce chantier marqua le début de la mécanisation. Pour la première fois en France, le corps du barrage était drainé ainsi que les fondations, comme cela deviendra la règle avec la circulaire ministérielle de 1923. On réalisa aussi un rideau d'injection en amont du rideau de drainage. Le béton était coulé par plots, selon les pratiques américaines. Des mesures d'échauffement du béton y furent réalisées ainsi que des mesures de déplacement de l'ouvrage à la mise en eau. Le barrage terminé en 1926 fut salué comme une réussite et un acte de mise en valeur très important. Il marquait aussi le début des travaux d'interconnexion entre régions par la construction d'une ligne de 210 KV entre Eguzon

et la région parisienne, qui reçut l'électricité « éguzonaise» le 17 juin 1926. C'était la première fois qu'une ville française recevait son électricité d'aussi loin.

6. Rochebut

7. Eguzon

Cette politique de développement devait marquer le retour en force des ingénieurs du corps des Ponts et Chaussées qui entre 1880 et 1914 avaient joué un rôle relativement effacé dans les réalisations et projets. Les sociétés d'électricité avec leurs moyens propres d'études, les entrepreneurs, les ingénieurs civils français et étrangers en particulier suisses, avaient été alors les acteurs principaux. Au milieu du XIX^e siècle, les ingénieurs de l'administration avaient joué un rôle majeur en France et au plan international dans le développement des barrages en maçonnerie, avec en particulier le barrage du Furens (1866) le plus haut barrage construit par l'homme à cette date⁹. Après 1920, on rappelle que conformément aux termes des concessions accordées par la loi, l'État avait à sa charge la conception et la construction des barrages et des organes associés, et les compagnies concessionnaires celles des usines, génie civil et équipements hydromécaniques et électriques.

En 1928, à l'arrivée d'A. Coyne à la tête du service spécial de la haute Dordogne créé le 20 octobre 1920, de nombreux travaux et études depuis 1920 avaient été réalisés ou entrepris dans le Massif central en conséquence des concessions accordées dans le cadre de la mise en œuvre de la loi de 1919. On retiendra l'aménagement de la Truyère (Sarrans – Brommat) par la Société des forces motrices de la Truyère, avec comme ingénieur conseil et entrepreneur, le service chutes de la SGE. Le barrage poids de Sarrans de 113 m de haut et d'un volume de 450.000 m³ retenant 296 millions de m³ d'eau, fut terminé en 1932. Avec deux usines associées dont celle souterraine de Brommat, l'aménagement représentait une puissance installée de 270 MW, ce qui représente un changement d'échelle par rapport à Eguzon et bien évidemment à tout ce qui avait été fait avant 1914. La retenue de mise en charge de l'usine de Brommat était fermée par une petite voûte de 30 m de haut (1931), sur la Bromme, la première en France depuis celle de Zola (1854), si on ne tient pas compte de celle de Savenay (1917), de 17 m de haut près de Donge, construite par l'armée américaine. A Coyne fit poser dans la voûte de la Bromme les 17 premiers témoins sonores jamais utilisés¹⁰ (1931).

9. Bordes J. I., *op. cit.* p. 201-215.

10. Brevet d'invention n° 721.629, déposé le 19 août 1931 délivré le 22 décembre 1931, *Procédés et dispositifs pour la mesure des déformations des solides et notamment des déformations internes*, André Coyne et société des établissements Henry-Lepaute

8. New-Croton barrage pour l'alimentation de New-York du type du Furens, Shoshone (Buffalo Bill Creek), barrage voûte

A la recherche des solutions techniques à mettre en œuvre

En même temps qu'étaient programmés les premiers travaux sur la Dordogne, dans le cadre de la concession au PO l'administration s'inquiétait des solutions techniques à apporter dans le domaine des barrages. Maurice Degove (1887-1928) ingénieur des Ponts et Chaussées, chargé du service spécial de la haute Dordogne le 1^{er} janvier 1924, précédemment affecté au service central des forces hydrauliques depuis le 1^{er} mars 1920, se rendit aux États-Unis en 1921, il publia en 1922 *Les grands barrages en maçonnerie aux États-Unis*. Les missions d'information aux États-Unis dans le domaine hydraulique étaient chose courante depuis la fin du XIX^e siècle. Compte tenu de la Première Guerre mondiale, une « mise à niveau » s'imposait d'autant plus que les États-Unis avaient fait des progrès considérables dans le cadre de la mise en valeur de l'Ouest (création du Bureau of Reclamation en 1905). Une mission PLM se rendit également en 1921 outre Atlantique pour prendre connaissance des derniers progrès. Les barrages voûtes, particulièrement en Californie apparaissaient comme une solution très prometteuse. Mais sa mise en œuvre n'allait pas de soi, l'échec d'une solution voûte au site de La Grande Rhue (1927) le prouvait¹¹. L'échec n'était pas d'ordre technique mais dû à une définition des prérogatives de l'administration et de l'entrepreneur inadéquate. André Coyne dut remettre à 1934 sa visite aux États-Unis, sa charge de travail lors de son arrivée en 1928, l'empêcha d'y aller plus tôt. Sur le plan scientifique, l'administration poursuivait son travail. Malgré la tentative avortée de construction d'une voûte sur les deux sites de la Rhue, plusieurs organismes d'État continuèrent à travailler en faisant des mesures sur la petite voûte de Savenay, et en s'informant sur tout ce qui se faisait à l'étranger. Le laboratoire de l'ONRSII (Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions), à

11. Dans le cadre des différents chantiers à lancer et le premier celui de l'aménagement de Coindre, le service spécial d'aménagement de la haute Dordogne, poussa l'adjudicataire des travaux, le Département des travaux hydrauliques des Etablissements Schneider à proposer un projet de barrage voûte pour les deux sites de la Petite et Grand Rhue (voir AN F¹⁴ 14452 projet de MM Schneider et Compagnie d'un barrage voûte de 35 m de hauteur au site de la petite Rhue 30 mai 1922, et projet d'un barrage voûte à la Grande Rhue 2 janvier 1923). Le marché en effet avait été adjugé sur séries de prix le 12 août 1921, sans que la forme des ouvrages eût été arrêtée. Les propositions de l'adjudicataire furent alors discutées en 1922 et 1923 par le service spécial et la commission des barrages de grande hauteur du Conseil général des Ponts et Chaussées où M. Degove apparaît au deux titres. Le projet est jugé viable mais la commission estime que le bénéfice de réduction de volume est compensé par le coût des coffrages, et par la plus-value pour le changement de ciment réclamée par l'entrepreneur, et que si économie il y avait, le fait que l'entreprise réclamât la moitié de cette économie devait conduire à repousser le projet de la voûte. Le barrage de la petite Rhue (35 m de hauteur) fut un barrage poids, celui de la grande Rhue (49 m de hauteur) fut un ouvrage bâtard, constitué d'un barrage poids reposant sur un bouchon tenant au cisaillement et obturant la partie inférieure très étroite de la vallée. Cette occasion perdue est la conséquence d'un mélange des genres où maître d'ouvrage, maître d'œuvre, organisme de contrôle, et entrepreneur ont des fonctions et des responsabilités mal partagées, où la consanguinité des acteurs conduit à des conflits d'intérêt très mal dominés.

Meudon, ancêtre de l'ONERA et pour partie du CNRS, avait été créé par la loi du 13 décembre 1922. Il résultait de la nécessité reconnue par tous d'une étroite collaboration entre la science et l'industrie. Un département d'essai de structures et de modèles réduits de barrage en plâtre¹² chargé au mercure fut créé. Un arrêté interministériel du 20 sept 1929 institua une commission chargée de contrôler les essais de barrage sur modèle réduit (Mesnager, Veyrier). Un modèle pour Marèges dénommé « voûte n° 1 de Bellevue » fut essayé dès 1927 (?). Un autre pour le barrage de la Bromme plus ou moins à la même époque, fut demandé par la Société des forces motrices de la Truyère. Un rapport tardif mais complet sur les essais de la Bromme fut publié en 1936. Il y avait toute une série de recherches et de réflexions où on retrouve André Coyne à plusieurs titres et d'où devait émerger la voûte de Marèges.

La voûte de Marèges

Celle-ci est tout à fait exceptionnelle pour l'époque. Le nombre d'innovations majeures mises en œuvre, et les principes qui guidaient leur utilisation dans le cas particulier de cet ouvrage doivent être soulignés. On a brièvement décrit les recherches, et travaux en cette fin des années 20. Le grand mérite d'A. Coyne est d'y avoir apporté de l'ordre et de la simplicité en affirmant des principes dont il ne se départit pas jusqu'à la fin de sa carrière : innovations prudentes fondées sur l'observation et la mesure des précédents, optimisation de l'ensemble barrage- ouvrages annexes, recherche de la simplicité des formes facilitant la construction et réduisant les délais et les coûts.

Beaucoup des idées directrices qui ont guidé la conception et la réalisation de Marèges furent répétées par la suite. Elles ont été appliquées à grande échelle sur le Zambèze, au barrage de Kariba, la dernière de ses grandes réalisations, 25 ans plus tard.

Au site de Marèges, dans les gorges de la Dordogne l'excellente qualité des appuis et la forme convergente des rives rendaient séduisante l'idée d'une voûte unique. Pour loger l'usine, le projeteur a tiré profit d'un épanouissement de la vallée et la présence de plusieurs thalwegs secondaires a donné toute l'aisance nécessaire à l'implantation des ouvrages régulateurs (prises d'eau et évacuateurs de crue) et à l'installation des chantiers.

La conception générale de l'aménagement est relativement simple mais A Coyne a innové dans chacune des réalisations partielles par souci de perfection technique et d'économie.

(i) L'encastrement du pied des consoles de la voûte à double courbure a. été réduit par un amincissement du côté amont¹³. De ce fait, sur les rives, les plots de la voûte basculeraient vers l'amont lorsque la retenue est vide La stabilité à vide de chaque plot a été rétablie par un calage contre le rocher et des béquilles dans le fond de la vallée. Nul doute que ce barrage en carène, appuyé sur des béquilles semblables à celles dont sont munies à l'échouage les barques de pêche, n'ait subi l'influence de l'expérience antérieure d'André Coyne qui avait débuté sa carrière au Port de Brest.

(ii) Le déversoir à saut de ski de la rive droite permettait de lâcher pour la première fois un jet à 40 m au-dessus du lit de la rivière par un tremplin encore horizontal. Les cuillères plus relevées apparaîtront à l'Aigle quelques années plus tard.

12. Il avait été établi que l'usage du plâtre pour la réalisation de maquettes (au 1/50° environ) permettait de représenter de manière satisfaisante un ouvrage en béton compte tenu des effets d'échelle. Ces maquettes ont été utilisées jusque dans les années 1960, en compétition avec des calculs d'ajustement progressif (trial load) faits à la main à l'aide des tables de logarithme dont seuls les plus anciens se souviennent. Il fallait un an d'un ingénieur chevronné (Mladiénovitch) pour réaliser le calcul d'une forme.

13. Un barrage voûte est construit par plots indépendants, c'est-à-dire par des sortes de tranche d'une quinzaine de mètres d'épaisseur qui constituent des consoles. Entre chaque plot, les joints s'ouvrent du fait du retrait du béton. Des lames d'étanchéité transforment chaque joint en une sorte de vérin géant qui est injecté après la fin de construction pour « claver » la voûte.

(iii) Ce même déversoir était implanté sur la culée-poids rive gauche qui reprenait les efforts de la partie supérieure de la voûte. La stabilité de la culée était assurée pour partie par des câbles précontraints de 500 tonnes suivant un brevet déposé par A Coyne (193.), méthode qu'il appliquera à la surélévation du barrage des Cheurfas en Algérie (1934)¹⁴.

(iv) La coupure de la rivière se fit à l'aide de grands gabions lestés en charpente métallique et grillage, surmontés ensuite d'enrochements au talus amont raidi verticalement grâce à des tirants internes, autre technique innovée précédemment en Bretagne par André Coyne, et appelée mur à échelle (brevet 19).

Le pied aval du batardeau amont ainsi constitué était tenu par une voûte en béton très tendue à caractère expérimental. De grands puits réalisés en profitant de la présence des joints à travers la voûte complétèrent la capacité d'évacuation des galeries de dérivation provisoire et facilitèrent le trafic en fond de vallée.

(v) On implanta le second système d'auscultation par témoins sonores (brevet Coyne), 74 témoins dans la voûte et 48 dans la culée.

Le rocher en fond de vallée enfoui depuis des dizaines de milliers d'années sous 12 mètres d'alluvions était dans un tel état de fraîcheur et rendu irrégulier par la présence de marmites d'érosion qu'on n'hésita pas à y fonder directement le barrage sans même réaliser d'excavation à l'explosif. L'implantation du barrage ayant été fixée avec certitude à quelques mètres près grâce aux sondages de reconnaissance, les galeries de dérivation provisoire furent très courtes.

L'ensemble des ouvrages provisoires avait fait l'objet d'un contrat préliminaire, de façon à délivrer l'Entrepreneur principal des risques de retards inhérents aux travaux délicats à exécuter en rivière.

On imposa pour la première fois des bétons plastiques qui furent mis en place par tapis puis compactés à l'aide de vibrateurs de surface et de pervibrateurs aiguilles.

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

Une méthode

A Coyne avait repris en main le projet à son arrivée en juin 1928, tout en terminant l'usine de Coindre (grande et petite Rhue). On retiendra que dans son rapport du 11 décembre 1928, A. Coyne arrivé depuis à peine 6 mois, repensait l'ensemble du problème du projet présenté le 19 avril 1928. Il soulignait l'importance du problème des crues ce qui l'amena à déplacer le barrage de sa position initialement prévue.

Suivirent 7 ans d'études et de travaux, rappelle A Coyne dans son article du Génie civil de 1935. Sa méthode de travail est parfaitement décrite :

« une longue gestation du projet a permis de serrer de très près la question des formes du barrage et d'obtenir un ajustement précis et harmonieux de l'ouvrage au site pittoresque qui l'encadre. Cette recherche est une des plus attachantes qui soit pour l'ingénieur : elle représente un véritable travail d'artiste, où la sensibilité a la plus grande part, parce qu'elle saisit des rapports et des nuances qui sont trop tenus pour être découverts par le calcul. »

14. Coyne A., « Perfectionnements aux barrages-poids par l'adjonction de tirants en acier », Le Génie civil, tome XCVII, n° 8, 23 août 1930, p. 186-187.

Un peu plus loin André Coyne rappelle le travail des ingénieurs français dans les années 1860 qui avait conduit à la réussite du Furens (1866) et des barrages frères des vallées industrielles voisines. En référence à la méthode suivie, il oppose celle suivie à Marèges, « *la méthode expérimentale la seule qui vaille quelque chose en matière scientifique. Les dispositions adoptées sont le fruit d'expériences successives principalement outre-mer, dans ce pays de Californie... C'est par une connaissance approfondie des réflexes de ces ouvrages, et notamment de leur probabilité de rupture, qui est jusqu'ici nulle, que nous sommes parvenus à la conception du barrage de Marèges, attentifs à pratiquer la maxime fameuse de Bacon : Natura vincitur nisi parendo*¹⁵. Sur tout le reste c'est la même méthode qui a prévalu : recherche patiente humble et méthodique des enseignements de la nature, qu'elle prodigue généreusement à ceux qui savent l'observer... »

Cette démarche, l'observation des faits relatifs au comportement des structures dans leur environnement, et l'attitude d'humilité devant la nature, le guideront tout au long de sa carrière.

L'équipe

Cette épopée technique avait réuni des hommes qui devaient s'illustrer dans le développement de la mise en valeur du potentiel hydroélectrique de la France en accédant aux plus hautes responsabilités dans EDF après la guerre, ou accompagner André Coyne dans la suite de sa carrière.

L'entreprise et Marcel Ballot, ont apporté à A. Coyne dans l'exécution, l'appui qui était nécessaire pour inscrire dans le réel le résultat de son imagination et de ses intuitions. Ce compagnonnage se poursuit à travers d'autres réussites comme celle de l'Aigle, du Nébœur ou de de Grandval.

9. Les Acteurs : André Coyne, à gauche, une partie des membres de l'équipe à droite

15. On ne vainc la nature qu'en lui obéissant.

10. Marès : la voûte vue depuis la rive droite en fin de construction

11. Marès : la voûte vue depuis la rive gauche en cours de construction

12. Marès passage d'une crue

STGB : collecte et diffusion du savoir et début de la consécration internationale

Une méthode de travail

Un des couronnements de la réussite de Marès, qui avait déjà valu à A. Coyne deux lettres de félicitations du ministre des Travaux publics, (1931) pour le projet et (1934) pour les travaux, est la création du Service technique des grands barrages (STGB) service qui avait été pensé pour et vraisemblablement avec A. Coyne. Ce dernier gardait le service spécial d'aménagement de la haute Dordogne, adjoint au (STGB). Ce nouveau service était d'autant plus justifié que l'augmentation du nombre de projets et de leur importance exigeait un encadrement technique efficace. Le recueil et l'analyse de l'expérience au fur et à mesure de l'exécution

des ouvrages étaient une des préoccupations principales de A. Coyne. Cette démarche constituait une étape importante de sa méthode de travail. Ceci conduisit les pouvoirs publics à créer un service par modification de l'arrêté du 28 février 1920 qui avait institué un service central des forces hydrauliques et de distribution d'énergie hydraulique, par l'arrêté du 2 novembre 1935. Ce nouveau service avait pour mission de « *constituer et tenir à jour une documentation technique sur les travaux de distribution d'énergie électrique, d'aménagement des cours d'eau et notamment des grands barrages, d'étudier les types et conditions générales des ouvrages en vue notamment de faciliter la préparation d'exécution par l'État, les départements et les communes de réseaux de distribution ou d'usines hydroélectriques ou de grands barrages* ». André Coyne déjà en charge de la haute Dordogne était nommé à la tête de ce service qui prenait le nom suivant les termes de l'arrêté de « Service technique des grands barrages et d'aménagement de la haute Dordogne ».

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

Cette « baronnie » technique n'était probablement pas faite pour déplaire à André Coyne dont le tempérament de battant et d'innovateur exigeait à la fois un vaste champ d'activité et une liberté d'action la plus grande possible, toute chose que son expertise justifiait sans discussion.

Missions à l'étranger et Commission internationale des grands barrages

Conscient de la nécessité d'échanger son expérience avec ses pairs, il effectua de nombreuses missions à l'étranger dès 1929 (Suisse et Italie), puis Italie (1930) Espagne (1933), États-Unis (1934), Egypte (1937), Angleterre (1938), au Portugal plusieurs fois et en Italie encore avant 1939.

Son intégration dans les organisations internationales se fit rapidement¹⁶. Vice-président de la Commission internationale de grands barrages (CIGB)¹⁷ en 1936, rapporteur général aux deux premiers congrès de 1933 et 1936, il en fut le président de 1946 à 1952. Il fit partie du comité d'experts pour la surélévation du barrage d'Assouan dès 1937.

Récompenses pour cette première partie de carrière

Il reçut le Prix Caméré en 1924 décerné par l'Académie des sciences et le Prix Rouville décerné par le ministère des Travaux publics (arrêté du 8 octobre 1936)

La guerre encore

Travaux et résistance

André Coyne fut de cette génération qui dut à deux reprises affronter de terribles épreuves à 25 ans d'intervalle. Après le désastre de mai 1940, et l'occupation d'une partie de la France par l'armée allemande, le

16. Noter la conférence prononcée le 11 février 1937 à Londres à l'Institution of civil engineers (ICE) lors d'une réunion conjointe de la branche londonienne de la société des ingénieurs civils de France, the Institution of structural engineers et l'ICE, sous le titre « the construction of large modern water dams », publié dans *The structural engineer*, février 1937.

17. La CIGB fut créée à Paris en 1928 à l'initiative de la France dans le cadre de la conférence mondiale de l'énergie et ne regroupait alors que 6 pays. Le nombre de pays adhérent augmenta rapidement pour atteindre de nos jours une centaine. C'est un remarquable lieu d'échanges qui se traduit par des congrès tous les trois ans dont les comptes rendus sont de précieux outils de travail, des réunions annuelles de sa commission exécutive, et des groupes de travail qui émettent des recommandations sur tous les sujets concernant, la conception, la construction et l'entretien des barrages, qui constitue une véritable encyclopédie des barrages. Trois ingénieurs français ont présidé cette commission, le premier Eugène Mercier de 1933 à 1936, André Coyne de 1946 à 1952 (2 mandats) et enfin Pierre Londe, ingénieur de Coyne chez ACJB, un de ses disciples, de 1979 à 1982.

STGB quitta Paris en mai 1940 et alla s'installer en zone libre dans l'hôpital de Mauriac (département du Cantal), non loin de la vallée de la Dordogne où se trouvait Marèges (30 km) et le barrage de l'Aigle (10 km) (1935-1946) ce dernier alors en construction, sans oublier plus en amont Bort-les-Orgues (1943-1952), Chastang (1941-1951) en aval, et Saint-Etienne-Cantalès (1939-1945) sur la Cère, en construction aussi.

13. Implantation des barrages sur la Dordogne, la Cère et la Truyère

Sous le patronage bienveillant d'André Coyne, sorte d'ange tutélaire et de conscience pour tous, nous dit Jean-Louis Salat¹⁸, l'équipe du STGB s'occupa des travaux à conduire tout en participant pour nombre de ses membres à des actes de résistance (renseignements, parachutages, transport de matériel, liaisons). André Decelle (1910-2007), ingénieur des Ponts et Chaussées prisonnier évadé, avait été embauché au STGB par A. Coyne pour être responsable de la réalisation du barrage de l'Aigle. André Decelle¹⁹ allait travailler en même temps à la mise sur pied de l'organisation de la résistance du barrage qui constitua l'ORA²⁰ du Cantal, dont le même André Decelle (Commandant Didier) fut le délégué départemental.

Les fonctions d'A. Coyne, dont celle d'inspecteur général à partir de novembre 1941 lui permettaient de circuler entre la vallée de la Dordogne et Paris. Ses possibilités d'assurer des liaisons étaient importantes, ce qui était également le cas d'André Decelle.

18. Jean-Louis Salat, (1987). *L'Aigle sur Dordogne: un pays, des hommes: un barrage sous l'occupation: résistance et libération*, Quota, réédité 2009, 448 p., p. 133.

19. André Decelle, X29, ingénieur des Ponts et Chaussées, continua sa carrière à EDF dont il devint le directeur général (1962-1967), puis à l'Aéroport de Paris dont il fut président (1971-1975).

20. ORA: Organisation de résistance de l'Armée créée au sein de l'armée d'armistice.

Il aida de jeunes ingénieurs ou des élèves ingénieurs fuyant le STO²¹, qui participèrent à la transformation du chantier du barrage en une des bases du « maquis ». Une promotion entière de l'École des Ponts et Chaussées fut ainsi intégrée aux équipes des barrages en construction.

Il lui fallut trouver avec son équipe un équilibre subtil pour conduire les travaux en général et ceux du barrage de l'Aigle en particulier, de façon à ne pas le mettre en service au bénéfice des Allemands avant la fin de la guerre, mais aussi à ne pas être trop en retard lors de la victoire, le tout sous le contrôle tatillon des Allemands installés sur le site. (cas des autres barrages en construction sur la Dordogne et la Cère).

L'hôpital de Mauriac tout juste terminé à la déclaration de la guerre et dont l'équipement avait été remis à plus tard, abritait dans une aile les services du STGB, (avec deux postes radio dans la salle des archives à un moment donné), le bureau d'André Decelle siège de l'ORA²², avec dans une autre aile la présence de troupes allemandes. Celles-ci virent passer sous leurs yeux des responsables de la Résistance et même un agent britannique francophone qui venait d'être parachuté, et qui trouvait cela très amusant. Le danger d'un faux-pas était permanent.

Dans certaines circonstances, A. Coyne intervint directement. Il fut un acteur important dans la capitulation de la garnison allemande de Rueyres le 20 août 1944, qui commandait le très important complexe Rueyres, Sarrans Brommat, à la fois centre de production très important et centre de dispatching. Des destructions considérables ont été ainsi évitées.

14. Stèle commémorative dévoilée le 6 septembre 1986, érigée par l'Amicale des anciens du barrage en hommage à André Coyne et tous les bâtisseurs du barrage

21. STO, le service du travail obligatoire fut, durant l'occupation de la France par l'Allemagne nazie, la réquisition et le transfert vers l'Allemagne de centaines de milliers de travailleurs français contre leur gré, afin de participer à l'effort de guerre allemand que les revers militaires rendaient sans cesse grandissant (usines, agriculture, chemins de fer, etc.). Les personnes réquisitionnées dans le cadre du STO étaient hébergées dans des camps de travailleurs implantés sur le sol allemand.

Un total de 600 000 à 650 000 travailleurs français furent acheminés vers l'Allemagne entre juin 1942 et juillet 1944.

22. *Op. cit.* p. 156.

Le souvenir de l'action de Coyne dans la vallée depuis 1928, en tant qu'homme, est toujours présent dans la mémoire des habitants actuels, qui se souviennent de la maison qu'il occupait avec sa famille²³.

Le barrage de l'Aigle

C'est un ouvrage encore remarquable qui fut réalisé dans ce contexte historique tout à fait exceptionnel, avec un incroyable mélange de destins d'hommes venus de partout (républicains espagnols, polonais, nord-africains, français réfractaires ou non au STO, autochtones et personnes venues d'ailleurs) et la complicité active ou passive de beaucoup, dont l'entreprise Ballot.

Le barrage de l'Aigle a 95 m de haut, un volume de béton de 240.000 m³ et retient un volume de 200 millions de m³ d'eau. Cet ouvrage a profité de toute l'expérience acquise à Marèges. On y a poussé plus loin le bénéfice de certaines innovations en suivant toujours les mêmes principes.

Tout découle du choix du site pour des raisons géomécaniques dont l'exiguïté tant pour l'implantation des ouvrages que pour les installations de chantier au contraire du site de Marèges, ont conduit à intégrer en un seul ouvrage, le mur du barrage, l'usine hydroélectrique accolée au barrage, faisant corps avec celui-ci, l'évacuateur de crue en deux bâches capables de débiter au total 4.000 m³/s passant sur le toit de l'usine, valeur considérable. L'ensemble fonctionne comme une voûte épaisse. A. Coyne dans son article de la revue Travaux de mars 1950²⁴, raconte comment l'équipe toute entière a collaboré à l'élaboration du projet, usine avec les groupes disposés suivant un arc de cercle pour en réduire l'encombrement (proposition de J. Bellier), évacuateur avec une extrémité de coursier à bord circulaire (suggestion de l'architecte, L. Brachet). Cette disposition favorisait une torsion des jets, ultérieurement accentuée en fin de coursier par l'inclinaison transversale des coursiers, et favorisant la dissipation de l'énergie de l'écoulement. Un modèle hydraulique sur le site, comme cela avait été fait à Marèges, a favorisé la recherche de la forme optimale, rapprochant concepteurs et hommes de terrain. On a mis en œuvre des bétons à granulométrie discontinue (M. Mary 1902-1967) mis en place par vibration. Des mesures avec des extensomètres à corde vibrante ont permis de suivre les réponses de la structure dans les zones délicates.

15. l'Aigle : Vue d'ensemble prise de l'aval

16. l'Aigle : Mise en place du béton

23. Faure A., (2008). « Ecouter les voix de la Vallée : les riverains des gorges de la Dordogne face à la construction de cinq grands barrages », dans *Grands barrages et habitants : les risques sociaux du développement*, (S Bonin, N Blanc dir), Quae, 336 p.

24. Coyne A., « Les barrages usines de l'Aigle et Saint-Étienne-Cantalès », Travaux, mars 1950, 21 p.

17. l'Aigle: Extensomètres à corde vibrante

18. l'Aigle: Vue d'un déversement

L'ingénieur, l'homme, un humaniste

La Libération correspondit, à un tournant professionnel majeur dans la vie d'André Coyne. C'est l'occasion dans ce récit d'essayer de préciser à travers les témoignages de ses compagnons, ses écrits, ses réalisations, quel homme était André Coyne.

L'ingénieur

C'était avant tout un ingénieur, c'est-à-dire un créateur passionné par son métier, possédé par son imagination une des plus grandes puissances de l'homme. Mais il y avait une parfaite symbiose et cohérence entre les différents aspects de sa personnalité et ses engagements d'ingénieur, comme créateur, expert, animateur d'une grande équipe, mais aussi de citoyen, et d'homme privé.

Son comportement était tout entier tourné vers l'action. Il n'aimait prouver le mouvement qu'en marchant. Il accordait la plus extrême importance aux conditions d'exécution comme cela ressort des comptes rendus de ses inspections et aux acteurs immédiats de l'acte de construire qu'étaient les entrepreneurs depuis le directeur du chantier jusqu'au plus humble des ouvriers vibrant le béton sur le plot en cours de bétonnage. On ne demandait pas aux ingénieurs une théorie mais un mur qui tienne pour le coût le moins élevé possible pour la collectivité, disait-il. Dans l'éditorial du premier numéro du bulletin du service technique des grands barrages après avoir défini les conditions du travail à faire, il écrivait de Mauriac le premier avril 1944, où il s'était replié avec toute son équipe depuis 1940.

« Mes Chers Amis,

Je salue avec joie l'avènement du Bulletin du Service Technique des Grands Barrages, Je vous ai dit les raisons qui m'ont décidé à vous demander cet effort supplémentaire. Il s'agit d'échanger entre nous tous les fruits d'une expérience longuement, chèrement acquise, et d'en laisser des traces durables.

Noblesse oblige ! Des bureaux de la Place Valhubert jusqu'à l'Hôpital de Mauriac, en passant par de nombreuses étapes intermédiaires, le Service Technique des Grands Barrages s'est progressivement haussé jusqu'au rang d'une Grande Maison. Ses moyens sont puissants, ses finances fort lourdes. Nous n'avons pas le droit, ni les uns ni les autres, de mettre sous le

boisseau les trouvailles, les recherches, les rencontres heureuses ou malheureuses à travers lesquelles se poursuivent et se réalisent, dans une floraison magnifique, les ouvrages petits ou grands que nous élevons tous, d'un même cœur, à la gloire de la technique française. Hardi donc ! Que personne ne mollisse devant cette tâche nouvelle, fort lourde, je le sais, ajoutée au poids des préoccupations immédiates qui vous assaillent de toute part. Je n'exige pas tellement. Aux praticiens des chantiers, à ceux précisément qui sont le plus chargés de besogne, mais dont l'avis m'est le plus précieux, je demande par bulletin une ou deux observations bien faites, décrites au besoin en quelques lignes, et sans souci excessif de présentation. Mais je ne cache pas non plus que je suis décidé à étendre sans cesse le champ de nos recherches, à pousser à fond celles qui sont entreprises, et en m'aidant des jeunes forces qui viennent de se joindre à nous, à mener, dans ce domaine, un train d'enfer. C'est à cette condition que nous pourrions constituer peu à peu en confrontant sans cesse les vues théoriques avec l'expérience un corps de doctrine large et souple, précis et vivant tout orienté vers l'action... »

Voilà un texte aux accents gaulliens dont le style offensif sans fausse modestie, s'accorde parfaitement avec l'homme qui l'a écrit. Sa démarche était donc toute fondée sur l'observation des ouvrages, pour l'auscultation desquels il imagina le témoin sonore dès 1930, produit de son esprit très inventif qui l'amena à déposer plus de 30 brevets. Il exaltait l'imagination, une des plus grandes puissances de l'homme, disait-il.

Il s'est toujours opposé à la mise en place de règles ou normes concernant les barrages. Il se méfiait d'une réglementation trop tatillonne, réductrice et faussement sécurisante, de comités cumulant incompétence et irresponsabilité, pensait-il²⁵.

Dès ses premiers textes relatifs aux barrages en 1930²⁶ alors qu'il travaillait à l'élaboration de Marèges, il écrivait :

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

Cette affirmation est toujours valable. Si des progrès considérables ont été faits depuis 1930, on n'a souvent fait que repousser les frontières de notre ignorance et ouvert de nouveaux champs de recherche.

Par méthode expérimentale, il faut entendre une démarche rationnelle partant de l'observation des faits et qui s'appuyant sur des modèles théoriques ou lois physiques peu à peu élaborés au cours d'une longue histoire de l'observation des comportements des matériaux et des structures, permet d'avancer dans une connaissance de plus en plus poussée de l'état de ces structures et de leur niveau de sécurité, pour les concevoir de façon sûre et économique. C'est la méthode inductive, méthode pratique et efficace qui s'oppose à la méthode déductive qui procède de propositions ou principes posés *a priori*. Son origine est très ancienne.

Cette pratique de la méthode expérimentale qu'André Coyne inculqua à son équipe, le conduisit à réaliser souvent de façon sommaire des modèles physiques structurels ou hydrauliques pour vérifier le bien-fondé d'une idée avant d'en pousser plus loin l'étude en laboratoire avant réalisation. Ces modèles furent réalisés à titre préliminaire sur le site même ou à proximité immédiate. C'est ainsi que dans les années 1950, à Paris dans le 17^e arrondissement, rue Alphonse de Neuville dans l'arrière cours de l'immeuble du 19, où était

25. Note manuscrite sur l'idée d'un service central technique, sans date, 1934 ?, Archives Coyne et Bellier.

26. Le Génie civil, numéro du cinquantenaire de la revue, novembre 1930.

installé ACJB, un bassin sommairement équipé permettait de faire des essais d'hydraulique. En 1967 pour faciliter la réalisation d'essais au plus près des projeteurs fut créée la SEIL (Société d'essais industriels en laboratoire). Cette société exécuta les essais sur modèle de Roselend et de Kariba.

André Coyne pouvait en 1938, dans un article²⁷ rédigé à la suite d'une conférence donnée à l'Institut du bâtiment et des travaux publics, montrer tous les bénéfices de la méthode expérimentale utilisant les mesures des extensomètres ou témoins sonores, insérés non seulement dans la structure d'un barrage mais dans celle d'un pont, d'un mur de quai, d'une conduite précontrainte

Enumérant les difficultés qui empêchent la mise en place d'un système d'auscultation et des procédures de surveillance et d'interprétation, il citait trois obstacles, manque d'argent, manque de temps, et manque de confiance dans les résultats. Il développait ce dernier point dans les termes suivants « *.../quelques ingénieurs se font illusion sur ce qu'on peut demander à l'auscultation. Ils s'attendent à ce qu'elle leur donne raison. Ils voudraient que les conclusions de la théorie, si fruste soit-elle, ne soient jamais démenties. Mais il en va tout autrement. Les mesures faites, aussi bien par les extensomètres classiques que par les témoins sonores, sont pleines d'imprévu. Et s'il arrive parfois que l'imprévu tienne à une erreur de mesure, la plupart du temps c'est la mesure qui a raison contre une théorie fausse..., parce qu'on a oublié quelque chose dans les hypothèses. De sorte que si les mesures tournent à notre confusion, il faut bien se garder d'accuser les appareils en y mettant je ne sais quel pointe de dépit, mais écouter docilement la leçon des faits et en faire notre profit. C'est à cette condition que les méthodes que je viens d'exposer devant vous peuvent porter leurs fruits. Et ce n'est pas leur moindre mérite de nous donner à l'occasion, une bonne leçon d'humilité.* »

Nous avons jugé bon, une fois encore, de citer André Coyne dans un texte, qui est de la plus grande clarté, car le problème dont il fait état, est des plus importants. Il touche à des circonstances dans lesquels l'ingénieur doit faire preuve de l'honnêteté intellectuelle la plus rigoureuse et de la plus grande humilité. André Coyne reviendra de très nombreuses fois sur cette problématique. C'est un de ses thèmes récurrents de réflexion.

L'ingénieur devait faire preuve d'humilité devant la nature, mais il doit avoir un profond amour de son métier. André Coyne avait été marqué par la pratique d'Eugène Freyssinet. Mais il ne doit pas se complaire pour autant dans la satisfaction de la pratique du métier, et ne pas céder à la virtuosité. Il insistait sur les limites du pouvoir de l'ingénieur dans la cité, le sens du service, les contraintes sur l'exercice du métier de bâtisseur. Il était pleinement ingénieur, considérant que son territoire était le site où il devait construire et affronter les conditions naturelles et ne pas se tromper dans l'estimation de celles-ci. Citant Napoléon qui disait que l'art de la guerre était de savoir ce qu'il y a derrière la colline, André Coyne disait que le problème du constructeur était de savoir ce qu'il y a dans la colline, et pour cela il devait mettre de l'ordre dans le chaos des données avec l'aide de tous les spécialistes du plus humble au plus qualifié, car cette tâche dépassait les capacités d'un seul homme²⁸. Il continuait en citant Paul Valéry : « De tous les actes, le plus complet est celui de construire. ».

Sa très grande sensibilité artistique ne pouvait qu'être concernée par l'impact architectural de son métier et sa dimension artistique, combinant le beau et l'utile.

« Par la nature des choses, nous voici sur un plan élevé : un barrage est une authentique œuvre d'art ; il est fait pour durer des siècles et rendre témoignage de la civilisation de son temps²⁹ ».

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

28. Discours à Stockholm 3^e Congrès international des grands barrages 1948.

29. A Coyne, conférence le 27/11/1953 à l'Institut français d'architecture.

Le monde de l'architecture l'a reconnu dans l'exercice de son métier, en lui décernant en 1953 le grand prix d'architecture du cercle d'études architecturales.

Le patron³⁰

Les relations de fait entre André Coyne et ses ingénieurs sont toujours restées les mêmes. André Coyne était le patron au sens plein et large du terme, incontesté et incontestable, gouvernant son affaire en souverain libéral, mais dont l'autorité naturelle n'aurait laissé la place à aucune autre direction, à aucun de ses assistants, ni même à Jean Bellier le premier d'entre eux, son plus ancien collaborateur, son confident le plus loyal, son conseiller le plus proche et à ce qu'on assure, son soutien intellectuel et moral.

19. André en Coyne 1951

20. André Coyne et Karl Terzaghi à Assuan en 1954

A Coyne se chargeait des tâches techniques délicates notamment l'étude générale et expérimentale, et se réservait la direction technique des affaires en cours dans la plupart des cas dont il contrôlait calculs, études de détail, passages à la planche à dessins, correspondance.

Mais s'il prenait lui-même les décisions, il les prenait en quelque sorte en public. Il aimait à penser tout haut, à la fois pour des raisons d'enseignement et sans doute parce que cela stimulait son esprit. Il exposait sans détour son raisonnement, stimulait les objections, recevait toutes les lumières qui pouvaient lui venir, fut-ce des plus humbles des participants. Il réunissait chaque semaine tous ses ingénieurs en conférences au cours desquelles les problèmes étaient, à son initiative ou celle des participants, librement débattus. On avait accès à lui. On pouvait lui faire les objections qu'on jugeait utiles. Mais le moment venu, s'estimant suffisamment éclairé, il décidait et veillait minutieusement à l'exécution rigoureuse de ses décisions.

Toutefois, il n'en résultait pas une subordination aveugle. La confiance qu'il accordait aux membres de son équipe, très jeunes pour beaucoup, la variété des situations sur le terrain, l'éloignement du siège parisien, leur laissaient une très grande autonomie. La réussite du groupe après la disparition de celui qui resta dans leur mémoire le « patron », prouve qu'il avait réussi dans sa mission de professeur, de passeur de son savoir et de sa méthode. L'ambiance qui régnait dans le groupe était un facteur de créativité dont il fut à l'origine. et dont ses ingénieurs en furent très conscients et très reconnaissants.

30. Déposition de L. Giuliani au procès de Malpasset, TGI Draguignan 14 octobre 1965.

Le professeur

C'était un maître au sens plein du terme qui formait ses ingénieurs de façon continue. Son cours à l'École des Ponts et Chaussées, dispensé jusqu'en 1958 avait pour titre *Leçons sur les grands barrages*³¹. Le chapitre premier s'intitulait, « les grandes leçons de l'expérience : les accidents, moyens d'attaque de l'eau, remèdes généraux », conforme dans son approche d'être attentif aux leçons dispensées par la nature à ceux qui veulent bien entendre. Son style est celui de l'homme d'action, direct, clair et concis, très imagé pour rendre la pensée plus concrète, mais sans fioritures inutiles.

L'homme

Il était affable et bienveillant, de belle taille pour son époque, massif sans être gros, avec une abondante chevelure devenue blanche avant la cinquantaine. Sa voix était sourde. Il inspirait le respect, mais les témoignages insistent sur sa modestie et son attention aux autres quelle que fut leur position sociale. Il était très sensible, voire inquiet, disent certains témoignages. Son attention aux membres de son équipe était profonde. De nombreuses anecdotes³², montrent le souci qu'il avait d'aider ses ingénieurs et leurs familles dans des situations difficiles quelquefois d'ailleurs pour l'accomplissement de missions confiées par le bureau. Il les aidait pour leurs logements, avec des prêts très avantageux ou des locations dans des logements qu'il avait acquis. Il le faisait très discrètement. Impatient et exigeant, il pouvait avoir des accès de colère dont il pouvait s'excuser publiquement, quand il s'était rendu compte qu'il s'était mis dans son tort. Cette ouverture ne se limitait pas à son entourage immédiat. Les populations concernées par les travaux en Dordogne en gardent un souvenir vivant 80 ans après, transmis par la mémoire collective des communautés. Son attention aux problèmes sociaux sur les chantiers se retrouve dans son cours de barrages à l'École des ponts et chaussées (chapitre 9, installations de chantier – conditions d'hébergement des ouvriers). Il rappelle la position de l'ingénieur à la charnière du capital et du travail, et le rôle social de l'ingénieur, en se référant à G. Lamirand, dont l'ouvrage sur ce thème eut un succès considérable avant la guerre. A Coyne se situe dans une tradition humaniste, nourrie par sa foi chrétienne.

Mais que ce soit à partir de témoignages de ses compagnons ou à la lecture de textes d'articles très techniques, on est frappé par sa sensibilité et son sens de la justice. Son hommage à Marcel Ballot son partenaire entrepreneur mort subitement très jeune à la fin des travaux de Marèges³³ qu'il pleure « comme un frère d'armes », l'explication de la conception du barrage de L'Aigle³⁴ et la mise en valeur de l'apport de chacun sont à ce titre exemplaire, tout comme la naissance du projet de Kariba et le choix du site³⁵. Il se met en scène sans fausse modestie, rapportant presque le dialogue avec ses partenaires donnant ainsi à son témoignage une épaisseur humaine particulière. Il nous paraît que notre époque a banni ce mode d'expression.

L'ingénieur conseil à la conquête du monde³⁶

En 1946, lors de la création d'EDF où il avait sa place, il préféra prendre le risque de créer un bureau d'études indépendant avec son gendre Jean Bellier (1905-1986) qui le secondait depuis l'aventure de Marèges,

31. Coyne A., (1943). *Leçons sur les grands barrages*, Paris, École nationale des Ponts et Chaussées, vol 1, 186 p.

32. Dossier de plusieurs dizaines de témoignages réunis par J. Martin en 1991, et déposés dans le dossier A. Coyne à l'École des Ponts et Chaussées.

33. Coyne A., « Le barrage et la centrale électrique de Marèges », *Le Génie civil*, tome CVII, n° 17, 26 octobre 1935, p. 385-387.

34. Coyne, A., (mars 1950). « Les barrages usines de L'Aigle et Saint-Étienne-Cantalès », *Travaux*, 21 p.

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

36. Bordes J.L., Herriou J.P., (juin 2013). « Entre excellence technique, et recherche de marchés, Coyne et Bellier, 1947-2009 », revue *Entreprises et Histoire*, numéro spécial sur l'Ingénierie, n°71, p. 62-83.

quelques fidèles de cette époque et un groupe de tout jeunes ingénieurs embauchés au STGB pendant la guerre, dont il avait apprécié les qualités. C'est avec cette équipe qu'il continua la pratique d'un métier commencée dans la vallée de la Dordogne. Il préservait à travers la structure d'un cabinet indépendant, une liberté d'invention, de proposition et d'intervention en France et à l'étranger, qu'il n'aurait pas eu au sein d'une organisation plus importante et plus lourde. Il n'est pas anodin de noter que le groupe emmené par A Coyne, sorte de garde rapprochée, ne comprenait aucun ingénieur de l'administration. Ces derniers avaient leur avenir ailleurs, en particulier à EDF où ils devaient laisser des œuvres remarquables. Nous y voyons une intention délibérée traduisant une volonté d'indépendance qui marqua déjà le fonctionnement du STGB. Pour ce faire un contrat (protocole en date du 30 juin 1947) lia d'une part André Coyne à EDF lui demandant lorsque la nature et le volume des prestations l'imposaient, de s'assurer les services d'une équipe d'ingénieurs rassemblés dans le bureau d'études André Coyne et Jean Bellier ACJB (SARL, devenu SA en 1957), lié de façon indépendante par un contrat à EDF. Un volume de commandes minimal était garanti. L'objet des prestations demandées concernait essentiellement les barrages proprement dits à l'exclusion des usines sauf lorsque celles-ci étaient intégrées à la structure du barrage comme à l'Aigle ou Monteynard.

Ce contrat valable pour une durée de 5 ans était renouvelable par tacite reconduction ; C'était pour travailler dans le monde entier, la constitution d'une base arrière et une garantie de stabilité économique et de références

En parallèle en 1947, A. Coyne créa Télémac (Télémesures acoustiques), SARL pour la conception, la fabrication, l'assistance à la mise en place et l'exploitation des appareils d'auscultation, en particulier développés autour du capteur à corde vibrante. J. Bellier s'en occupa tout particulièrement. Des dizaines de milliers de capteurs seront fabriqués et posés dans des centaines de barrages à travers le monde, et parmi les plus importants³⁷.

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

Celle-ci se déroula à la fois en France dans le cadre de ce que certains appelèrent l'épopée hydroélectrique de l'Electricité de France³⁸, et aux quatre coins du monde

Dès 1937, A. Coyne avait fait partie du groupe d'experts consultés par le gouvernement égyptien pour la surélévation du premier barrage d'Assouan. C'est au Portugal en 1942³⁹ qu'il intervint comme ingénieur-conseil pour plusieurs ouvrages, en particulier pour l'avant-projet du barrage Castelo do Bode, voûte de 115 m de haut. Il suivit le projet jusqu'à sa réalisation terminée en 1951. Un jeune ingénieur⁴⁰ de son équipe résida à Lisbonne pendant cinq ans pour assurer suivi et coordination. Après le Portugal, où quatre ouvrages furent ainsi conçus et construits jusqu'en 1953, suivirent des interventions au Maroc (Bin el Ouidane - 1947) et en Tunisie (Nebeur sur l'oued Mellègue - 1947), puis plus au grand large, au Chili (Rappel - 1957), avant Kariba sur le Zambèze (1959). La pénétration commerciale de l'équipe s'appuyait alors, pour l'essentiel, sur le rayonnement personnel d'André Coyne, vice-président de la Commission internationale des

37. Archives Télémac.

38. P. Gérard, (1996). *L'Épopée hydroélectrique de l'Électricité de France*, Paris, Association pour l'histoire de l'électricité en France, 683 p.

39. Une lettre en archives laisse à penser que les contacts commencèrent dès 1941 à partir d'une demande de consultation sur des problèmes d'auscultation.

40. Il s'agit de Jean Martin (1920-...), ingénieur civil des Ponts (44), élève ingénieur sur le chantier de l'Aigle, qui fut président de Coyne et Bellier de 1960 à 1984, après avoir assumé, entre autres responsabilités, celle de chef de projet de Kariba.

grands barrages en 1936, puis président pendant deux mandats (1946-1952), mais aussi sur les entreprises françaises par le biais des variantes (Tunisie, Maroc), pratiques toutefois exceptionnelles pour les barrages. Ce type de relation commerciale fondée sur la seule valeur de l'expertise individuelle était insuffisant pour établir une expansion commerciale soutenue. A la fin des années 50, l'activité à l'exportation s'élevait à 60% de l'activité totale du bureau.

Le personnel d'ACJB au nombre de 17 à sa fondation en 1947 atteignait le chiffre de 33 dès 1948 et la centaine en 1960, expatriés non compris. Le barrage de Yaté en Nouvelle Calédonie, 50ème barrage conçu par André Coyne était mis en eau en 1959.

Le travail à l'exportation fut l'occasion de collaboration fructueuse avec des ingénieurs étrangers dont certains devinrent des experts internationaux réputés, comme Laghina Serafim et Manuel Rocha au Portugal

Le barrage de Kariba

Kariba, sur le Zambèze, ouvrage exceptionnel, mérite un développement spécial, ne serait-ce que parce que c'est le dernier barrage conçu par André Coyne⁴¹. Cet ouvrage clôt une série qui s'ouvre avec le coup de maître de la voûte de Marèges (voir annexe 1). Le parti retenu renvoie aussi à la méthode qui a prévalu pour élaborer celui retenu à Marèges. Il s'agit de l'une des premières voûtes en vallée large, (rapport l/h supérieur à 5) de 120 mètres de haut et de 617 m de longueur en crête, avec un évacuateur de 9 000 m³/s à travers la voûte calée à 30 mètres sous le niveau de la retenue. Il retient alors la troisième grande retenue du monde (180 milliards de m³) à ce jour.

Le rocher un gneiss à biotite était apte à recevoir un barrage à béton. Le site retenu laissait le choix entre une voûte simple et un barrage à voûtes multiples. Mais l'importance des débits de la rivière, 16.000 m³/s mesurés pendant les travaux, et le délai impératif de réalisation des ouvrages, ont imposé le choix d'une voûte unique. Le maître de l'ouvrage a exigé que la mise en service de la centrale intervienne quatre ans et demi seulement après la première visite du site par l'ingénieur-conseil ;

La voûte est relativement épaisse en crête, à cause de la largeur de la vallée. Il était plus facile d'y installer un déversoir que sur un barrage à voûtes multiples. La solution de la voûte unique présentait un pourcentage du volume de béton à mettre en place en partie basse plus faible ce qui diminuait le temps passé dans la partie basse à réaliser les excavations du rocher puis le bétonnage des plots de la voûte. De ce fait, les risques d'exposition aux crues sont réduits ainsi que l'importance des ouvrages de dérivation. La topographie du fond de la vallée a permis de supprimer de grosses galeries de dérivation provisoire, comme prévues initialement. On a pu mettre à sec le lit mineur de la rivière par dérivation par des pertuis provisoires ménagés dans les plots du barrage construits sur une plage rocheuse au pied de la rive gauche.

La mise en eau a pu être commencée, bien avant l'achèvement du barrage, en laissant passer les débits réservés à l'aval, par des conduits provisoires, obturés ultérieurement à l'abri de boules en béton armé descendues devant leurs orifices amont.

L'impératif de programme a amené à projeter la première centrale hydro-électrique, construite en même temps que le barrage, en souterrain pour éliminer tout risque de retard dû aux crues. Son implantation, sous la retenue, a permis d'éliminer les cheminées d'équilibre amont de grande hauteur. Le trajet hydraulique a été raccourci en plaçant les conduites forcées et les aspirateurs des turbines du même côté de la centrale. Les premières turbines ont fonctionné avant la fin du remplissage de la retenue grâce à des prises provisoires à niveau bas, obturées par la suite.

41. Coyne A., (décembre 1958). « Le barrage de Kariba sur le Zambèze (Rhodésie) », *Annales de l'institut du bâtiment et des travaux publics*, n° 132, p.

Les ouvrages d'évacuation des crues ont été réduits à leur plus simple expression, sous forme d'orifices à travers la voûte, sous 30 m de charge, pour rejeter les eaux assez loin à l'aval, et éviter que la fosse d'érosion qui se formerait à l'impact ne mette en danger les fondations de la voûte. En fait, les érosions ont été importantes puisqu'une fosse de 60 mètres s'est creusée dans la partie centrale de la vallée. Ceci est dû pour partie au fait que l'hydraulicité a été très abondante durant la première décennie de vie du barrage et que la deuxième usine en rive gauche, côté nord, n'a été construite que dix ans plus tard. L'évacuateur de crue a donc fonctionné quasiment sans discontinuer durant une période très longue ce qui est très inhabituel. Des travaux d'inspections par plongeurs protégés des crocodiles par des cages métalliques montrèrent que la stabilité des appuis n'était pas remise en cause. En 2014 des travaux d'aménagement de cette zone aval sont en cours de conception.

Toutes les dispositions adoptées à Kariba ont été indispensables pour permettre de respecter avec rigueur un programme de construction particulièrement ambitieux, malgré des crues exceptionnelles survenues aux deux années critiques des travaux. A Coyne au soir de sa carrière, bien loin des lieux de ses débuts avait un fois encore dominé les problèmes en intégrant toutes les contraintes dont celle d'exécution, dont il soulignait sans relâche l'importance.

22. Kariba : crue pendant les travaux

23. Kariba : Coupe en clé

24. Kariba : barrage terminé déversant

La pratique des barrages en terre, Serre-Ponçon, Mont-Cenis, Jatiluhur⁴²

Bien que la France fut depuis C. Coulomb (1736-1806) à l'origine du développement de la mécanique des sols, la technique des barrages en terre pourtant le type le plus commun de barrage depuis des millénaires n'avait guère progressé. Un membre éminent du corps de Ponts et Chaussées parlait en 1920 du long martyrologe des digues françaises qui nécessitaient des travaux fréquents de réparations et de confortement. Il fallut attendre les travaux de K Terzaghi (1883-1963), en particulier sa thèse de 1924 pour avoir un instrument qui permit de comprendre le comportement des matériaux constituant les digues. Il y eut alors une conjonction entre ces progrès scientifiques et la construction de barrages en terre aux États-Unis, répondant aux besoins de mise en valeur des grandes plaines de l'Ouest. Mais A Coyne considérant cette évolution, fidèle à l'importance qu'il a toujours accordée aux conditions d'exécution, « *suivant sa pente naturelle, donnerait volontiers, dans cet avancement prodigieux de l'art de manier les terres, la palme aux fabricants de matériel de terrassement.* »⁴³

C'est au cours des débuts de l'existence d'ACJB que deux jeunes ingénieurs Pierre Londe (1922-1999) tout juste embauché chez ACJB et Georges Post (1922-2006) qui devait entrer au bureau à son retour de États-Unis, en 1948, après plusieurs mois de séjours concomitants aux États-Unis le premier au Bureau of Reclamation, le second à l'US Corps of Engineers, publièrent un livre⁴⁴ qui constitua un vecteur de transfert technologique tout à fait remarquable. La réalisation du barrage de Serre-Ponçon de 1947 à 1960 fut l'occasion dans la sillage d'EDF⁴⁵ et sous son impulsion d'organiser un transfert technologique à partir des États-Unis touchant tous les secteurs, moyens d'étude, laboratoires de mécanique des sols, formation universitaire, entreprises de Travaux publics, fabricants de matériels de Travaux publics. Au passage pour répondre au parti imposé par le site, le barrage souterrain profond de 60 mètres, réalisé dans les alluvions du remplissage du sillon alluvial, était le produit d'une technique d'injection des entreprises françaises leaders mondiaux dans ce domaine. Celle-ci avait été développée à partir des années 1930 en Algérie. La réussite technique qui s'ensuivit fut un exemple reproduit de nombreuses fois dans le monde entier.

42. Bordes, J.L., (2004). « Transferts technologiques et barrages en terre en France, le cas du Barrage de Serre-Ponçon », in *Les circulations techniques*, Presses Universitaires de Franche-Comté, Belfort Montbéliard, p. 193-214.

43. Préface d'A. Coyne au livre de G. Post et P. Londe.

44. G. Post, P. Londe, (1953). *Les barrages en terre compactée, pratiques américaines*, Paris, Gauthier-Villars, 185 p.

45. Où l'on retrouve André Decelle responsable technique du projet à la Région d'équipement hydraulique d'Alpes Marseille, Alpes III, dont il était le directeur.

L'assimilation des techniques modernes de conception et d'exécution des barrages en terre par les ingénieurs français fut très rapide. En 1953 commençaient les études du barrage du Mont-Cenis situé au col du Mont-Cenis dans les Alpes à la frontière franco-italienne. Cet ouvrage en terre et enrochements, avait une hauteur de 120 m et un volume de remblai 14 millions de mètres cubes. Il fut terminé en 1968. Les études furent assurées par l'équipe d'A Coyne, pour le compte d'EDF. A Coyne avait obtenu en 1954 un contrat pour les études et la supervision de la construction du barrage de Jatiluhur à Java de 105 m de hauteur et d'un volume de remblai de 9,1 millions de mètres cubes, terminé en 1967. De nombreux barrages en terre allaient être étudiés et construits dans le cadre de l'activité de Coyne et Bellier tant sur le marché intérieur qu'à l'exportation. Les références relatives à la conception et l'exécution de barrages en terre, en France et à l'étranger concernent des dizaines d'ouvrages parmi les plus importants et remarquables, mis en service ces dernières années.

25. *Jatiluhur, Indonésie Ile de Java*

L'activité internationale d'A Coyne et le rayonnement qui en résultait pour la France lui valut une promotion au grade de Commandeur de la Légion d'Honneur au titre du ministère des Affaires étrangères, ce dont il était très fier⁴⁶.

Les 55 voûtes d'André Coyne, le projeteur et l'innovateur

Un retour, sur la carrière d'André Coyne permet de retenir le chiffres de 55 voûtes produites en 32 ans d'activité (1928-1960) voir Annexe 1. Ce total qui est en fait de 56 dans l'Annexe 1, souffre toujours d'imprécision pour différentes raisons.

On a dans un récit chronologique insisté sur les caractéristiques remarquables et les innovations des barrages de Marèges, de L'Aigle et Kariba, seuls ouvrages auxquels A. Coyne a consacré des articles spécifiques. On complètera cette revue par des considérations sur deux autres barrages exceptionnels dont la conception doit beaucoup à Jean Géhin (1913-1967), un des premiers compagnons d'André Coyne.

La stabilité d'ensemble d'un barrage à voûtes multiples est assurée par son poids auquel s'ajoute celui de l'eau surmontant son parement amont, d'où l'intérêt des voûtes relativement inclinées sur l'aval. Le fruit des contreforts augmente cette stabilité.

46. Dossier 19800035/323/43514, Base LEONORE, Archives nationales.

Enfin des surfaces de fondation relativement réduites rendent ce type de barrage peu sensible aux sous-pressions. Cependant les barrages à voûtes multiples, jusque vers 1945, étaient en général constitués de voûtes de faible portée, de faible épaisseur, ferrillées et difficiles à coffrer, d'où leur coût élevé.

André Coyne inaugura les voûtes à grande portée, donc plus épaisses et coffrées sans échafaudage grâce à un fruit limité à 0,6. De 50 m de portée à Nebeur pour une hauteur de 70 m sur l'Oued Mellègue en Tunisie, record du monde en son temps, puis 75 m à Grandval pour 88 m de hauteur avec introduction d'une crête rectiligne, son équipe aboutit au Québec enfin à 150 m de portée à Daniel Johnson (Manic V) pour une hauteur de 214 m, nouveau record du monde.

Les prix unitaires du béton et des coffrages ne sont alors pas plus élevés que dans les barrages à voûte unique. Suivant les données particulières au site, on dispose d'un outil permettant de trouver la réponse économique, en même temps qu'une réponse architecturale achevée comme le montre le barrage de Grandval (1959).

Enfin dans les Alpes, ouvrage unique au Monde, le barrage de Roselend (1962), rencontre improbable d'une voûte et d'un barrage à contreforts, expression architecturale en accord avec le site, correspondant à la recherche esthétique d'A Coyne.

26. Grandval

27. Roselend

Une fin de vie tragique

La maladie l'affecte lors de la fin des travaux de Kariba au cours d'une visite sur le site début 1959, puis survient la catastrophe de Malpasset, le 2 décembre 1959.

André Coyne en fut bouleversé se considérant comme le seul responsable. L'émotion dans son équipe fut considérable, comme en témoigne ce texte d'un de ses très proches collaborateurs⁴⁷. Cette épreuve lui fut fatale. Il décéda le 21 juillet 1960.

Le barrage de Malpasset était un ouvrage somme toute classique. Conçu pour alimenter en eau potable la région de Toulon à Fréjus, il fut construit de 1952 à 1954. Il s'agissait d'une voûte mince à double courbure

47. L. Giuliani « Son existence exemplaire aurait mérité de s'achever dans la sérénité d'une vieillesse encore féconde. Mais la tragédie ravagea tout en moins d'un an. Miné soudain par la maladie, puis torturé par la catastrophe de Malpasset, André Coyne épuisa ses dernières forces à tenter d'en éclairer les causes et enjoignit à ses disciples d'arracher, lui disparu, à la Nature, après tant de confrontations réussies, son secret meurtrier. Ils y parvinrent en suivant les règles mêmes de son enseignement technique et moral et aidèrent ainsi la Science qu'il leur avait transmise à tirer un progrès de l'épreuve par un surcroît de connaissance et de sûreté pour l'avenir », dans André Coyne (1891-1960), plaquette éditée à l'occasion du centenaire de sa naissance, Paris 1991, 14 p.

de 65 mètres de hauteur pour une longueur en crête de 223 mètres et une épaisseur maximale de 9 mètres. D'un volume de 48.000 m³ de béton, il stockait 55 millions de mètres cubes d'eau sur un bassin versant d'une surface modeste. La mise en eau commencée en 1954 est stabilisée en 1955 à 18,50 m sous la cote normale d'exploitation (RN) pour arriver par paliers à 4 m sous la RN pendant l'été 59, suivie par une montée fin novembre en 3 jours de 4,3 m jusqu'au seuil déversant, jusqu'à la rupture brutale le 2 décembre 1959. Il y eut 423 morts, la vallée fut ravagée sur plusieurs kilomètres, la ville de Fréjus en partie détruite. C'était la première fois qu'un barrage voûte se rompait.

Le maître d'ouvrage, service du génie rural du département du Var était inexpérimenté. Une première mise en eau complète tardive et brutale dans les derniers mètres, d'un ouvrage laissé sans surveillance, peut être à l'origine de la non prise en compte de certains signaux, faibles de surcroît. Mais surtout plusieurs années de recherche aboutiront à la conclusion, que l'effacement du barrage est dû à la rupture en grand de la fondation en rive gauche suivant un schéma alors totalement inconnu, compte tenu de propriétés très particulières de la roche ignorées jusqu'alors⁴⁸. C'était aussi l'aboutissement d'un long cheminement de la connaissance par les ingénieurs de l'effet de l'eau dans les sols et les roches, entamé il y avait près de deux siècles⁴⁹. Ce fut l'occasion d'une remise en question de toute une profession, en montrant que le risque est toujours présent, risque difficilement identifiable qui ne doit pas dissuader les ingénieurs d'avancer avec humilité, à l'écoute des signaux souvent faibles émis par la nature, interprétables par eux seuls.

Des procédures judiciaires ont été menées pour déterminer les causes de la catastrophe et rechercher d'éventuelles culpabilités. Les enquêtes, auditions et expertises ont duré plus de 6 ans. Le verdict final a été prononcé 12 ans après le drame.

Tous les jugements consécutifs à la rupture du barrage de Malpasset (Tribunal de Grande Instance de Draguignan, jugements des 25 novembre 1964 et 17 novembre 1965, Cour d'Appel d'Aix-en-Provence, arrêt du 26 avril 1966, Tribunal Administratif de Nice, jugement du 13 juin 1968, Conseil d'État, arrêt du 22 octobre 1971) innocentent les constructeurs, le Conseil d'État, constatant qu'aucune faute n'est établie à leur charge, ce qui implique l'absence de responsabilité.

Dans les attendus du jugement prononcé par la Cour d'appel d'Aix en Provence le 26 avril 1966 (tome VII p. 29-43), on peut lire : « Attendu que les contre experts ont conclu que toutes ces conjonctions qui étaient imprévisibles ont constitué une malheureuse occurrence, et que l'expert Drouhin a même considéré qu'il s'est agi en réalité d'un piège préparé par la nature... », cette dernière expression fut reprise à plusieurs reprises, et en particulier dans le rejet du pourvoi en cassation du 7 décembre 1967.

Les disciples d'André Coyne répondirent à ses prières de tout faire pour comprendre ce qui s'était passé. Quatre thèses y furent consacrées, suivant sa méthode d'études des matériaux et d'observation des faits. Elles furent coordonnées par P. Londe et P Habib. P Londe fut l'auteur d'une méthode de calcul de stabilité de coins rocheux permettant d'analyser les conditions de stabilité d'une fondation de barrage voûte.

A Coyne fut paradoxalement victime des risques sur lesquels il ne cessait d'attirer l'attention dans tout son enseignement, à savoir la méconnaissance de la nature du sol de fondation et de sa structure ainsi que l'influence des facteurs humains qu'il considérait comme non moins pathogènes. Ce sont ces facteurs aux-

48. *Revue française de géotechnique*, n° 131-132, 2^e et 3^e trimestre 2010, numéro spécial publié à l'occasion des cinquante ans de la catastrophe de Malpasset, voir les articles de Pierre Duffaut, « Malpasset, la seule rupture totale d'un barrage voûte » p. 5-18, Pierre Habib, « La fissuration des gneiss de Malpasset », p. 19-22, Alain Carrère, « Les leçons de Malpasset, leur application aux projets de barrages d'aujourd'hui », p. 37-52.

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

quels Jean Goguel, expert géologue de la commission administrative, nommé le 15 décembre 1959, faisait allusion dans une libre opinion dans le journal *Le Monde*⁵⁰.

Cette catastrophe majeure marqua la naissance d'une nouvelle discipline, celle de la mécanique des roches dans l'établissement et le développement de laquelle, plusieurs ingénieurs formés par A Coyne s'illustrèrent. (J. Bernaix, P. Londe, V. Maury, B. Schneider). Elle servit de fondement à l'introduction de diverses dispositions concernant le traitement des fondations de barrages voûtes et de leur auscultation, tant des ouvrages existants que de ceux à construire. Des dispositions réglementaires furent arrêtées dans différents pays, des structures de contrôle techniques et administratives furent mises en place.

28. Malpasset: vue des ruines et du dièdre rive gauche

29. Malpasset: Schéma de rupture de la fondation

La poursuite de l'aventure

La rupture du barrage de Malpasset, comme on aurait pu le craindre ne marqua pas la fin de l'aventure. En décembre 1959 même, mois de la rupture de Malpasset, Hydro-Québec signait le contrat qui associait ACJB à SNC pour concevoir et superviser la construction du barrage de Manic V, le plus haut barrage à voutes multiples du monde et la deuxième retenue par sa capacité

30. Barrage Daniel Johnson sur la rivière Manicouagan au Québec (Manic V)

50. Goguel, J., « La lumière et la justice », journal *Le Monde*, 13 mars 1965, p. 14.

Soixante-cinq ans après sa fondation, le bureau Coyne, devenu en 2009 Tractebel Engineering France, regroupe 350 personnes et présente un palmarès exceptionnel: plus de 600 barrages et 90 usines hydroélectriques, programmés, conçus et construits dont plusieurs parmi les plus importants au monde, dans soixante-dix pays, soit plus que tous les concurrents ou beaucoup d'agences gouvernementales. Mais ce palmarès serait largement incomplet si on ne mentionnait pas les tunnels hydrauliques, routiers et ferroviaires, le génie civil (l'enceinte) de nombreuses centrales nucléaires en France et à l'étranger et plusieurs très grandes structures comme celle de la Grande Arche à La Défense (1989), le Grimaldi Forum à Monaco (1999), le musée des confluences à Lyon (en cours d'achèvement). Ce palmarès n'est donc pas celui d'une société dédiée à une seule activité, même si la notoriété internationale dans le domaine des barrages est telle qu'elle jette un peu d'ombre sur les autres activités pourtant tout aussi technologiques et prestigieuses. On peut en imputer l'origine de la diversification à son fondateur qui avec l'utilisation de câbles de précontrainte des 1934 ouvrait la voie à l'étude des caissons nucléaires. C'était aussi oublier un peu vite la richesse du barrage qui fait corps avec son environnement naturel. Sa conception, sa réalisation puis son exploitation et son entretien requièrent des connaissances relevant de la quasi-totalité des domaines techniques des sciences de la nature et de la construction. C'est le fruit d'une démarche interdisciplinaire. Par ailleurs, son impact socio-économique requiert l'apport des sciences humaines. Plus que compliqué, c'est un ouvrage complexe à cause de l'incertitude qui demeure quant à la valeur des paramètres physiques à prendre en compte dans son étude, la géométrie de leur espace, ainsi qu'en ce qui concerne les lois régissant leurs relations. C'est aussi un ouvrage exceptionnel non seulement dans ses dimensions, mais peut-être surtout par sa durée. Sa pratique permet une diversification multiple. Elle a marqué la culture de l'entreprise toujours vivace et son organisation dans la filiation de l'impulsion donnée par son fondateur.

Dans cette tradition, on notera l'importance accordée à la recherche, la recherche de l'excellence, la pratique de la pluridisciplinarité et échanges d'expériences, et une appropriation collective de la renommée du fondateur.

Des idées audacieuses, une postérité féconde

Nous voudrions revenir sur les réalisations d'A. Coyne, en isolant quelques-unes de ses idées les plus remarquables qui expliquent la fécondité de sa postérité. Nous allons relire son histoire au risque de se répéter. Ce n'est que pour insister sur ce qu'il y a de plus important dans son enseignement. La simplicité de certaines de ses affirmations n'est souvent qu'apparente, et ne dispense pas d'un second regard pour en comprendre toute la force et la richesse.

Lorsqu'il fonde ACJB en 1947, André Coyne s'entoure d'une toute jeune équipe partiellement issue de ses élèves de l'école des Ponts et Chaussée. Il quitte une haute position dans l'administration française pour se lancer à 56 ans dans une nouvelle aventure humaine avec le cabinet d'ingénieurs conseils qu'il crée avec son gendre Jean Bellier et qu'ils appellent André Coyne et Jean Bellier. Il choisit son équipe en partie dans celle du barrage de l'Aigle. Il aurait pu avoir un rôle éminent au sein d'EDF. Il semble préférer sa liberté d'initiative et d'entreprise et, peut-être ressourcé par l'expérience simultanée du chantier du barrage de l'Aigle et du maquis qui y a été associé, il cherche une nouvelle vie. La confiance qu'EDF lui accordait lui permettait ce contact si fructueux avec ce tout nouveau Maître d'ouvrage, conscient de sa mission pour relever la France, confiante dans son ingénieur conseil, mais sans concession ni technique, ni scientifique, ni financière. Beaucoup des idées décrites ci-dessous ont émergé lorsqu'il était dans l'administration, mais elles se sont développées dans le nouveau cadre qu'il s'était donné.

André Coyne avait des idées, mais il savait aussi accueillir les idées des autres en faire des idées communes à son équipe et développer cette notion d'expertise collective si essentielle dans de tels métiers et si passion-

nante à vivre humainement pour ceux qui y sont associés. C'est d'ailleurs peut-être cette manière d'être en équipe qui est son héritage le plus riche pour ceux qui en ont profité directement ou indirectement.

Les barrages-voûtes

Il avait la passion de la forme mécanique parfaite qui guide la force telle un flux vers les appuis, à la manière des arcs boutants des voûtes des cathédrales gothiques. Les barrages en béton sont constitués de béton massif sans aciers, c'est-à-dire d'un matériau qui ne peut travailler durablement qu'en compression comme une maçonnerie. La forme est donc essentielle.

Après le barrage voûte de Marège, sur la Dordogne, construit en 1935, il a cherché les meilleures formes en développant des méthodes d'analyse tridimensionnelle nouvelles. Il y avait la méthode des anneaux plongeurs pour tenir compte de l'effet cumulé du poids et de la poussée de l'eau. Il y avait aussi le concept des arcs actifs qu'il faut imaginer à l'intérieur d'un massif plus volumineux dont une partie ne participe pas activement à la résistance du barrage et dont seule une zone située au cœur de la masse conduit les contraintes. L'arc actif est la forme pure qui suffirait si on enlevait tout le reste. En pratique ce béton « inutile » peut être nécessaire pour porter un évacuateur de crue, pour assurer la stabilité à vide etc. Dans ce concept, ce qui importe, c'est que l'ingénieur s'imagine dans la masse du béton et du rocher, faisant corps avec la structure qu'il analyse et guidant les efforts vers les appuis le plus simplement possible.

Il insistait sur « l'intelligence du site », c'est-à-dire la vision globale, on dirait aujourd'hui la vision systémique, qui met ensemble la géologie, la forme de la vallée, les solutions d'évacuateurs de crue et d'usines hydroélectriques, et les attentes de la population. Il était assoiffé de pureté de ligne, de simplicité de solution, de limpidité de l'intégration dans la nature. Il citait souvent la phrase de Saint-Exupéry « La perfection est chaque fois atteinte non quand il n'y a rien à ajouter mais quand il n'y a rien à retrancher, quand on a mis un corps à nu ».

Un barrage n'est jamais invisible dans la nature, il est un geste fort qui se doit d'être beau à l'échelle de la nature à laquelle il se mêle. La recherche de formes minces et pures trouva ses limites au barrage du Gage et au barrage de Tolla, où finalement, ce sont des efforts autres que ceux qui étaient supposés qui provoquèrent des fissures jugées inacceptables. L'expérience pratique perturbe parfois la pureté du raisonnement. C'est souvent ainsi. A Tolla, près d'Ajaccio, ce sont les contraintes thermiques notamment lorsque la retenue est vide et que le barrage chauffe par ses deux faces que des difficultés ont été rencontrées.

Cette tradition des barrages voute s'est renforcée avec le temps. Coyne et Bellier est le premier concepteur de barrages voûtes de la planète avec environ 100 barrages voûtes conçus et réalisés. Le barrage de Malpas-set était un barrage voûte, il s'est rompu le 2 décembre 1959 et a provoqué la première catastrophe associée à un barrage voûte (et, à ce jour, la seule). Les diagnostics, les recherches, les analyses n'ont jamais mis en cause ni la conception de la voute, ni le calcul « à la main » qui à l'époque durait une année complète, avec des tables de logarithme.

31. Barrage de Marèges, vue d'aval de la voûte

Les barrages à voûtes multiples

A côté des barrages voutes, les barrages à voutes multiples ont tenus une grande place dans le champ de l'innovation. Dans bien des cas, la forme de la vallée est trop large pour autoriser le dessin d'un arc unique, mais la qualité du rocher permet un ouvrage sollicitant fortement la fondation rocheuse. André Coyne provoquait l'imagination de ses collaborateurs et notamment de Jean Géhin (1913-196 ?) souvent difficile à comprendre et qui l'agaçait puis l'enchantait. Cette imagination collective pleine d'esprit de compétition au sein de l'équipe a engendré des idées originales mêlant voûtes, contreforts, murs etc. On lui doit des ouvrages totalement originaux comme les barrages de Roselend, de Daniel Johnson (Québec), de Grandval etc.

Ces barrages sont particulièrement harmonieux. Le dernier réalisé est le barrage du Mazeaud (1978) pour l'alimentation en eau de Limoges.

La nouvelle technologie dite du béton compacté au rouleau a rendu obsolète cette belle technique dont le savoir-faire aura bientôt disparu.

Les effets de l'eau, l'accident, la leçon

La compréhension du rôle de l'eau dans la stabilité des barrages en béton ou en maçonnerie était encore le fait de quelques-uns. De grands ingénieurs s'étaient attelés à cette question qui paraît simple. C'est l'ingénieur autrichien Karl von Terzaghi (1883-1963) qui le premier a développé complètement la notion de pression interstitielle et l'a explicitement définie en 1924 dans son livre *Erdbaumechanik*. C'est une avancée essentielle qui fonde la géotechnique et les ouvrages en remblais. A. Collin (1808-1890) en France avait esquissé la bonne théorie et les bonnes expérimentations, mais son excellent travail n'avait pas convenu à sa hiérarchie.

Dans le cas des barrages-voûtes, la mécanique des roches juste naissante avec Joseph Talobre ne donne pas encore sa juste part à l'action de l'eau. On faisait confiance à la flexibilité des barrages voutes peu épaisses comme le très mince barrage du Gage. Il est dit dans le livre de Joseph Talobre « Il semble donc que la réserve de sécurité contenue dans les ouvrages eux-mêmes serve à compenser la sécurité incertaine de leur fondation ». On avait pris l'habitude de drainer la fondation des barrages depuis 1900, puis systématiquement depuis 1923, mais pas celles des barrages voûtes, car l'application de la sous-pression sur la surface de contact entre le béton de la voute et le rocher de la fondation ne semblait pas pouvoir mettre en cause la résistance du barrage. On s'intéressait surtout à l'étanchéité de la fondation, comme à celle du béton, mais le concept fondamental de l'effet de l'eau qui s'écoule dans la masse du rocher (comme dans celle du béton) n'existait que dans l'intuition des esprits fins et surtout des habitués de l'analyse de terrain. On peut supposer qu'André Coyne en avait le pressentiment, car, après l'accident du barrage de Malpasset, son équipe a progressé tellement rapidement dans la compréhension des causes qu'il est permis de penser que l'expertise collective était mure.

Rappelons la conception moderne : l'eau n'agit pas comme un liquide externe qui appliquerait une pression sur la surface externe du barrage ou de la rive rocheuse, mais comme un fluide en déplacement à l'intérieur de la masse du matériau : la pression de l'eau en tout point du massif de rocher ou de béton est une variable d'état, c'est la variation de la pression (le gradient de pression) qui est une force qui agit à l'intérieur de la masse. La rupture du barrage de Malpasset fut le point de départ du développement de la mécanique des roches moderne et de l'émergence des modèles dit couplés. A l'époque de la rupture, son mécanisme était considéré comme inexplicable. Aujourd'hui ce serait une faute impardonnable que ni les services de contrôle, ni le Comité Technique Permanent des Barrages et des Ouvrages hydrauliques ne laisseraient passer.

Les barrages en remblai

Les barrages en remblai d'enrochements ou d'alluvions avec un noyau argileux n'étaient pas fortement ancrés dans la culture technique française. Comme on l'a vu, les principes même de pression interstitielle étaient très récents, et sans doute encore peu enseignés, dans les grandes écoles où étaient formés les ingénieurs.

André Coyne était conscient de la faiblesse de l'expérience française et européenne dans le domaine des barrages en remblai. En 1948, il envoie Pierre Londe en mission pour plusieurs mois aux États-Unis à Denver au Bureau of Reclamation. Il y rencontre Georges Post qui était boursier Fulbright en stage à la Tennessee Valley Authority et à l'US army corps of engineers. Au retour, Post est embauché par Coyne et Post et Londe écrivent un livre évidemment préfacé par André Coyne : « G. Post, P. Londe, Les barrages en terre compactée, pratiques américaines, Paris, Gauthier-Villars, 1953, 185 p. ». Une autre mission de Jean Martin a lieu en 1951. Dans cette préface André Coyne dit, à propos de la mécanique des sols qu'il découvre :

A ce propos, j'entends dire souvent que la Mécanique des Sols est à l'origine des progrès vraiment spectaculaires réalisés dans le domaine qui nous intéresse. Tous les sites lui seraient aujourd'hui abordables avec fortes chances de succès. Pour moi, si je suivais ma pente naturelle, je donnerais volontiers, dans cet avancement prodigieux de l'art de manier les terres, la palme aux fabricants de matériel de terrassement, et je serais tenté de conclure – à l'opposé – que c'est la Mécanique des Sols qui est redevable à la technique des digues en terre de progrès peut-être moins visibles mais tout aussi sensationnels.

Et un peu plus loin :

il n'est certes pas mauvais pour les Français de constater quels nouveaux horizons les tendances empiriques des constructeurs anglo-saxons ont su ouvrir à la recherche scientifique, faisant ainsi une juste balance aux spéculations purement abstraites.

Et il s'extasie volontiers devant la pratique des essais de mécanique des sols où la perception des caractéristiques du sol se fait en partie au toucher et à l'œil.

Il y avait beaucoup de choses à apprendre des pratiques américaines : l'usage des nouveaux matériels de transport et de mise en place (les bulldozers, les scrapers, les rippers, les loaders, les dumpers, qui ont eu du mal à se faire des noms français), ensuite l'organisation des circulations de ces parcs de matériels mais il y avait aussi la compréhension des matériaux frottant, des matériaux plastiques, de la pression interstitielle de l'eau au sein de la matrice du remblai et du noyau, et tous les systèmes de filtres et drains destinés à contrôler les écoulements et les transports éventuels de matériaux qu'ils provoquent. Faire un barrage en remblai, c'est trouver des matériaux abondants à proximité du site, les déplacer et les organiser pour créer un ouvrage solide et sûr à très long terme. Là encore, il faut l'intelligence du site et des matériaux du site. Utiliser des matériaux proches, mais de qualité médiocre demande plus d'imagination et de talent qu'aller chercher plus loin des matériaux de qualité meilleure.

Le barrage de Serre Ponçon ne pouvait être un barrage en béton, notamment à cause de l'épais remplissage alluvial en fond de vallée. Après des décennies d'hésitation, le projet d'un grand barrage en terre est élaboré et construit entre 1954 et 1960, avec un écran d'étanchéité réalisé par injection dans les alluvions dû à la maîtrise des entreprises françaises dans ce domaine. Deux experts américains furent associés à la conception et à la construction. Ce fut un succès incontestable et le début d'une longue série de barrages en remblais.

32. Barrage du Mont-Cenis

Les évacuateurs de crue

Les évacuateurs de crue sont ces organes qui permettent de laisser passer les débits des crues lorsque ceux-ci dépassent le débit turbiné ou fourni aux utilisateurs d'eau. Un barrage ne retient l'eau que très temporairement.

La pratique dans les années 30 était plutôt de guider l'eau vers l'aval puis de la tranquilliser autant qu'il est possible avant qu'elle ne rejoigne son cours habituel. André Coyne propose à l'inverse de donner à l'eau suffisamment de vitesse pour pouvoir la projeter le plus loin possible à l'aval. Ainsi les érosions inévitables n'interfèrent pas avec la stabilité des appuis du barrage. La fosse creusée par l'impact du jet est centrée dans le fond de la vallée et est acceptable dans le cas d'un barrage voute qui s'appuie principalement sur ses appuis latéraux.

C'est l'invention du saut de ski qui signe l'aspect extérieur de bien des barrages de Coyne.

Poussant plus loin l'idée, et toujours tendu vers la solution la plus pure, il propose de créer de simples orifices vannés à une profondeur suffisante pour que la charge statique donne à l'eau une vitesse suffisante (25 à 35 m/s) pour projeter l'eau à distance sans même faire l'investissement du tremplin du saut de ski. Cette idée a été développée pour des vitesses nettement supérieures, mais il est alors indispensable de blinder les pertuis avec de l'acier. La même idée a été utilisée pour des barrages de grande hauteur (supérieure à 150 mètres). Leur évacuateur est installé en tunnel dans une des rives rocheuse ; la partie amont du tunnel est en charge d'une trentaine de mètre et courbe jusqu'à la chambre des vannes. Celle-ci est suivie d'un canal rectiligne à forte pente qui permet de lâcher l'eau à une vitesse encore compatible avec l'érosion du béton (< 35 m/s) du court saut de ski situé à l'extrémité du tunnel qui se trouve encore à plus de 100 mètres au-dessus du fond de la vallée si la hauteur du barrage est de 200 mètres. L'impact du jet est repoussé très loin et ne présente pas de danger pour les appuis. On réalise souvent un contre barrage afin d'augmenter l'épaisseur du « coussin d'eau » et réduire l'érosion sous l'impact.

33. Cahora Bassa sur le Zambèze à l'aval de Kariba

La précontrainte par câbles d'acier

Lors de son expérience à Brest et à l'occasion de ses contacts nombreux avec Eugène Freyssinet, André Coyne avait bien compris l'intérêt de la précontrainte dans les ouvrages en béton. Il avait breveté plusieurs idées associées à l'usage de précontrainte par câble de grande puissance (brevet du 1 juillet 1929). Ces techniques furent utilisées pour renforcer des barrages, pour en surélever d'autres. Il a appliqué l'usage de la précontrainte à de nombreux ouvrages, comme le barrage de Cheurfas en Algérie avec des tirants de 1000 tonnes, puis à la voute multiple de Saint Michel, au barrage de Tansa en Inde, au barrage du Nébeur sur l'Oued Mellègue en Tunisie pour l'ancrage des vannes de l'évacuateur, pour la surélévation du barrage de Joux en France, de Gafarsa en Ethiopie, de Witbank et de Henley en Afrique du sud. Il utilisa aussi la précontrainte pour renforcer les fondations des barrages de Castillon et Chaudanne en France. Des progrès considérables ont été réalisés dans la prévention de la corrosion des câbles principalement grâce aux travaux d'optimisation des enceintes nucléaires en béton précontraint, des plots ou des structures comme l'arche de la Défense. La France est depuis longtemps leader dans le domaine de la précontrainte et des systèmes technologiques associés. Elle le demeure.

34. Barrage du Nebeur – Évacuateur en rive gauche

Le mur à échelle, le barrage à écaille

Une technique très intéressante est celle qu'A. Coyne avait appelée le mur à échelle et qui procède des mêmes concepts que la terre armée. Il avait travaillé à ces idées dès son séjour à Brest, mais c'est un remarquable article du « Génie Civil » 1 mai-15 mai 1945 qui rassemble toutes les idées qui avaient mûri pendant ces années de guerre et de présence sur le chantier du barrage de l'Aigle. L'introduction qui évoque sans gêne le besoin d'en avoir le goût pour faire les choses, même en une période si troublée, est significative de sa liberté d'esprit.

« Voici de longues années que le *Génie civil* me faisait l'honneur d'accueillir dans ses colonnes un petit article intitulé, « Murs de soutènements et murs de quai à échelle »⁵¹. J'y décrivais sous une forme condensée et schématique un nouveau type de mur de soutènement à tirants superposés, auquel m'avaient conduit une série de recherches expérimentales, et j'en donnais une justification théorique assortie d'une méthode de calcul. Je promettais de revenir plus tard sur le parti que l'on pouvait tirer plus tard de ces vues nouvelles, mais faute de temps ou de goût pour l'entreprendre, cette publication n'a jamais vu le jour. »

L'article fait la démonstration de l'absolue nécessité d'élaborer et de développer une base expérimentale pour asseoir une théorie, puisque ce sont les essais qui ont raison contre la théorie qui prévalait avant l'essai. La démonstration est brillante et la théorie élaborée sur cette nouvelle base aussi. L'objectif de la démarche

51. Coyne A., « Murs de soutènement et murs de quai à échelle », *Le Génie civil*, 1^{er} et 15 mai 1945.

est de remplacer des murs de soutènement lourds par des murs de soutènement légers et souples retenus au moyen d'ancrage placés dans le talus qu'ils soutiennent. De nombreuses applications ont été faites par exemple des murs de quai à Brest, plusieurs grands ouvrages sur le site du barrage de Marèges (mur de soutènement du chemin d'accès, rives du canal de fuite de l'évacuateur de crues, batardeau amont, ouvrages d'une quinzaine de mètres de hauteur). La technique a ensuite été appliquée au barrage du Laurenti et à la digue de col du barrage de Saint Cassien.

Pour lutter contre la corrosion des tirants à long terme (les barrages vivent très longtemps et représentent une menace s'ils se dégradent), André Coyne recommandait d'enrober les tirants d'acier dans une gaine de mortier frettée par « deux spires hélicoïdales à pas très allongé, de sens contraire ». Cette technologie a été améliorée lors de la construction du barrage dit « à écaille » de Conqueyrac sur le Vidourle où les tirants sont enveloppés d'une petite poutrelle frettée et précontrainte par fils adhérents sur un banc de préfabrication ce qui donne à l'ensemble une grande souplesse lors du transport et de la mise en place sans risque de fissuration.

35. Barrage de Conqueyrac

L'extensomètre à corde vibrante et la mesure

Il est un peu paradoxal de terminer cette revue des objets, procédés ou dispositifs imaginés par A. Coyne par un appareil dont on a parlé dans le tout début de cet article, et dont l'utilisation couvre tout au long de sa carrière. Mais la mise au point de cet appareil et son utilisation illustrent parfaitement la démarche du projeteur de barrage qui accompagne la réalisation de l'ouvrage jusqu'au bout de sa réalisation et de son exploitation. A Caquot qualifie A. Coyne de physicien dans son introduction à la conférence sur Kariba. C'est bien en physicien qu'il se conduit dans la recherche d'appareils simples pour mesurer le comportement des structures. A la fin des années 30, la profession était quelque peu démunie en matière d'outil de mesure in situ. On raconte qu'A. Coyne a eu l'idée du capteur à corde vibrante à partir de son expérience de violoniste. Ce serait bien en accord avec son attitude d'observation constante du réel. Il étend la notion de laboratoire hors les murs à l'ensemble du barrage depuis l'étude du site jusqu'à toutes les étapes de la réalisation puis de l'exploitation de l'ouvrage.

Le capteur à corde vibrante se caractérise par sa simplicité et sa rusticité : un simple fil tendu rendu solidaire du milieu à ausculter par un tube avec des flasques, avec un câble pour la mise en excitation du fil et le renvoi du signal de réponse. Quatre-vingts ans après les premières utilisations, ce capteur rend les plus grands services⁵².

Ces capteurs qui permettent de concevoir toute une gamme d'appareils étaient particulièrement bien adaptés aux environnements extrêmement difficiles propres au génie civil. Des cellules de pression interstitielle avec une corde vibrante mesurant la déformation d'une membrane soumise à la pression, étaient conçues en 1958 par A. Coyne et Jean Bellier. Les mesures de pression de l'eau dans les barrages en terre, essentielles pour apprécier leur comportement et leur sécurité, étaient devenues courantes. Limitées dans les barrages en béton au contact béton-rocher, elles allaient être étendues à la mesure des pressions dans le massif de fondation, en particulier à la suite des leçons tirées de la catastrophe de Malpasset survenue en 1959. Les capteurs à corde vibrante, sans électronique, possèdent une longévité, une stabilité et une précision tout à fait remarquables, et leur signal de sortie en fréquence les rend insensibles aux défauts de ligne.

36. Principe du témoin sonore, brevet André Coyne 1931

52. Rosin-Core N., Noret C., Bordes J.L., « L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience », Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », 27-28 Novembre 2012, Chambéry

Une leçon pour notre époque

Le monde dans lequel a travaillé A. Coyne était déjà un monde globalisé qui imposait à son équipe la pratique de plusieurs langues, l'ouverture sur des mondes et des mentalités souvent bien éloignés de ceux du monde européen. Cette ouverture se traduisait par l'obligation de la connaissance de l'histoire et de la géographie des pays où la conclusion de contrat entraînait les ingénieurs. Car les interactions entre l'histoire, la géographie, et les pratiques techniques sont étroites. Leurs appréciations relèvent de la même démarche que celle mise en œuvre dans la connaissance d'un site pour la définition du parti de l'ouvrage qui répondra au problème posé par le client. Mais ce travail doit être partagé et transmis au client qui doit s'approprier son territoire. Il y a déjà longtemps que les ingénieurs français des Travaux publics étaient partis au grand large, depuis le milieu du ^{xix}^e siècle, depuis les travaux du canal de Suez. Chemins de fer, ports, ponts avaient été leur spécialité, mais les grands travaux hydrauliques du milieu du ^{xx}^e siècle et au-delà leur ont apporté un défi spécifique particulièrement complexe, lié aux effets de l'eau.

Une des explications de la réussite de l'industrie française des travaux publics à l'exportation est liée à sa capacité d'innovation. Ce fut un des mérites d'André Coyne, comme nous l'avons montré, de concevoir des ouvrages, en imaginant des solutions originales et audacieuses sans jamais perdre de vue les contraintes de l'exécution, accompagnant ses propositions dans l'exécution et au delà dans l'exploitation. Si l'innovation demeure une des clés du progrès, une étroite coordination entre les acteurs de l'acte de construire, maître d'ouvrage, concepteur et entrepreneur est une des conditions pour qu'elle puisse être pleinement féconde. Le rôle du maître d'ouvrage qui est à l'origine de la demande et en dernier ressort l'utilisateur, est fondamental par l'appui qu'il peut donner aux propositions qui lui sont faites, et au suivi des ouvrages réalisés. On n'apprend qu'en construisant, en observant et en mesurant. Mais on ne progresse qu'en élaborant ensuite une modélisation qui permet de comprendre globalement le fonctionnement du barrage de sa fondation et de sa retenue. C'est le principe même de la méthode expérimentale suivie par André Coyne.

Les auteurs remercient vivement Jean Martin qui a bien voulu relire leur manuscrit.

Annexe

Liste chronologique des 55 voûtes d'André Coyne

Nom	Situation (pays ou territoire)	Hauteur (m)	Volume de béton (m³)	Période d'étude et de construction (année)
Marèges	France,	90	185.000	1929-1935
Gouessant	France	22	2.000	1933-1936
L'Aigle	France	95	240.000	1935-1946
Les Sirous	France	25	1.900	1936-1938
Castillon	France	100	125.000	1936-1949
Maury	France	70	72.000	1938-1948
Saint-Etienne Cantalès	France	70	150.000	1939-1945
La Triouzoune	France	27	11.000	1939-1944
Monceaux-La-Virole	France	34	7.800	1939-1947
Fabrèges	France	51	36.000	1940-1946
Santa-Luzia	Portugal	76	80.000	1940-1944
Goulours	France	23	9.000	1941-1945
La Couze	France	30	6.000	1941-1945
Chastang	France	85	250.000	1941-1951
Castelo do Bode	Portugal	115	450.000	1942-1950
La Roucarié	France	28	6.000	1944-1949
Venda Nova	Portugal	97	220.00	1945-1951
Bort-les-Orgues	France	120	660.000	1945-1952
Marcillac	France	48	27.000	1945-1949
Bimont	France	87	122.000	1946-1951
Tignes	France	181	632.000	1946-1952
Bioge	France	57	8.000	1946-1949
Pont-en-Royans	France	30	10.000	1946-1949
La Luzège	France	42	9.000	1946-1950
La Chaudanne	France	72	27.000	1946-1952
Nebeur	Tunisie	45	25.000	1947-1952
Les Gloriettes	France	45	25.000	1947-1951
Bin-el-Ouidane	Maroc	135	260.000	1947-1953
Les Cammazes	France	70	100.000	1947-1957
Cap de Long	France	101	265.000	1947-1954
Ait Ouarda	Maroc	45	25.000	1947-1953
Esch-sur-Sure	Luxembourg	50	26.000	1948-1958
Le Tech I	France	33	13.000	1949-1951
Rassisse	France	34	6.000	1940-1954
La Palisse	France	61	30.000	1949-1953
Le Gage I	France	38	6.000	1949-1953
Salamonde	Portugal	75	93.000	1949-1953
Dumbéa Est	Nouvelle Calédonie	31	11.000	1950-1972
Roselend	France	150	940.000	1950-1962
Grangent	France	55	65.000	1950-1958
Grandval	France	79	190.000	1950-1959

Nom	Situation (pays ou territoire)	Hauteur (m)	Volume de béton (m ³)	Période d'étude et de construction (année)
Saint-Pierre Cognet	France	80	30.000	1951-1956
Monteynard	France	155	450.000	1951-1962
Mandraka	Madagascar	25	8.000	1952-1955
La Valla	France	45	28.000	1952-1954
Moulin Ribou	France	16	4.0000	1952-1954
Yaté 2	Nouvelle Calédonie	57	135.000	1953-1959
Naguilhes	France	61	25.000	1954-1959
Lanoux	France	45	26.000	1954-1960
Laouzas	France	50	60.000	1954-1964
Kariba	Zimbabwe Zambie	128	1.000.000	1954-1959
Pont du Roi	France	28	9.500	1956-1959
Ku-Kuan	Taïwan	86	100.000	1956-1962
Tolla	France	92	75.000	1956-1965
Kyle	Zimbabwe	65	55.000	1956-1960
Bavigne	Luxembourg	23	12.000	1958-1958

Les études et la conception des voûtes de Rapel (Chili) (1957-1968) et Vouglans (1957-1968) commencèrent en 1957.

Bibliographie

- Barbin C.**, (2013). *L'aménagement hydroélectrique de Marèges, Histoire du site et importance patrimoniale*, École du Louvre, mémoire de recherche (2nde année de 2^e cycle), 186 p.
- Billoré J.**, (June 1991). « André Coyne : a review of his ideas and their application today », *Water Power and Dams Construction*, p. 47-54.
- Bordes J.L.**, (2004). « Transferts technologiques et barrages en terre en France, le cas du Barrage de Serre-Ponçon », in *Les circulations techniques*, Presses Universitaires de Franche-Comté, Belfort Montbéliard, p. 193-214.
- , (2005). *Les barrages-réservoirs en France du milieu du XVIII^e siècle au début du XX^e siècle*, collection Histoire et Techniques, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 448 p.
- , (hiver 2010). « Les barrages en France du XVIII^e à la fin du XX^e siècle, histoire, évolution technique et transmission du savoir », *Pour mémoire*, Revue du comité d'histoire du ministère de l'Écologie et du Développement durable, n° 9, p. 70-120.
- , (2011). « Barrages et essais en vraie grandeur, auscultation et surveillance », Documents pour l'histoire des techniques, n° 20, Paris, CNAM, p. 97-106.
- Bordes J.L., Herriou J.P.**, (juin 2013). « Entre excellence technique, et recherche de marchés, Coyne et Bellier, 1947-2009 », revue *Entreprises et Histoire*, numéro spécial sur l'Ingénierie, n°71, p. 62-83
- Carrère A.**, (2010). « Les leçons de Malpasset, leurs applications aux projets de barrages d'aujourd'hui », *Revue française de géotechnique*, n° 131-132, p. 37-52.
- Coyne A.**⁵³, (29 octobre 1927). « Murs de soutènement et murs de quai à échelle », *Le Génie civil*, p. 432-433.
- , (23 août 1930). « Perfectionnements aux barrage-poids par l'adjonction de tirants en acier », *Le Génie civil*, tome XCVII, n° 8, p. 186-187.
- , (novembre 1930). « Les barrages différents types et modes d'exécution », *Le Génie civil*, numéro spécial du cinquantenaire de la revue, p. 202-205.
- , (26 octobre 1935). « Le barrage et la centrale électrique de Marèges », *Le Génie civil*, tome CVII, n° 17, p. 385-387
- , (feb 1937). « The construction of large modern water dams », *The structural engineer*, London.
- , (juillet-août 1938). « Quelques résultats d'auscultation sonore sur les ouvrages en béton, béton armé ou métal. », *Annales de l'institut du bâtiment et des travaux publics*, p. 33-56.

53. Il n'existe pas de bibliographie complète à notre connaissance d'André Coyne. La bibliographie d'André Coyne établie par Coyne et Bellier en septembre 1960, comprend 58 titres, total légèrement sous-estimé à notre avis. Nous nous sommes limités aux références (17) qui ont servi à l'élaboration de cet article.

- , (1943). *Leçons sur les grands barrages*, Paris, École nationale des Ponts et Chaussées, vol. 1, 186 p.
- , (1^{er} et 15 mai 1945). « Murs de soutènement et murs de quai à échelle », *Le Génie civil*.
- , (mars 1950). « Les barrages usines de l'Aigle et Saint-Étienne-Cantalès », *Travaux*, 21 p.
- , (1951). « Du rôle des ingénieurs-conseils et des bureaux d'études en matière de construction de barrages », *Hydraulique et Électricité française*, La Houille Blanche.
- , (mars 1951). « Quelques réflexions sur l'esthétique des grands barrages », conférence à l'Institut d'esthétique industrielle, *Esthétique industrielle*, n° 2.
- , « L'esthétique des grands barrages », conférence prononcée le 27 novembre 1953 à l'Institut français d'architecture
- , (1953). « Remerciement au Cercle d'études architecturales à l'occasion de la remise du Grand prix d'architecture 1953 ».
- , Allocutions d'accueil aux congrès internationaux des grands barrages, 3^e Stockholm 1948, 4^e New-Delhi 1951, 5^e Paris 1955.
- , (April 1956). « Arch dams their philosophy », *Journal of Power division, Proceedings ASCE*, paper 959, n° PO2.
- , (décembre 1958). « Le barrage de Kariba sur le Zambèze (Rhodésie) », *Annales de l'institut du bâtiment et des travaux publics*, n° 132.
- Coyne A., (1891-1960), (1966). Hommage solennel le 16 mai 1966, salle d'Iéna, Comité français des grands barrages, Paris, 20 p.
- Coyne A., (1891-1960), (1991). plaquette éditée à l'occasion du centenaire de sa naissance, Paris, 14 p.
- Faure A., (2006). « Ecouter les voix de la Vallée : les riverains des gorges de la Dordogne face à la construction de cinq grands barrages ».
- Faure A., Maisonanbe A., (2012). *Bort-les-Orgues, les mots sous le lac*, Toulouse, Privat, 96 p.
- Freyssinet E., (1993). *Un amour sans limite*, Paris, Éditions du Linteau, 187 p.
- Gérard P., (1996). *L'Épopée hydroélectrique de l'Électricité de France*, Paris, Association pour l'histoire de l'électricité en France, 683 p.
- Grands Barrages*, recueil photographique, Paris, Coyne et Bellier 1955, 1^{re} édition.
- Martin J., Dufour Y., (octobre 1961). « L'aménagement de Kariba », *Annales de l'institut du bâtiment et des travaux publics*.
- Martin J., (26-27 avril 1989). « Les 55 voûtes d'André Coyne dans l'histoire mondiale des barrages voûtes », dans *Quels problèmes pour quels barrages ?* colloque organisé par le Centre d'études et d'informations

et de formation des ingénieurs de la construction et de l'industrie, Paris, 31 p.

Martin J., (2001). « Souvenirs du Portugal... cinquante ans après », Plougastel, 5 p. et autres communications aux auteurs.

Post G., Londe P., (1953). *Les barrages en terre compactée, pratiques américaines*, Paris, Gauthier-Villars, 185 p. Préface d'A. Coyne.

Revue française de géotechnique, n° 131-132, 2010, numéro spécial publié à l'occasion des cinquante ans de la catastrophe de Malpasset, voir les articles de Alain Carrère, Pierre Duffaut et Pierre Habib.

Crédits photographiques: Baranger, Bordes JL, Coyne et Bellier, Tractebel Engineering France, EDF, J et P Duffaut, Structurae, Travaux.