

	<b>COLLOQUE</b>  <b>METHODES ET TECHNIQUES          INNOVANTES DANS LA MAINTENANCE          ET LA REHABILITATION DES BARRAGES          ET DES DIGUES</b>	27 et 28 novembre 2018  CHAMBERY  Centre de Congrès Le Manège
<b>UNE SYNTHESE</b>		

Introduction du colloque par Bernard Reverchon – Président du Comité d’Organisation

### *Objet du Colloque*

Rappelons un truisme bien robuste : les barrages, comme le reste d’ailleurs, vieillissent d’un an chaque année. La raréfaction de la construction de ces ouvrages ces trente dernières années conduit là aussi à une évidence : l’âge moyen des barrages français, s’il n’est pas encore canonique, augmente régulièrement pour être à ce jour de l’ordre de l’espérance de vie humaine. En remblai pour les plus anciens, puis en maçonnerie et enfin en béton pour les plus « récents », les barrages (et les matériaux qui le composent) subissent l’épreuve du temps. Les opérations de maintenance et de réhabilitation sont (et seront) très largement plus nombreuses en France que les constructions d’ouvrages. Pour les digues de protection, dans le contexte de la mise en place de la GEMAPI et des systèmes d’endiguement, il existe aussi des ouvrages anciens qui nécessitent de la maintenance et/ou des ouvrages conçus séparément dont le futur fonctionnement cohérent dans un même système d’endiguement nécessitera diagnostics et réhabilitations pour viser un niveau de protection homogène.

Certaines pathologies de long terme finissent un jour par se révéler, puis prendre de l’ampleur : gonflement des bétons, érosion interne des remblais et des fondations, pertes d’étanchéité conduisant à des longues montées en pression de massifs,.... Le challenge de la pérennité et de l’intégrité des barrages et des digues dans le temps, dans un champ de fortes contraintes, notamment économiques, conduit à développer des méthodes et des techniques innovantes (comme par exemple le refroidissement/chauffage d’un barrage voûte), et parfois totalement inédites. Certaines sont en devenir, d’autres mises en œuvre depuis suffisamment de temps pour en établir un premier retour d’expérience.

Ce colloque propose de visiter les **méthodes et techniques innovantes** introduites dans cette dernière décennie aussi bien dans la **préparation** des opérations de réhabilitation ou de maintenance que dans les **réalisations sur chantier**.

Il s’adresse ainsi à tous les acteurs de la profession : maîtres d’ouvrages/exploitants, bureaux d’études, maîtres d’œuvre, entreprises de travaux publics, experts indépendants et universitaires.

Ce colloque a été décidé en réunion de la Commission Exécutive du CFBR le 9 juin 2017.

## Contenu du Colloque

L'étendue du sujet a conduit le comité d'organisation à restreindre le périmètre du colloque au seul domaine du **génie civil**, pour tous les types de barrages et de digues.

Deux critères principaux ont conduit le choix des communications présentées :

- Le maître mot du colloque est **l'innovation** : c'est le principal critère de sélection des communications
- L'autre critère retenu a été la richesse et l'importance du **Retour d'Expérience** de la technique ou de la méthode

Le colloque est finalement séquencé en deux thèmes :

### Innovations dans les diagnostics

- Les dispositifs novateurs de reconnaissances, d'investigations et d'auscultation des ouvrages en particulier ceux supportés par des vecteurs aériens ou sous-marins
- Les nouvelles techniques développées dans la dernière décennie dans le domaine des reconnaissances géotechniques et géophysiques in situ et/ou l'exploitation des données recueillies
- Les dispositifs numériques d'aide aux expertises

### Innovations dans les opérations de maintenance ou de réhabilitations

- Développement des techniques nouvelles dans le traitement des sols et dans les fondations sur terrain meuble,
- Nouvelles techniques de réhabilitation, renforcement, augmentation de la durée de vie des matériaux ou de conservation de leurs propriétés originelles
- Idées novatrices dans le traitement de pathologies des barrages : gonflement, perte d'étanchéité, fluage. Nouvelles approches de justification du bon comportement des barrages, limites de ces approches

## Le Comité d'organisation/Comité scientifique

Il est composé de (par ordre alphabétique):

**Pierre AGRESTI – ARTELIA**

**Florent BACCHUS – BETCGB**

**Olivier BORY – CFBR (Secrétaire général)**

**Jean Marie BOUTET - EDF-CIH**

**Catherine CASTEIGTS – SCP**

**Patrice CHARDARD – EIFFAGE Génie Civil**

**Olivier CHULLIAT- EDF-CIH**

**Gaétan DAUTOIS – TRACTEBEL Ingénierie**

**Thibaut GUILLEMOT – ISL**

**Bernard REVERCHON – CFBR (Président)**

**Laurent THAREAU - CNR**

**Guillaume VEYLON – IRSTEA**

**Eric VUILLERMET - BRL Ingénierie**

## Synthèse du thème A (innovations dans les diagnostics) Eric Vuillermet – Jean-Marie Boutet

Le cœur du métier d'ingénieur consiste à trouver des solutions pour rendre possible un projet.

Et l'innovation, c'est donc d'introduire quelque chose de nouveau dans l'usage, dans une pratique, dans un domaine particulier,

- c'est améliorer, parfaire des méthodes usuelles,
- c'est développer des produits nouveaux,
- c'est mettre à disposition de nouveaux outils,

L'ingénierie des barrages et de digues n'échappe pas à cette idée. On recherche des techniques innovantes pour parfaire sa connaissance des ouvrages dans l'objectif de faire face aux enjeux de la sûreté hydraulique.

Ce que l'on constate au travers des différentes communications et des échanges dans le domaine du Diagnostic, domaine qui intègre aussi bien l'examen des ouvrages, la caractérisation de paramètres, la surveillance et l'analyse du comportement est que, compte tenu d'un parc d'ouvrages vieillissants dont il faut évaluer le niveau de sûreté, compte tenu de l'évolution de la réglementation et des attentes, nous sommes conduit à chercher à mieux appréhender et améliorer notre connaissance des barrages pour passer d'une approche forfaitaire sécuritaire à une approche singulière et spécifique basée sur de nouvelles informations. Elle nécessite de nouveaux moyens car elles sont devenues difficilement accessibles, elles permettent d'avoir des approches intégratrices du comportement global.

Cela nous conduit :

- A se réapproprier des techniques en profitant de l'évolution dans le traitement des données ;
- D'adapter des techniques issues d'autres industries ;
- De mettre en application des résultats de la recherche appliquée.

Les exposés du thème A ont clairement montré que la très grande majorité des innovations ont pour objet **d'élever le niveau de sûreté de nos ouvrages**, ce qui est largement positif (on n'innove pas pour innover).

Au-delà de l'amélioration de la sûreté, les exposés ont également montré que les innovations apportent également :

- Une meilleure **prise en compte de l'environnement** (pas de vidange des canaux, pas de vidange des barrages...)
- Un **gain de temps** (mais l'exploitation des nouvelles méthodes / procédés nécessite aussi du temps, qui est peut-être parfois sous-estimé, ou masqué)
- Une **amélioration de la sécurité d'intervention** (moins de cordistes), mais qui peut masquer un risque de **perte de l'analyse humaine** (moins d'observation directe)

Un grand progrès apporté par les innovations concerne la sauvegarde numérique des données permettant a priori une reproduction des contrôles avec comparatif (par ex. évolution d'envasement), mais nous sommes face à de nombreuses difficultés de traitement des données → certains auteurs ont d'ailleurs mentionné la nécessaire capitalisation à travers des bases de données,

ou la nécessité de disposer de référentiels, ou encore de codes de bonne pratique, permettant de garantir l'homogénéité et la reproductibilité des méthodes dans le temps.

A cet égard, **le sujet du Big Data et de l'intelligence artificielle** ont été finalement peu évoqués, alors qu'ils sont au cœur des problématiques de l'analyse de données.

On constate de manière générale le très fort développement des **examens non destructifs in-situ** (aussi bien pour les remblais que pour les bétons), ce qui est très positif pour améliorer la précision et la fiabilité des diagnostics.

Ces END empruntent largement aux **autres domaines industriels** (métallurgie, off-shore, géophysique) et on doit continuer à s'inspirer de ces autres domaines.

Ces END et plus largement les innovations ouvrent largement la voie à une **maintenance prédictive et mieux ciblée**.

La nécessité de **coupler approche expérimentale et approche numérique** pour confirmer la validité des nouvelles méthodes, et mieux convaincre, a encore été largement évoquée.

Par ailleurs, il a été mis en évidence que le développement d'un procédé innovant **prend du temps** (les thèses sont longues ...), et que les **MOA doivent investir (du temps et de l'argent)** pour fiabiliser ces nouveaux procédés.

Nous avons bien noté l'appel à la prudence de l'Administration dans l'application de certains procédés / méthodes innovants, notamment lorsqu'ils sont utilisés pour justifier la stabilité des ouvrages.

Enfin, ce colloque est une bonne introduction à celui de 2019, puisque beaucoup de méthodes innovantes vont justement servir de « données d'entrée » à la **justification de la stabilité des ouvrages**.

## Synthèse du thème B (innovations dans les opérations de maintenance et de réhabilitation) Olivier Bory – Thierry Guillemot

La première partie de la matinée a été consacrée au sous-thème innovations dans l'amélioration de l'étanchéité des ouvrages. Trois présentations ont concerné des applications de géosynthétiques, une sur les écrans étanches, et enfin une sur les injections de fissures.

- Les géosynthétiques sont l'une des plus grandes innovations dans le domaine du génie civil de ces dernières décennies. Ils permettent d'accomplir de nombreuses fonctions : étanchéité, renfort, filtration, drainage, séparation... et ceci avec économie, facilité et rapidité de mise en place, fiabilité. Toutes ces fonctions trouvent des applications sur les ouvrages hydrauliques.
- Parmi les géosynthétiques, les géomembranes pour leur fonction étanchéité constituent une innovation majeure pour l'étanchéité (ou son amélioration) des barrages. Elles ont été utilisées sur des ouvrages neufs, ou lors de réhabilitations, sur tous les types de barrage, avec de nombreux produits. Le PVC-P est cependant le plus répandu (statistiques CIGB pour les

grands barrages). Lors de ces présentations, de nombreuses applications en réhabilitation ont été développées.

- La France a été pionnière dans l'utilisation de ces composants (dès les années 1960-70), et dispose maintenant d'un retour d'expérience de plusieurs décennies : il est globalement satisfaisant. Néanmoins, l'utilisation de ces produits fait appel à une haute technicité pour les applications (la France a largement contribué à améliorer la conception des systèmes d'étanchéité par géomembrane, notamment parce qu'elle a essuyé quelques pots cassés) et pour le choix des produits (nombreuses formulations ont été testées en France, qui compte plusieurs fabricants). Quelques difficultés subsistent, notamment pour le raccord aux extrémités, par exemple en fondation.
- Les sujets d'avenir pourraient être :
  - o les questions de durabilité et de vieillissement de ces produits,
  - o la maintenance et le suivi des géomembranes,
  - o le développement de nouveaux produits plus performants : formulation, épaisseur, protection...
  - o les applications sous l'eau (même si la technique n'est pas nouvelle : on peut citer la référence du barrage de Lost Creek en 1997), et avec du courant (plus récent, développement de géomatelas d'étanchéité pour canaux),
  - o Application en galerie en charge (référence récente au Pérou, USA et Israël).

Nous avons également eu une communication sur les écrans étanches dans les digues, et notamment la technique du deep soil mixing. De nombreuses techniques ont été testées, avec un contrôle des performances et de sa durabilité. Ces techniques apportent une amélioration significative du comportement des digues. Les opérations en cours alimentent le retour d'expérience de ces solutions.

Enfin, une communication a concerné les travaux d'injection de fissures du barrage de Bimont. Il s'agit de rétablir le monolithisme du barrage, qui l'avait perdu à cause d'une pathologie de gonflement de béton. La référence est significative par son ampleur, et l'utilisation d'une modélisation numérique du réseau de fissure.

Pour conclure sur le thème étanchéité, sujet important pour les hydrauliciens, il est possible d'apprécier le chemin parcouru pour le développement de nouvelles techniques. Avec un parc d'ouvrage vieillissant, on peut dire que ces innovations étaient indispensables, et figurent en bonne place dans notre boîte à outils, qui devrait être amenée à encore être complétée.

La seconde partie du thème B concernait les innovations dans le renforcement des ouvrages et dans les opérations de réhabilitation.

Dans les articles et présentations, les durées de mise en œuvre des innovations sont assez disparates :

- Pour les PKW, on constate un démarrage fulgurant : 30 réalisations en 15 ans, même si M. Lempérière nous a rappelé que l'idée n'était pas si récente (barrage de Beni-Bahdel en Algérie en 1938) et était tombée dans l'oubli.
- De même pour les hausses fusibles, l'idée a pris rapidement, la démonstration de l'efficacité de ces deux solutions étant évidente.
- Pour le barrage de Gage II, il a fallu 10 ans entre le 1<sup>er</sup> diagnostic détaillé et la mise en œuvre du dispositif de refroidissement, puis 5 ans de plus pour le dispositif de chauffage.
- Pour les tirants précontraints, la première application aux barrages date de 80 ans, mais la technique est jugée fiable depuis 30 ans seulement, soit une cinquantaine d'années de développement. Pour le barrage de Laouzas, on compte 10 ans entre le diagnostic et la dernière phase de travaux de stabilisation de la fondation de la voûte par précontrainte.
- Les évacuateurs en BCR sur remblai comptent 40 ans de pratique. On note aujourd'hui le projet de mise à niveau du barrage de Sainte-Cécile qui prévoit un débit spécifique de 30 m<sup>3</sup>/s/ml, qui n'a rien à envier aux évacuateurs à marches sur barrages en béton.
- Dans le domaine de la recherche, les solutions de sols traités pour les digues (première application en 1972 aux Etats-Unis) et biocalcification font actuellement l'objet de programme de recherche et demanderont encore quelques années de développement avant de connaître une mise en œuvre à l'échelle industrielle.

Ces durées plus ou moins longues s'expliquent par le fait qu'une innovation répond à un problème posé et nécessite un développement technique, puis une phase d'acceptabilité pour les parties prenantes des projets. L'administration a rappelé à l'occasion de ce colloque qu'elle n'était pas contre l'innovation, mais demandait des justifications sérieuses avant d'en accepter la mise en œuvre.

Les retours d'expérience sur les projets permettent des améliorations et modifications des innovations et par la suite l'application à des projets de plus en plus osés.

Les innovations présentées font appel à des disciplines techniques parfois éloignées des domaines traditionnels de l'ingénierie des barrages.

On constate qu'il n'y a en général pas d'innovation qui révolutionne le métier, mais une somme de petits progrès et une analyse approfondie des retours d'expérience font avancer les techniques et la fiabilité des ouvrages. De plus, chaque innovation répond à un problème, mais arrive avec son lot de nouveaux problèmes à résoudre.

Nos métiers de barragistes, en études et réalisations, resteront donc sur une lignée passionnante, les jeunes ingénieurs pouvant bénéficier des avancées de leurs aînés et du retour d'expérience, bon ou mauvais, pour à leur tour faire progresser la technique.

Les innovations présentées à l'occasion de ce colloque s'inscrivent parfaitement dans le leitmotiv « Better Dams for a Better World », cher à la CIGB et au CFBR.

## Conclusion du colloque par Michel Lino, Président du CFBR

Le CFBR remercie le Comité d'Organisation pour le choix du thème du colloque et la sélection et l'optimisation des communications, les auteurs de communication pour la qualité des présentations et les rapporteurs pour l'animation qu'ils ont apportés au Colloques.

Une mention particulière pour la magnifique conférence de M. Lempérière sur sa longue carrière toute entière consacrée à l'innovation et qui a porté des fruits nombreux et de grandes portées.

En conclusion, **quels sont les moteurs de l'innovation?**

Tout d'abord, **la solution apportée à une problématique récurrente** que l'innovation permet de surmonter. Les barrages anciens en maçonnerie sont affectés d'une pathologie chronique de fuite entraînant la dégradation accélérée de l'ouvrage. Les géomembranes, innovation majeure mentionnée par les rapporteurs, ont été permis d'apporter une réponse économique et durable à ce problème récurrent. Les pathologies associées aux barrages voûtes en vallée large ont permis des avancées dans le domaine de la modélisation du comportement des ouvrages. L'érosion interne des remblais et des fondations meubles, problématique majeure des barrages en remblai, a suscité le développement de remblai en sol traité à la chaux et/ou au ciment ou par la technique de bio-calcification.

Un deuxième moteur est **le transfert de technologie** avec d'autres domaines scientifiques ou techniques. Nous avons eu pendant le colloque l'exemple du transfert des techniques d'inspection et de travaux du domaine pétrolier off shore au domaine des barrages.

Troisième moteur, **la recherche d'économie et l'optimisation de la durée de construction** : dans les 40 dernières années le BCR a remplacé le BCV pour la construction des barrages poids et plus récemment on assiste à un développement important des voûtes en BCR. La conférence de M. Lempérière a également montré des exemples où l'innovation technique dans le cadre de réponses d'entreprises à des appels d'offres fut aussi un puissant moteur de progrès technique et de solutions innovantes.

Enfin, et de façon quelque peu paradoxale, **la réglementation** peut également être un moteur d'innovation. Plusieurs programmes de recherches initiés par les Maîtres d'ouvrage ont pour but de mieux justifier la stabilité ou la résistance des ouvrages face au durcissement de la réglementation. On citera les recherches sur la résistance à la traction et au cisaillement des fondations de barrage, les calculs cycliques pour prédire le comportement à long terme des barrages voûtes en vallée large fissurés présentés lors du colloque ou les recherches entreprises dans le cadre de la collaboration entre le CFBR et le JCOLD (Comité Japonais des Barrage) sur la modélisation comportement dynamique des barrages pendant les séismes afin de définir des critères de performance opérationnels.

Le CFBR se positionne résolument en faveur de l'innovation tant dans la conception, la construction et l'exploitation des barrages que l'innovation dans les usages des barrages, particulièrement dans le domaine du stockage de l'énergie qui est une voie possible du développement futur des barrages.