

Prise en compte des résultats de l’auscultation dans la modélisation des barrages en béton

Use of monitoring results in concrete dams modelling

Eric Bourdarot
EDF-CIH 73373 Savoie Technolac
eric.bourdarot@edf.fr

Emmanuel Robbe
EDF-CIH 73373 Savoie Technolac
emmanuel.robbe@edf.fr

Téléphone : +00 (33) 04 79 60 60 60, Fax : +00 (33) 04 79 60 62 98

MOTS CLÉS

Barrages, béton, maçonnerie, auscultation, modélisation, réversibles, irréversibles, déplacements, pressions, débits, déformabilité.

RÉSUMÉ

L’auscultation occupe un rôle essentiel dans l’évaluation des conditions de stabilité des ouvrages. Ce rôle est amené à évoluer au cours des différentes phases de la vie des ouvrages. Après la phase initiale où est vérifiée la conformité du comportement attendu de l’ouvrage, l’auscultation va permettre d’évaluer les évolutions irréversibles de l’ouvrage par rapport à un état initial considéré comme satisfaisant. L’utilisation des résultats de l’auscultation dans le cadre de modélisations aux éléments finis apporte une forte valorisation de ces résultats, tout en permettant une validation de la représentation numérique de son comportement mécanique. Dans cet article sont présentés les différents aspects du processus d’exploitation des composantes réversibles et irréversibles des paramètres mesurés en les reliant aux différents aspects du comportement des ouvrages. Lorsque que l’ouvrage ne dispose pas d’un dispositif permanent d’auscultation, il est également possible d’envisager, comme sur le barrage d’Ocana, la mise en place provisoire d’un tel équipement.

ABSTRACT

Monitoring occupies a central place in concrete dams safety evaluation. Such place can change during the different phases of dams operation. After an initial phase, where the initial planned dam behavior needs to be confirmed, the monitoring process will mainly try to evaluate, through the irreversible parameters analysis, the possible drift of dam behavior in comparison with an initial state considered as acceptable. Use of monitoring data, in the framework of finite element modellings, brings a strong valorization of such results allowing at the same time the validation of the dam mechanical behavior representation. In this paper are presented the different aspects of the processes of the use of reversible and irreversible components in relation with the observed phenomenons. When a permanent monitoring device is not available, it is also possible to install such device for a short time as was done on the Ocana dam.

1. INTRODUCTION

L’auscultation occupe une place centrale dans le processus d’évaluation de la sûreté des barrages en béton. Ses objectifs sont cependant amenés à évoluer à mesure que se constitue un retour d’expérience sur le comportement des ouvrages. Le développement de ce retour d’expérience accompagne le vieillissement progressif du parc de barrages et se trouve modulé en fonction des différentes phases de leur vie.

Le lien entre l’auscultation et l’évaluation des conditions de stabilité des ouvrages apparaît dans toutes ces phases comme une préoccupation essentielle. Ainsi à l’issue de la mise en eau, phase pendant laquelle la vérification de la

représentation mécanique du comportement de l’ouvrage adoptée en phase de conception apparaît comme une préoccupation principale, un état de référence (ou de normalité) est considéré à partir duquel l’auscultation va permettre de vérifier l’absence d’évolutions irréversibles ou du moins d’évaluer leur niveau d’acceptabilité.

Les modèles d’analyse des mesures d’auscultation vont s’attacher à dégager d’un ensemble de mesures brutes les différentes composantes réversibles et irréversibles. La possibilité de séparer de manière suffisamment fine ces différentes composantes conditionne la possibilité d’estimer la composante irréversible, à laquelle l’auscultation s’attache en premier.

Par ailleurs, l’évaluation des conditions de stabilité des ouvrages, implique une quantification des efforts retransmis à la fondation. Le mode de transmission de ces efforts étant influencé par la déformation de la structure sous l’effet des chargements appliqués, la mise en œuvre d’une représentation physique apparaît nécessaire.

Parmi les paramètres traduisant la déformation de l’ouvrage, les déplacements, intégrateurs des déformations apparaissent aujourd’hui comme les plus utiles. Les mesures des déformations élémentaires, en raison de leur caractère local restent le plus souvent délicates à exploiter. Nombreuses sur les ouvrages construits à une époque où les outils numériques fournissant un calcul réaliste des déformations et les contraintes faisaient défaut, et où les concepteurs avaient hâte de vérifier in-situ la validité des hypothèses simplificatrices adoptées pour la représentation du comportement mécanique des ouvrages, elles sont devenues d’un intérêt moindre depuis la généralisation des modélisations aux éléments finis. Elles peuvent néanmoins conserver un intérêt, avec un nombre réduit de capteurs, afin de détecter d’éventuelles évolutions irréversibles.

A côté des paramètres déformations, les mesures de pressions et de débits occupent une place croissante dans les analyses afin notamment de mieux estimer les conditions de développement d’une fissuration, en particulier au contact barrage-fondation, et en corollaire des efforts liés aux effets des sous-pressions.

2. EFFETS REVERSIBLES

La partie réversible des phénomènes fait intervenir à la fois les effets du chargement mécanique induit par les variations du plan d’eau et ceux engendrés par les évolutions thermiques des ouvrages.

Si les effets liés aux variations du plan d’eau ou ‘effets réversibles hydrostatiques’ peuvent être décrits par une fonction mathématique, le plus souvent polynomiale, du niveau du plan d’eau, le mode de représentation des effets liés aux évolutions thermiques est plus délicat. Il est ainsi difficile de représenter les déplacements d’un ouvrage à l’aide d’une seule mesure de température, compte tenu de la variabilité des températures à l’intérieur de l’ouvrage. C’est pourquoi, le paramètre saison est souvent préféré, comme cela est le cas dans la méthode HST sous la forme d’une combinaison de fonctions trigonométriques de la date dans l’année.

L’analyse des effets réversibles et l’évaluation de leurs conditions de normalité s’avère difficile en l’absence de points de comparaison. La valorisation de ces informations dans le cadre d’études d’inter comparaison entre ouvrages est souvent délicate, en raison de l’influence conjointe des facteurs géométriques et de déformabilité des matériaux. C’est pourquoi les critères manquent souvent pour évaluer la normalité de ces effets, en dehors de leur éventuelle dérive au cours du temps.

Ces effets apparaissent par contre d’un très grand intérêt dans le cadre d’une modélisation aux éléments finis, à la fois parce qu’ils permettent de préciser les différents paramètres de cette modélisation et parce que cette phase de calage permet souvent de mettre en évidence et de fournir des explications à l’évolution des phénomènes observés, phénomènes souvent peu apparents à l’issue d’une simple analyse des mesures ;

Dans cette situation, il est procédé en deux étapes successives :

1. L’exploitation des effets réversibles hydrostatiques qui va permettre de caler les paramètres de déformabilité du barrage et de la fondation,
2. Ces paramètres étant définis, de déterminer le coefficient de dilatation et les champs thermiques dans l’ouvrage permettant de décrire les évolutions saisonnières.

2.1 Calage des effets réversibles hydrostatiques

Dans cette phase, l’exploitation des mesures de déplacements, intégratrices des déformations de la structure, apparaît la plus intéressante. L’idéal est bien entendu de disposer d’un nombre suffisant de points de mesures bien répartis sur la structure, à la fois en crête, en pied d’ouvrage et sur les rives. Les mesures aux pendules fournissent souvent les meilleurs ajustements, en particulier lorsqu’ils sont télémésurés. Les mesures topographiques présentent l’avantage de fournir les déplacements ‘absolus’ de l’ouvrage, tandis que les pendules ne fournissent que des valeurs relatives, sauf lorsque l’on dispose de pendules inversés suffisamment profonds. Dans ce dernier cas, même si les pendules inversés sont de profondeur limitée, le calage reste possible, dans la mesure où la comparaison s’effectue de manière relative en considérant les points correspondants situés en fondation.

Le processus de calage est le plus souvent itératif et s’apparente à une étude de sensibilité. Un jeu de paramètres de départ peut être choisi, fonction de la connaissance des matériaux de l’ouvrage et de la fondation et conforté par des études déjà réalisés sur des ouvrages similaires.

Afin de faciliter l’analyse il est intéressant d’analyser séparément les déplacements radiaux et tangentiels. En effet, les déplacements radiaux en crête apparaissent principalement représentatifs de la déformabilité de l’ouvrage et sont principalement sensibles aux variations du module d’élasticité du barrage. Les déplacements radiaux en pied et les déplacements tangentiels en rive sont eux par contre beaucoup plus sensibles à la déformabilité de la fondation.

En procédant ainsi en deux étapes, un bon ajustement peut être, le plus souvent, assez rapidement trouvé sur l’ensemble de l’ouvrage. Dans certains cas, il peut apparaître nécessaire d’introduire une différenciation de la déformabilité des rives, voire une variabilité de la déformabilité de la fondation, en particulier en partie haute des rives. Dans ce cas il peut s’avérer opportun d’appuyer le choix d’hypothèses sur un examen des conditions géologiques, voire dans certains cas d’envisager des investigations spécifiques.

Dans les cas de fondations présentant des directions préférentielles de fracturation, voire une schistosité marquée, l’adoption d’une modélisation anisotrope de la fondation peut s’avérer justifiée. Dans ce cas l’adoption d’un modèle orthotrope avec deux directions préférentielles de déformabilité apparaît le plus souvent suffisante mais multiplie le nombre de paramètres à déterminer. Dans le cas d’un modèle isotrope, seul le module d’Young présente une influence sensible. Le coefficient de Poisson peut le plus souvent être fixé entre 0,2 et 0,3.

Il peut arriver également qu’une variabilité des modules de l’ouvrage s’avère nécessaire pour décrire sa déformation réelle. Il s’agit notamment des ouvrages présentant des différences de clavage entre les parties hautes et basses ou de rive à rive, en fonction des conditions d’injection des joints de plots.

Le plus souvent est observé sous l’effet du remplissage de la retenue un déplacement tangentiel de l’ouvrage orienté vers les rives. Dans certains cas cependant, les déplacements mis en évidence par l’auscultation peuvent apparaître très réduits, voire même orientés légèrement vers la vallée. Dans ce cas, peut se produire un effet de couplage mécanique-hydraulique dans les appuis conduisant à un ‘gonflement’ de ceux-ci lors du remplissage. Ce phénomène peut être décrit dans une modélisation aux éléments finis par une condition de déplacement imposé aux limites du modèle de fondation. Un tel phénomène a été observé en France sur le barrage de Castillon et à l’étranger sur le barrage de Kurobé (cf. réf.5).

Il faut noter que la fissuration d’un ouvrage est de nature à affecter sa déformabilité de manière diffuse, en particulier lorsqu’un phénomène de gonflement est observé. Ceux-ci affectent cependant peu, en phase initiale, la déformabilité du matériau, le changement de rigidité au niveau de la structure pouvant apparaître d’abord, à mesure que se développe une fissuration de type structural. Un changement global de rigidité peut également apparaître dans le cas de la fissuration de pied des barrages-voûtes qui correspond à une perte d’encastrement en zone amont. Dans un tel cas, il est possible que le calage sur un modèle élastique-linéaire conduise à une certaine sous-estimation des modules de déformation par rapport à ceux adoptés dans le cadre d’une modélisation non-linéaire prenant en compte l’endommagement du matériau.

Le tableau 1 présente un récapitulatif des résultats de calage obtenus sur un ensemble de barrages-voûtes et de barrages-poids en béton et en maçonnerie, en fonction des types de granulats utilisés et de la nature de la roche de fondation.

Type D'ouvrage	Granulats	Module barrage (GPa)	Roche de fondation	Module fondation (GPa)	Rapport module (béton / barrage)
Voûte	Calcaire	3,5	Quartzites	1,25	2,8
Poids	Maçonnerie/moellon granite	2	Granite	1	2
Voûte	Alluvions siliceuses	3,5		1,25	2,8
Voûte	Calcaire	3,5	Calcaire	1,2	2,9
Voûte	Calcaire	3,5	Calcaire	1,4	2,5
Voûte	Calcaire	3,2	Calcaire	1,2	2,7
Voûte	Gneiss	1,6	Gneiss	0,9	1,8
Voûte	Granite	2,4	Granite	0,8	3
Voûte	Calcaire	3	Gneiss	1,2	2,5
Voûte	Calcaire	3,3	Calcaire	1,6	2,1
Voûte	Calcaire	3	Schistes	1,2	2,5
Voûte	Gneiss	2,5	Migmatites	1,2	2,1
Voûte	Calcaire	3,7	Calcaire	2	1,9
Poids	Granite	2	Granite	1	2
Voûte	Gneiss	2	Gneiss	0,8	2,5
Voûte	Granite	2,8	Granite	1,2	2,3
Voûte	Gneiss	2,5	Gneiss/micasch	1	2,5
Voûte	Granite	2	Granite	0,8	2,5
Voûte	Calcaire	3,2	Granite	1,9	1,7
Voûte multiple	Granite	3	Granite	1,4	2,1
Voûte	Granite	2,5	Granite	1,2	2,1
Voûte	Granite	2,6	Microgranites	1,4	1,9
Poids	Granite	2,2	Granite	1,2	1,8
Voûte	Alluvions	2,5	Calcaire	1	2,5
Voûte	Gneiss	1,4	Gneiss	0,4	3,5
Voûte	Gneiss	2,5	Gneiss	1,2	2,1
Poids	Schistes métamorphisés	2,2	Schistes métamorphisés	1,2	1,8
Voûte	Granite	2,3	Granite	1,3	1,8
Voûte	Alluvions	2,1	Gneiss/micaschistes	1,3	1,6
Voûte	Gneiss	2	Schistes	0,55	3,6
Poids	Gneiss	2,5	Gneiss	1,2	2,1
Voûte	Alluvions	2	Calcaires	0,8	2,5
Poids	Alluvions	1,5	Calcaire	1,15	1,3
Voûte	Granite	2,3	Quartzite/schistes	1,2	1,9
Voûte	Gneiss	1,6	Gneiss	0,9	1,8

Tableau 1 : Modules d'Young du barrage et de la fondation obtenus après calage d'une modélisation aux éléments finis sur les effets réversibles hydrostatiques.

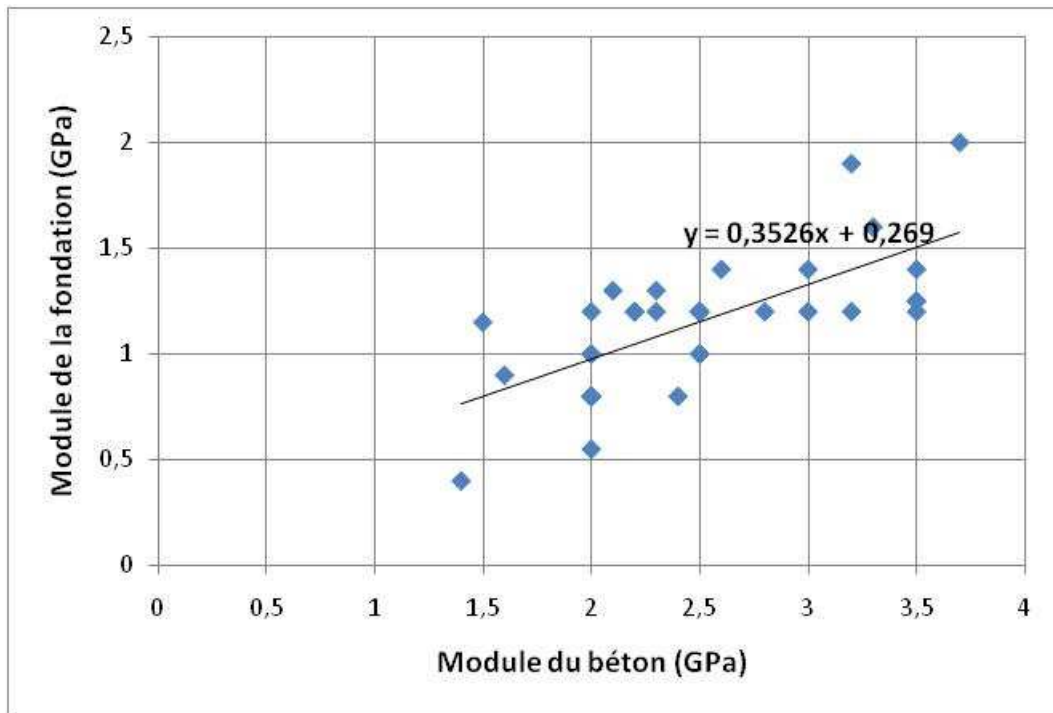


Figure 1 : Distributions des modules d’Young de l’ouvrage et de la fondation

Il apparaît globalement que les modules obtenus sur les bétons produits avec des granulats calcaires sont plus élevés que ceux obtenus avec des granulats siliceux. La valeur moyenne des modules est voisine en effet de 3,3 GPa pour les granulats calcaires, 2,5 GPa pour les granulats granitiques, 2,1 GPa pour les granulats gneissiques et 2,3 pour les alluvions, dont la composition est le plus souvent assez mélangée.

Pour ce qui concerne les modules de fondation ceux-ci présentent une plus grande variabilité en particulier dans le cas de matériaux schisteux. Le ratio module béton / module fondation apparaît compris entre 1,3 à 3 avec coefficient de la droite de régression faisant apparaître un ratio moyen voisin de 2,8 (Fig. 1). La plus grande déformabilité de la fondation par rapport à celle du béton apparaît donc de règle.

Le calage des modèles sur les résultats de l’auscultation permet ainsi une détermination à l’échelle de l’ouvrage des propriétés de déformabilité de la structure, les essais de laboratoire prenant plus difficilement en compte les effets d’échelle des matériaux et ceux des discontinuités (fissures, reprises, joints inter-plots). Il en est de même pour les essais in-situ en fondation qui ne permettent pas toujours de caractériser les discontinuités (diaclases, failles) au-delà d’un rayon d’action limité. Le barrage peut être considéré en l’espèce comme le meilleur vérin permettant de tester la déformabilité ‘en grand’ de la fondation.

Comme on le voit cette phase de calage est une phase très riche qui est l’occasion pour l’ingénieur de ‘sentir’ le comportement de l’ouvrage en se posant un ensemble de questions sur les phénomènes expliquant le comportement observé.

2.3 Calage des effets réversibles saisonniers

Le calage des effets saisonniers consiste principalement en la détermination des champs de température d’été et d’hiver permettant de reproduire les variations de déplacements dans la structure entre ces deux saisons. Le champ de température peut être défini par la donnée des températures en crête et en pied d’ouvrage à l’amont et à l’aval, avec variation linéaire à l’intérieur de la structure entre ces valeurs.

Le retour d’expérience sur un parc d’ouvrages montre que la température en crête peut être considérée comme assez proche de la température moyenne de l’air fournie pour les périodes considérées par les chroniques météorologiques proches. En pied aval d’ouvrage, on observe souvent une réduction des

amplitudes de variation des températures par rapport à la crête, en raison d'une exposition moindre. En pied amont, la condition de température est fixée par la température de fond des retenues souvent à partir des ouvrages de moyenne altitude voisine de 4°C toute l'année.

Dans une seconde étape, il peut apparaître justifié d'effectuer un recalage du coefficient de dilatation du béton notamment lorsque les champs de température s'écartent de ceux adoptés pour des ouvrages de caractéristiques géométriques (épaisseur) et de situation géographique proches. En effet les coefficients de dilatation du béton peuvent varier dans une fourchette comprise entre 0,7 et $1,2 \cdot 10^{-5}$. Il apparaît ainsi que si les modules de dilatation des bétons avec granulats calcaires sont souvent plus élevés que ceux produits avec des granulats siliceux, ceux-ci peuvent présenter en contrepartie des coefficients de dilatation plus faibles. Au final, c'est la déformation résultant des champs de température et du coefficient de dilatation qui est imposée à la structure.

Pour la simulation des cas de charge, il est également nécessaire de définir une température de clavage de l'ouvrage à partir de laquelle les déformations thermiques de l'ouvrage vont être prises en compte. Le plus souvent une température de 10° est considérée. Il s'agit vraisemblablement d'une hypothèse simplificatrice qui peut masquer une part de déformations irréversibles initiales assimilables à du retrait.

Il faut noter, pour les ouvrages épais à forte inertie thermique, que les champs de température correspondant aux amplitudes annuelles des effets saisonniers calés sur l'ensemble des points de mesure des déplacements présentent un caractère virtuel, car les extrema présentent souvent un déphasage en raison des inerties thermiques variables. Dans ce cas, il peut être préféré l'identification des champs thermiques aux deux périodes de l'année décrivant la position extrême de l'ouvrage (par exemple vis-à-vis de l'ouverture du pied amont pour une voûte), périodes pour lesquelles les champs de température seront déterminés.

2.3 Cas particulier où l'ouvrage n'est pas équipé d'un dispositif permanent d'auscultation. Exemple du barrage d'Ocana.

Lorsque l'ouvrage n'est pas équipé d'un dispositif d'auscultation permanent, il est également envisageable, dans certains cas, d'en installer un de manière temporaire. L'exemple du barrage d'Ocana, barrage-voûte en béton et maçonnerie, situé en Corse dans la vallée du Prunelli, apparaît intéressant de ce point de vue. Bien que de taille modeste (classe D, 9 mètres de hauteur maximale sur terrain naturel), mais jouant un rôle important dans l'alimentation en eau potable de la ville d'Ajaccio, une réévaluation de ses conditions de stabilité s'est avérée nécessaire.

Afin de palier l'absence de dispositif d'auscultation (pendules, mesures topographiques), un pendule temporaire a été mis en place au droit du parement aval (Figure 1) et, profitant de la faible taille de la retenue (22 000 m³), deux cycles de vidange / remplissage ont été réalisés en mai et juin 2010 avec des mesures régulières de la cote du plan d'eau et des déplacements de la voûte associés (Fig. 2).

Les mesures réalisées lors du remplissage de la retenue étant fortement perturbées par l'effet thermique, en raison des différences de température entre l'eau de la retenue et le barrage, on s'est intéressé principalement aux déplacements mesurés par le pendule en phase de vidange, en prenant pour référence un déplacement nul à retenue pleine (Fig. 3). Les valeurs obtenues lors des deux essais sont du même ordre de grandeur. Compte tenu de l'influence du comportement thermique, les valeurs obtenues pour les faibles niveaux de retenue sont vraisemblablement surestimées (l'échauffement de la voûte accentuant le déplacement vers l'amont). En conséquence, le déplacement horizontal de la voûte imputable au seul effet hydrostatique est évalué à 0,8 mm (pour une variation du plan d'eau de 360 à 353 NGF). Cette valeur permet de caler le module de déformation de la voûte par comparaison des déplacements mesurés et calculés (cf. Graphique 3) : la valeur de 15000 MPa assure ici un calage satisfaisant à retenue haute tout en respectant les 0.8 mm retenus pour une variation du plan d'eau de 7 m.

A partir de ce calage, une modélisation par éléments-finis de l’ouvrage a pu être menée. Malgré sa faible taille, la prise en compte de non-linéarités au contact béton-rocher (utilisation d’éléments-joint) a été nécessaire afin de modéliser de façon satisfaisante le comportement de l’ouvrage.

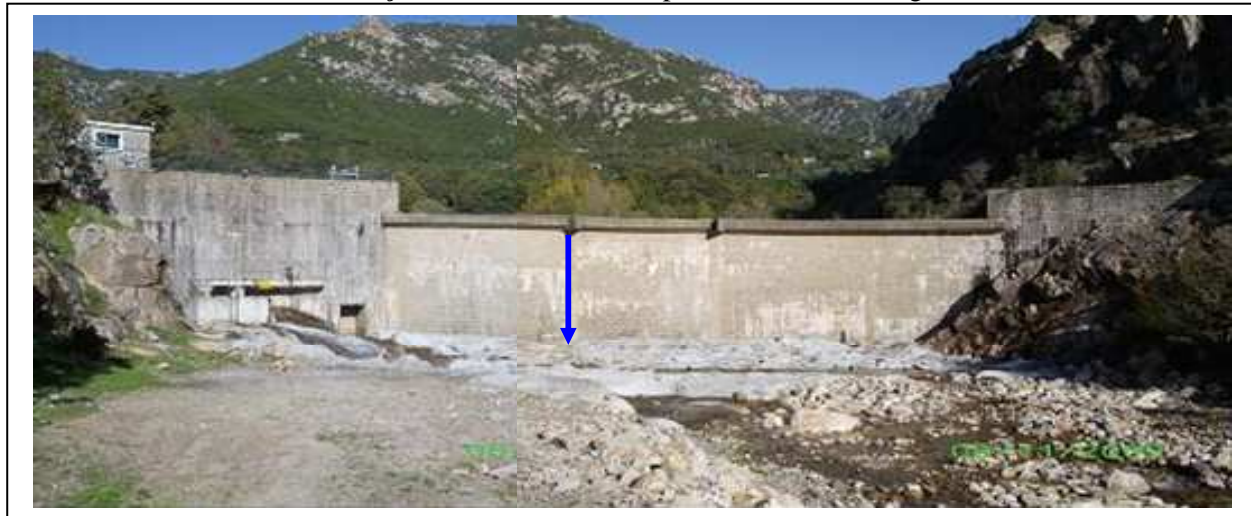


Figure 2 : Barrage d’Ocana. Emplacement du pendule temporaire.

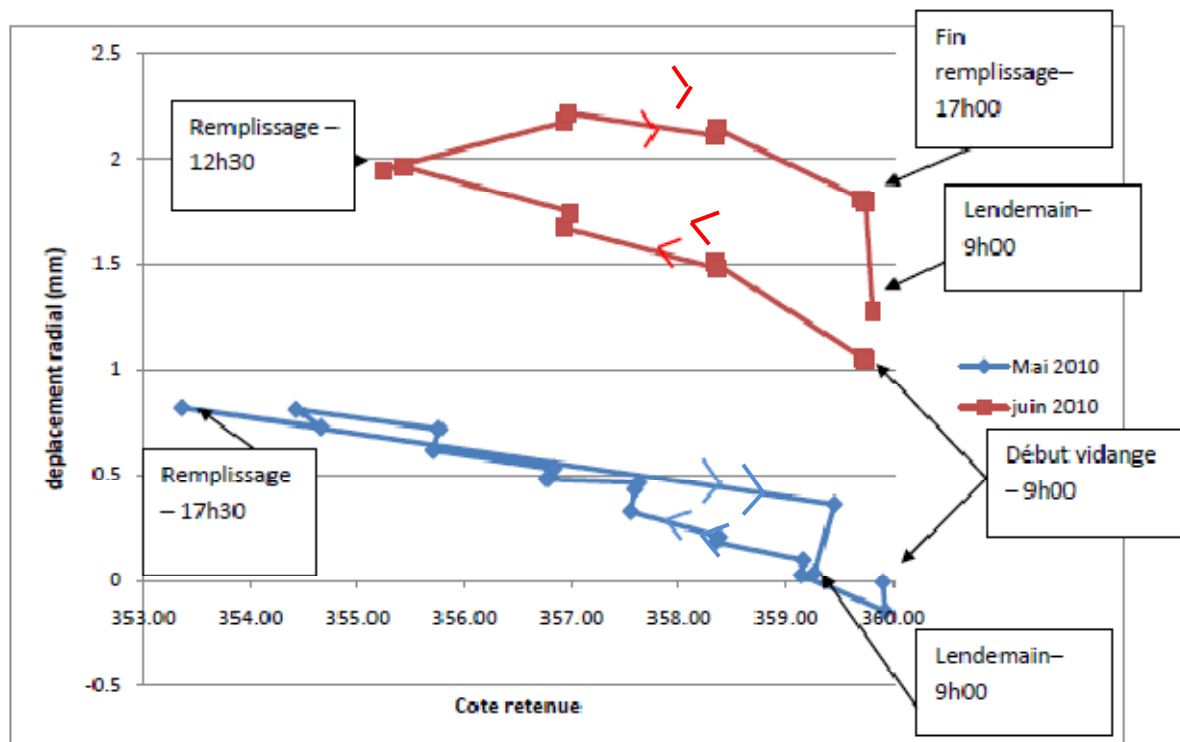


Figure 3 : Barrage d’Ocana. Mesures brutes de déplacements de la crête de la voûte au cours des vidanges/remplissages en mai et juin 2010 (positif vers l’aval).

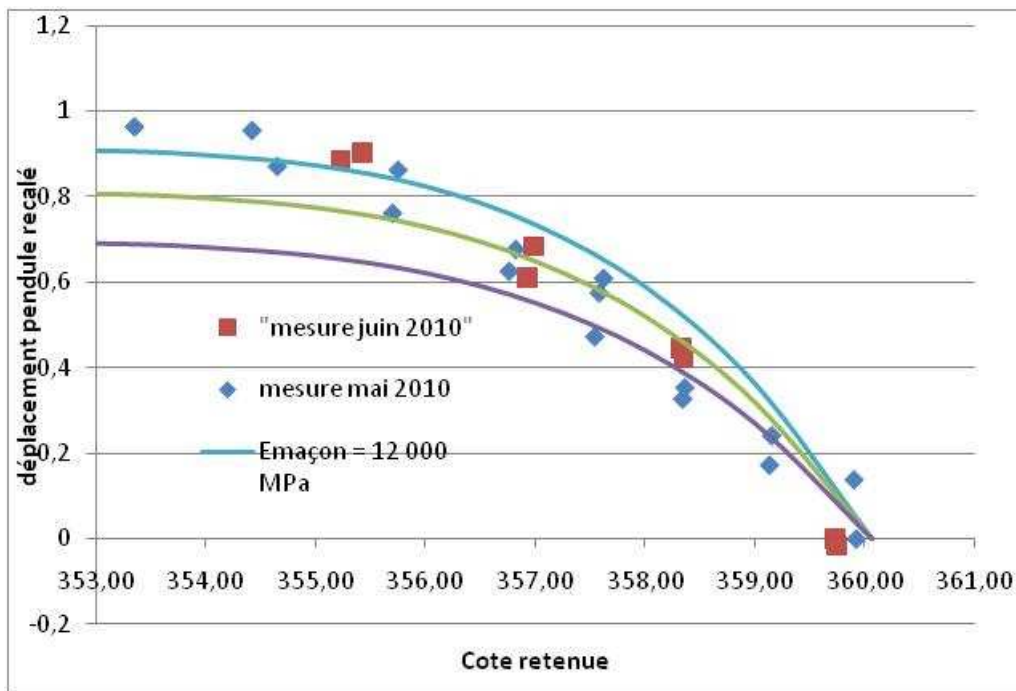


Figure 4 : Barrage d'Ocana. Mesures recalées de déplacement de la voûte et calage du module de déformation de la voûte

Pour de tels ouvrages, et lorsque les conditions (taille de la retenue, possibilité de vidange) sont réunies, un équipement temporaire peut fournir une solution satisfaisante pour fournir les données nécessaires aux études de comportement.

2. EFFETS IRREVERSIBLES

Comme cela a été indiqué en introduction, les évolutions irréversibles sont le principal indicateur auquel s'attache l'auscultation du comportement d'un ouvrage afin d'évaluer la normalité de son comportement.

De même, lors de la modélisation du comportement d'un ouvrage à l'aide d'un modèle aux éléments finis, il s'avère indispensable de prendre en compte ces évolutions dans la mesure où elles se traduisent par une modification des déplacements et des déformations de l'ouvrage et en conséquence des distributions de contraintes et d'efforts qui s'y développent.

Le calage des modèles sur ces déplacements apparaît de ce point de vue d'un très grand intérêt pour définir plus précisément la nature des irréversibilités rencontrées et leur intensité. L'exploitation de toutes les composantes des déplacements s'avère nécessaire afin de discriminer l'origine des évolutions irréversibles. Ainsi un déplacement radial irréversible vers l'amont d'un barrage est souvent rapidement attribué à un gonflement du béton. Si dans la majorité des cas cela peut être vérifié, il n'en demeure pas moins que ce phénomène peut se rencontrer dans d'autres situations.

L'exemple extrait de la référence 1 permet d'illustrer ce cas. Un barrage-voûte type de 100 m de hauteur a ici été considéré auquel les évolutions irréversibles suivantes ont été appliquées :

- Cas 1 : Gonflement du béton de $50 \mu\text{m}$
- Cas 2 : Déplacement imposé en rive droite de 1 cm aux limites du modèle de fondation
- Cas 3 : Contraction de 10^{-4} imposée dans la partie centrale de la fondation (par exemple pour décrire un effet de type Zeuzier)

Il s’avère à l’analyse de la figure 5 (déplacements en plan et en élévation de l’ouvrage) que dans les trois cas un déplacement vers l’amont est observé, mais que c’est l’analyse des autres composantes qui permet de définir l’origine des phénomènes, en effet :

- dans le cas 1, une surélévation de la crête est observée ainsi qu’un léger déplacement tangentiel vers les rives,
- dans le cas 2, aucun déplacement vertical de la crête n’est observé, tandis qu’au niveau des rives un déplacement tangentiel vers le centre de la vallée est noté,
- dans le cas 3, un tassement de la crête est obtenu ainsi qu’un déplacement des rives vers le centre de la vallée est enregistré.

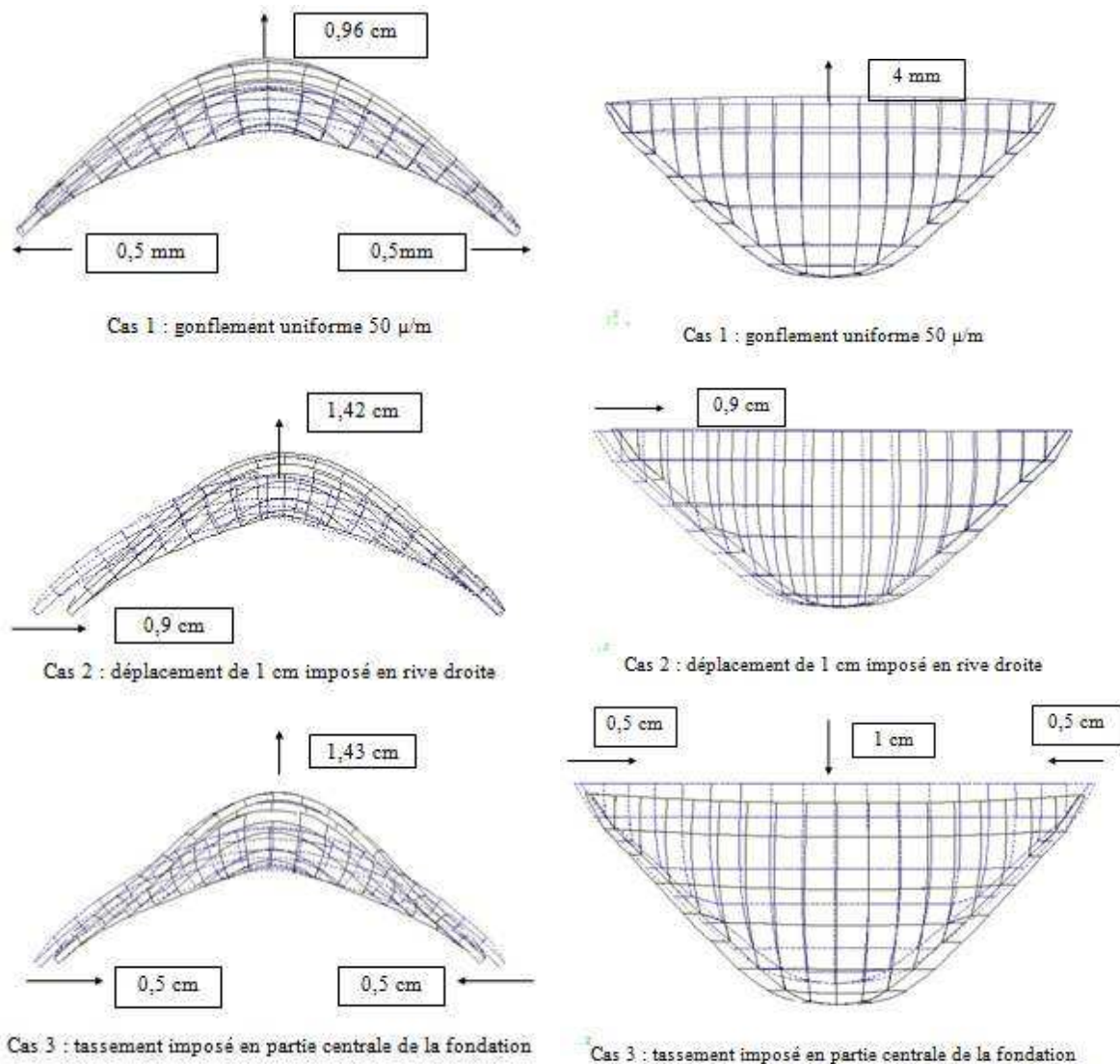


Figure 5 : Déformations irréversibles d’un barrage-voûte pour trois scénarios d’irréversibilité

L’analyse de ces trois cas montre que dans le cas d’un déplacement radial irréversible orienté vers l’amont en crête, d’autres paramètres devront être examinés afin de conclure sur l’origine des phénomènes observés, les plus intéressants étant les nivellements en crête (pas toujours disponibles) et les déplacements sur les rives.

D’autres situations peuvent également être rencontrées qui font appel à une combinaison de différentes causes ou à une variabilité des effets dans la structure ou la fondation. Ainsi une hétérogénéité des gonflements peut être observée, comme dans le cas présenté en figure 6 où le gonflement est principalement localisé en rive droite. Sur beaucoup d’ouvrages, on note également que le gonflement en partie haute apparaît souvent plus fort qu’en partie basse, en raison des effets du confinement et que le gonflement en zone amont est également plus fort qu’en zone aval, en raison des gradients d’humidité.

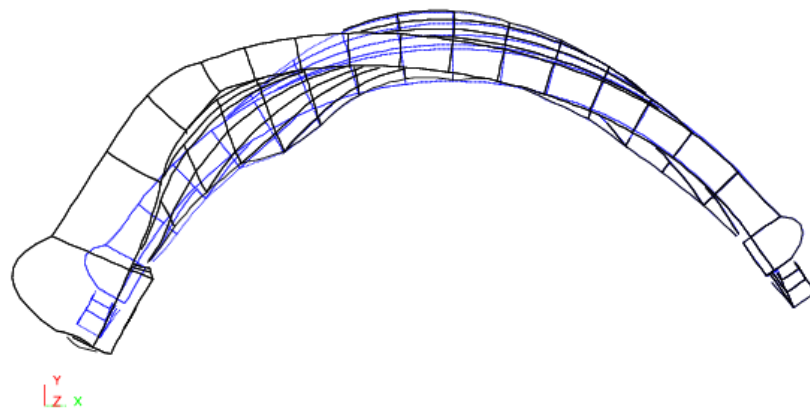


Figure 6 : Hétérogénéité de gonflement

Dans le cas de gonflements plus intenses et/ou d’effets de structures plus marqués (géométrie, confinement) le calage du champ de déformation imposé à la structure peut devenir difficile et nécessiter le recours à des modèles rhéologiques plus complexes. Dans ce cas un calage des paramètres combinant à la fois les résultats d’essais en laboratoire, en particulier pour les paramètres de cinétiques des réactions, et sur ouvrage, pour l’amplitude macroscopique des gonflements, peut apparaître opportun (cf. référence 6).

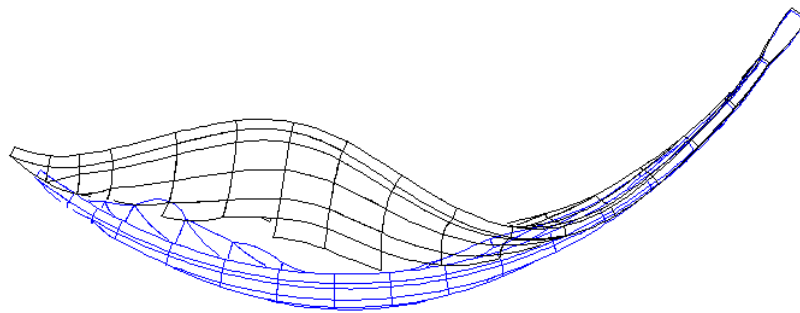


Figure 7 : Fluage dissymétrique en fondation

Les déplacements liés aux irréversibilités de fondation peuvent faire apparaître des dissymétries entre rive en lien avec les effets d’un déconfinement et d’un fluage postglaciaire. Le fluage de la fondation peut également s’avérer une cause importante de déplacements irréversibles (dans ce cas déplacements tangentiels vers les rives) parfois prolongée. L’exemple présenté graphique 7 décrit un cas de déplacement localisé en rive gauche en lien avec une fondation schisteuse.

Les phénomènes de retrait et de fluage affectent essentiellement les premières années de la vie des ouvrages ; la référence 3 fournit sur cet aspect un retour d’expérience sur le parc de barrages-voûtes d’EDF. Ces déformations initiales sont en effet amenées à se combiner aux effets du gonflement et peuvent conduire suivant les cas :

- à la poursuite des déformations initiales vers l’aval,
- à une stabilisation progressive,
- à une inversion du sens des déformations de l’aval, vers l’amont,

Dans certains cas, en particulier dans celui d’ouvrages massifs, aucune phase d’évolution initiale vers l’aval n’est observée.

La modélisation du retrait peut se faire à partir d’une déformation imposée homogène ou variable suivant les informations disponibles concernant les conditions de réalisation des ouvrages, alors que le fluage peut être représenté, de manière simplifiée, à l’aide de modules de déformation équivalents. Le fluage peut

concerner à la fois le barrage et la fondation. La distinction entre ces deux mécanismes s’opère via une étude de sensibilité sur les déplacements radiaux et tangentiels en différents points de l’ouvrage. Un des éléments distinctifs entre ces deux types d’effets apparaît dans la proportionnalité des déformations de fluage par rapport aux déformations réversibles hydrostatiques, les deux évoluant en fonction du niveau des contraintes, ce qui n’est pas le cas des déformations de retrait.

Les déformations irréversibles imposées aux ouvrages lorsqu’elles se traduisent par un déport vers l’aval sont susceptibles d’accentuer l’ouverture de la fissuration en pied amont et l’effet des sous-pressions. Ce phénomène peut être lui-même une explication d’une partie des dérives, des calculs non-linéaires (cf. ref 4) montrant que ceux-ci peuvent expliquer dans certains cas jusqu’à 40 % des dérives observées. La fissuration qui peut se développer dans la structure est de nature également à diminuer de manière homogène et localisée ses modules et dans ce cas peut se trouver masquée par la prise en compte d’un fluage.

La mise en œuvre de modélisations couplées mécaniques-hydrauliques permet de représenter les effets du décollement du contact amont barrage-fondation et son impact sur la diffusion des pressions hydrauliques en pied. L’utilisation de mesures piézométriques en pied, des débits, ainsi que de déplacement verticaux, tant pour ce qui concerne les effets réversibles qu’irréversibles, est susceptible d’apporter des éléments de calage des paramètres adoptés pour décrire les effets du couplage mécanique hydraulique (lois de variation des perméabilités en fonction de l’ouverture notamment). Le renforcement de l’auscultation en ce sens apparaît ainsi riche d’enseignements pour ce qui concerne la modification des modes de transmission des efforts en pied (réf. 4).

Leur exploitation met par contre en évidence que l’hypothèse d’additivité des effets hydrostatiques et saisonniers adoptée dans les modèles statistiques n’est pas forcément vérifiée pour les phénomènes d’ouverture du contact barrage-fondation, un fort couplage intervenant entre eux.

3. CONCLUSIONS

La recherche d’une complémentarité entre les méthodes d’analyse statistique des résultats d’auscultation des barrages en béton et les modélisations aux éléments finis apparaît d’un grand intérêt pour faire progresser l’analyse de leur comportement.

L’utilisation des mesures d’auscultation, dans la phase de mise au point d’une modélisation aux éléments finis d’un ouvrage existant, apparaît comme une étape indispensable pour appréhender le comportement d’un ouvrage. Très fructueuse pour la compréhension du comportement des ouvrages, par le biais des études de sensibilité qu’elle nécessite, elle permet la quantification des différents paramètres des modèles ainsi que la pondération des différents effets irréversibles.

L’évolution nécessaire des modèles statistiques afin notamment de réduire les dispersions dans l’estimation de la part irréversible des phénomènes, peut tirer parti des informations fournies par les modélisations aux éléments finis. Le développement des modélisations numériques avec prise en compte de phénomènes de plus en plus complexes (couplage mécanique-hydraulique, effets irréversibles) permet une meilleure exploitation et interprétation des résultats de l’auscultation. Le calage effectué assure la représentativité des modélisations mise en œuvre et éclaire les besoins de renforcement en dispositifs d’auscultation.

Par ailleurs, à côté des ouvrages comportant une auscultation permanente, la mise en place d’un équipement temporaire de mesure de déplacements pourrait être envisagée pour un parc plus vaste de moindre importance, lorsque les conditions (géométrie des ouvrages, taille de la retenue, possibilité de vidange) sont réunies.

RÉFÉRENCES

- [1] Bourdarot E. (2001). Analysis of the irreversible deformation of arch dams. *Colloque CIGB Geiranger juin 2001*.
- [2] Bourdarot E., Carrère A., Mei L., Hoonakker M. (2001). Apports combinés de la modélisation et de l’auscultation pour l’analyse et la compréhension du comportement des barrages. *Congrès CIGB Q 78 R 64. Beijing 2000*.
- [3] Bourdarot E., Fabre J.P. (2003). Analyse du comportement mécanique à long terme des barrages-voûtes. *Congrès CIGB Q 82 R 3. Montreal 2003*.
- [4] Bourdarot E., Hoonakker. (2012). Le comportement des barrages-voûtes en vallée large. Expérience tirée des barrages de Vouglans et Laouzas. *Congrès CIGB Q 95 R 11. Kyoto 2012*.
- [5] Akira H., Mitsuzumi A. (2012). Long trem behavior and dynamic analysis based on observation records of seismic motion of the Kurobe dam. *Congrès CIGB Q 95 R 37. Kyoto 2012*.
- [6] Chuliat O., Grimal E., Bourdarot E., Boutet J.M., Taquet B. (2012). Le gonflement des barrages en béton. Apport des recherches scientifiques. Application au barrage du Chambon et à son confortement. *Congrès CIGB Q 95 R 15. Kyoto 2012*.