



**HAL**  
open science

## Évaluation de la performance des barrages poids basée sur la formalisation et l'agrégation des connaissances

C. Curt, A. Peraldi, H. Félix

► **To cite this version:**

C. Curt, A. Peraldi, H. Félix. Évaluation de la performance des barrages poids basée sur la formalisation et l'agrégation des connaissances. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, 06-08 juin 2012, Jun 2012, Chambéry, France. 10 p. hal-00755951

**HAL Id: hal-00755951**

**<https://hal.science/hal-00755951>**

Submitted on 22 Nov 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Evaluation de la performance des barrages poids basée sur la formalisation et l'agrégation des connaissances

Curt Corinne<sup>1</sup>, Peraldi Audrey<sup>1</sup>, Félix Huguette<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irstea, UR OHAX Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie, 3275 route de Cézanne, F-13612 Le Tholonet Aix-en-Provence, France

[corinne.curt@irstea.fr](mailto:corinne.curt@irstea.fr), [huguette.felix@irstea.fr](mailto:huguette.felix@irstea.fr)

---

*RÉSUMÉ. Le maintien de la sécurité des barrages rend important le développement de méthodes et d'outils d'aide à la décision permettant d'évaluer leur performance et leur sécurité. Une méthode d'évaluation de la performance des barrages poids basée sur le développement d'un système à base de connaissances est proposée. Elle repose sur 3 étapes : formalisation des données d'entrée, définition des modèles d'agrégation permettant d'obtenir la performance des fonctions et la performance de l'ouvrage vis-à-vis des modes de rupture, validation. Les indicateurs et modèles ont été décrits pour 3 modes de rupture : cisaillement dans le corps du barrage, cisaillement à l'interface fondation-corps et dégradation des fondations. La validation de ces indicateurs et modèles a été initiée et a montré des résultats satisfaisants.*

*ABSTRACT. To control dam safety, it is important to develop methods and tools able to assess their performance. A method for assessing the performance of gravity dams is proposed in this article. It is based on the development of a knowledge-based method. It relies on 3 main stages: (i) formalization of input data as indicators, (ii) definition of aggregation models that allow obtaining the function performance and the performance related to failure modes, (iii) validation. The indicators and models were established for 3 failure modes: shearing in the body of dam, shearing at the interface foundation/body and foundation degradation. The validation of these indicators and models was initiated; satisfying results were obtained.*

*MOTS-CLÉS : barrages poids – performance – sécurité – système à base de connaissances.*

*KEY WORDS: gravity dams – performance – safety – knowledge-based system.*

---

## 1. Introduction

Le maintien de la sécurité des ouvrages de génie civil rend important le développement de méthodes et d'outils d'aide à la décision permettant d'évaluer leur performance et leur sécurité. C'est notamment le cas des barrages qui peuvent être sources de dangers pour les biens et les personnes situés à leur aval. A l'heure actuelle, l'évaluation de la performance et de la sécurité des barrages, leur diagnostic et la proposition d'actions correctives sont conduits par des ingénieurs experts au cours de revues, sur la base de plusieurs données : données issues de l'auscultation (mesure de débit, piézométrie...), inspection visuelle (trace de calcite, état des tirants d'ancrage...), données issues de modèles mathématiques (résistance à l'effort tranchant...) et données de conception et réalisation (composition du béton du corps du barrage, essai de résistance au cisaillement...). Nous proposons une méthode d'évaluation de la performance des barrages poids basée sur le développement d'un système à base de connaissances (SBC). Les SBC peuvent en effet répondre aux difficultés posées par l'agrégation d'informations hétérogènes et multiples et la représentation des connaissances expertes [AKE 09, SPE 01, ZWI 95].

## 2. Méthodologie et systèmes étudiés

La méthodologie utilisée pour évaluer la performance des barrages poids par formalisation et agrégation des connaissances a été développée pour le cas des barrages en remblai [CUR 10]. Ses 3 principales étapes sont présentées sur la Figure 1. Pour modéliser la performance vis-à-vis d'un mode de rupture, plusieurs séances de recueil avec un groupe de quatre experts, suivie de formalisations intermédiaires s'enchaînent.

Les formalisations concernent les ouvrages poids ainsi que leurs fondations rocheuses (fondations non déformables sous le poids de l'ouvrage). Les barrages étudiés sont les suivants : barrages poids en béton (béton compacté au rouleau, béton conventionnel vibré), en maçonnerie, à contreforts et multi-voûtes. Tous les types courants de parements amont, parements aval, systèmes de drainage, éléments de contact entre l'ouvrage et la fondation ont été considérés.

Trois modes de rupture ont été traités : cisaillement dans le corps du barrage, cisaillement à l'interface du corps du barrage et de la fondation, dégradation des fondations (dissolution, débouillage). Les deux premiers modes de rupture correspondent à état-limite de résistance à l'effort tranchant défini dans [CFB 06]. Cet état-limite est examiné le long des surfaces de rupture prédéfinies : dans le corps du barrage le long des joints et à l'interface barrage-fondation. Ils sont étroitement liés au mécanisme d'ouverture des fissures dans le corps du barrage à partir du parement amont et à l'interface barrage/fondation. Cet état-limite est également défini dans [CFB 06] et correspond à un mode de dégradation.

Les paragraphes suivants détaillent et illustrent les 3 étapes de la démarche.

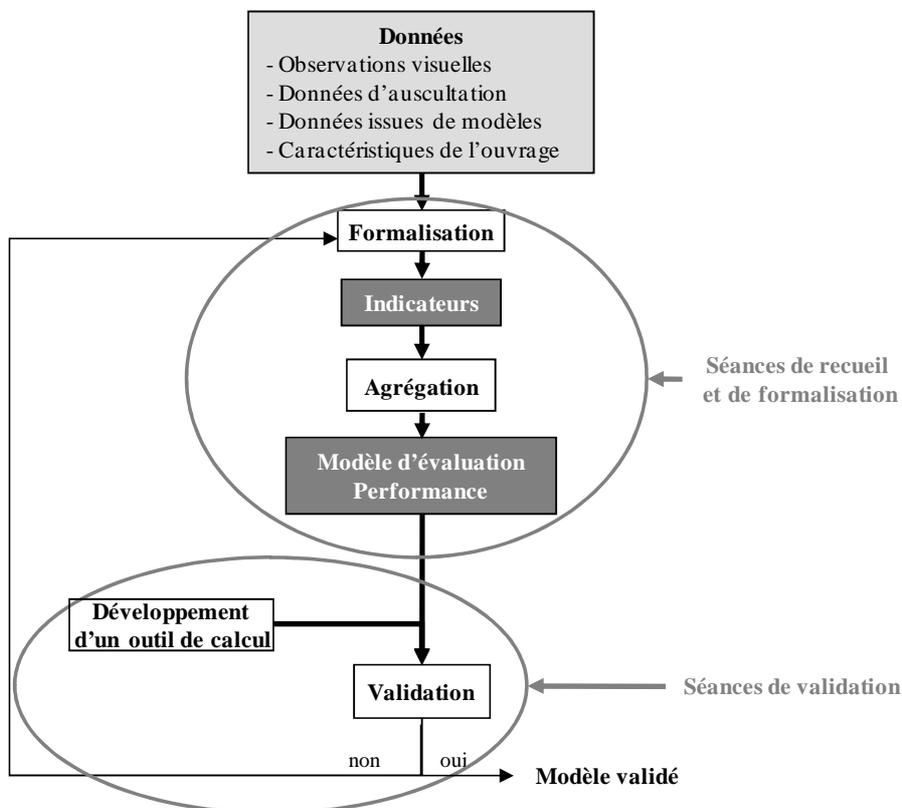


Figure 1. Principales étapes de la démarche

### 3. Formalisation des données d'entrée

La première étape de la démarche consiste en une formalisation des données d'entrée (inspection visuelle, données d'auscultation...) en tant qu'indicateurs. Les indicateurs sont décrits par une grille en 6 points : nom, définition, échelle, références, caractéristique temporelle (moment de la mesure) et caractéristique spatiale (lieu de la mesure) [CUR 10]. Ce format permet de rendre la mesure d'un indicateur robuste c'est-à-dire répétable et reproductible. Toutes les données, quel que soit leur type, sont décrites par cette même grille : on distingue ainsi des indicateurs visuels, auscultés et de conception-réalisation.

Soixante-neuf indicateurs ont été identifiés puis décrits selon la grille de formalisation : 25 indicateurs visuels, 16 indicateurs auscultés et 28 indicateurs de conception-réalisation. Le Tableau 1 présente un exemple d'indicateur visuel « Suintement sur parement aval » et le Tableau 2 un exemple d'indicateur ausculté « Perte de tension des tirants ».

Nom	Suintement sur parement aval
Définition	La présence de suintements sur le parement aval traduit la dégradation du système de drainage
Echelle et références	Echelle : 0 (excellent) à 10 (inacceptable) 0-2 : parement sec 5 : présence d'un suintement à mi-hauteur du parement aval 10 : présence d'un suintement au niveau normal de la retenue Plus le suintement est proche du sommet, plus la note est élevée
Caractéristique spatiale	Parement aval
Caractéristique temporelle	Evaluation menée lors des inspections visuelles

**Tableau 1.** Description de l'indicateur visuel « Suintement sur parement aval »

Nom	Perte de tension des tirants
Définition	Le vieillissement des tirants d'ancrage peut mener à une perte graduelle de tension entraînant des déformations structurelles, des fissurations et au final une défaillance de la structure si aucune mesure corrective n'est prise
Echelle et références	Echelle : 0 (excellent) à 10 (inacceptable) 0 : pas de perte de tension 7-9 : perte de tension de 20 % 10 : perte de tension de 50 %
Caractéristique spatiale	Tirants d'ancrage
Caractéristique temporelle	Traitement des données mené une fois par an

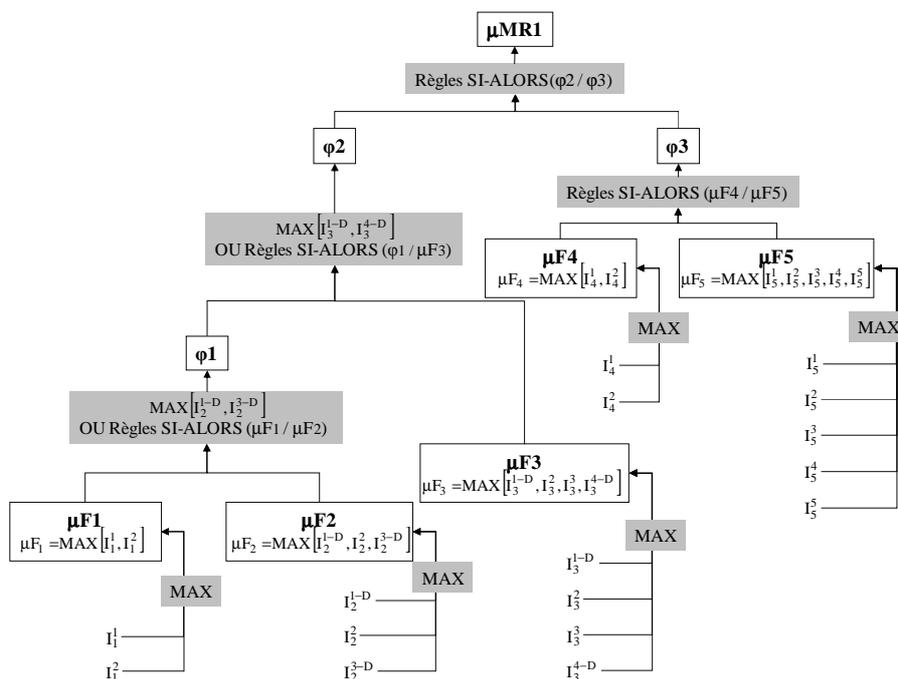
**Tableau 2.** Description de l'indicateur ausculté « Perte de tension des tirants »

#### 4. Modèles d'agrégation pour l'évaluation de la performance

La deuxième étape de la démarche décrite en Figure 1 vise à obtenir une évaluation globale de la performance de l'ouvrage vis-à-vis des différents modes de rupture ainsi que l'évaluation de la performance des différentes fonctions techniques telles que l'étanchéité ou le drainage. La performance est définie comme l'aptitude d'une infrastructure ou d'un composant à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. La perte de performance est liée à des détériorations causés par de nombreux phénomènes dynamiques plus ou moins liés tels que colmatage, érosion interne ayant des origines variées et souvent multiples [CIG 94].

Les performances du barrage sont évaluées au travers d'un modèle hiérarchique : les indicateurs sont agrégés pour évaluer la performance des fonctions puis la performance globale vis-à-vis d'un mode de rupture est obtenue par agrégation des

performances des fonctions (cf. Figure 2). Les agrégations se font de manière hiérarchique pour deux raisons : tout d'abord, il n'est pas possible pour un être humain de réaliser l'agrégation de plus de 7 éléments [MIL 94] ; dans notre cas, le nombre d'indicateurs est déjà largement supérieur à 7. Par ailleurs, cette agrégation séquentielle retrace les phénomènes qui peuvent toucher l'ouvrage. Ainsi, sur la Figure 3, le phénomène « Présence d'infiltrations » est lié à la dégradation des fonctions « Etanchéité du parement » et « Etanchéité de la crête ».



**Figure 2.** Modèle hiérarchique d'évaluation de la performance ;  $I_a^b$  = Indicateur  $b$  ;  $I_a^{b-D}$  = Indicateur direct ;  $\mu F_a$  = Performance de la Fonction  $a$  ;  $\mu MR_m$  = performance vis-à-vis du mode de rupture  $MR_m$  ;  $\phi_k$  = Phénomène

L'agrégation des indicateurs pour obtenir la performance d'une fonction est réalisée en utilisant l'opérateur maximum. L'utilisation de cet opérateur se justifie par l'utilisation d'une échelle unique (0-10) pour évaluer l'ensemble d'indicateurs : ceci introduit une hiérarchie entre les indicateurs depuis l'étape de mesure. Dans le cas de  $n$  indicateurs  $I_a^b$  impliqués dans l'évaluation de la fonction  $\mu F_a$  :

$$\mu F_a = \max_{b=1 \dots n} [I_a^b] \quad [1]$$

Par exemple sur la Figure 2, la performance de la Fonction 1 ( $\mu F_1$ ) est évaluée par  $\max [I_1^1, I_1^2]$ .

Le second niveau d'agrégation permet d'obtenir la combinaison des  $\mu F_a$  dénommée  $\varphi_k$  (phénomènes) et au final la performance du barrage vis-à-vis d'un mode de rupture. Sur la Figure 2,  $\varphi_1$  est évalué par la combinaison de  $\mu F_1$  et de  $\mu F_2$  et  $\varphi_3$  est évalué par la combinaison de  $\mu F_4$  et  $\mu F_5$ .

Ce second niveau d'agrégation est réalisé en utilisant différents opérateurs : maximum, moyenne pondérée, règles SI-ALORS. Par ailleurs, certains indicateurs dénotés  $I_a^{b-D}$ , sont qualifiés de « directs » : ce sont des indicateurs spécifiques d'un phénomène ou d'un mode de rupture. Ils en fournissent une évaluation directe. Ce type d'indicateur a la particularité de prendre seulement les valeurs extrêmes sur l'échelle c'est-à-dire 0, 7, 8, 9 ou 10 : la situation est soit totalement normale, soit très sérieuse. L'indicateur « Perte de tension des tirants » (cf. Tableau 2) est un indicateur direct de la fonction « Apport de poids à l'ouvrage ».

L'agrégation prend en compte la valeur des indicateurs directs en utilisant :

- L'opérateur maximum quand des indicateurs directs sont activés (la valeur de l'indicateur évaluée par l'expert est strictement positive).  $\varphi_k$  est évalué par :

$$\text{SI } I_a^{b-D} > 2 \text{ ALORS } \varphi_k = \text{MAX}_b [I_a^{b-D}] \quad [2]$$

où  $I_a^{b-D}$  sont des indicateurs directs de  $\varphi_k$

Sur la Figure 2,  $I_2^{1-D}$  et  $I_2^{3-D}$  sont des indicateurs directs de  $\varphi_1$

$$\text{SI } I_2^{1-D} > 2 \text{ OU } I_2^{3-D} > 2, \text{ ALORS } \varphi_1 = \text{MAX} [I_2^{1-D}, I_2^{3-D}]$$

- Inversement, des règles SI-ALORS quand aucun indicateur direct n'est concerné (la valeur de l'indicateur évaluée par l'expert est égale à 0). Les règles SI-ALORS relient (i) la performance de deux fonctions impliquées dans un phénomène ( $\mu F_1$  et  $\mu F_2$  sur la Figure 2) ou (ii) une fonction et un phénomène ( $\mu F_3$  et  $\varphi_1$ ) ou (iii) deux phénomènes ( $\varphi_2$  et  $\varphi_3$ ) :

$$\circ \text{ SI } I_a^{b-D} \leq 2 \text{ ALORS } \varphi_p = f(\mu F_i, \mu F_j) \quad [3]$$

Combinaison de 2 performances de fonctions  $\mu F_i$  et  $\mu F_j$

$$\circ \text{ SI } I_a^{b-D} \leq 2 \text{ ALORS } \varphi_p = f(\mu F_a, \varphi_c) \quad [4]$$

Combinaison d'une performance de fonction  $\mu F_a$  avec un phénomène  $\varphi_c$

$$\circ \varphi_p = f(\varphi_c, \varphi_d) \quad [5]$$

Combinaison de deux phénomènes  $\varphi_c$  et  $\varphi_d$

$f$  est une fonction pouvant être une moyenne pondérée (cas de l'agrégation des fonctions d'étanchéité de la crête et d'étanchéité du parement sur la Figure 3) ou des règles SI-ALORS (table de vérité définie par les experts ou conclusion de la règle exprimée sous la forme d'équations arithmétiques). Par exemple, sur la Figure 3, l'agrégation des phénomènes « Perte de résistance des matériaux vis-à-vis du cisaillement » et « Perte de la force d'ancrage » est menée selon les équations arithmétiques présentées dans le Tableau 3.

Hypothèses	$\varphi_{RM-Cisail}$ : note du phénomène « Perte de résistance des matériaux vis-à-vis du cisaillement » $\varphi_{ForceAnc}$ : note du phénomène « Perte de la force d'ancrage » $\varphi_{PerteRésist-Ouv}$ : évaluation du phénomène « Perte de résistance de l'ouvrage vis-à-vis du cisaillement »  $R = MAX(\varphi_{RM-Cisail}, \varphi_{RM-ForceAnc})$ $r = MIN(\varphi_{RM-Cisail}, \varphi_{RM-ForceAnc})$
Algorithme	$\varphi_{PerteRésist-Ouv} = R + \rho$  $\rho = 0$ SI $0 \leq r \leq 2$ $\rho = 1$ SI $3 \leq r \leq 4$ avec $\rho = 2$ SI $5 \leq r \leq 6$ $\rho = 3$ SI $r \geq 7$  $0 \leq \varphi_{PerteRésist-Ouv} \leq 10$

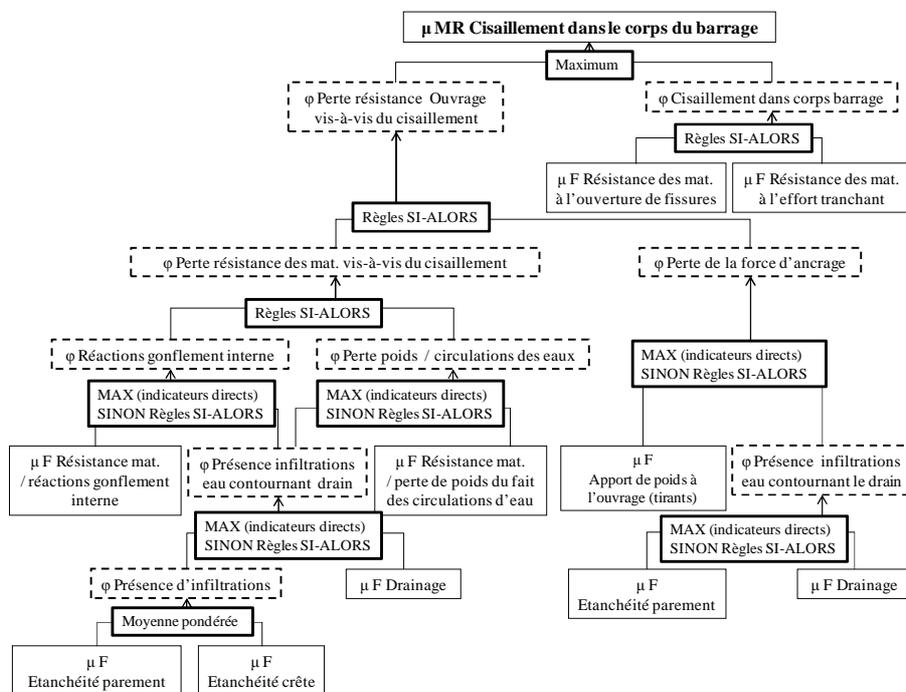
**Tableau 3.** Exemple d'agrégation de phénomènes

Le modèle n'est pas chronologique : par exemple,  $\mu F_2$  peut se produire avant  $\mu F_1$ .

Un modèle a été décrit pour chacun des 3 modes de rupture considéré en utilisant le modèle hiérarchique décrit sur la Figure 2. La Figure 3 présente le cas du mode de rupture par cisaillement du corps du barrage. Huit fonctions ont été identifiées : étanchéité de la crête, étanchéité du parement amont, drainage, résistance des matériaux vis-à-vis des réactions de gonflement interne, résistance des matériaux vis-à-vis de la perte de poids du fait des circulations d'eau, apport de poids à l'ouvrage, résistance des matériaux à l'ouverture de fissures et résistance des matériaux à l'effort tranchant.

Sur cette figure sont représentées les différentes agrégations définies par le groupe d'experts. La performance des fonctions est obtenue par application de l'équation [1]. Les 22 indicateurs utilisés n'ont pas été représentés pour des raisons de clarté. L'évaluation de la performance vis-à-vis du mode de rupture par cisaillement dans le corps du barrage est obtenue par la combinaison entre :

- la note évaluant le phénomène de cisaillement dans le corps du barrage
- la note évaluant le phénomène de perte de résistance de l'ouvrage vis-à-vis du cisaillement dans le corps de l'ouvrage résultant de la combinaison entre :
  - o la note évaluant la perte de la force d'ancrage des tirants
  - o la note évaluant la perte de résistance des matériaux vis-à-vis du cisaillement résultant de la combinaison entre :
    - la note évaluant le phénomène de gonflement interne (alcali-réaction, ettringite différée)
    - la note évaluant le phénomène de perte de poids du fait des circulations des eaux agressives (dissolution et érosion).



**Figure 3.** Evaluation de la performance d'un barrage poids vis-à-vis du cisaillement du corps du barrage

### 5. Validation

La troisième étape concerne la validation des formalisations et modèles tout d'abord par confrontation à des cas réels simplifiés puis à des cas réels complets. Afin de conduire ces exercices, un outil logiciel est développé. Il permet de faciliter

la notation pour les experts qui réalisent les tests, de tracer les données et de réaliser automatiquement les calculs de performance.

Un premier travail de validation a été réalisé sur des cas simplifiés. Pour les barrages poids, nous avons rencontré une contrainte particulière que nous n'avons pas identifiée pour le cas des ouvrages en remblai : les cas de dégradation sont beaucoup moins nombreux dans le cas des ouvrages poids que des ouvrages en remblai d'où une difficulté à générer des dossiers tests. Nous avons tout de même pu produire 7 études de cas sur lesquelles 3 experts ont fourni leur notation. En première approche, les résultats d'une part, de comparaison des notes des experts entre elles et d'autre part, de comparaison de ces notes aux notes produites par l'algorithme sont satisfaisants mais d'autres cas simplifiés doivent être mis en œuvre avant de passer à des cas en vraie grandeur.

Par exemple, le descriptif suivant, extrait d'un rapport d'expertise, a été donné aux experts : « *Les pierres sont de faible épaisseur (de type placage) et de nombreuses pierres sont tombées, laissant apparaître un corps de barrage fait de maçonnerie tout venant. Les joints de maçonnerie sont en mauvais état. Dans le 1/3 inférieur, on note une présence importante de mousses, malgré l'entretien réalisé l'été. Malgré la retenue vide, on note plusieurs points de suintement sur le parement aval.* ». Des photos ont été également fournies.

A partir de ce descriptif, les experts ont évalué 2 indicateurs en utilisant les grilles formalisées des indicateurs (cf. Tableau 1 pour « Suintements sur parement aval »). Le Tableau 4 présente les résultats. Les 3 experts sont en accord pour l'indicateur Suintements sur parement aval. Il existe par contre un écart pour l'indicateur Etat de dégradation du parement aval, même si les notes restent dans la même gamme (5 = médiocre et 7 = mauvais). Des séances d'échange afin de comprendre l'origine de ces écarts doivent alors être menées.

	Etat de dégradation du parement aval	Suintements sur parement aval
Expert 1	5	7
Expert 2	5	7
Expert 3	7	7

**Tableau 4.** Exemples de résultats de notation par trois experts

## 6. Conclusion

Le développement de méthodes et d'outils capables de gérer la performance et la sécurité des barrages revêt une importance particulière car la perte de performance peut mener à différentes détériorations structurelles ou fonctionnelles. Celles-ci peuvent résulter en un vieillissement accéléré, des coûts opérationnels supplémentaires ou la rupture de l'ouvrage. La méthode proposée repose sur la formalisation et l'agrégation d'informations hétérogènes issues de différentes

sources dans des modèles adéquats en employant une approche de type KBS. Les résultats ont montré les points suivants :

- il est possible d'exprimer tous les types de données (observations visuelles, données d'auscultation, données de conception ou réalisation) dans un format unique composé de 6 items qui permet d'obtenir une évaluation robuste ;
- les modèles d'agrégation admettent plusieurs types de sorties : performance des fonctions (étanchéité, drainage...) et performance vis-à-vis d'un mode de rupture (cisaillement dans le corps du barrage, cisaillement à l'interface du corps du barrage et de la fondation, dégradation des fondations rocheuses) ;
- différents types d'agrégation peuvent être utilisés : opérateurs mathématiques de type moyenne pondérée, maximum ou règles SI-ALORS ;
- il est nécessaire de proposer des procédures de validation spécifiques ;
- l'approche est bien acceptée par les experts car elle est proche de leur raisonnement naturel.

Cette approche a été initialement déployée pour les barrages en remblai puis adaptée au cas des barrages poids. Toutefois, dans ce dernier cas, l'approche développée permet d'obtenir des résultats de premier ordre de grandeur ; une méthodologie aux états limites avec calculs associés a été proposée [PEY 06]. L'approche reste par contre intéressante dans une optique de transmission des connaissances à des ingénieurs récemment impliqués dans des tâches d'expertise d'ouvrages.

## 7. Bibliographie

[AKE 09] Akerka R. and Sajja P., "Introduction to Knowledge-based Systems", Knowledge-based Systems, Jones & Bartlett Publishers, Sudbury, USA, 2009.

[CFB 06] CFBR, Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids - Propositions et recommandations, Comité Français des Barrages et Réservoirs - Groupe de Travail "Calcul des barrages poids", 62 pages, 2006.

[CIG 94] CIGB, Ageing of dams and appurtenant works - Review and recommendations, CIGB, 1994.

[CUR 10] Curt C., Peyras L. and Boissier D., "A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance", *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25, 171-184, 2010.

[MIL 94] Miller G., "The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information", *Psychological Review*, 101, 343-352.

[PEY 06] Peyras L., Kovarik J. B. and Royet P., "Vers l'adaptation aux Eurocodes de la justification des barrages poids", *Revue Européenne de Génie Civil*, 10, 83-109, 2006.

[SPE 01] Speel P., Schreiber A. T., van Joolingen W., van Heijst G. and Beijer G. J., "Conceptual Modelling for Knowledge Based Systems", *Encyclopedia of Computer Science and Technology*, Marcel Dekker Inc., 2001.

[ZWI 95] Zwingelstein G., Diagnostic des défaillances - Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Hermès, 1995.