

FORMALISATION ET INTEGRATION DES CONNAISSANCES POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES BARRAGES

A METHOD FOR THE DAMS PERFORMANCE ASSESSMENT BY KNOWLEDGE FORMALISATION AND INTEGRATION

Curt C. et Peyras L.
Cemagref
Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
3275 Route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix-en-Provence Cedex 5 – France

Boissier D.
Laboratoire de Génie Civil
CUST - Université Blaise Pascal
24, avenue des Landais - BP 206
63174 Aubière cedex – France

Résumé

La perte de performance d'un ouvrage de génie civil peut se traduire par des dégradations ou des défaillances se matérialisant par des événements dramatiques comme la rupture d'un barrage. La conservation du patrimoine, la vérification que le système remplit pleinement ses fonctions et l'assurance de la sécurité sont ainsi des préoccupations majeures des concepteurs, des propriétaires et des exploitants. L'évaluation de la performance et de la sécurité des barrages repose sur les connaissances théoriques et heuristiques du déroulement des différents enchaînements de phénomènes. Ces connaissances sont utilisées par des ingénieurs expérimentés pour analyser le comportement des ouvrages. Nous avons choisi, dans ce travail, de modéliser cette approche. Elle consiste principalement (i) à identifier toutes les informations utilisées par les experts pour caractériser un ouvrage c'est-à-dire les données issues des modèles mécanistes existants, les évaluations issues de l'inspection visuelle, les mesures provenant des instruments qui équipent le barrage et les éléments de conception et de réalisation présents dans le dossier du barrage, (ii) à obtenir leur formalisation de manière à rendre leur utilisation répétable et reproductible et (iii) à les agréger afin de quantifier la performance des différentes fonctions (étanchéité, drainage...) et la performance par rapport aux différents modes de rupture (érosion interne, glissement, surverse...). Cette méthodologie est illustrée par le cas de l'érosion interne au travers du remblai. Des tests sur dossiers réels ont montré l'accord entre les notes des experts et la possibilité de discriminer les barrages par rapport à leur performance.

Summary

The performance loss of a civil engineering works can lead to deteriorations or failures such as dam break. The performance and security assessment of dams mainly relies at the moment on theoretical and heuristic knowledge of expert engineers. During dam reviews, experts developed measurement, assessment and decision strategies. However, this approach is seldom formalised. A modelling of this approach is proposed in this paper. It includes (i) the collection of information coming from mechanical models, visual inspection, monitoring and conception and realisation data (ii) the description of these information to guarantee their correct use i.e. repeatability and reproducibility, (iii) their aggregation using pertinent mathematical operators to obtain the global condition of the dam. The method is illustrated for the case of the piping through the embankment. Tests carried out on real cases showed a good agreement between the evaluations of the experts as well as a discriminative ability between dams.

Introduction

La perte de performance d'un ouvrage de génie civil peut se traduire par :

- nombre de dégradations qu'elles soient techniques comme le vieillissement accéléré, ou économiques comme des pertes d'eau excessives dans le cas d'un barrage ou l'interdiction de la circulation à certaines classes de véhicules sur un pont ;
- des défaillances donnant lieu à des événements dramatiques comme la rupture du barrage de Malpasset en France en 1959, l'effondrement Silver Bridge aux Etats-Unis en 1967, l'accident de la centrale de Tchernobyl en 1986...

La conservation du patrimoine, la vérification que le système remplit pleinement ses fonctions et l'assurance de la sécurité sont ainsi des préoccupations majeures des concepteurs, des propriétaires et des exploitants. Les structures privées et publiques ont toujours essayé de maintenir leurs infrastructures, soumises à un vieillissement inexorable, dans une condition d'usage et de service à coût minimum [1]. Ces préoccupations ont généré une forte augmentation de la demande d'outils et de méthodes pour maîtriser la performance et la sécurité des ouvrages de génie civil à partir du milieu des années 1960. Un certain nombre de recherches a débouché sur l'établissement de procédures, de manuels techniques, de spécifications ou d'outils

logiciels pour une mise en œuvre sur le terrain. Ces systèmes ont été développés principalement pour les revêtements routiers ou certains composants (béton, toitures). On peut lister en exemple :

- Technical Manual - Pavement Maintenance Management [2] ;
- Users Guide to the Highway Concrete (HWYCON) Expert System développé dans le cadre du Strategic Highway Research Program [3] ;
- Condition Rating Procedures for Concrete in Gravity Dams, Retaining Walls, and Spillways [4] ;
- Technical report - ROOFER: an engineered management system (EMS) for bituminous built-up roofs [5] ;
- Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges [6].

Le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation de la performance et la sécurité de ouvrages complexes que sont les barrages représente par conséquent un enjeu fort. Cette thématique comporte toutefois un verrou important car l'évaluation de la performance est loin d'être triviale : la Figure 1 dresse les enchaînements de phénomènes pouvant se dérouler lors de la vie de l'ouvrage. La perte de performance d'un ouvrage est ainsi une succession de phénomènes aux origines diverses et complexes et aux conséquences tout aussi diverses et complexes allant de la dégradation d'une ou plusieurs fonctions à l'événement extrême

de rupture de l'ouvrage. Les modes de rupture d'un barrage sont multiples : pour les barrages en remblai, on distingue classiquement la surverse, le glissement du remblai, le glissement

de la fondation, l'érosion interne dans le remblai et l'érosion interne dans la fondation.

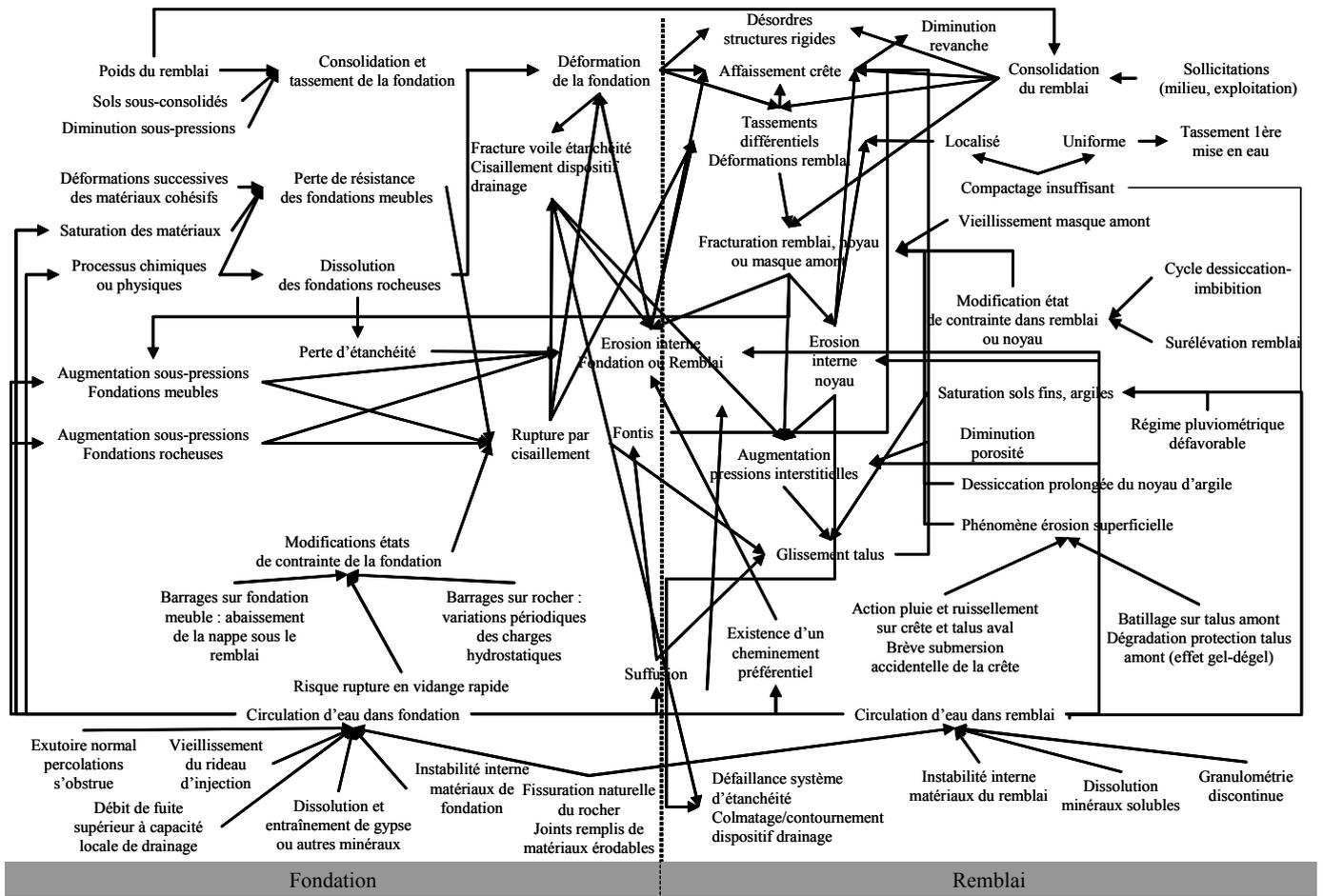


Figure 1 : Phénomènes se déroulant durant le vieillissement d'un barrage en remblai

La compréhension incomplète des réactions complexes se déroulant pendant la vie d'un barrage associée

- au nombre très important de variables susceptibles de provoquer une dégradation de la performance des barrages ;
- au caractère unique de chaque ouvrage ;
- aux conditions environnementales très différentes dans lesquels ces ouvrages peuvent être placés ;
- à des données d'auscultation ne couvrant pas nécessairement toutes les composantes d'un ouvrage

font que les modèles numériques développés sont très généralement valides pour un mécanisme donné, des conditions de sollicitations connues et un ouvrage particulier et défini. De fait, il n'est pas possible de prétendre développer un modèle numérique unique prenant en charge l'ensemble des processus de dégradations au sein d'un barrage.

A côté des modèles numériques, trois grands types d'approches ont été introduits :

- l'analyse statistique détaillée des ruptures et accidents affectant les barrages en remblai et leurs facteurs d'influence : la méthode UNSW (University of New South Wales) est basée sur l'hypothèse qu'il est possible de faire des estimations de la probabilité relative de rupture des barrages en remblai à partir de la fréquence historique de défaillance [7] ;

- les méthodes basées sur le recueil et la formalisation des connaissances : la méthode des indices de conditions est issue du programme transversal REMR (Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation) développé par l'US Army Corps of Engineers (USACE) au début des années 1980. Une méthodologie générique a été proposée afin d'allouer les fonds de manière rationnelle entre les ouvrages d'un parc important à partir de l'évaluation d'un indice de condition [8]. Ce programme repose sur une méthodologie d'évaluation de l'état des ouvrages établie tout d'abord pour les chaussées puis élargie à 29 types d'ouvrages de génie civil au sein de l'USACE. La démarche a été reprise et adaptée par d'autres organismes tels qu'HydroQuébec dans son « Guide d'implantation des indices de condition - barrages en remblai » [9]. La méthode Schémas Directeurs de Maintien du Patrimoine Hydraulique développée par EDF entre dans cette lignée de méthodes issues de la modélisation de l'expertise. Elle est basée sur la détermination d'un indice technique en fonction de l'état du composant, de son importance fonctionnelle et de l'évolution du composant [10] ;
- des méthodes systémiques basées sur la modélisation fonctionnelle des barrages, utilisant les techniques de la sûreté de fonctionnement et destinées à évaluer la fiabilité des barrages en service [11].

La méthode que nous proposons repose sur les connaissances théoriques et heuristiques du déroulement des différents enchaînements de phénomènes. Ces connaissances sont utilisées par des ingénieurs expérimentés pour analyser le comportement des ouvrages. Nous avons choisi, dans ce travail, de modéliser cette approche et ainsi de compléter les approches mécaniciennes classiques et incontournables par une approche basée sur l'utilisation des connaissances déclaratives.

A l'heure actuelle, cette démarche d'évaluation de la performance de ces barrages n'est pas entièrement formalisée, ce qui pose des problèmes dans le cas de départ à la retraite, licenciement ou de mutations par exemple. Il est donc important de valoriser ces connaissances en les capitalisant et en les transmettant, en complément à leurs connaissances théoriques, à des ingénieurs débutants amenés à réaliser des expertises. En outre, cette méthode d'évaluation devrait permettre à terme un suivi du barrage au cours du temps avec un accord entre les notes données par plusieurs experts (reproductibilité) et un accord entre les notes données par le même expert lorsqu'on lui demande de répéter la même mesure (répétabilité).

Notre domaine d'application concerne spécifiquement les barrages français intéressant la sécurité publique et placés sous le contrôle du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Cette population représente environ 250 barrages.

Nous présentons dans la section 2 la méthodologie proposée pour l'évaluation de la performance que nous illustrerons par l'exemple

de l'érosion interne dans le barrage en remblai à étanchéité amont dans la section 3.

Développement d'une méthodologie d'évaluation de la performance des barrages par formalisation et intégration des connaissances

Description du raisonnement de l'expert au cours des revues d'inspection

La Figure 2 est une représentation de l'approche que l'expert met en œuvre lors des revues d'inspection. Elle comporte 3 grandes phases :

- une phase de mesure c'est-à-dire la caractérisation par des mesures pertinentes des phénomènes qui induisent une perte de performance. Ces mesures sont issues de quatre sources : des inspections visuelles, des instruments d'auscultation de l'ouvrage, des essais et du dossier de conception et réalisation du barrage (« informations antérieures à l'inspection »). Certaines de ces données subissent un traitement avant utilisation : traitement statistique des mesures d'auscultation, calcul de la résistance au glissement... ;
- une phase d'évaluation c'est-à-dire la combinaison des différentes mesures. Cette agrégation permet l'évaluation de la performance des différentes fonctions et de la performance globale du barrage et l'évolution de cette performance jusqu'à l'état limite c'est-à-dire la défaillance ;
- une phase de contrôle qui a pour objectif de replacer le système étudié dans son état de fonctionnement standard.

Dans ce travail, nous nous intéressons plus spécifiquement aux deux premières phases que sont la formalisation des mesures et l'évaluation de la performance. La recherche vise principalement (i) à identifier toutes les informations utilisées par les experts pour caractériser un ouvrage, (ii) à obtenir leur formalisation et (iii) à les agréger afin de quantifier la performance des différentes fonctions (étanchéité, drainage...) et la performance par rapport aux différents modes de rupture (érosion interne, glissement, surverse...). L'évolution de cette perte dans le temps et le contrôle par actions correctives n'y seront pas traités.

Les paragraphes suivants décrivent les différentes étapes de la méthodologie présentée sur la Figure 3. Le cœur de la méthode est constitué par les séances de recueil : la construction du modèle repose sur la formalisation de l'expertise recueillie au cours de séances menées selon des interviews guidées. Un groupe de cinq experts du Cemagref a été constitué : ces experts conduisent plusieurs expertises décennales par an (revue complète de la sécurité des barrages réalisée tous les 10 ans et imposée par la réglementation), depuis au moins une dizaine d'années. Pour modéliser la performance par rapport à un mode de rupture donné, plusieurs séances de recueil et formalisations intermédiaires s'enchaînent.

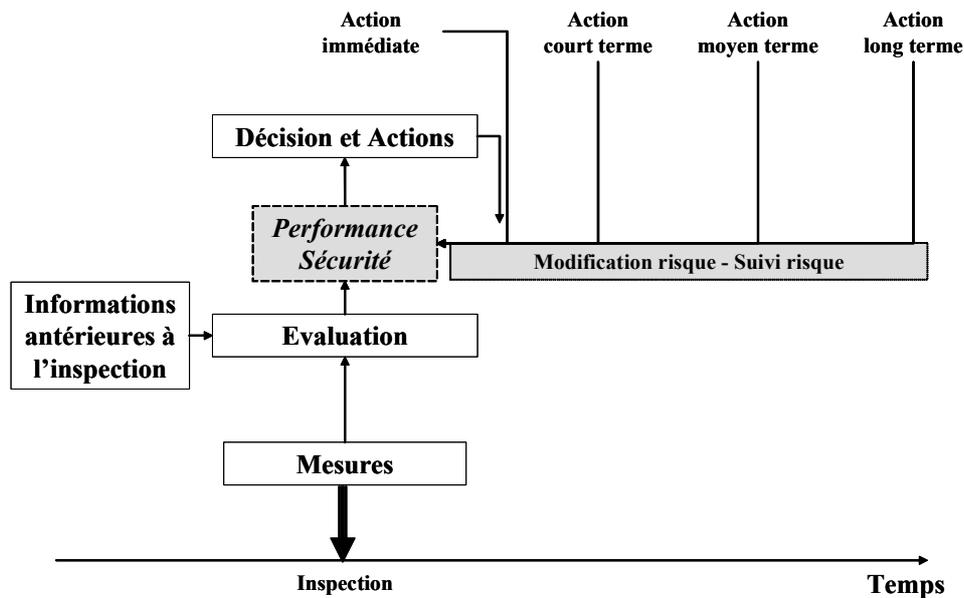


Figure 2 : Démarche de l'ingénieur expert lors des inspections

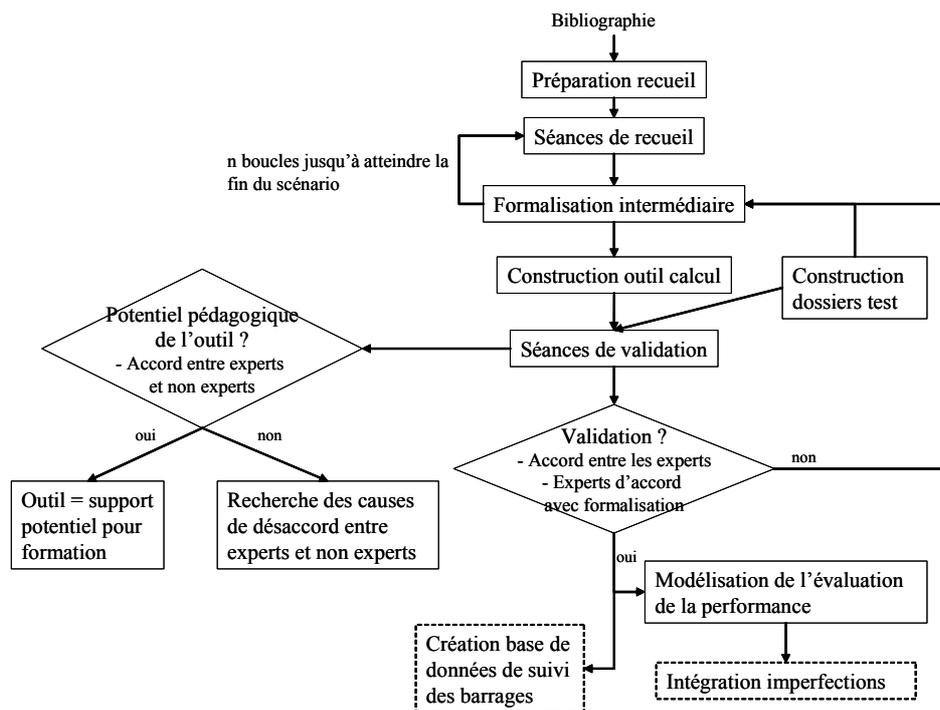


Figure 3 : Organigramme de la méthode

Préparation des séances de recueil

La phase de préparation des séances de recueil est une étape importante : elle permet à l'ingénieur chargé du recueil de se familiariser avec la terminologie du domaine des barrages et de comprendre les différents phénomènes se déroulant pendant la vie d'un ouvrage ainsi que leur enchaînement. Cet apprentissage constitue un passage obligatoire pour l'instauration du dialogue avec les experts tout comme pour la préparation des documents supports qui seront employés pendant les séances et des questions qui y seront posées.

Notre objectif étant de formaliser l'évaluation de la performance des barrages par rapport aux différents modes de rupture, il est nécessaire, en premier lieu, d'identifier les phénomènes entraînant une dégradation de chacune des fonctions potentiellement impliquées dans ces modes de rupture. Par exemple, l'érosion interne dans le remblai à étanchéité amont est liée à la perte de performance de la fonction d'étanchéité, de la fonction de drainage et de la fonction d'auto-filtration. La dégradation de la performance de la fonction de drainage peut être, quant à elle, le résultat d'un certain nombre de phénomènes comme le colmatage ou le contournement du drain. Ce sont ces

phénomènes que les experts quantifient à l'aide de différentes mesures que nous appellerons indicateurs : par exemple, l'augmentation du débit de drainage est en général l'indicateur de l'occurrence d'un phénomène d'altération du masque amont.

Pour guider les interviews, il s'agit donc d'identifier, pour chaque mode de rupture, les fonctions et phénomènes impliqués. Cette identification est réalisée à partir de la littérature [7 ; 12-17] et notamment de nos travaux antérieurs. Ceux-ci reposent sur l'adaptation aux barrages de méthodes de la Sécurité de Fonctionnement telles que les méthodes pour l'analyse fonctionnelle et l'AMDEC (analyse des modes de défaillance et de leurs effets) [16]. Ces travaux ont notamment permis la construction d'un modèle fonctionnel de vieillissement en utilisant une représentation sous forme de graphes orientés. Il permet de construire des scénarios de vieillissement en enchaînant des

séquences successives de défaillances et permet de connaître les fonctions et indicateurs impliqués dans un mécanisme de vieillissement ou de rupture [16].

L'identification des causes des différents modes de rupture est faite sous la forme de diagrammes d'Ishikawa. Afin de faciliter le recueil ultérieur, nous distinguons les phénomènes issus de la conception et de la réalisation et les phénomènes issus du vieillissement (cf. Figure 4).

Ces schémas sont susceptibles d'évoluer lors des séances de recueil par ajout ou retrait de fonctions ou phénomènes.

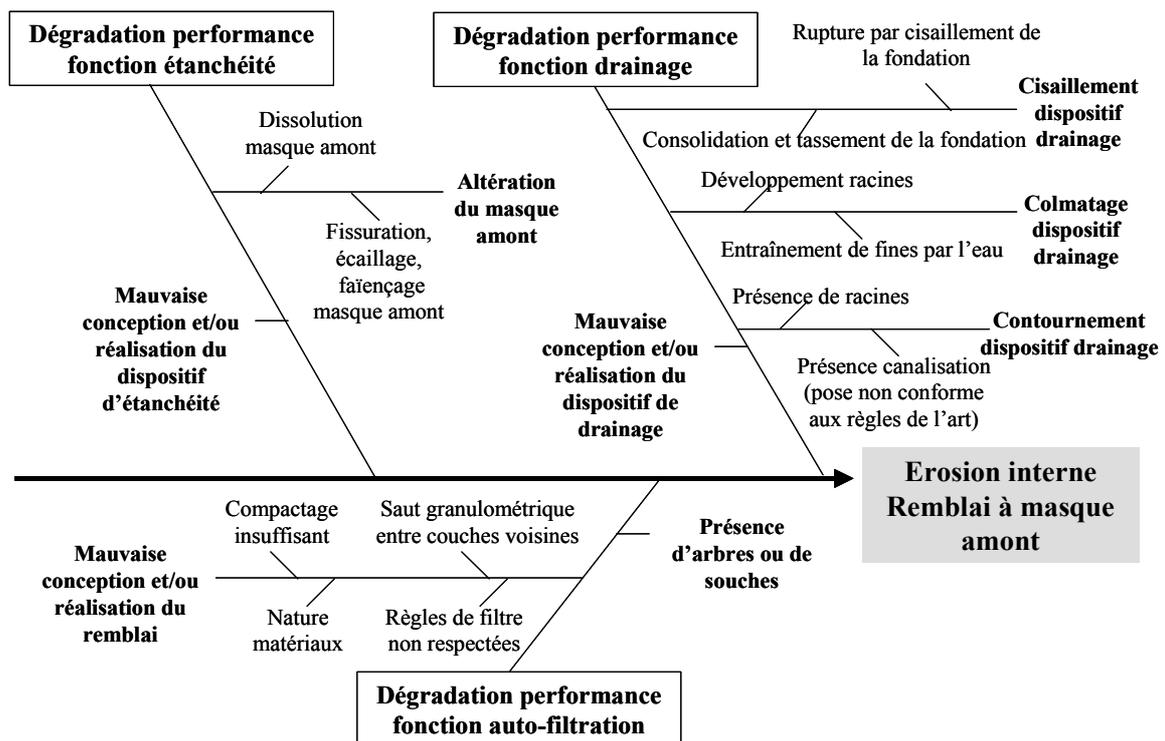


Figure 4. Diagramme cause-effet - Erosion interne dans le remblai à masque amont

Identification et formalisation des mesures

Les variables d'entrée du modèle de calcul de la performance sont toutes les sources d'information que l'ingénieur expert utilise pour réaliser l'évaluation de la performance. Il s'agit :

- d'indicateurs visuels issus de l'inspection visuelle sur le site. L'observation visuelle est à l'origine de la détection de la majorité des anomalies des barrages. Ce type d'inspection tient ainsi une place prioritaire dans le dispositif de surveillance ;
- de mesures instrumentales pouvant provenir de deux sources : elles sont soit acquises à partir des instruments qui équipent le barrage, comme par exemple, les piézomètres, les pendules... soit à partir d'essais en laboratoire ou in situ comme par exemple des essais de détermination de perméabilité ou granulométrie. Ces mesures instrumentales font l'objet de traitements statistiques permettant de déduire des informations sur l'évolution de certains phénomènes ;
- de symptômes calculés obtenus à partir des modèles mécanistes faisant intervenir des symptômes auscultés en prenant en compte les caractéristiques intrinsèques de l'ouvrage (géométrie d'après les plans de l'ouvrage, caractéristiques des matériaux déterminées par des essais...) et les caractéristiques des milieux extérieurs (niveau de la retenue, intensités des actions) [16] ;
- des caractéristiques de l'ouvrage, à savoir :
 - sa géométrie ;
 - les propriétés des matériaux qui le constituent et leur évolution au cours du temps ;
 - les informations sur sa conception, sa réalisation et les modifications éventuelles apportées à l'ouvrage comme une rehausse, un confortement ;
 - la capacité de l'évacuateur de crues étudiée en liaison avec les données hydrologiques actualisées ;

- la résistance aux séismes.

Une fois chacune de ces mesures et informations identifiées, il est nécessaire de mettre en place une grille autorisant la description de chacune d'elles de manière à les rendre répétables et reproductibles. Pour les informations visuelles, nous avons adapté le concept d'indicateur sensoriel développé dans le cadre du génie des procédés pour désigner les mesures perceptives qui permettent à l'opérateur de suivre l'évolution d'un produit au cours de sa fabrication [18]. Nous avons établi que les champs à renseigner pour une définition complète de la mesure sont : le nom de la mesure, une définition, une échelle avec références (photos, schémas, descriptions linguistiques), une caractéristique d'espace (échantillonnage, lieu de la mesure). Les informations formalisées sont appelées indicateurs.

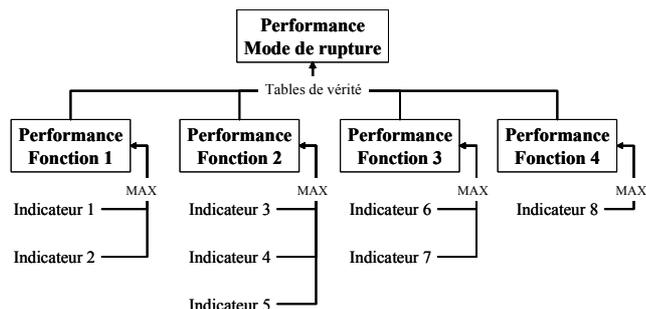


Figure 5. Modélisation de l'évaluation de la performance par rapport à un mode de rupture

Deux types d'échelles ont été retenus :

- une échelle de 0 (excellent) à 10 (inacceptable) avec 6 jalons (excellent, bon, passable, médiocre, mauvais, inacceptable) pour les indicateurs issus de l'auscultation et de l'inspection visuelle ;
- une échelle de 0 (conforme) à 10 (non-conforme) avec 4 jalons (conforme, déviation faible, déviation forte, non-conforme) pour les données de conception et réalisation. Le mot déviation s'entend par comparaison aux règles de l'art actuelles.

Les références sont des éléments clés pour garantir la robustesse de l'évaluation : il s'agit de préciser le plus possible les différents cas pouvant se produire afin que l'évaluation faite par plusieurs experts ou par un même expert à différents moments conduise à la même note. Par exemple, dans le cas d'un barrage étanché par un masque amont en béton conventionnel, les notes 1 et 2 correspondent à la présence de fissures non ouvertes et les notes 3 à 6 à des fissures ouvertes. La notation précise dans la plage 1-2 (respectivement 3-6) est faite à partir du nombre de fissures non ouvertes (respectivement ouvertes) relevées.

Construction du modèle d'évaluation de la performance

La combinaison des indicateurs d'auscultation, issus de modèles mécaniques ou simulations numériques et visuels, à l'aide d'opérateurs mathématiques adaptés à la nature des données à agréger, permet d'établir la performance de chaque fonction (fonction de drainage, d'étanchéité...) et la performance vis-à-vis du mode de rupture considéré (glissement...); ces performances constituent les variables de sortie du modèle (cf. Figure 5). Ces opérateurs mathématiques sont le maximum pour le calcul de la performance des fonctions et des tables de vérité pour le calcul de la performance par rapport au mode de rupture.

Une démarche similaire est effectuée pour caractériser la conformité des différents dispositifs (étanchéité, drainage...) aux règles de l'art actuelles par combinaison des informations de conception et réalisation.

Validation

Des tests sont effectués afin de vérifier (i) la cohérence du groupe par analyse de la notation individuelle de chaque expert, de cas de barrages présentés sous forme de dossiers et (ii) la validité de la description des indicateurs par confrontation à des cas réels. Un ingénieur confirmé du domaine des barrages qui n'a pas participé aux séances de recueil a également noté les dossiers de même qu'un jeune ingénieur génie civil, ceci dans le but de tester la potentialité pédagogique de cet outil. La capitalisation du savoir ne prend en effet toute son importance que si ce savoir peut être transféré à des ingénieurs nouvellement amenés à faire des expertises.

Dix dossiers tests ont été construits à partir de la base de cas disponible au Cemagref. Nous avons procédé en utilisant une présentation type : description du barrage (hauteur, date de mise en eau, volume de la retenue, nature de l'étanchéité...), informations issues de l'inspection visuelle, informations issues de l'auscultation lorsqu'elles existent, et photographies. Les experts sont invités à faire la notation des 10 barrages en utilisant les indicateurs formalisés durant les séances. Un outil informatique a été développé en Visual Basic avec une interface Excel pour réaliser les calculs et enregistrer les données fournies par l'expert. Le traitement des résultats est effectué par analyse de la variance (ANOVA). L'analyse est menée au niveau des performances des fonctions et des barrages. Si une différence existe entre les experts ou entre experts et non experts, une recherche est conduite au niveau des indicateurs pour déterminer d'où vient la différence et, le cas échéant, affiner la description de l'indicateur, ajouter un nouvel indicateur....

Intégration des imperfections dans le modèle

Les informations sont entachées d'imprécision (énoncé approximatif de la connaissance), d'incertitude (doute sur la validité d'une connaissance) et/ou d'incomplétude (absences de connaissances ou connaissances partielles). Dans notre cas, les 3 types d'imperfections sont rencontrés comme par exemple :

- l'imprécision associée aux instruments d'auscultation et aux observations visuelles réalisées par les experts, imprécision des modèles mécanistes... ;
- les incertitudes liées aux éléments de conception et de réalisation présents dans le dossier du barrage... ;
- les incomplétudes des informations : composant peu ou non accessible, barrage peu ou non instrumenté, information absente dans le dossier, en particulier dans le cas de barrages très anciens...

Le système prendra en compte, à terme, ces imperfections. Nous nous inspirerons des travaux développés dans le domaine des produits du bâtiment qui autorisent une évaluation de la qualité des données à partir d'une adaptation de l'outil NUSAP (Numerical Unit Spread Assessment Pedigree). L'outil adapté pour les produits du bâtiment est basé sur un ensemble de critères qui prennent en compte [19] :

- les hypothèses de calcul introduites dans le modèle ;
- la voie d'obtention de la donnée (type de modèle, sources des données...) ;
- la validation de la donnée par la communauté scientifique ;
- la crédibilité de la donnée qui est une « mesure » de la chance de trouver un modèle qui contredise l'évaluation considérée.

A chaque donnée pouvant être une mesure ponctuelle, une distribution uniforme ou un sous-ensemble flou, on affecte ou on calcule une note allant de 0 à 4 pour chacun des critères. Les critères sont ensuite agrégés ce qui permet l'obtention d'une masse de qualité. Si plusieurs sources de données sont disponibles, une fusion a finalement lieu.

Nos travaux pour la prise en compte de la qualité des données consisteront à identifier les critères appropriés. Ils prendront en compte notamment la précision attachée à l'instrument qui a fourni la donnée, le logiciel utilisé pour réaliser l'analyse des données d'auscultation, l'expérience de l'expert qui a fait la notation... Dans un deuxième temps l'échelle de notation de chacun de ces critères sera définie. L'agrégation et la fusion finale seront a priori réalisées selon l'approche présentée ci-dessus [19].

Application à l'érosion interne dans le barrage en remblai

Nous présenterons plus spécifiquement les résultats obtenus sur l'évaluation de la performance des barrages en remblai vis-à-vis du mode de rupture par érosion interne qui constitue la première source d'incidents sur les ouvrages hydrauliques en terre [12] : un peu plus de la moitié des ruptures des barrages en remblai entre 1950 et 1986, en excluant les ruptures pendant la construction, ont eu lieu par érosion interne que ce soit dans la fondation ou le remblai [7]. Provoquée par l'existence de fuites à travers l'un de ces éléments, non contrôlées par le système de drainage et qui entraînent vers l'aval des particules constitutives du remblai ou de la fondation à la suite de leur arrachement, l'érosion interne ne se développe que si arrachement et transport des particules peuvent s'enchaîner [12]. Selon le mode de transport, on distingue (i) le mécanisme de renard où le transport des particules est concentré dans un conduit et les vitesses d'écoulement sont rapides et (ii) le mécanisme de suffusion où le transport est diffus dans l'espace poreux inter particulaire et les vitesses sont initialement peu élevées.

Exemple de diagramme cause-effet

La figure cause-effet « érosion interne dans le remblai » montre que 3 fonctions avaient été initialement identifiées : étanchéité, drainage et auto-filtration (cf. Figure 4). La fonction protection de l'étanchéité a été ajoutée lors des recueils d'expertise. Les règles de filtre sont incluses dans les fonctions de drainage et d'auto-filtration.

Evaluation de l'érosion interne

Le Tableau 1 illustre un exemple de description d'un indicateur visuel utilisé pour caractériser la fonction d'auto-filtration du

remblai. Ce tableau fournit un exemple de détail des références, points d'ancrage sur l'échelle de notation, essentiels à une notation robuste.

Pour les remblais à étanchéité amont, 28 indicateurs visuels ou d'auscultation ont été décrits selon la grille ci-dessus et 33 indicateurs de conception et réalisation ont été identifiés avec une description en cours de finalisation. Les tables de vérité autorisant le calcul de la performance par rapport à l'érosion interne ont été établies.

Nom	Fontis – cônes d'affaissement
Définition	Effondrement de terrain localisé, souvent en forme d'entonnoir provoqué par la présence d'un vide qui se propage verticalement vers la surface du barrage. Se traduit par un affaissement du terrain (cône) ou la présence d'un trou (fontis)
Echelle et référence	0 : absence de fontis ou de cône d'affaissement 6 : fontis isolé, de petite taille (quelques dm) et ancien (quelques années) OU suspicion de fontis (cônes d'affaissement) 7 – 9 : fontis isolé, de petite taille, et récent (<1 an) OU fontis isolé, de grande taille et ancien 10 : fontis de grande taille et récent
Illustration	Photo

Tableau 1. Description de l'indicateur « Fontis – cônes d'affaissement »

Résultats de la validation

Le Tableau 2 présente les résultats de l'ANOVA (Expert x Barrages) pour chacune des performances. L'effet Barrage a été considéré comme aléatoire et l'effet Expert comme fixe. Le risque est fixé à 5%. L'analyse a été conduite sur 6 barrages par 4 experts ayant participé aux séances de recueil ; les autres dossiers sont en cours de notation.

	Effet Expert		Effet Barrage	
	F	p	F	p
Performance fonction protection dispositif étanchéité	1,88	0,1764	9,05	0,0004
Performance fonction étanchéité	0,83	0,4964	4,90	0,0074
Performance fonction drainage	2,09	0,1447	28,77	0,0000
Performance fonction auto-filtration	0,83	0,4981	9,34	0,0003
Performance / Erosion interne	2,92	0,0686	31,23	0,0000

Tableau 2. Résultats de la validation (F : F de Fisher, p : probabilité associée à F)

Quelle que soit la fonction, il n'existe pas de différence significative entre les experts (p Effet Expert > 0,05) : ceci signifie que les 4 experts évaluent les fonctions de la même manière (cf. Tableau 2). L'effet Barrage (p Effet Barrage < 0,05) est significatif ce qui traduit le pouvoir de discrimination des experts pour des barrages différents. Une analyse complémentaire montre que les 4 experts évaluent chacun des barrages de la même manière.

Les résultats de l'ANOVA pour l'ingénieur confirmé et l'ingénieur débutant indiquent une notation identique à celle des experts en ce qui concerne les fonctions et les barrages : la méthode exprime, sur la base de ces premiers résultats, un potentiel pédagogique intéressant.

Conclusion et perspectives

Un système d'aide à l'évaluation de la performance du barrage en remblai par rapport à l'érosion interne au travers du remblai a été développé, par modélisation de l'approche utilisée par les experts lors des revues d'inspection. Une démarche similaire a été engagée sur les digues de protection contre les inondations [20].

Dans le cas des barrages, la validation a montré la reproductibilité des notes fournies par les experts et le caractère discriminant des experts. La démarche que nous avons utilisée et notamment la formalisation des mesures visuelles réalisées par les experts est issue du domaine du génie des procédés pour lequel elle avait fait ses preuves dans le cadre de différents produits alimentaires et non alimentaires [18]. Elle donne accès à une méthodologie pour recueillir une information fiable et répétable au niveau de l'expert dans sa situation de travail et la possibilité de la transmettre à des ingénieurs en formation. Nous insistons sur le fait que la phase critique est la formalisation du « savoir-mesurer » : même si le modèle est bien calé sur les données des experts et donc valide, l'introduction d'une valeur erronée pour une mesure visuelle par exemple entraîne une notation erronée de la performance de la fonction ou du barrage, dans les limites de la sensibilité du modèle qu'il nous faudra étudier. Nous considérons que la formalisation des informations doit être menée de manière très rigoureuse et doit fournir notamment pour un expert en formation des références très précises pour le guider dans son évaluation.

Les suites de ce travail sont axées sur la prise en compte des imperfections qui entachent les différentes informations. L'adaptation de la méthode NUSAP aux produits du bâtiment nous offre un cadre de raisonnement et de traitement des résultats qui paraît tout à fait pertinent.

Remerciements

Les auteurs remercient les membres du panel d'experts pour leur contribution forte à ce travail : Gérard Degoutte, Patrice Mériaux, Laurent Peyras, Paul Royet et Rémy Tourment. Les auteurs remercient également Huguette Félix pour sa forte implication dans la construction des dossiers de validation.

Références

- [1] Flintsch G. W. and Chen C., Soft computing applications in infrastructure management, Journal of Infrastructure Systems, December, 157-166, 2004.
- [2] Headquarters Department of the Army, Pavement Maintenance Management, 1982.
- [3] Kaetzel L. J., Clifton J. R. and Snyder K., Users Guide to the Highways Concrete (HWYCON) Expert System, Strategic Highway research Program, National Council, Washington, DC, 1994.
- [4] Bullock R. and Foltz S. D., REMR Management Systems-Navigation and reservoir structures condition rating procedures for concrete in gravity dams, retaining walls, and spillways, US Army Corps of Engineers, 1995.
- [5] Bailey D. M., Brotherson D. E. and Tobiasson W. K., A., ROOFER: an engineered management system (EMS) for bituminous built-up roofs, U.S. Army Corps of Engineers, 1989.
- [6] US Department of Transportation, Recording and Coding guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges, Federal Highway Administration, 1995.
- [7] Foster M., Fell R. and Spannagle M., The statistics of embankment dam failures and accidents, Canadian Geotechnical Journal, 37, 1000-1024, 2000.
- [8] Andersen G. R. and Torrey V. H., Function-based Condition Index for embankment dams, Journal of Geotechnical Engineering, August, 579-588, 1995.
- [9] Hydroquébec, Guide d'implantation des indices de condition - Barrages en remblai (document interne), 2005.
- [10] De Laleu V., Reverchon B., Cault J. B. and Lefranc M., La politique de maintenance des ouvrages et matériels de production hydroélectrique d'Electricité de France. Une expérience d'analyse

de risque simplifiée, appliquée à l'optimisation de la maintenance d'un grand canal, Vingtième Congrès des grands Barrages, Beijing, Chine, 511-525.

[11] Peyras L., Royet P., Salmi A., Salembier M. and Boissier D., Etude de la sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique de génie civil : application à des ouvrages de protection contre les inondations de la ville de Nîmes, Journées Nationales de la Fiabilité, Clermont-Ferrand, France, octobre 2005, 12 pages.

[12] CIGB, Internal erosion: typology, detection, repair, CIGB, 1997.

[13] Degoutte G., Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens, Paris, Cemagref Editions, 1992.

[14] Degoutte G., Petits barrages - Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Paris, Comité 1997.

[15] Degoutte G. and Royet P., Sécurité des barrages en service, Paris, Cemagref Editions, 1993.

[16] Peyras L., Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II, 2003.

[17] Royet P., La surveillance et l'entretien des petits barrages - guide pratique, Paris, Cemagref Editions 1994.

[18] Curt C., Trystram G. and Hossenlopp J., Formalisation of at-line human evaluations to monitor product changes during processing. Integration of human decision in the dry sausage ripening process, Sciences des Aliments, 21, 663-681, 2001.

[19] Lair J., Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II, 2000.

[20] Serre D., Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations - Modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique, Thèse de doctorat, Marne-la-Vallée, 2005.

