
Développement d'une méthode pour la maîtrise de la sécurité des barrages

Méthode basée sur le diagnostic multi modèles appliquée à un barrage en remblai

E. Masse^{*,**} — C. Curt^{*} — M. Le Goc^{**}

^{*} Cemagref Aix-en-Provence
Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
3275 Route de Cézanne CS 40061
13182 Aix en Provence Cedex 5 – France
{emilie.masse, corinne.curt}@cemagref.fr

^{**} LSIS Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes
– UMR CNRS 6168 –
Université Paul Cézanne Aix-Marseille III
Avenue Escadrille Normandie Niemen
13397 Marseille Cedex 20 – France
{emilie.masse, marc.legoc}@lsis.org

RÉSUMÉ. Dans cet article, nous proposons de modéliser le comportement des barrages à l'aide d'une approche multi modèles. La formulation des connaissances par les experts, bien qu'adéquats pour un diagnostic efficace et pertinent, mélange souvent en un modèle unique les connaissances relatives à de multiples points de vue. Ainsi, l'approche multi modèles sépare les connaissances expertes de natures différentes en trois modèles qui permettent d'effectuer de la surveillance, du diagnostic et de la prédiction. Cet article présente les trois modèles obtenus par l'application de l'approche à un barrage en remblai homogène ayant subi un mécanisme d'érosion interne.

ABSTRACT. This paper proposes the dam behavior modeling with a multi models approach. The expert knowledge wording is pertinent and efficient to a diagnosis task but mixes in a same model knowledge concerning different points of view. So, the multi models approach separates different knowledge natures in three different models. That permits us to monitor, diagnose and predict the behaviour of a dynamic system as a dam. This article shows the three models obtained by the approach application to a homogeneous fill dam which has suffer to internal erosion.

MOTS-CLÉS : Barrage, Approche multi modèle, Hypothèses expertes, CommonKADS

KEYWORDS : Dam, Multi model approach, Expert assumptions, CommonKADS

1. Introduction

Le mécanisme de vieillissement est assimilable à un ensemble de processus dynamiques tels que le colmatage, l'érosion interne, le glissement... qui sont plus ou moins dépendants et agissent sur la performance et la sécurité des barrages. Toutefois, à l'heure actuelle, la cinétique des phénomènes affectant les barrages est encore, de manière générale, mal connue. Ceci pose un problème conséquent pour la prédiction du comportement du barrage, et en particulier de sa sécurité, à différents pas de temps. Le besoin de rationaliser et d'assister l'évaluation et la maîtrise de la sécurité des barrages nous amène à chercher une méthode permettant d'aider les exploitants, les bureaux d'études et les experts à mieux contrôler le comportement des ouvrages hydrauliques.

Hors, depuis une vingtaine d'années, des chercheurs du domaine de l'intelligence artificielle se sont intéressés plus particulièrement à la conception de systèmes d'aide à la conduite de processus dynamiques c'est-à-dire des systèmes à base de connaissances effectuant la surveillance, le diagnostic et le contrôle de processus comme ceux utilisés pour la conduite de hauts fourneaux (Le Goc, 2004). Nous étudierons le vieillissement d'un ouvrage hydraulique sur la base de ce type de méthodes. Plus précisément, nous combinerons une approche multi modèles pour le diagnostic de systèmes dynamiques (Zouaoui, 1998), (Thetiot, 1999) et la modélisation des processus cognitifs des experts selon la méthodologie CommonKADS (Breuker, 2000).

Dans un premier temps, nous présentons le barrage étudié et sa base de connaissance. Puis, nous passerons à l'exposé de la méthode (Masse et al., 2007) et des résultats obtenus pour l'étude du vieillissement de ce barrage.

2. Présentation du barrage de Cublize et de la base de connaissance

Nous étudions le barrage de Cublize (69) dont le vieillissement a été précisé par une expertise formalisée (Peyras, 2003) : la base de connaissance contient ainsi une coupe du barrage donnant les principaux éléments du barrage et leur positionnement, un texte et des courbes explicitant le diagnostic et décrivant l'évolution des mécanismes de vieillissement de cet ouvrage pendant une durée de dix années. Cette base de connaissance constitue notre corpus de connaissance.

La description du barrage est la suivante : le barrage, fondé sur un massif granitique, est en remblai quasi homogène en arènes granitiques, de 16 m de hauteur maximale, créant un plan d'eau de 35 ha pour une capacité de 2 hm³. Cet ouvrage possède un drain vertical arasé 2 m en dessous du niveau normal des eaux (RN) et un drain horizontal au contact fondation remblai sur la moitié aval du remblai. Ce barrage a été mis en eau pour la première fois fin 1978. Le niveau de l'eau est ensuite resté très proche de la cote RN, sauf lors de deux vidanges partielles de 2 m sous la cote RN en novembre 1981 et décembre 1985. Lors d'une visite annuelle de

contrôle en septembre 1988, une zone particulièrement humide est repérée au pied aval du remblai, le barrage est alors mis sous surveillance rapprochée. Mi-octobre 1988, la zone humide s'est agrandie et des glissements localisés sont observés sur une dizaine de mètres de longueur sous la risberme aval. Deux jours plus tard, des venues d'eau avec entraînement de matériaux sont détectées dans les mêmes secteurs. La vidange totale et en urgence du plan d'eau est alors décidée.

Les experts ont fait le diagnostic suivant : « Compte tenu de leur granulométrie, les arènes granitiques des remblais sont particulièrement sensibles à l'érosion interne et ont été le siège d'un mécanisme de suffusion interne. Celui-ci a produit un colmatage progressif du dispositif de drainage vertical, expliqué par une granulométrie du drain inadaptée [...] et par le non respect des conditions de filtre par rapport au remblai. Le colmatage a entraîné une saturation progressive des remblais amont, puis aval par contournement par le haut (rendu possible par un sommet du drain inférieur à la cote RN). La saturation des matériaux du talus aval a abaissé ses caractéristiques mécaniques et provoqué les premiers glissements superficiels. Les écoulements ont commencé à entraîner les particules fines, créant l'amorce d'un « renard hydraulique » qui aurait rapidement évolué en quelques semaines, voire quelques jours, vers la ruine de l'ouvrage si la vidange n'avait rapidement été décidée. L'ensemble du processus s'est déroulé sur environ 10 ans. »

3. Modélisation du barrage de Cublize par l'approche multi modèle avec hypothèses expertes

3.1. Analyse des connaissances du corpus

Les connaissances présentes dans le corpus de connaissance sont tout d'abord analysées selon la méthodologie CommonKADS afin d'une part, de décortiquer les connaissances et le raisonnement des experts et d'autre part, d'identifier les composants, les variables, les données temporelles... Le modèle conceptuel qui nous sert de grille de lecture est assimilable à celui utilisé pour le système Sachem conçu pour modéliser et diagnostiquer des systèmes dynamiques (Le Goc, 2004). Cette grille de lecture permet d'identifier les termes employés sous la forme de « composants », « mesures datées », « interprétations des signaux » (PhSg) et « phénomènes » (PhPr). De plus, cette analyse a mis en valeur deux types de règles :

- les unes R_{PhSg} qui permettent d'accéder à l'interprétation des signaux à partir des mesures datées et ordonnées (courbes des données instrumentales). « Si il y a une modification significative (franchissement d'un seuil, pente de la courbe...) pour des mesures datées ordonnées formant une courbe alors PhSg » par exemple : Si « la courbe de pression du capteur C3 $\geq$ cote du drain » alors « PhSg1 ».
- les autres R_{PhPr} qui permettent la détection de phénomènes à partir de l'interprétation des signaux des instruments d'auscultation par exemple. Elles sont de

la forme « Si PhSg alors PhPr » par exemple : Si « Pression interstitielle sur C3 $\geq$ cote du drain (PhSg1) » alors « Sous pression dans le Remblai Amont (PhPr2) » ;

Une fois analysées, les connaissances peuvent être ensuite distribuées, sur la base de l'analyse précédente, dans trois modèles (comportemental, structurel, fonctionnel) jusqu'à épuisement du corpus. En effet, l'approche multi-modèles avec hypothèses expertes repose sur l'idée qu'un système peut être entièrement décrit par ces trois types de modèles (Le Moigne, 1999), (Zanni et al., 2005). Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus par l'application de cette approche à l'historique de vieillissement du barrage de Cublize.

3.2. Modèle structurel

L'analyse de la coupe du barrage et de la base de données permet de construire le modèle structurel (Figure 1) composé de 7 composants du barrage et 8 capteurs. Il décrit la structure du processus à partir des composants et de leur interconnexions représentant les relations géométriques entre ces structures dans le système. Les capteurs C3, C4 et C5 sont des piézomètres, D1 est un capteur de débit de drainage. Les indicateurs Zone humide, Eau chargée et Glissement issus de l'observation visuelle sont décrits par une procédure les rendant robustes (Curt et al., 2006).

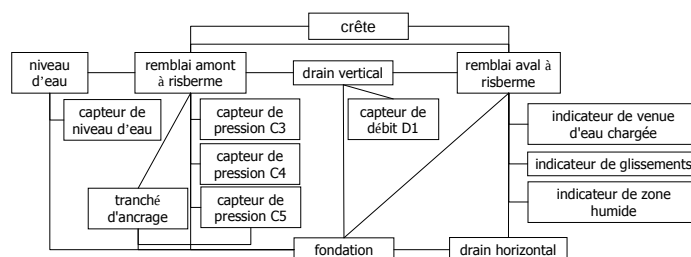


Figure1. Modèle Structurel du barrage de Cublize.

3.3. Modèle comportemental

Le modèle comportemental définit d'une part, les différents états du barrage en terme de processus de vieillissement et d'autre part, les conditions de changement d'état (sous l'effet du temps ΔT , d'une action de réparation...).

Pour obtenir ce modèle, nous partons de la base de connaissance qui nous permet de tracer la Figure 2 : on définit tout d'abord les PhSg à partir des règles R_{PhSg} puis on lie les PhSg et PhPr selon les règles R_{PhPr} définies au § 3.1. Par exemple, PhSg4

et PhSg5 correspondent à la pression des capteurs C4 et C5 au-dessus de la cote du drain : cette information provient directement de l'analyse de la courbe de piézométrie des capteurs C4 et C5. PhSg 4 et PhSg5 sont mis en relation avec le début de PhPr1, PhPr2, PhPr9, PhPr14 et PhPr7. Sur la Figure 2, certains PhSg et PhPr ont été représentés sur la même ligne afin de rendre la figure plus compacte : ceci n'implique pas de relation particulière entre ces PhSg et PhPr.

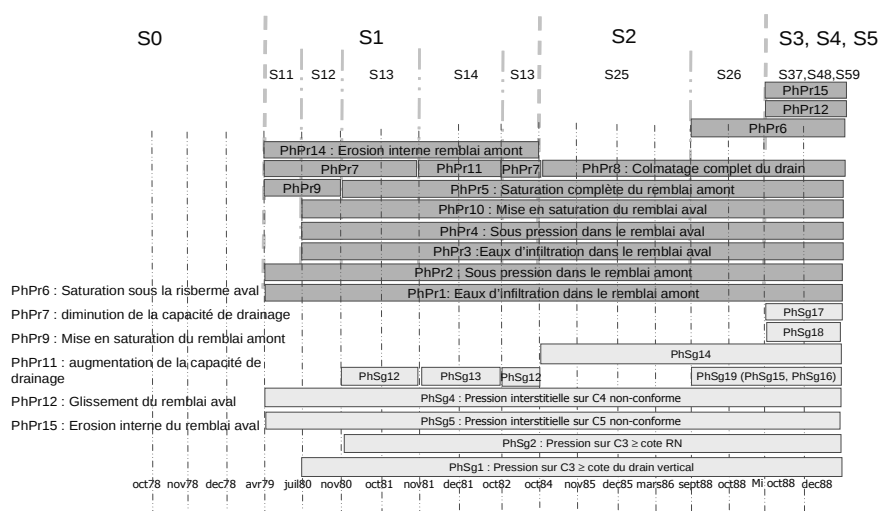


Figure2. Scénario retraçant le vieillissement du barrage de Cublize.

L'analyse de l'évolution des phénomènes nous amène à la construction du modèle comportemental qui se présente comme un automate à états finis (Figure 3). Les états sont définis comme l'apparition d'un nouveau phénomène PhPr ou l'arrêt d'un PhPr déjà en cours. Dans notre exemple, S0 représente l'état de bon fonctionnement du barrage, S11 (PhPr1, PhPr2, PhPr9, PhPr14 et PhPr7), S12, S13, et S14 renseignent sur le Mécanisme d'Erosion Interne du Remblai Amont avec différent niveaux d'importance suivant les phénomènes déclenchés, S25 et S26 montrent la saturation du remblai aval, S37 représente le Mécanisme d'Erosion Interne du Remblai Aval, S48 le Mécanisme de Glissement du Remblai Aval, S59 le Mécanisme de Glissement du Remblai Aval et le Mécanisme d'Erosion Interne du Remblai Aval. Les conditions de passage d'un état à l'autre sont variables : dans cet exemple, la détection de PhSg4 et PhSg5 informe que le système vient de passer de S0 (état de bon fonctionnement) à l'état S11 (début du mécanisme d'érosion interne du remblai amont). Le passage à l'état S12 s'effectuera après un laps de temps ΔT_{11} ... Dans l'exemple traité, ΔT_{11} est égal à 15 mois.

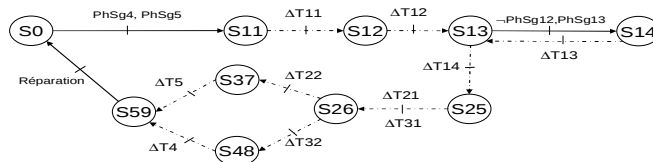


Figure 3. *Modèle Comportemental relatif au barrage de Cublize.*

3.4. Modèle fonctionnel

Le modèle fonctionnel est déduit du modèle comportemental. Il est composé d'un ensemble de fonctions (au sens mathématique) et lie les valeurs de variables d'entrée à celle d'une variable de sortie (Figure 4). Chaque variable est associée à un capteur. Les fonctions sont des tables de valeurs qui donnent la valeur de la variable de sortie en fonction des valeurs des variables d'entrée. Chaque état est lié aux valeurs des variables qui apparaissent aux niveaux des transitions du modèle comportemental.

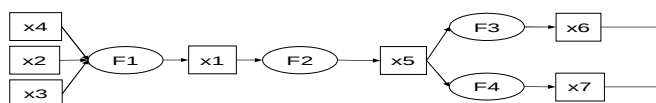


Figure 4. *Modèle Fonctionnel relatif au barrage de Cublize.*

Considérons le début du modèle comportemental : la transition de S0 vers S1 est conditionnée par PhSg4 et PhSg5 liés aux capteurs C4 et C5 situés près des fondations (pressions non-conformes). Les variables x1 et x2 sont affectées respectivement à C4 et C5. Ce sont les variables d'entrée de la fonction F1 du modèle fonctionnel (Figure 4). Lorsque ces deux variables sont supérieures à 430, PhSg1 et PhSg2 (pressions anormales sur le capteur C3 localisé à proximité du haut du drain vertical) sont détectés. La table de valeurs de la Figure 5 indique alors que x1 qui est la variable de sortie de F1 et qui représente le niveau d'eau dans le remblai amont, a dépassé la cote du drain (état S11). x1 est également la variable d'entrée de la fonction F2 : quand x1 est supérieure à la cote du drain, la variable x4 qui représente le drain indique que le drain est colmaté (état S12). On poursuit ainsi de proche en proche : dès qu'une nouvelle valeur est attribuée à une variable

d'entrée, une fonction calcule la valeur de la variable de sortie. Rappelons que le modèle fonctionnel des Figures 4 et 5 est relatif au barrage de Cublize.

x1 = f1(x2, x3, x4, Δt1)				x5 = f2(x4, Δt3)	
x4	x2	x3	x1	x1	x5
1 > x4 ≥ 1,5	< 429	< 430	< Drain height	< Drain height	Not wetland
1 > x4 ≥ 1,5	≥ 429	< 430	∅	≥ RN height	Wetland or Water
1 > x4 ≥ 1,5	< 429	≥ 430	∅		
1 > x4 ≥ 1,5	≥ 429	≥ 430	< Drain height		
0.2 > x4 ≥ 1	< 429	< 430	∅	x6 = f4(x5, Δt5)	
0.2 > x4 ≥ 1	≥ 429	< 430	∅	x5	x6
0.2 > x4 ≥ 1	< 429	≥ 430	∅	Not wetland	Not sliding
0.2 > x4 ≥ 1	≥ 429	≥ 430	∅	Wetland or water	Sliding
0.2 > x4 ≥ 1	≥ 429	≥ 430	Drain height ≥ x1 > RN height	x7 = f3(x5, Δt4)	
x4 ≥ 0,2	< 429	< 430	∅	x5	x7
x4 ≥ 0,2	≥ 429	< 430	∅	Not wetland	Not Muddy water
x4 ≥ 0,2	< 429	≥ 430	∅	Wetland or Water	Muddy water
x4 ≥ 0,2	≥ 429	≥ 430	≥ RN height		

Figure 5. Table des valeurs (ou règle de production)

3.5. Cohérence des modèles

Le fondement de la modélisation est centré sur le maintien de la cohérence entre les trois modèles : toute relation identifiée lors de l'analyse préalable doit obligatoirement être projetée dans un des trois modèles et être compatible avec les deux autres modèles. Dans le cas contraire, des connaissances supplémentaires devront être acquises lors d'une nouvelle série d'entretiens avec les experts afin de lever les incohérences ou de compléter les modèles. Le processus de modélisation prend fin lorsque les modèles sont cohérents et ont atteint un niveau de complétude adéquat avec le problème à résoudre.

4. Conclusion et perspectives

Nous avons montré sur un exemple que la modélisation de l'ensemble de la connaissance sur les trois modèles structurel, fonctionnel et comportemental est possible. La méthode et l'outil que nous développons, permettront de diagnostiquer l'état d'un barrage et de prédire ses évolutions. La mise en évidence d'un événement significatif sur un signal permet d'alerter l'exploitant du barrage sur d'éventuels problèmes. Le modèle comportemental donnera une idée du laps de temps restant avant le déclenchement d'un nouvel état. Cela permettra aux exploitants de prévoir des travaux avant la propagation des problèmes, de réduire les coûts de réparation et d'anticiper des situations critiques.

Les trois modèles obtenus pour notre application ne sont pas complets. Ils sont uniquement relatifs au scénario fourni par la base de connaissance de Cublize.

Cependant l'acquisition de nouvelles connaissances auprès d'experts ou à travers de nouveaux cas devrait nous permettre de généraliser les modèles tout d'abord aux barrages ayant le même profil que celui de Cublize puis de généraliser encore à l'ensemble des barrages en remblai homogène. Les modèles devront aussi être enrichis par d'autres scénarios de vieillissement puis étendus à d'autres types de remblai et notamment à étanchéité amont.

L'approche utilisée permet de modéliser un système dynamique de type barrage à partir d'une base de donnée renseignée par un expert, un exploitant, ... Ces bases de données contiennent pour l'essentiel la structure du système et les processus de vieillissement.

Nous avons à présent à notre disposition la grille de lecture des connaissances ressortie de l'analyse au niveau conceptuel qui permettra d'analyser de manière systématique et plus rapide les bases de connaissance. Elle permet aussi de guider futures acquisitions de connaissances auprès des experts. La démarche d'analyse du corpus de connaissances peut donc être considérée comme générique.

5. Bibliographie

- Breuker J., W. van de Velde, *CommonKADS Library for Expertise Modeling*. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 1994.
- Curt C., Peyras L., Boissier D., « Méthode d'évaluation de la performance des barrages basée sur l'expertise ». In *LambdaMu15 – 15e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement*, Lille, 10-13/10/2006.
- Le Goc M., « SACHEM, a real time intelligent diagnosis system based on the discrete event paradigm », *Simulation*, Vol. 80, Issue 11, November 2004, pp. 591-617, ©2004 The society for Modeling and Simulation International.
- Le Moigne Jean-Louis, *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, 1999.
- Masse E., Le Goc M., « Towards a Modeling Approach of Dynamic Systems for a Multi Model Based Diagnosis », *Accepté à Dx'07*, Nashville, 2007.
- Peyras L., Thèse de Doctorat, Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, Développement de méthodes d'aide à l'expertise. Université Blaise Pascal, Clermont II, 2003.
- Thetiot R., Thèse de Doctorat, « Utilisation de l'approche multi modèles pour l'aide au diagnostic d'installations industrielles », Université d'Evry Val d' Essonne, 1999.
- Zanni C., Le Goc M., Frydman C., « A conceptual framework for the analysis, Classification and choice of knowledge-based diagnosis systems », *International Journal of Knowledge-Based & Intelligent Engineering Systems (KES Journal)*, IOS Press Eds., 41 p., 2005.
- Zouaoui F., Thèse de Doctorat, « Aide à l'interprétation du fonctionnement des systèmes physiques en utilisant une approche multi-modèles. Application au circuit primaire d'une centrale à eau pressurisée », Université de Paris XI – Orsay, Décembre 1998.