

Évaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil

Damien Serre, Laurent Peyras, Corinne Curt, Daniel Boissier et Youssef Diab

Résumé : Cet article synthétise les travaux engagés par le Cemagref (Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts) pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques, en particulier en ce qui a trait à leur performance et leur sûreté. Un modèle fonctionnel générique a été développé, à partir de méthodes issues de la sûreté de fonctionnement, pour représenter les divers mécanismes opérant dans des ouvrages de nature différente (barrages-poids, barrages en remblai, digues fluviales, etc). Le recueil et la structuration des connaissances sur les défaillances de ces ouvrages ont permis de définir des indicateurs structurels et leurs règles d'évaluation. Des indicateurs de performance des ouvrages hydrauliques ont ensuite été construits par méthodes d'agrégation multicritères; différents résultats ont ainsi été obtenus. Une base de connaissances relatives aux mécanismes et historiques de vieillissement des barrages a été constituée et s'avère un appui utile aux ingénieurs-conseils. Des méthodes et des outils d'évaluation de la performance des digues fluviales ont été développés pour apprécier leur aptitude au service et aider les gestionnaires dans la programmation des actions de maintenance. Un travail similaire est en cours sur les barrages en remblai et fournira une aide dans l'expertise des ouvrages hydrauliques en service.

Mots-clés : ouvrages hydrauliques, barrage, digue, performance, indicateur.

Abstract: This paper reviews Cemagref (Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts) research on assessment of hydraulic works, especially on their performance and safety. A generic functional model has been developed, using reliability methods, to represent the various mechanisms acting on different hydraulic works (gravity and embankment dams, fluvial dikes, etc.). Collecting and analyzing data on the failure of these works allowed us to define structural indicators and the rules for their assessment. Performance indicators for hydraulic works were created through multicriteria aggregation methods; various results were thus obtained. A database of knowledge relating to mechanisms and histories of dam ageing has been produced and constitutes a useful aid for consulting civil engineers. Methods and tools have been developed to assess the performance of fluvial dikes and to assist managers in planning maintenance operations. Similar research is under way on embankment dams and will provide a diagnosis tool for hydraulic works in operation.

Key words: hydraulic works, dam, dike, performance, indicator.

État de l'art et démarche proposée

Le Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (Cemagref) est un organisme public français de recherche et d'expertise dans le domaine de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (www.cemagref.fr). Au sein du Cemagref, l'unité de recherche Ouvrages hydrauliques et hydrologie intervient plus particulièrement dans la

gestion et l'expertise du parc de barrages et de digues relevant du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. Pour ses propres besoins d'expertise, le Cemagref travaille depuis plusieurs années au développement de méthodes qualitatives et quantitatives de diagnostic, d'évaluation de l'aptitude au service ou encore d'évaluation de la sûreté de fonctionnement et d'analyse des risques, dédiées aux ouvrages hydrauliques. Ces recherches ambitionnent de proposer des méthodes d'évaluation d'un ouvrage qui prennent en compte l'ensemble des mécanismes (les mécanismes de vieillissement et de rupture) susceptibles de l'affecter et l'ensemble des actions, aléas et environnements extérieurs (crue, séisme, glissement de terrain, végétations, etc.) interagissant sur la structure.

Ces travaux de recherche et développement ont été menés dans le cadre de thèses en génie civil, sous la direction de l'Université Marne-la-Vallée (Laboratoire Génie urbain, environnement et habitat) et de l'Université Blaise-Pascal (Laboratoire de génie civil). De fait, même si ces recherches présentent une vocation appliquée confirmée, la rigueur scientifique de la démarche a été l'un des objectifs principaux, en particulier dans l'application des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement. Le lecteur intéressé trouvera

Reçu le 24 juillet 2006. Accepté le 27 août 2007. Publié sur le site Web des Presses scientifiques du CNRC, au reg.cnrc.ca, le 18 janvier 2008.

D. Serre, L. Peyras¹ et C. Curt. Unité de recherche Ouvrages hydrauliques et hydrologie, Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (Cemagref), 3275, route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence CEDEX 5, France.

D. Boissier. Laboratoire de génie civil, Université Blaise-Pascal – Clermont-Ferrand II, 24, avenue des Landais, B. P. 206, 63174 Aubière CEDEX, France.

Y. Diab. Laboratoire Génie urbain, environnement et habitat, Université Marne-la-Vallée, Cité Descartes, bâtiment Lavoisier, 5, boulevard Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France.

1. Auteur correspondant (courriel : laurent.peyras@cemagref.fr).

le détail de ces travaux de recherche dans Serre (2005) et Peyras (2003).

De nombreux questionnaires de parcs d'ouvrages et autres organismes ont développé des méthodes pour évaluer les ouvrages hydrauliques à des fins de diagnostic, d'analyse des risques ou de programmation d'actions de maintenance. Les quatre principales méthodes classiques d'évaluation des ouvrages rencontrées dans le cadre international sont brièvement résumées ci-après :

1. Méthodes traditionnelles basées sur la modélisation mécanique des processus de dégradation : L'ouvrage est examiné sous l'angle de sa sécurité structurale, à partir des équations mathématiques d'états limites et des modèles mécaniques de comportement et de rupture.
2. Méthodes simplifiées d'analyse de risques : On trouve, parmi celles-ci, la méthode UNSW (University of New South Wales, Sidney, Australie) basée sur l'analyse statistique des historiques d'accidents de barrages (Foster et al. 2000a, 2000b). D'autres méthodes à base d'index permettent également l'évaluation rapide du risque ou de l'état d'un ouvrage au sein d'un parc, par exemple, la méthode proposée par Marche (2004) de l'École polytechnique de Montréal (Québec, Canada) et la méthode d'évaluation du patrimoine développée par Électricité de France (EDF) (Laleu et al. 2000). Ces méthodes trouvent leur application dans la planification des actions de maintenance.
3. Constitution et consultation de bases de données sur les incidents et accidents de barrages : Ces méthodes visent un retour d'expérience sur les incidents et accidents de barrages, dans un objectif d'aide au diagnostic. Citons, à ce titre, le National Performance of Dam Program développé par la Stanford University (Palo Alto, Californie) avec les questionnaires de parcs de barrages (McCann 1998).
4. Méthodes d'analyses de risques issues de la sûreté de fonctionnement : Il s'agit de la démarche la plus complète, qui cherche à évaluer la fiabilité d'un ouvrage en considérant les différents scénarios de dégradation ou de rupture susceptibles de se produire. Les analyses de risques mettent en œuvre différentes méthodes issues de la sûreté de fonctionnement (analyse fonctionnelle, analyse des modes de défaillance, etc.), et les évaluations peuvent être quantitatives probabilistes. Les travaux de la Commission internationale des grands barrages (2005), de Hartford et Baecher (2004) et de l'Association canadienne des barrages (2007) constituent des références remarquables en matière d'analyses de risques appliquées aux ouvrages hydrauliques.

Le choix d'une méthode d'évaluation, parmi celles examinées à travers ce panorama rapide, dépend de nombreux facteurs tels que les informations disponibles sur les ouvrages hydrauliques (parcs plus ou moins bien documentés), la précision de l'évaluation souhaitée (diagnostic de premier ordre de grandeur ou analyse précise) et la finalité de la méthode (diagnostic, gestion patrimoniale). Les différentes méthodes d'évaluation des ouvrages de génie civil ont été classifiées en fonction des approches ou des méthodologies mises en œuvre (Peyras et al. 2004; fig. 1) :

1. La modélisation physique : Cette approche repose sur les processus mécaniques de dégradation d'une structure, en prenant en compte les équations régissant les phénomènes.

Elle implique une connaissance approfondie du système et sa représentation sous forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par simulation numérique.

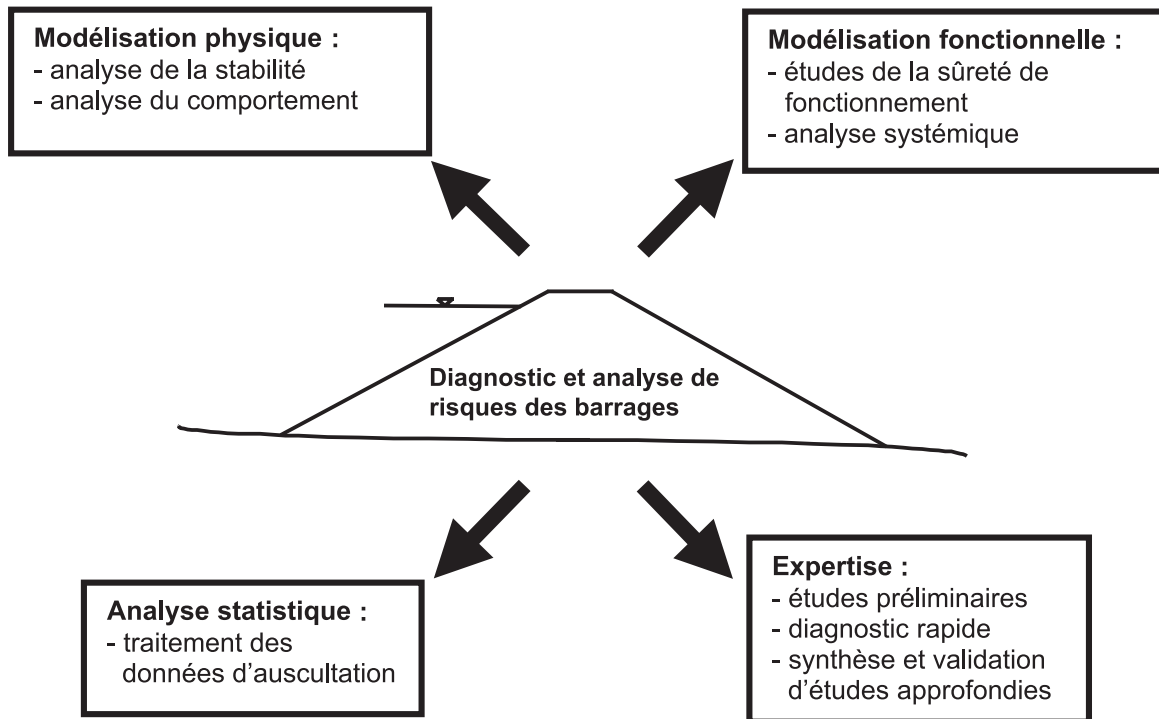
2. La modélisation fonctionnelle : Cette méthodologie vise à étudier les ouvrages sous l'angle des fonctions qu'ils doivent remplir et pour lesquelles ils sont conçus. Elle détermine les interactions entre les composants d'un système et son environnement de façon à établir, de manière formelle, les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets.
3. L'analyse statistique : Ce mode d'évaluation nécessite un retour d'expérience riche et parfaitement documenté. Les méthodes statistiques appliquées aux données du retour d'expérience permettent d'établir des corrélations entre les défaillances et des facteurs explicatifs, pour anticiper ensuite les comportements (Boissier et Peyras 2005).
4. L'expertise : Cette dernière approche est privilégiée, en présence d'un nombre réduit d'ouvrages ou en absence de modèle de comportement, pour évaluer une structure et prévoir des évolutions.

Dans le contexte national français, les ouvrages hydrauliques sont de typologie variée (différents types de barrages et digues fluviales), souvent à caractère unique (les barrages notamment), hétérogènes entre eux au sein d'un même parc, présentant parfois de grands linéaires (les digues de protection contre les inondations) et possédant une documentation technique souvent incomplète (ouvrages très anciens, propriétaires pas nécessairement identifiés ou actifs, exploitation perfectible).

Face à de tels parcs d'ouvrages, variés et affectés par de nombreux mécanismes, une approche systémique et générique, basée sur la modélisation fonctionnelle et appuyée par la connaissance sur les défaillances des ouvrages, a été choisie. Les modèles fonctionnels visent à évaluer la performance des ouvrages, c'est-à-dire leur aptitude à accomplir les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Ces modèles mettent en œuvre l'analyse fonctionnelle des systèmes, les méthodes issues de la sûreté de fonctionnement et les modèles du raisonnement qualitatif. La démarche proposée s'appuie également sur des méthodes spécifiques de recueil et de traitement de données qui contribuent à la connaissance sur les défaillances des ouvrages. La connaissance de la performance à différentes temporalités permet de proposer des méthodes pour le diagnostic (recherche sur l'historique de la performance d'un ouvrage), pour l'évaluation de l'aptitude au service (évaluation de la performance d'un ouvrage à l'instant présent) ou encore pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement et l'optimisation de la gestion du patrimoine (prévision des évolutions futures de la performance d'un ouvrage et de ses défaillances).

Ces recherches ont été engagées initialement sur les barrages, ouvrages à caractère ponctuel, pour aboutir à une base de connaissances relative aux mécanismes et une base de données relatives aux historiques de vieillissement (Peyras et al. 2006a). Sur les digues fluviales, un projet de recherche a conduit à un développement de méthodes pour l'évaluation de l'aptitude au service de tronçons de digues (Serre 2005). Une étude opérationnelle appliquée à des ouvrages de ralentissement dynamique (destinés, entre autres, à la rétention temporaire d'une partie des volumes de crues ou à l'utilisation des capacités d'amortissement du lit majeur) a recher-

Fig. 1. Les différentes approches à l'évaluation des ouvrages hydrauliques.



ché la sûreté de fonctionnement d'un système d'ouvrages hydrauliques interconnectés (Peyras et al. 2006b). Enfin, une recherche en cours vise à produire des méthodes d'évaluation de la sûreté de fonctionnement des barrages en service (Curt et al. 2006).

Le présent article se propose d'établir une synthèse de ces travaux, de montrer les invariants de la démarche et des méthodologies (fig. 2) et de les illustrer par des applications extraites des différents projets dédiés à l'évaluation d'ouvrages hydrauliques.

En un premier temps, la section Recherche d'indicateurs de l'état structurel des ouvrages hydrauliques présente une démarche d'évaluation des ouvrages. En connaissance de leur état structurel, il est possible de rechercher l'état fonctionnel des ouvrages et d'évaluer alors leur performance. La construction d'indicateurs structurels des ouvrages se fait par la mise en œuvre et l'adaptation au génie civil de méthodologies issues de la modélisation fonctionnelle et de la sûreté de fonctionnement. Il s'agit là de représenter, par un modèle fonctionnel, les mécanismes susceptibles de dégrader la performance d'un ouvrage, et d'en dégager et définir des indicateurs structurels pour les besoins spécifiques de la recherche, soit la construction de bases de données, l'évaluation de la performance ou l'analyse de la sûreté.

Puis, la section Recueil et structuration de la connaissance sur les mécanismes des ouvrages hydrauliques est consacrée à l'évaluation des indicateurs structurels. L'objectif est de prendre en compte toutes les informations relatives à la connaissance sur le comportement des ouvrages hydrauliques : les résultats des modélisations mécaniques (facteurs de sécurité, gradients hydrauliques), les mesures d'auscultation (piézométrie, débit de drainage) et les résultats d'essais spécifiques (géophysiques, géotechniques) interprétés par des modèles statistiques, les éléments techniques re-

latifs à la conception et à la réalisation de l'ouvrage et les observations visuelles analysées par le jugement expert. Le recueil et la structuration de cette connaissance, avec l'appui d'un groupe d'experts, permettent d'affiner l'identification des indicateurs structurels et d'agréger toutes ces informations de natures différentes en proposant, notamment, des règles d'évaluation des indicateurs structurels. Ce travail a pour objectif d'obtenir une information fiable et reproductible.

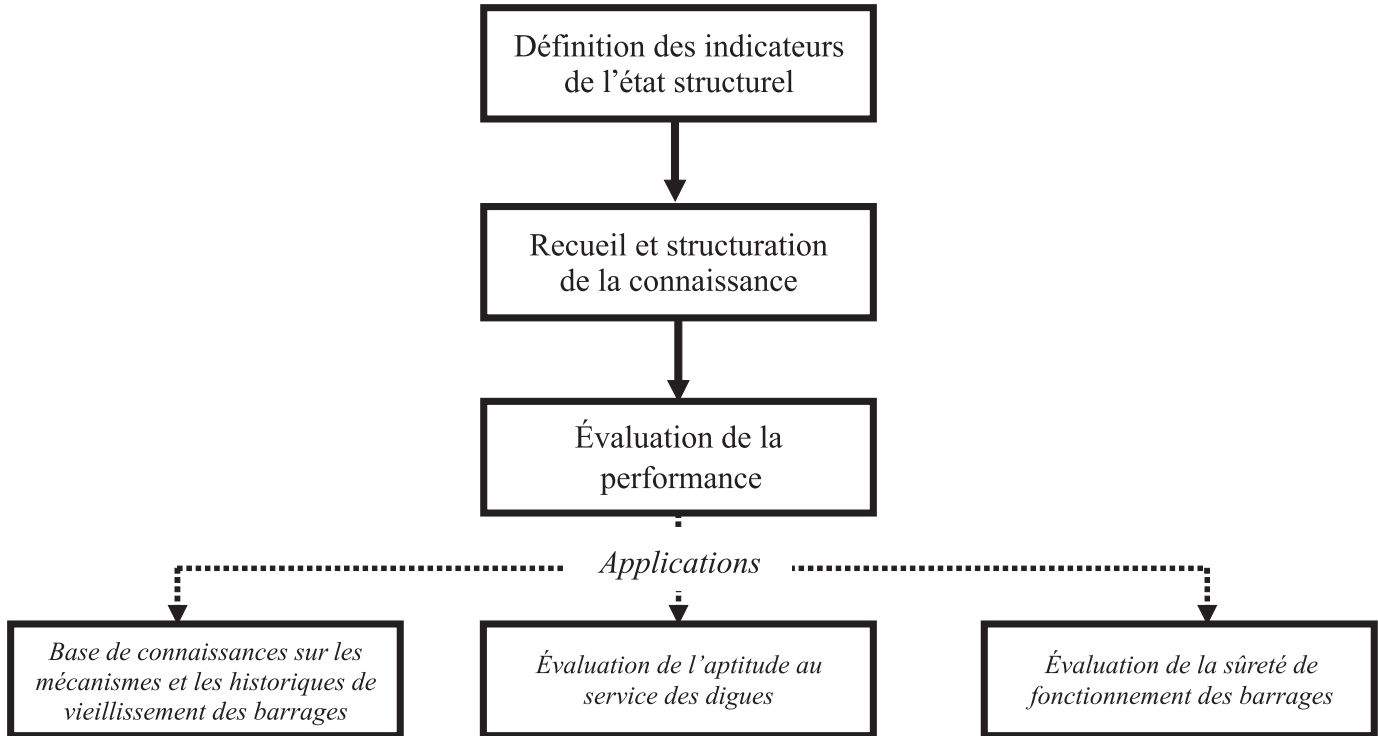
Enfin, la section subséquente traite de l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques. Il s'agit d'évaluer les différentes fonctions qu'une structure doit accomplir, notamment celles de résistance face aux sollicitations extérieures. La performance fonctionnelle est obtenue par l'agrégation des différentes informations relatives à l'état structurel de l'ouvrage, résumées dans les indicateurs structurels. Les méthodes multicritères d'aide à la décision sont utilisées pour définir des règles d'agrégation multicritères entre les indicateurs structurels et pour construire des indicateurs de performance des ouvrages. Enfin, les méthodes d'évaluation de la performance proposées sont testées et validées sur des ouvrages en grandeur nature servant de support d'application.

Recherche d'indicateurs de l'état structurel des ouvrages hydrauliques

Démarche

L'objectif recherché est le développement d'un modèle avec niveau d'abstraction élevé, pouvant représenter tous les mécanismes et s'adaptant à des ouvrages de génie civil de nature différente (barrages-poids, barrages en remblai, digues, ouvrages de ralentissement dynamique). Ce modèle permettrait de dégager les informations nécessaires à l'éva-

Fig. 2. Démarches pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques.



luation de l'état structurel des ouvrages hydrauliques, permettant ensuite de construire des indicateurs structurels.

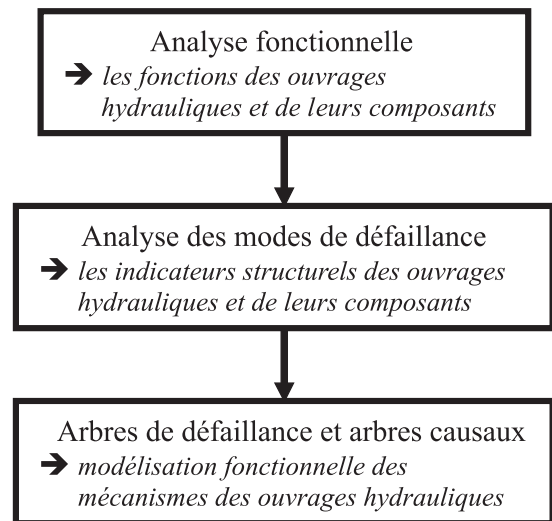
Les modèles fonctionnels répondent au besoin de méthodes d'évaluation génériques. Pour développer un tel modèle, différents outils ont été mis en œuvre : l'analyse fonctionnelle, destinée à analyser le fonctionnement des systèmes; les méthodes issues de la sûreté de fonctionnement, pour modéliser les systèmes complexes; les modèles du raisonnement qualitatif (Travé-Massuyès et al. 1997), permettant d'intégrer des connaissances hétérogènes relevant de différentes disciplines. Le modèle fonctionnel de représentation des mécanismes est construit en trois étapes développées dans la suite de cette section (fig. 3).

Analyse fonctionnelle appliquée aux ouvrages hydrauliques

L'analyse fonctionnelle permet la compréhension et la description synthétique du fonctionnement du système étudié : elle définit ses limites, son environnement, sa composition et recherche les fonctions qu'il remplit (Zwingelstein 1995). En ce qui concerne les ouvrages hydrauliques, l'analyse fonctionnelle est réalisée à l'échelle des composants des ouvrages.

L'analyse structurelle des différents types d'ouvrages permet tout d'abord de lister leurs composants constitutifs respectifs, de repérer la position physique de ceux-ci et de déterminer leurs interactions. Appliquée aux barrages en remblai et aux digues fluviales, l'analyse structurelle a conduit à proposer différents profils en travers types, couvrant l'ensemble des ouvrages rencontrés dans le parc français de barrages en remblai et de digues fluviales relevant du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables : ouvrages à étanchéité amont, ouvrages à étanchéité interne (noyau central) (fig. 4).

Fig. 3. Principes de construction du modèle fonctionnel pour les mécanismes de vieillissement des ouvrages hydrauliques.



Lorsque la structure des ouvrages et leurs composants sont connus, les interactions des composants entre eux et avec les milieux extérieurs peuvent alors être étudiées : les contacts, les sollicitations mécaniques, les flux hydrauliques, etc. L'analyse des interactions des composants entre eux et avec leur environnement permet d'obtenir les fonctions de conception accomplies par les composants, tel que regroupées dans les tableaux d'analyse fonctionnelle (tableau 1), classées selon l'origine de l'interaction : contacts, sollicitations mécaniques, flux hydrauliques. Ces tableaux synthétisent l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques et récapitulent, pour chacun de leurs composants, les fonctions accomplies.

Fig. 4. Analyse structurelle des barrages et des digues. Extraits de Peyras (2003) et Serre (2005).

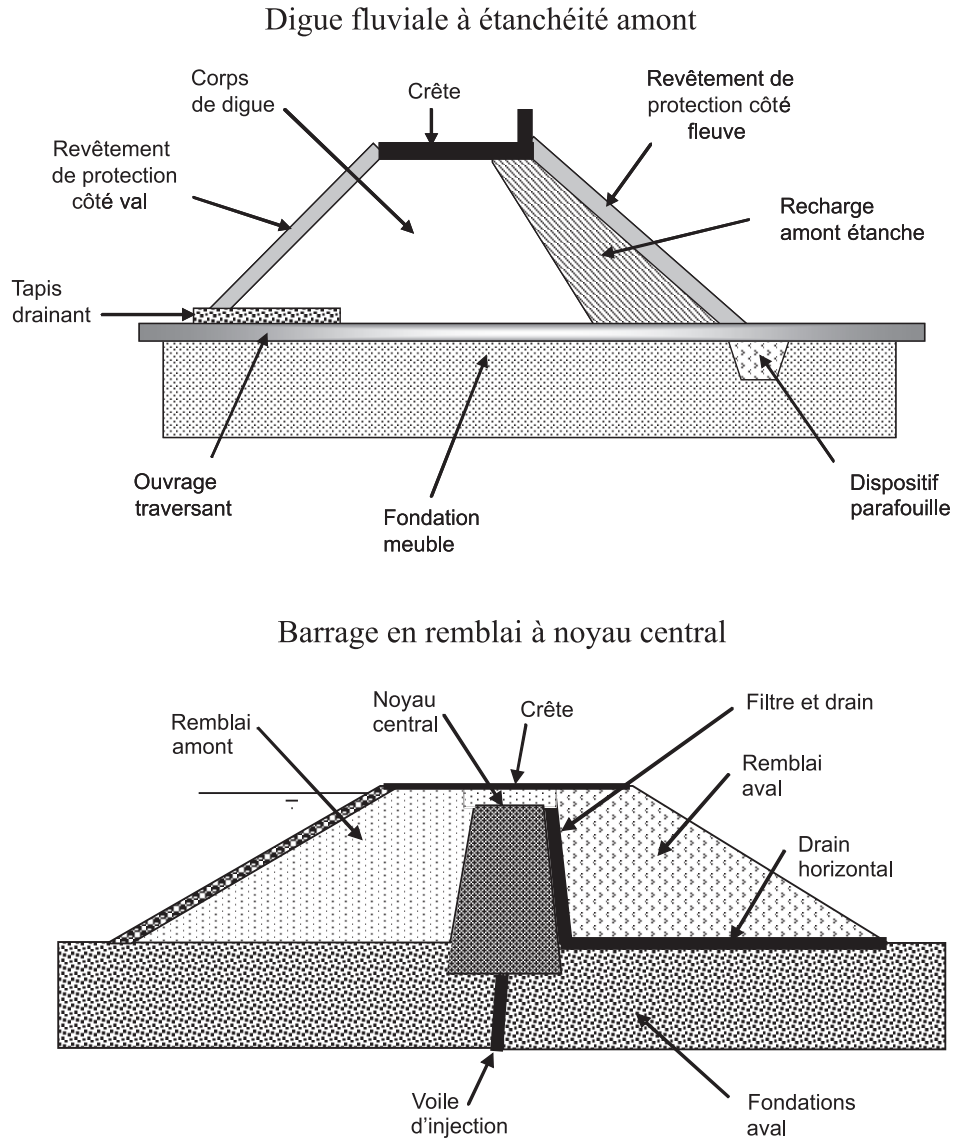


Tableau 1. Analyse fonctionnelle de conception appliquée à des composants de barrages et de digues (Peyras 2003; Serre 2005).

Fonction de conception du composant	Sollicitation	
	Nature ou source	Provenance
Barrage en remblai, composant « noyau central »		
Résistance aux sollicitations mécaniques	Poussée hydrostatique Sous-pressions Poussées Charges Masse propre	Remblai amont Fondations amont, fondations aval Remblai amont, remblai aval Crête Évacuateur
Limitation des infiltrations hydrauliques	Flux hydraulique	Remblai amont, fondations amont, fondations aval
	Eaux de pluie	Crête
Digue fluviale à étanchéité amont, composant crête		
Résistance aux sollicitations mécaniques	Circulation, développement de racines	
Limitation des infiltrations hydrauliques	Eaux de pluie	
Évacuation vers le revêtement de protection côté val	Eaux de ruissellement	
Résistance à l'érosion externe	Eaux de ruissellement, crue	

Tableau 2. Méthode Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) adaptée au composant « recharge amont étanche » d'une digue (Serre 2005).

Mode de défaillance	Cause possible	Effet possible	Indicateur	Moyen de détection
Dégradation ou défaut de la fonction d'étanchéité	Fissuration	Infiltration d'eau	Fuites sur le parement aval, traces d'humidité ou zones humides	Observations visuelles
	Érosion	Sous-pression dans le corps de digue	Piézométrie élevée dans le corps de digue	Piézomètres ou cellules de pression

Nota : Voir la figure 4 pour l'emplacement du composant.

Analyse des modes de défaillance des ouvrages hydrauliques

En connaissance des fonctions accomplies par les ouvrages hydrauliques et leurs composants, l'objectif recherché est de déterminer les modes de défaillance des ouvrages, leurs causes et leurs effets. Cette analyse vise à mettre en évidence les causes et les effets structurels des défaillances des composants des ouvrages et l'enchaînement des séquences de défaillances dans les mécanismes de vieillissement et de rupture.

Pour cela, une méthode spécifique issue de la sûreté de fonctionnement, adaptée à l'objectif de recherche des défaillances potentielles des ouvrages, est utilisée : l'Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). L'AMDE est une méthode inductive d'analyse des défaillances d'un système; elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et ses modes de défaillance, leurs causes et leurs effets (Villemeur 1988).

Les techniques de l'AMDE sont adaptées au contexte des ouvrages de génie civil et permettent d'obtenir les informations suivantes :

1. les composants issus de l'analyse structurelle;
2. les fonctions accomplies par les composants, obtenues à partir de l'analyse fonctionnelle;
3. les modes de défaillance correspondant aux défaillances ou aux dégradations des fonctions;
4. les causes et les effets des défaillances et
5. les indicateurs (visuels ou issus de mesures d'auscultation, coefficients de sécurité, etc.) traduisant la manifestation des effets des défaillances.

Au terme de l'AMDE appliquée aux ouvrages hydrauliques, les principales informations relatives aux défaillances des ouvrages hydrauliques et intervenant dans les mécanismes sont connues : les principaux modes de défaillance des structures, leurs causes, leurs effets et une partie des indicateurs associés. Le tableau 2 illustre un extrait de l'application de l'AMDE aux digues (Serre 2005).

Modélisation mécanismes – indicateurs structurels des ouvrages

À partir des résultats de l'AMDE, les mécanismes opérant dans les ouvrages hydrauliques peuvent être modélisés sous forme de scénarios fonctionnels, enchaînant des séquences chronologiques de défaillances et conduisant aux défaillances des fonctions. Les scénarios sont représentés sous forme de graphes orientés décrivant les processus fonctionnels de dégradation et les enchaînements des variables correspondantes (Peyras et al. 2006b).

L'utilisation de ce modèle de représentation des scénarios conduit à structurer les informations sur les mécanismes en trois catégories de variables : (i) les fonctions accomplies par les composants, (ii) les phénomènes regroupant les cau-

ses et effets des modes de défaillance et (iii) les indicateurs correspondant aux manifestations des phénomènes. Les scénarios modélisés sont représentés sous la forme de séquences itératives de défaillances fonctionnelles dans lesquelles des combinaisons de phénomènes conduisent à la perte de performance de fonctions et produisent une nouvelle combinaison de phénomènes (fig. 5).

Les indicateurs sont représentatifs de l'état structurel des ouvrages et de leurs composants; ils correspondent donc à des indicateurs structurels. Ils renseignent également sur les phénomènes opérant dans les composants de la structure étudiée. Trois catégories d'indicateurs structurels peuvent être distinguées :

1. les indicateurs détectés par observation visuelle (érosion, végétation, ouvrages singuliers, terriers d'animaux, glissements, etc.);
2. les indicateurs mesurés par auscultation ou essai in situ ou en laboratoire (piézométrie, débit, déformations, perméabilité, compacité, etc.) et
3. les indicateurs calculés à partir des indicateurs auscultés; ils correspondent aux facteurs de stabilité intervenant dans les conditions d'états limites des digues (gradient hydraulique, charge hydraulique, coefficients de sécurité, etc.).

En synthèse, le modèle fonctionnel proposé pour représenter les mécanismes répond aux objectifs d'évaluation des ouvrages hydrauliques. L'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance permettent d'obtenir et de structurer les informations relatives aux mécanismes de vieillissement. Les indicateurs structurels sont les variables d'entrée du modèle et renseignent sur l'état structurel des ouvrages; ils constituent les paramètres clefs de l'évaluation de la performance des fonctions accomplies par les composants des ouvrages.

Recueil et structuration de la connaissance sur les mécanismes des ouvrages hydrauliques

Démarche

Le modèle fonctionnel développé pour représenter les mécanismes des ouvrages hydrauliques va permettre de constituer une base de connaissances relative aux mécanismes de vieillissement et de rupture, puis d'en déduire les indicateurs structurels des ouvrages et de proposer leurs règles d'évaluation.

La connaissance relative au comportement des ouvrages hydrauliques intègre quatre catégories d'information (Peyras et al. 2004; fig. 6) :

1. La physique des mécanismes opérant dans les ouvrages hydrauliques : Cette connaissance peut être traduite en équations mathématiques régissant les phénomènes inter-

Fig. 5. Principes du modèle fonctionnel d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques via la représentation des séquences itératives « phénomènes de dégradation – indicateurs de défaillance des fonctions des composants – défaillance de fonctions » (Peyras et al. 2006b).

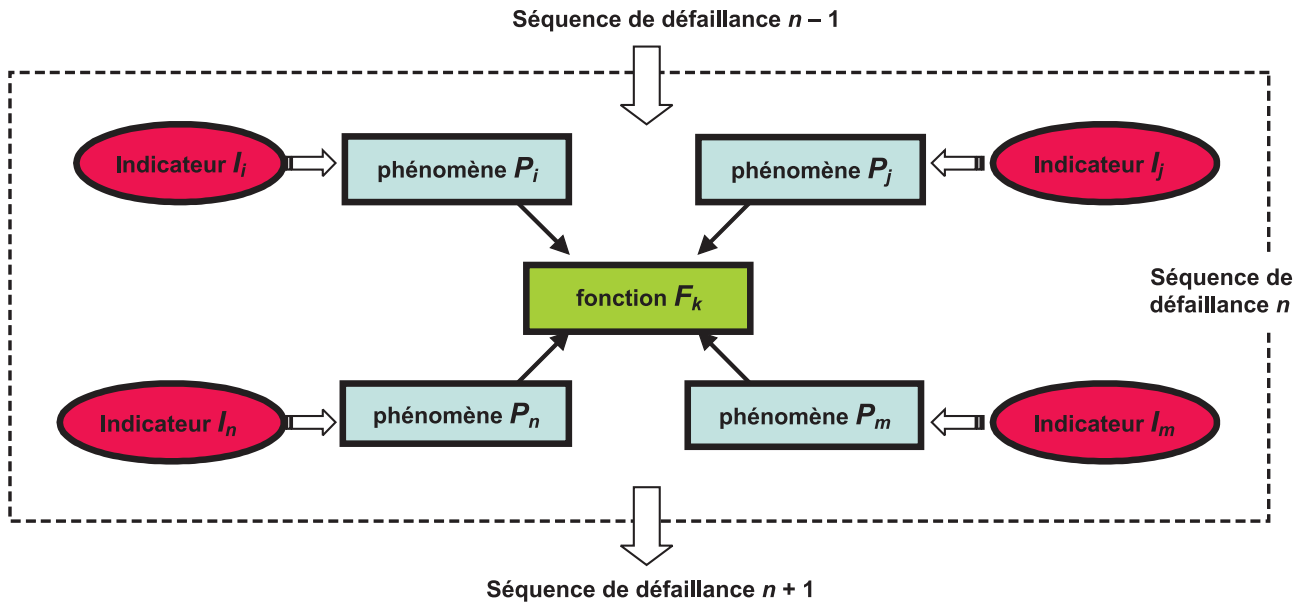
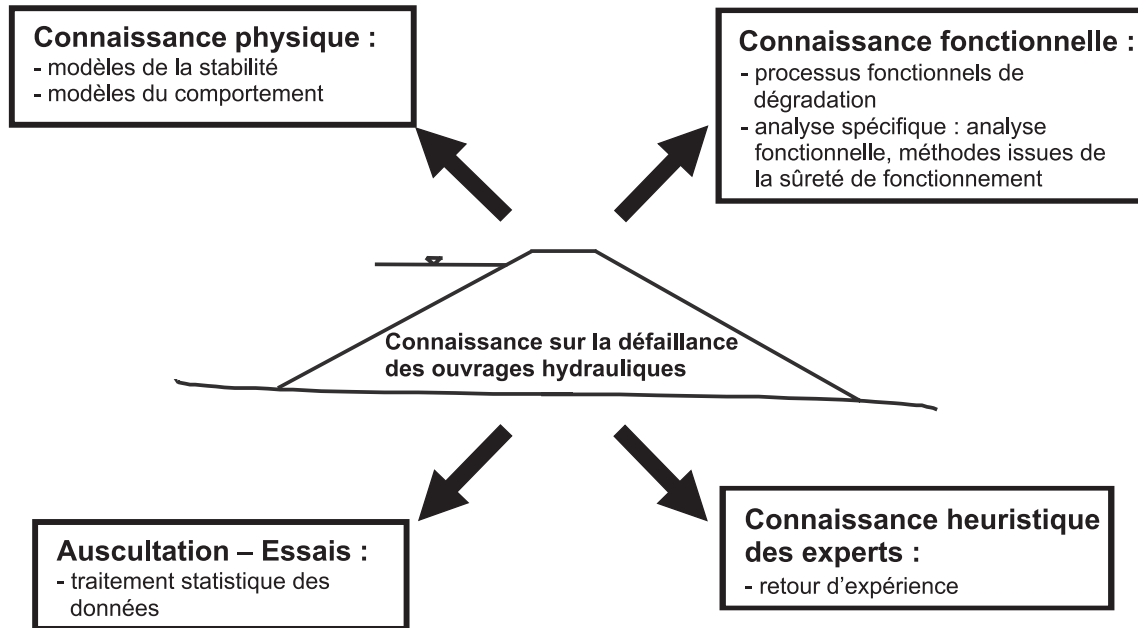


Fig. 6. Les différents éléments de la connaissance sur la défaillance des ouvrages hydrauliques.



nes. Il s'agit d'une connaissance approfondie du système, qui peut s'appuyer sur des modèles physiques et mathématiques de comportement destinés à modéliser les processus physiques s'opérant au sein des structures (percolation des écoulements, déformation des remblais, répartition des contraintes). Ces modèles « mécanistes » permettent d'évaluer la sécurité disponible vis-à-vis des différents états limites (glissement, surverse, érosion interne). Sous forme analytique ou numérique, la connaissance mécanique est la base de l'évaluation des ouvrages hydrauliques.

2. Les processus fonctionnels de dégradation au sein des structures, y compris l'enchaînement des causes et effets conduisant aux modes de défaillance : Cette connaissance

peut être acquise par des méthodes spécifiques d'analyse, soit l'analyse fonctionnelle des systèmes et les méthodes issues de la sûreté de fonctionnement.

3. Les données d'auscultation ou d'essais géophysiques et géotechniques : Ces informations sont indispensables pour l'analyse du comportement des ouvrages hydrauliques et la détection des mécanismes; elles sont également les paramètres d'entrée des modèles mécanistes. Cette connaissance est souvent appuyée par des modèles statistiques d'analyse des informations : traitement statistique des données géotechniques pour la détermination des valeurs caractéristiques des résistances (géotechniques, propriétés des matériaux constitutifs des ouvrages); analyse,

à conditions constantes, des données d'auscultation des barrages (pression, drainage, déplacement); intensité des actions (modèles hydrologiques).

4. La connaissance heuristique des experts sur le vieillissement des composants des ouvrages hydrauliques : Cette connaissance n'est pas nécessairement décrite ou prise en charge à travers des modèles physiques ou des données d'auscultation, mais elle est explicitable par le retour d'expérience des experts du domaine. Elle concerne, en particulier, l'identification des séquences de défaillances en amont d'un état limite : dégradation d'un masque d'étanchéité, d'un dispositif de drainage ou de filtration; erreurs humaines d'exploitation; etc.

La démarche proposée est basée sur le recueil d'informations en ce qui concerne les différents aspects du comportement des ouvrages hydrauliques et sur leur structuration à l'aide du modèle fonctionnel de représentation des mécanismes.

Base de connaissances sur les mécanismes des ouvrages hydrauliques

L'objectif recherché est de constituer une base de connaissances sur les mécanismes conduisant à la perte de performance des ouvrages hydrauliques. L'analyse fonctionnelle et l'AMDE permettent de déterminer, pour chaque mécanisme, les modes de défaillance en jeu, les phénomènes y conduisant ou en résultant et les indicateurs de détection des phénomènes. Ces informations sont classées et des choix terminologiques sont établis afin d'obtenir des informations structurées et homogènes, pouvant être intégrées dans des bases de données.

Chaque mécanisme peut être représenté sous la forme d'un arbre de défaillances qui représente l'enchaînement des séquences de défaillances fonctionnelles. La figure 7 illustre la modélisation du mécanisme d'érosion interne se produisant dans les digues à étanchéité amont. Ce mécanisme résulte des dégradations successives suivantes : (i) dégradation de la fonction de résistance mécanique accomplie par le revêtement côté fleuve (correspondant à un état limite de service), (ii) dégradation de la fonction d'étanchéité accomplie par la recharge amont (correspondant également à un état limite de service), puis (iii) dégradation de la fonction d'autofiltration accomplie par le corps de digue (correspondant à un état limite ultime ou mode de rupture). Cette représentation des mécanismes sous forme de scénarios fonctionnels montre les différents états limites successifs se produisant dans les composants des ouvrages et conduisant à un mode de rupture (érosion interne, glissement structurel du corps de digue).

Pour chaque séquence de défaillances correspondant à la dégradation d'une fonction (par exemple, dégradation de la fonction d'étanchéité de la recharge amont d'une digue à étanchéité amont), les différents indicateurs contribuant à la performance de cette fonction sont identifiés :

1. les indicateurs structurels (pour l'exemple de la fonction d'étanchéité : la présence de racines dans la digue, la présence d'ouvrages traversant la digue ou la présence de terriers d'animaux fouisseurs) et
2. les indicateurs de l'environnement de la digue (pour l'exemple de la fonction d'étanchéité : la végétation sur la digue ou la présence d'animaux fouisseurs sur le site).

En terme de résultats, une base de connaissances sur les mécanismes des barrages-poids et des barrages en remblai a été constituée, soit environ 20 scénarios (Peyras 2003). Un travail identique a été réalisé sur les mécanismes des digues fluviales, soit environ 15 scénarios (Serre 2005). À titre d'illustration, six mécanismes ont été modélisés pour les digues à étanchéité amont : la surverse, l'affouillement côté fleuve, l'érosion interne en fondation, l'érosion interne dans le corps de digue, le glissement côté fleuve et le glissement côté val.

La modélisation des mécanismes conduit à proposer quelque 90 indicateurs structurels pour les barrages et autant pour les digues. À titre d'illustration, le tableau 3 présente les indicateurs mesurés pour les barrages-poids.

Évaluation des indicateurs structurels des ouvrages hydrauliques

L'objectif recherché est de développer une méthode permettant l'évaluation quantitative des différents indicateurs structurels des ouvrages hydrauliques. Ces indicateurs sont de nature différente (visuels, mesurés, calculés, de conformité vis-à-vis des règles de l'art) et agrègent des informations variées (données mécaniques, hydrauliques, structurelles, etc.); il faut alors en avoir une définition homogène. La démarche adoptée consiste à travailler avec un groupe d'experts-conseils pour l'évaluation des indicateurs. L'expertise est donc ici mise à profit pour intégrer l'ensemble des connaissances relatives au comportement des ouvrages hydrauliques et contenues dans les indicateurs.

Le panel d'experts, constitué de deux experts en ouvrages hydrauliques, d'un hydraulicien et d'un animateur généraliste, a pour rôle, d'une part, de fixer la méthode de notation des indicateurs et, d'autre part, de rédiger l'ensemble des règles d'évaluation.

Dans un premier temps, les experts ont fixé une échelle des cotes applicables aux indicateurs structurels. Une échelle discrète, comprise entre de 0 à 10, a été proposée, où 0 correspond à la situation idéale, et 10, à la situation la plus critique (fig. 8). Cette échelle unique est utilisée pour l'ensemble des indicateurs structurels, indépendamment de leur contribution à la performance de l'ouvrage. Le choix d'une telle échelle permet donc d'introduire, dès la mesure, une hiérarchie dans les indicateurs. Ainsi, un indicateur structurel ayant une importance capitale dans l'évaluation d'une fonction peut atteindre la valeur maximale de 10; à contrario, on pourra limiter la cote maximale d'un indicateur moins significatif.

Les règles applicables à l'ensemble des indicateurs structurels sont établies par les experts; les cotes 0 et 10 sont fixées ainsi que les cotes intermédiaires. Pour chaque indicateur, les règles d'évaluation sont fixées en attribuant des cotes dépendant des observations relevées sur les ouvrages hydrauliques, de leurs mesures d'auscultation, des essais disponibles ou des paramètres de stabilité calculés (par exemple, les facteurs de sécurité). Les règles d'évaluation associées à chaque cote décrivent ainsi la condition d'excellence (situation où l'indicateur d'état prend la cote 0), la condition inacceptable (situation où l'indicateur d'état prend la cote 10) et les quatre jalons intermédiaires (bon, passable, médiocre, mauvais).

Les règles d'évaluation des indicateurs structurels sont établies de manière à ce que leur notation soit fiable et reproductible. Pour cela, un certain nombre de champs doivent être documentés : nom de l'indicateur, définition, mode

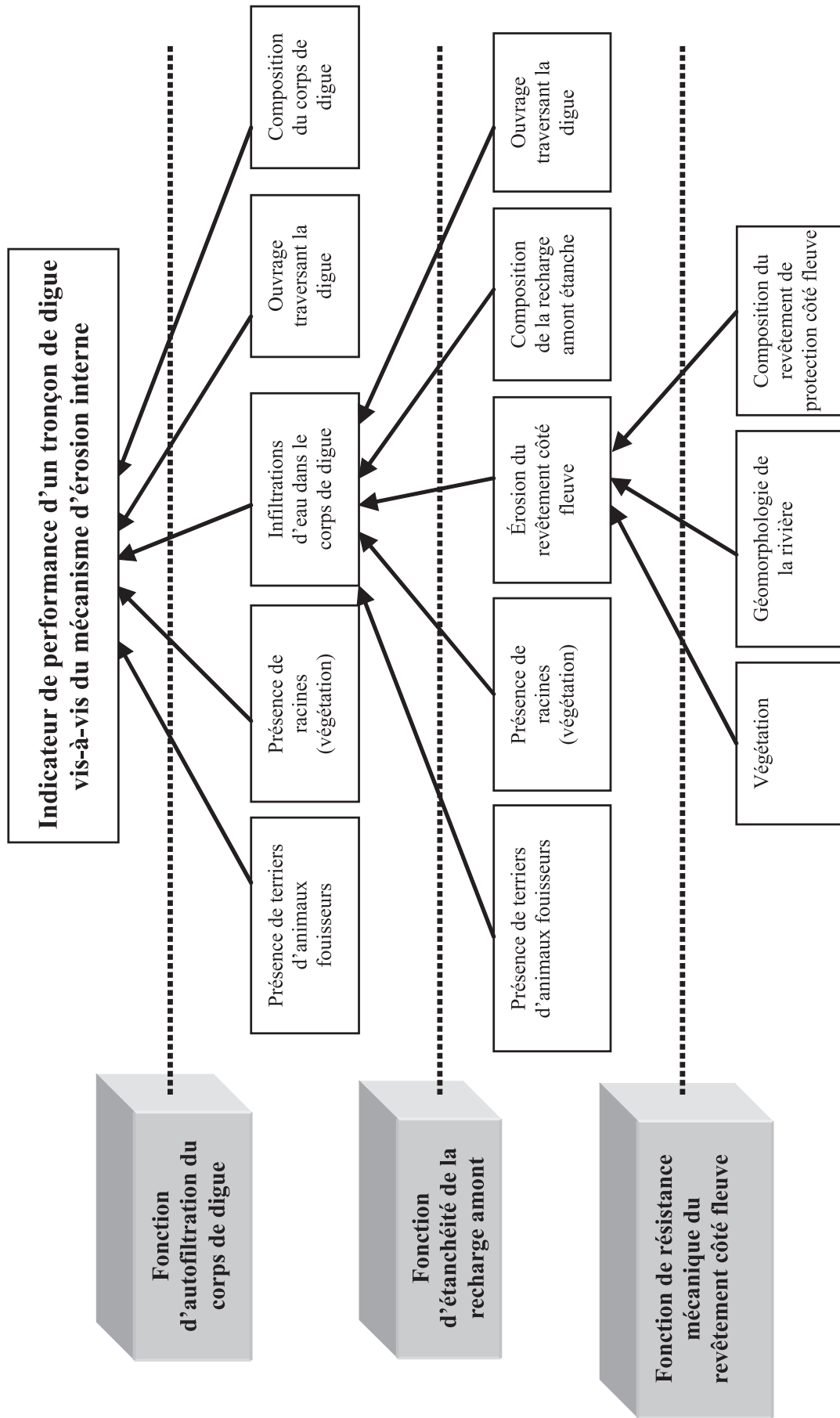


Fig. 7. Modélisation du mécanisme d'érosion interne dans les digues à étanchéité amont (Serre 2005).

Tableau 3. Indicateurs de l'état des barrages (Peyras 2003).

Indicateurs mesurés	Instruments ou méthodes de mesure
Déplacement, tassement	Pendule direct ou inversé; topographie par planimétrie, nivellement ou alignement
Déformation mécanique	Extensomètre à corde vibrante ou multipoints (Distofo)
Fissures	Fissuromètre triaxial (Vinchon), avec capteur inductif ou avec mesures au vernier ou au comparateur
Piézométrie	Cellules à contre-pression ou à corde vibrante, piézomètre
Débit	Débitmètre, empotement, déversoir
Charge amont	Limnimètre, échelle de niveau

Fig. 8. Échelle de notation des indicateurs structurels des ouvrages hydrauliques.

Cote	Qualification	Code graphique
0	Excellent	
1	Bon	
2	Bon	
3	Passable	
4	Passable	
5	Médiocre	
6	Médiocre	
7	Mauvais	
8	Mauvais	
9	Mauvais	
10	Inacceptable	

opérateur, échelle de notation, références sur cette échelle et repère spatial (recharge amont étanche, corps de digue, etc.).

Pour certains indicateurs structurels, il est nécessaire de recourir à des indicateurs intermédiaires pour lesquels le groupe d'experts propose des règles d'évaluation et d'agrégation. Ces indicateurs sont alors combinés à l'aide de différents opérateurs : somme, somme pondérée, maximum, table de vérité.

À titre applicatif, cet article présente l'évaluation de l'indicateur structurel « présence de racines (végétation) » dans la recharge amont étanche, lequel intervient dans l'évaluation de la fonction d'étanchéité de la recharge amont des digues à étanchéité amont (fig. 7 relative à l'arbre de défaillances du mécanisme d'érosion interne). La règle proposée par les experts indique que cet indicateur doit être déterminé par l'examen de la végétation située sur la digue (talus côté fleuve, crête) et à ses abords (sur une emprise de 2 m de part et d'autre de la recharge amont). L'indicateur structurel est alors évalué à partir de trois indicateurs intermédiaires : grands arbres, petits arbres et buissons (tableau 4).

Les cotes de l'indicateur structurel présence de racines (végétation) dans la recharge amont sont explicitées comme

suit : 0, condition d'excellence, obtenue si aucun arbre ou buisson ne se situe sur la digue ou à proximité (sur une emprise de 2 m de la digue); 10, condition inacceptable (cote 10), atteinte dès qu'un seul grand arbre mort est observé au contact de la recharge amont étanche ou à proximité (à moins de 2 m de la recharge). Les jalons intermédiaires sont également définis; par exemple, cote 8, présence d'arbres vivants et denses (tableau 4).

L'agrégation des trois indicateurs intermédiaires pour l'évaluation de l'indicateur structurel présence de racines (végétation) dans la recharge amont est obtenue en adoptant la cote la plus défavorable (opérateur maximum). Le détail des règles et la règle d'évaluation synthétique sont résumés au tableau 4.

En termes de synthèse, le modèle fonctionnel permet de constituer une base de connaissances relatives aux mécanismes de vieillissement et de rupture. Il est ainsi le support pour le recueil et l'intégration de l'expertise visant à affiner l'identification et la structuration des indicateurs ainsi que leur agrégation pour l'évaluation de la performance des ouvrages.

En termes de résultats, il y a ainsi quelque 90 indicateurs structurels, relatifs aux digues, pour lesquels des règles d'évaluation quantitative ont été établies. Ces indicateurs couvrent l'essentiel des mécanismes de vieillissement et de rupture des digues à étanchéité amont (Serre 2005). Un travail de structuration des indicateurs est également en cours de réalisation sur les barrages en remblai (Curt et al. 2006); ainsi, 28 indicateurs visuels ou d'auscultation et 37 indicateurs de conformité (extraits du dossier du barrage) ont été définis pour le cas de l'érosion interne dans le remblai à étanchéité amont.

Ces bases de règles d'évaluation des indicateurs structurels permettent de capitaliser la connaissance relative aux défaillances des ouvrages hydrauliques et constituent, à ce titre, des recueils techniques complets. Elles intègrent la connaissance mécanique des processus de dégradation, la connaissance des comportements des ouvrages détectables à partir de données d'auscultation ou d'essais (géophysique ou géotechniques) et la connaissance heuristique des experts sur les dégradations des composants des ouvrages. Finalement, elles revêtent un caractère pédagogique d'importance, en particulier pour les jeunes ingénieurs.

Évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques

Démarche

À partir des indicateurs structurels, l'objectif recherché est de développer des indicateurs de performance représentatifs de l'aptitude des ouvrages hydrauliques et de leurs compo-

Tableau 4. Règles d'évaluation de l'indicateur structurel « présence de racines (végétation) » dans le corps de digue (Serre 2005).

Indicateur structurel	Critère d'évaluation*	Cote [†]
Racines ou végétation	Aucun arbre ou buisson	0 (conditions excellentes)
Buissons	Buissons épars	1
	Buissons denses	2
Petits arbres	Arbres vivants et denses ou morts et épars	3
	Arbres morts et denses	4
Grands arbres	Arbres vivants et épars	7
	Arbres vivants et denses	8
	Arbres morts et denses	9
	Un arbre mort	10
Cote globale :		Maximum (la cote la plus élevée est retenue)

*Basé, en règle générale, sur la présence de végétation sur la digue (côté val protégé et sur la crête hors dispositif d'étanchéité) ou à ses abords, limités à 2 m de la digue. Si une jeune pousse est repérée, il faut raisonner en terme de taille adulte de l'espèce, c'est-à-dire considérer sa taille adulte. La densité est prise en compte même pour les grands arbres.

[†]Les cotes sont évaluées par le garde digue, responsable de la surveillance de la digue.

sants à accomplir leurs fonctions. La démarche mise en œuvre repose sur l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision (Roy et Bouyssou 1993) : la performance d'un ouvrage et de ses composants dépend de plusieurs indicateurs structurels pour lesquels des règles d'évaluation ont été proposées (section Recueil et structuration de la connaissance sur les mécanismes des ouvrages hydrauliques) et que nous cherchons à agréger.

Pour évaluer les ouvrages de façon complète, la performance doit être déterminée pour chaque mécanisme susceptible de se produire. Dans chacun des mécanismes, il s'agit d'évaluer tout d'abord la performance des fonctions des composants impliqués dans chaque séquence de défaillances. Ces informations doivent ensuite être agrégées pour évaluer la performance de la fonction principale de résistance de l'ouvrage (celle dont la défaillance conduit à l'état limite ultime ou rupture), puis proposer un indicateur de performance unique pour le mécanisme étudié (fig. 9).

Évaluation de la performance des fonctions accomplies par les composants des ouvrages hydrauliques

La méthode multicritères utilisée pour l'agrégation des indicateurs structurels est la méthode d'affectation à base de règles (Azibi 2003). Il s'agit d'une méthode interactive qui alterne des étapes de calculs d'agrégation et des étapes de dialogue avec les experts-conseils du domaine qui servent d'appui en ce qui a trait à la connaissance sur les mécanismes des ouvrages. La méthode d'affectation à base de règles repose sur l'utilisation de règles d'agrégation de type « si ..., alors ... » : la condition « si » concerne les évaluations des indicateurs structurels et la conclusion « alors » indique l'évaluation de l'indicateur de performance. Cette méthode permet de respecter le caractère qualitatif des indicateurs, et une démarche itérative est mise en œuvre pour la construction d'une base de règles.

À l'instar de l'évaluation des indicateurs structurels, les informations nécessaires à l'agrégation des indicateurs structurels sont recueillies auprès du même groupe d'experts-conseils consulté pour ce projet, et auprès desquels sont organisées des séances d'entrevues structurées.

Le travail d'agrégation des indicateurs s'appuie sur le modèle fonctionnel de représentation des mécanismes (section

Recherche d'indicateurs de l'état structurel des ouvrages hydrauliques). Les indicateurs structurels sont agrégés à chaque séquence de défaillances fonctionnelles du mécanisme, de manière à obtenir la performance de la fonction du composant impliquée dans le mode de défaillance.

À titre d'illustration, l'évaluation de la performance de la fonction d'étanchéité de la recharge amont (mécanisme d'érosion interne d'une digue fluviale à étanchéité amont) est présentée en figure 7. La performance de cette fonction dépend d'une combinaison de cinq indicateurs structurels (fig. 10) :

1. la présence de terriers d'animaux fouisseurs,
2. la présence de racines d'arbres dans l'ouvrage d'étanchéité,
3. les dégradations liées à l'érosion de la protection du revêtement côté fleuve,
4. la composition du revêtement et
5. la présence d'ouvrages traversant la digue.

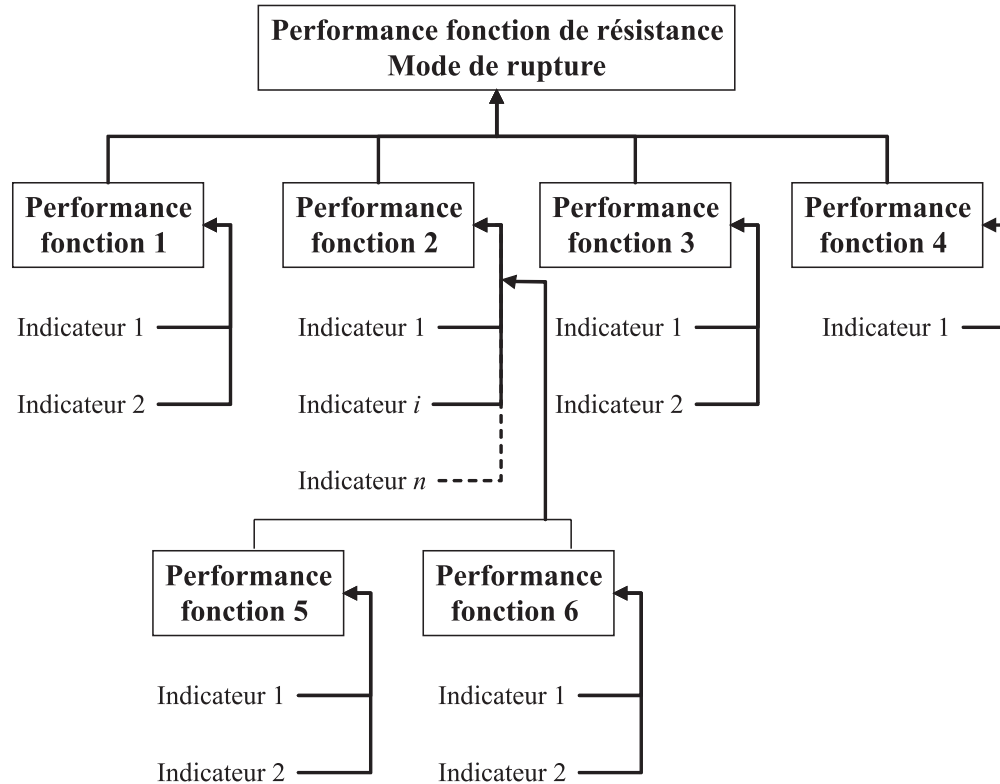
La règle d'agrégation retenue par le groupe d'experts est l'opérateur maximum. Ce choix se justifie sur deux niveaux :

1. D'une part, l'importance relative des différents indicateurs est prise en compte directement dans leurs évaluations, sans pondération ultérieure. Ainsi, chaque indicateur note, avec la même échelle d'importance, la performance de la fonction à laquelle il est rattaché.
2. D'autre part, on suppose que les indicateurs sont indépendants et qu'il n'y a pas, sinon peu, de synergie entre eux. Cette hypothèse constitue donc une simplification de la réalité, mais elle reste malgré tout correcte, car l'AMDE fournit des causes de défaillance à priori indépendantes les unes des autres (du fait de l'indépendance des systèmes choisis dans l'analyse fonctionnelle), et l'analyse experte réalisée par la suite s'est efforcée de vérifier cet aspect des choses.

Évaluation des indicateurs de performance des ouvrages hydrauliques

Pour chaque mécanisme de vieillissement ou de rupture, l'objectif recherché est de définir un indicateur de performance représentatif, à l'échelle de l'ouvrage, de sa capacité à résister au processus de dégradation étudié. Il s'agit donc d'agréger les indicateurs de performance des différentes fonctions accomplies par les composants de l'ouvrage.

Fig. 9. Démarche de construction de l'indicateur de performance d'un ouvrage hydraulique pour un mécanisme donné.



L'évaluation de la performance d'un ouvrage vis-à-vis d'un mécanisme revient à évaluer la fonction de résistance de l'ouvrage (fonction finale au sommet de l'arbre de défaillances; voir fig. 7), dont la défaillance conduirait à un état limite ultime. L'évaluation de cette dernière fonction est obtenue par agrégation des cotes de performance des différentes fonctions des composants de l'ouvrage et des indicateurs structurels.

À titre d'exemple, la performance d'une digue fluviale à étanchéité amont est évaluée, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, à partir d'une table de vérité experte (fig. 11) qui combine deux entrées :

1. d'une part, la cote maximale de quatre indicateurs structurels : (i) la présence de terriers d'animaux fouisseurs dans le corps de digue, (ii) la présence de racines (végétation) dans le corps de digue, (iii) la présence d'ouvrages traversant la digue et (iv) la composition du corps de digue;
2. d'autre part, la performance de la fonction d'étanchéité de la recharge amont, elle-même obtenue par l'agrégation de différents indicateurs structurels.

Validation de l'évaluation des indicateurs de performance

La validation de l'évaluation des indicateurs de performance vise à tester la capacité de la méthode à rendre compte d'une situation réelle. Elle doit être vérifiée sur deux aspects : d'une part, la validité et la complétude du système de règles proposé pour l'évaluation des ouvrages;

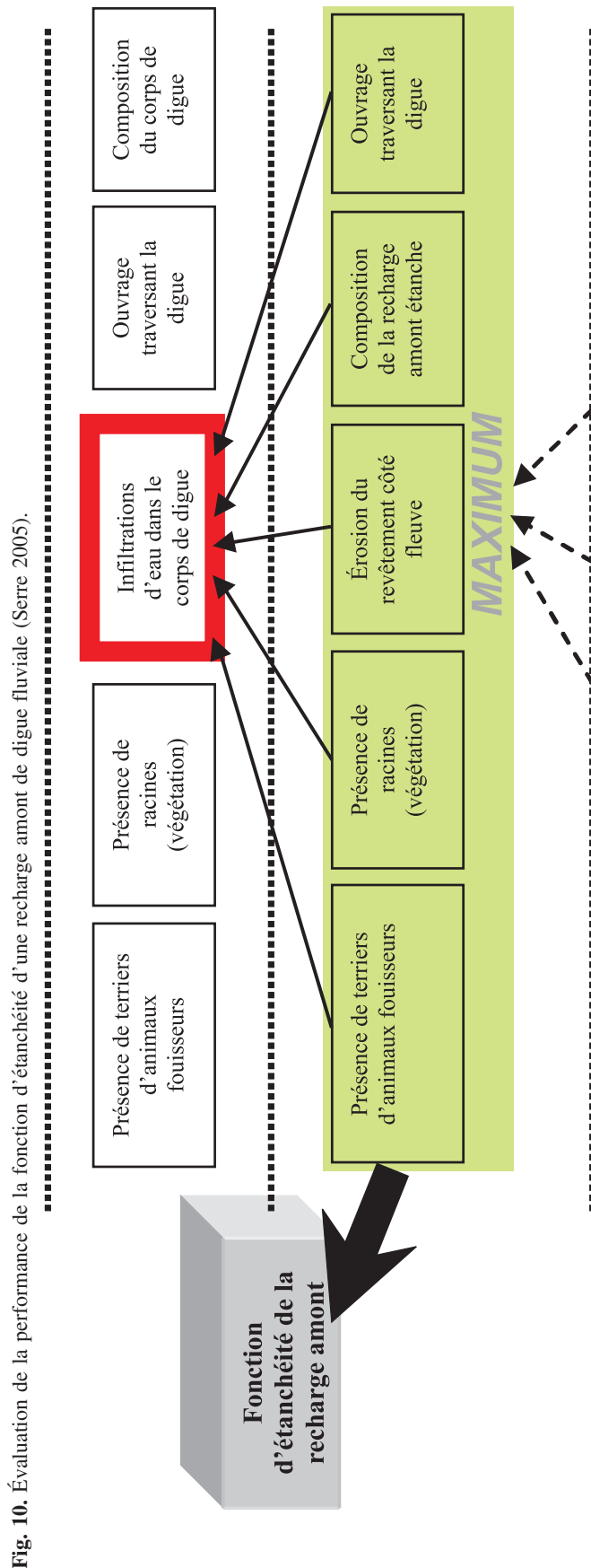
d'autre part, la cohérence des notations des ouvrages par les utilisateurs de la méthode (reproductibilité des évaluations).

La démarche mise en œuvre dans cette phase de validation consiste à comparer, sur des ouvrages hydrauliques réels, les conclusions d'études de diagnostics selon l'une des quatre méthodes classiques, listées antérieurement, aux résultats d'évaluation obtenus par la méthode proposée dans la présente étude. Cette mise en situation des méthodes d'évaluation de la performance permet ainsi d'examiner

1. si la nouvelle méthode prend en compte l'ensemble des indicateurs nécessaires à l'évaluation (complétude des indicateurs structurels et des règles associées) et
2. si les notations obtenues à l'aide de la nouvelle méthode sont cohérentes au regard du diagnostic initial selon une méthode classique.

La phase de validation de la méthode est présentée sur l'exemple des digues fluviales (Serre 2005). La digue test est un ouvrage de 1870 m de longueur, construit en 1907 et présentant de nombreuses faiblesses. Elle a fait l'objet d'un diagnostic initial complet par méthode classique d'évaluation.

La méthode multicritères à base d'indicateurs de la présente étude est appliquée sur l'ensemble du linéaire de digues. Pour cela, une inspection visuelle détaillée et une analyse minutieuse des dossiers des ouvrages exécutés ont été réalisées par trois experts dans le cadre d'un travail collectif. L'expertise a conduit à proposer, pour chacun des tronçons homogènes, des valeurs pour les différents indicateurs structurels ensuite agrégés dans les indicateurs de performance. Dans ce test, l'évaluation s'est concentrée sur le



mécanisme d'érosion interne, auquel la digue paraissait particulièrement vulnérable.

La digue évaluée étant un ouvrage à grand linéaire, les résultats de l'analyse des indicateurs de performance sont référencés au moyen d'un système d'information géographique permettant d'afficher, pour les différents tronçons de la digue, les cotes des différents indicateurs structurels et les niveaux de performance (fig. 12).

Les résultats de cette analyse sont ensuite comparés à ceux du diagnostic initial par méthode classique, réalisé préalablement à ce travail de validation. Cette comparaison met en évidence que les tronçons de digues dont la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne est médiocre, mauvaise ou inacceptable (cotes 5 à 10) se dégagent de manière homogène selon les deux méthodes. De façon générale, le découpage de la digue en tronçons de performance homogène reflète correctement les conclusions du diagnostic global initial.

Un deuxième élément de validation a consisté à confronter les résultats fournis par la méthode multicritères à base d'indicateurs à l'expertise d'ingénieurs en génie civil ayant une bonne connaissance de la digue étudiée. D'une manière générale, ceux-ci considèrent que les niveaux de performance des tronçons attribués par la nouvelle méthode sont en accord avec l'état actuel de l'ouvrage. Cette méthode multicritères représente la réalité de manière acceptable pour les tronçons dont l'état est satisfaisant et dont les cotes des indicateurs structurels sont comprises entre 0 et 4, puis pour les tronçons dont l'état n'est pas satisfaisant et dont les cotes des indicateurs structurels sont comprises entre 7 et 10. Pour la plage des cotes intermédiaires variant de 5 à 6, les résultats présentent une plus grande variabilité entre la méthode à base d'indicateurs et la vision des ingénieurs (ainsi, certains d'entre eux considéraient que les tronçons affectés à la classe médiocre (cotes 5 et 6) auraient dû être affectés plutôt à la classe passable (cotes 3 et 4).

Ainsi, le travail réalisé à date doit se poursuivre afin de tester la méthode multicritères à base d'indicateurs sur de nombreux cas de digues, l'objectif étant d'améliorer le modèle et d'ajuster finement les notations des différents indicateurs. Ce travail consiste donc en la poursuite de l'analyse de sensibilité par de nombreux tests sur plusieurs configurations de digues (différents états structurels, typologies, géométries) et en la comparaison des résultats de la méthode à base d'indicateurs avec ceux des diagnostics selon les méthodes classiques et avec les notations des ingénieurs. Cette approche permettra de rajouter ou de modifier des règles d'affectation pour augmenter la précision de la méthode à base d'indicateurs.

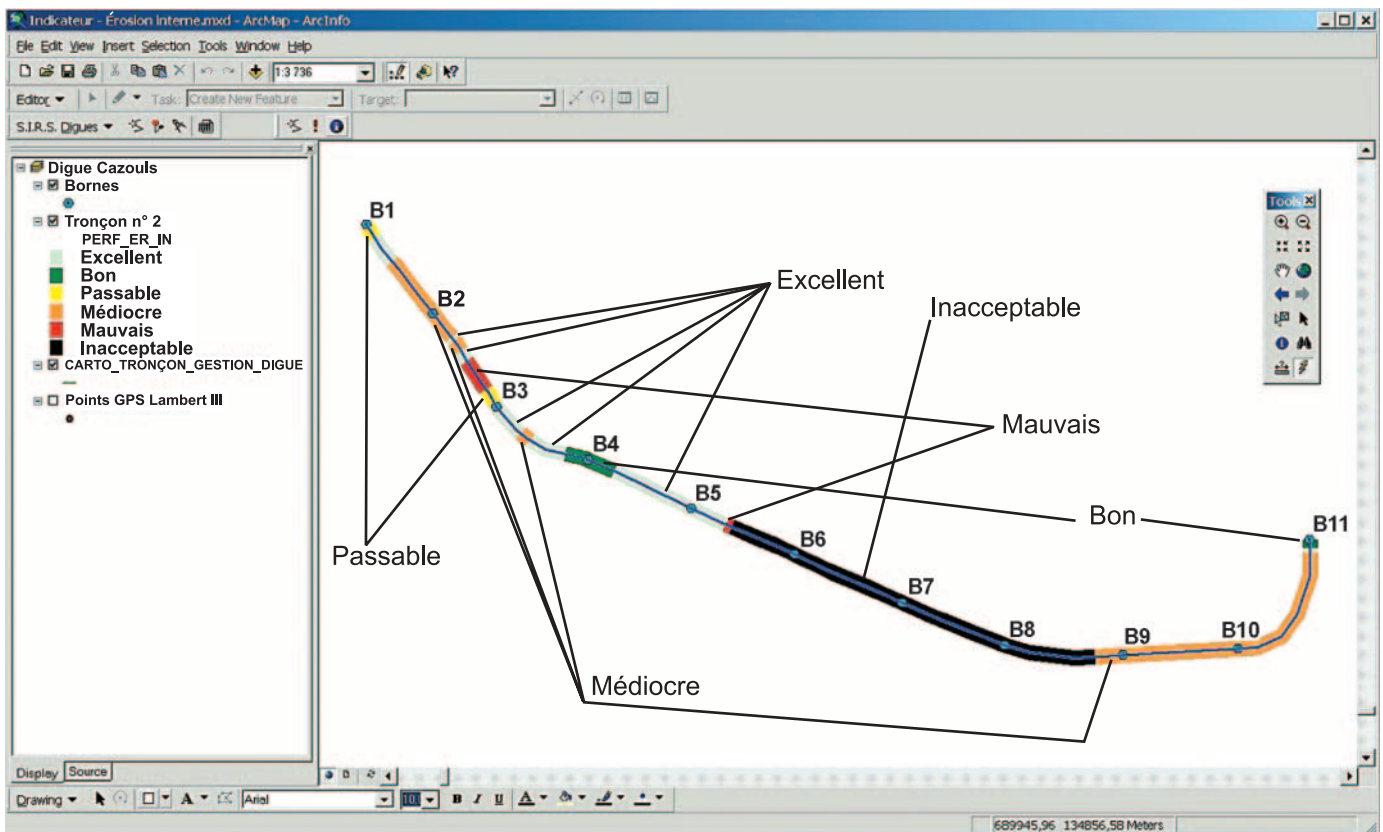
Synthèse et perspectives

Le Cemagref, en collaboration avec l'Université Marne-la-Vallée (laboratoire Génie urbain, environnement et habitat) et l'Université Blaise-Pascal (Laboratoire de génie civil), a développé des méthodes d'évaluation de l'aptitude au service des ouvrages hydrauliques, avec des applications pour les digues fluviales et les barrages. L'objectif de ce projet est de développer des méthodes et des outils opérationnels pour répondre aux besoins internes d'expertise du Cemagref sur les ouvrages du parc de digues et de barrages

Fig. 11. Évaluation de la performance d'une digue fluviale à étanchéité amont, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne (Serre 2005).

Cote maximale des indicateurs structurels : (i) présence de terriers (ii) présence de racines (végétation) (iii) ouvrage straversant la digue (iv) composition du corps de digue	Indicateur de performance : infiltration d'eau dans le corps de digue	Cote de performance de la fonction d'étanchéité de la recharge amont										
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
10		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
9		9	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
8		8	8	8	7	6	5	4	3	2	1	0
7		7	7	7	7	6	5	4	3	2	1	0
6		7	7	7	6	6	5	4	3	2	1	0
5		6	6	6	6	5	4	4	3	2	1	0
4		6	6	6	5	4	4	3	3	2	1	0
3		6	5	5	4	4	4	3	3	2	1	0
2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
1		2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
0		2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0

Fig. 12. Performance d'une digue fluviale vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne (Serre 2005).



relevant du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables.

À partir des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement adaptées au génie civil (analyse fonctionnelle, AMDE, arbres de défaillances), un modèle fonctionnel répondant à des besoins de méthodes d'évaluation génériques et utilisables pour des ouvrages de nature différente a été développé. La modélisation des mécanismes de vieillissement et de rupture permet de construire des indicateurs structurels représentatifs de l'état des ouvrages hydrauliques. Cette démarche scientifique a permis d'obtenir une bonne exhaustivité des indicateurs entrant dans l'évaluation de la performance des ouvrages, en comparaison avec une démarche directe heuristique qui ne permettrait pas de tels résultats.

Fondée sur l'analyse de la connaissance sur les défaillances des ouvrages hydrauliques et l'appui d'un groupe d'experts-conseils, une base de règles d'évaluation des indicateurs structurels a été proposée. Ces règles intègrent l'ensemble des informations disponibles sur les ouvrages, celles issues de la connaissance physique des mécanismes, des données d'auscultation ou des inspections visuelles. La prise en compte de la connaissance heuristique des ingénieurs vient compléter la démarche systématique du modèle théorique fonctionnel, permettant ainsi d'obtenir une base de règles fondée, d'une part, sur une démarche scientifique rigoureuse, d'autre part, sur la pratique des experts du domaine.

Les indicateurs structurels des ouvrages sont agrégés au moyen d'une méthode d'analyse multicritères à base de règles d'affectation, permettant ainsi de construire un indicateur de performance pour chaque mécanisme. Des tests de validation sur des ouvrages réels sont effectués pour s'assurer de la pertinence et de la validité des résultats obtenus pour l'évaluation de la performance des ouvrages. Les analyses de sensibilité montrent une bonne concordance entre la méthode à base d'indicateurs et des diagnostics traditionnels. Toutefois, ces tests doivent être poursuivis sur de nombreux ouvrages afin de rajouter ou de modifier des règles d'affectation pour augmenter la précision de la méthode à base d'indicateurs.

La pratique révèle que la méthode à base d'indicateurs est bien admise parmi les ingénieurs spécialistes des ouvrages hydrauliques. Cet état de fait résulte de l'intégration de la démarche d'ingénierie traditionnelle aux règles d'affectation des indicateurs structurels et de performance. Un autre avantage important de cette méthode, qui est apparu à l'usage, est l'adaptabilité de la base de règles : celle-ci peut être modifiée et complétée de manière très simple. Ainsi, la méthode proposée offre une transparence, dans la mesure où toutes les règles sont énoncées et accessibles aux experts.

Ce modèle a servi de base à plusieurs recherches et applications. Dans le domaine des barrages, des bases de connaissances sur les mécanismes et les historiques de vieillissement ont été développées et sont destinées aux experts du domaine pour l'aide au diagnostic et à l'analyse de risques (Peyras et al. 2006a). Dans le domaine des digues, des méthodes d'évaluation de la performance ont été proposées; elles sont utilisées par les gestionnaires d'ouvrages et intégrées dans un système d'information géographique (Serre et al. 2006). Une nouvelle recherche, récemment engagée, vise à développer des méthodes d'aide à l'expertise pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des barrages en service (Curt et al. 2006).

Bibliographie

- Association canadienne des barrages. 2007. Directives sur la sécurité des barrages. Association canadienne des barrages (www.cda.ca/cda/main/new_guidelines_review_guidelines_review.html), Edmonton, Alb.
- Azibi, R. 2003. Construction de critères en aide à la décision : aspects méthodologiques, techniques et pratiques. Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine, Paris, France.
- Boissier, D., et Peyras, L. 2005. Retour d'expérience : diagnostic, sûreté, risque et gestion des ouvrages et des sites. *Annales du BTP*, **6** : 33-45.
- Commission internationale des grands barrages. 2005. Évaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage. Examen des bénéfices, des méthodes et des dernières applications. Commission internationale des grands barrages (www.icold-cigb.net/images/PDF-multilangue/cata%20web.pdf), Paris, France, Bulletin n° 130.
- Curt, C., Peyras, L., et Boissier, D. 2006. Formalisation et intégration des connaissances pour l'évaluation de la performance des barrages. *Dans Risques et performances*. 15^e Congrès Lambda Mu, 9 au 12 octobre 2006, Lille, France. Institut pour la maîtrise des risques et la sûreté de fonctionnement (<http://imdr-sdf.asso.fr/lm15>), Bagnaux, France.
- Foster, M., Fell, R., et Spannagle, M. 2000a. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Revue canadienne de géotechnique*, **37** : 1000-1024. doi:10.1139/cgj-37-5-1000.
- Foster, M., Fell, R., et Spannagle, M. 2000b. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Revue canadienne de géotechnique*, **37** : 1025-1061. doi:10.1139/cgj-37-5-1025.
- Hartford, D.N.D., et Baecher, G.B. 2004. Risk and uncertainty in dam safety. Thomas Telford Publishing, Londres, Royaume-Uni.
- Laleu, V., Reverchon, B., Cault, J.B., et Lefranc, M. 2000. La politique de maintenance des ouvrages et matériels de production hydroélectricité d'EDF. Une expérience d'analyse de risque simplifiée, appliquée à l'optimisation de la maintenance d'un grand canal. *Dans Compte rendu du 20^e Congrès international sur les grands barrages*. 9 au 22 septembre 2000, Pékin, Chine. Commission internationale des grands barrages (www.icold-cigb.net/images/PDF-multilangue/cata%20web.pdf), Paris, France. Vol. 1. p. 511-525.
- Marche, C. 2004. Barrages : crues de rupture et protection civile. Presses internationales Polytechnique, Montréal, Qué., Canada.
- McCann, M. 1998. Learning from the US experience. *International Water Power & Dam Construction*, **50** : 30-32.
- Peyras, L. 2003. Diagnostic et analyse de risques des barrages. Développement de méthodes d'aide à l'expertise. Thèse en génie civil, Université Blaise-Pascal - Clermont II, Clermont-Ferrand, France.
- Peyras, L., Boissier, D., et Royet, P. 2004. Approches de l'analyse de risques en génie civil : exemple des barrages. *Revue française de génie civil*, **8** : 931-952. doi:10.3166/rfgc.8.931-952.
- Peyras, L., Royet, P., Salmi, A., Salembier, M., et Boissier, D. 2006a. Étude 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. *Revue européenne de génie civil*, **10** : 615-631. doi:10.3166/regc.10.615-631.
- Peyras, L., Royet, P., et Boissier, D. 2006b. Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert judgment. *Revue canadienne de géotechnique*, **43** : 169-186. doi:10.1139/T05-096.
- Roy, B., et Bouyssou, D. 1993. Aide multicritère à la décision : méthodes et cas. Economica, Paris, France.

- Serre, D. 2005. Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique. Thèse en science de l'information géographique, Université Marne-la-Vallée, Paris, France.
- Serre, D., Maurel, P., Peyras, L., Tourment, R., et Diab, Y. 2006. Méthodes et solutions pour maîtriser le risque de rupture de digues. Des modèles de rupture de digues couplés à un SIG. *Revue internationale de géomatique*, **16** : 479–498. doi:10.3166/ri.16.479-498.
- Travé-Massuyès, L., Dague, P., et Guerrin, F. 1997. *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Hermès, Paris, France.
- Villemeur, A. 1988. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité – facteurs humains – informatisation*. Eyrolles, Paris, France.
- Zwingelstein, G. 1995. *Diagnostic des défaillances*. Hermès, Paris, France.