
Outil SANBA : capitalisation des connaissances et retour d'expérience sur les barrages et leur sécurité

Corinne Curt¹, Martine Wolff¹, Huguette Félix¹, Stephan Bernard²

¹ Irstea – 3275 route de Cézanne – CS 40061 – 13182 Aix-en-Provence Cedex 5
prenom.nom@irstea.fr

² Irstea – Campus Universitaire des Cézeaux – 24 avenue des Landais – BP 50085 – 63172 Aubière Cedex
stephan.bernard@irstea.fr

RÉSUMÉ. Les connaissances sur la conception-réalisation et les modes de rupture et dégradation des barrages sont nombreuses, dispersées et non explicites pour certaines. Il est donc intéressant de développer des outils permettant de rassembler, capitaliser et expliciter les connaissances actuelles et futures et de constituer des supports de formation ou de documentation. L'outil prototype SANBA est composé d'une base de connaissances sur les barrages axée plus particulièrement sur la conception et réalisation et les modes de rupture et de dégradation couplée à une base de cas décrivant de manière détaillée des incidents et accidents s'étant produits sur des ouvrages. Ces bases sont en cours de remplissage et de validation, actuellement en interne au sein d'Irstea Aix-en-Provence, puis seront ensuite accessibles à un public extérieur selon des droits conférés à chaque type d'utilisateur.

ABSTRACT. Knowledge related to dam design, construction and failure and degradation modes are numerous, scattered and not explicit for some of them. Consequently, it is interesting to develop tools that allow gathering, capitalizing and making explicit current and future knowledge. These tools can be learning or documentation support systems. The prototype tool SANBA described in this paper is composed of a knowledge base specifically developed for dam design, construction and failure and degradation modes coupled with a case base which gives a detailed description of incidents and accidents that have occurred on structures. These bases are currently being filled and validated, at Irstea Aix-en-Provence. Later, they will be accessible to external users for consulting and writing tasks as a function of the rights conferred to each type of user.

MOTS-CLÉS : Barrage – Base de connaissances – Retour d'expériences – Conception – Réalisation – Phénomènes de dégradation

KEY WORDS: Dam – Knowledge base – Feedback – Design – Construction – Degradation phenomena

Introduction

Les barrages représentent des enjeux économiques importants liés à leurs nombreux rôles : création de réserves d'eau pour l'irrigation, production d'hydro-électricité, alimentation en eau, alimentation des canaux de navigation, maîtrise des crues et soutien des étiages, création de plans d'eau pour les loisirs, la navigation, la décantation et/ou le stockage de résidus miniers ou industriels, régulation des rejets. Toutefois, en cas de rupture, ces ouvrages peuvent être des sources de danger pour leur environnement, les biens et les personnes. L'événement de rupture peut avoir deux origines différentes : d'une part, les événements extrêmes tels que crues et séismes peuvent provoquer une rupture brutale de l'ouvrage, d'autre part, la diminution de la fiabilité des composants peut entraîner, au cours du temps, une baisse de sécurité des ouvrages et à terme la rupture. La diminution de la fiabilité des composants peut elle-même provenir de deux causes : des conditions de conception ou réalisation inappropriées et/ou l'occurrence, lors de la période de service, de phénomènes de dégradation tels que la fissuration du masque amont en béton, le colmatage des exutoires de drainage, le glissement des talus... [ICO94].

Plusieurs éléments caractérisent les connaissances sur la conception-réalisation et les modes de rupture et dégradation des barrages :

- une partie des connaissances n'est pas explicite mais tacite ;
- les connaissances explicites sont nombreuses mais dispersées ;
- les connaissances présentent des formats différents tels que textes, photographies ou vidéos ;
- elles concernent d'une part, les connaissances du domaine (description des modes de conception et réalisation, des phénomènes de dégradation...) et d'autre part, le retour d'expérience sur des barrages ayant subi des désordres.

Il est donc intéressant de rassembler, capitaliser et expliciter les connaissances actuelles dans un outil susceptible d'être mis à jour [CUR07]. L'existence d'un tel outil a plusieurs intérêts :

- rassembler les connaissances en un seul outil et enrichir cet outil au fur et à mesure de la création de nouvelles connaissances ;
- formaliser le retour d'expérience sur des incidents et accidents qui se sont produits sur les barrages ;
- constituer un outil de formation qui permette par exemple à un utilisateur de trouver des définitions ou d'aide à la formation d'un jeune expert ;
- produire un outil de documentation qui permette alors à un utilisateur de se référer à un barrage qui aurait subi un même désordre ou d'accéder à une préconisation d'action corrective ;
- faciliter la communication entre les utilisateurs notamment par la définition d'un vocabulaire commun. Cet outil de communication peut être à usage

interne d'un panel d'experts dialoguant sur un même problème mais aussi à usage externe entre un animateur non expert et un groupe d'experts.

Nous présentons, dans cet article, l'outil prototype SANBA composé d'une base de connaissances, SANBA-dom, dédiée aux barrages et axée plus particulièrement sur leur conception et réalisation, leurs modes de rupture et de dégradation, leur suivi et leur entretien (connaissances du domaine) couplée à une base de cas, SANBA-cas, décrivant de manière détaillée des incidents et accidents s'étant produits sur des ouvrages (diagnostic, conséquences et actions correctives). Les deux premières sections sont dédiées à la présentation succincte d'outils de capitalisation des connaissances et de retour d'expérience déjà développés dans le domaine du génie civil en considérant plus particulièrement les bases orientées sur les barrages. La troisième section traite de la démarche et des méthodes mises en œuvre. La quatrième section présente les résultats obtenus.

Bases dédiées à la capitalisation des connaissances du domaine pour des ouvrages de génie civil

1.1. Bases de connaissances sur les routes, tunnels et ponts

Dans le domaine du génie civil, quelques outils accessibles en ligne portant sur la formalisation et capitalisation des connaissances d'ouvrages de génie civil peuvent être cités.

La base portée par le département de génie civil de l'Institut Indien de Technologie de Delhi (<http://ws2.cdacmumbai.in/projects/vidyakash/online-content/webit/bridge/homefra.htm>) concerne la conception des ponts : elle décrit les types de ponts (8 types), les spécifications et codes de pratique, les composants de la structure, les études hydrologiques, les études de fondations... Les pathologies et le suivi des ponts ne sont par contre pas explicités.

L'Association Mondiale de la Route a également mis en place une base de connaissances sur 21 aspects concernant les routes, les ponts et les tunnels : chaussées routières, conception des routes interurbaines, environnement, études économiques... Pour la plupart de ces items, sont présentés des rapports techniques, des articles et des liens vers des séminaires. Le thème « exploitation des tunnels routiers » est quant à lui plus complet et comporte en particulier un manuel (<http://tunnels.piarc.org/fr/>). Ce manuel informatique traite des différentes phases de la vie de l'ouvrage, des équipements et composants, de la réglementation, de la sécurité, la présentation des acteurs, des aspects environnementaux... Par contre, il ne décrit pas de manière détaillée les différentes pathologies pouvant toucher ce type d'ouvrage. A noter la présence d'un glossaire de 140 termes et de nombreux liens renvoyant vers des sources extérieures.

Deux outils recherche ont été développés par le CETU (Centre d'Etudes des Tunnels) en collaboration avec différents partenaires. L'outil RAMCESH (Recueil Assisté et Maniement des Connaissances des Espaces Souterrains Habités) stocke des éléments de connaissance à partir d'un traitement simple et assisté des

documents pour en extraire la connaissance [FAU07]. RAMCESH n'est pas accessible en ligne. L'outil DIDACTU est un didactiel sur les tunnels (<http://www.outils-cetu.fr/didactu/Index.html>). Il comporte les champs : ouvrage, reconnaissances, dimensionnement, réalisation, matériaux, vie de l'ouvrage. Cet outil est prévu pour couvrir les différents éléments de conception, réalisation et vie de l'ouvrage et présente l'avantage d'être accessible en ligne. Toutefois, il consiste en une compilation de travaux d'étudiants et sa validation reste à faire. Par ailleurs, certaines sections prévues ne sont pas disponibles et aucune donnée n'est présentée concernant les pathologies et l'inspection des ouvrages.

1.2. Base de connaissances sur les barrages

Aucune base n'a été spécifiquement mise en place pour capitaliser les connaissances du domaine dans le cas des barrages. Il est à noter qu'un dictionnaire est présent dans la base NPDP (National Performance of Dams Program - npdp.stanford.edu/index.html). Il définit en quelques lignes notamment les différents éléments du barrage et les pathologies et donne des liens vers des termes connexes. Par ailleurs, un didacticiel sur support DVD dénommé VIGIE BARRAGE [EDF98] a été élaboré à destination des « barragistes » en charge de la surveillance des ouvrages.

Bases de cas passés d'accidents d'ouvrages du génie civil

2.1. Bases de cas sur les ponts, tunnels, bâtiments

L'outil UNIT Cyberrisques détaille des accidents s'étant produits sur des ouvrages de génie civil (<http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/index.htm>). La structure de la description est la même pour tous les cas : synthèse des faits, analyse des faits, iconographie (photographies, dessins, films...) et leçons retirées – conséquences. Les ouvrages concernés sont 5 ponts (la période couverte est 1879-2006), 1 tunnel (accident en 2005) et 2 bâtiments (accidents en 1968 et 2004).

Peu de détails sont fournis sur les ouvrages et notamment sur les appareils d'auscultation.

2.2. Bases de cas sur les barrages

Le retour d'expérience sur les ruptures de barrages a d'abord fait l'objet de différentes publications de l'ICOLD (International Commission on Large Dams) [ICO95, ICO74, ICO73]. L'outil Cyberrisques présente, selon la structuration présentée au § 2.1, 3 exemples de barrages ayant subi une rupture. Des outils informatiques ont été développés par la suite et notamment, deux bases de données librement accessibles via Internet (ARIA et NPDP) et une base sur CD-Rom (BHDF). Ces trois bases sont considérées dans les paragraphes suivants.

2.2.1. Base ARIA

La base ARIA est gérée en France par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (www.aria.developpement-

durable.gouv.fr). Elle recense les incidents ou accidents qui ont, ou auraient, pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, l'agriculture, la nature et l'environnement.

Au 08/01/2013, y sont recensés 40 000 accidents dont 194 concernent la catégorie « Barrages ». Dans cette catégorie, 39 accidents relèvent de barrages hydrauliques et sont liés à une défaillance de l'ouvrage (surverse, érosion interne, défaillances de vannes...). La période couverte par les 27 cas est 1959-2012 : 1 cas en 1959, 1 cas en 1963, 1 cas en 2008, 17 cas en 2010, 9 cas en 2011 et 10 cas en 2012. Les cas listés sont donc récents. Sept d'entre eux se sont produits à l'étranger.

Hormis deux d'entre eux formulés dans une fiche détaillée d'une dizaine de pages, ces cas sont décrits assez brièvement (en moyenne par 190 mots). Peu de documents annexes sont fournis pour l'ensemble de ces cas : une ou plusieurs photos sont associées pour uniquement 4 cas. Les champs structurant les fiches détaillées de la base ARIA sont présentés dans le Tableau 1.

2.2.2. Base NPDP

La base NPDP (<http://npdp.stanford.edu/>) recense des événements vécus par les barrages américains : ils concernent la conception, la construction, l'inspection, les modifications, les incidents... Environ 3 000 incidents sont ainsi décrits dans NPDP au 08/01/2013 par des textes de quelques centaines de mots. Cette base de données est complétée par un dictionnaire qui explicite les termes techniques du domaine.

Chaque incident est l'un des enregistrements de la base : il est possible de suivre les différents événements sur un barrage au cours du temps. Les champs structurant les fiches détaillées de la base NPDP sont présentés dans le Tableau 1. Il faut préciser que de nombreux champs paraissent n'être que rarement remplis (notamment les photos). Le champ systématiquement renseigné outre le nom du barrage concerne la description de l'événement.

2.2.3. Base BHDF

La base BHDF (Bibliography of the History of Dam Failures) est une base rassemblant des données sur les défaillances de barrages collectées par la Data Station for Dam Failures (DSDF-VIENNA) depuis 1980.

Les champs structurant les fiches détaillées de la base BHDF sont présentés dans le Tableau 1. La base contient la description des ruptures, les dimensions des barrages concernés et les causes de la rupture, l'estimation des dommages lorsqu'ils sont connus et des références de la littérature. La base de données comprend actuellement 323 ruptures de grands barrages, 445 ruptures de petits barrages et 133 ruptures de barrages de stériles. Les données proviennent de librairies, bases de données privées ou d'organisations gouvernementales ou non gouvernementales, universités [VOG04]. Il est important de préciser qu'aucun texte ne décrit la rupture : la cause de la rupture est identifiée sous la forme uniquement d'un des 14 types recensés.

2.3. Synthèse – Proposition d'un nouvel outil

L'analyse précédente montre qu'il n'existe pas actuellement d'outil accessible traitant à la fois des connaissances du domaine et du retour d'expérience, quel que soit l'ouvrage considéré. Notre projet vise à proposer un tel outil dédié aux barrages que nous avons nommé SANBA. Il est composé d'une base de connaissances, SANBA-dom, dédiée aux barrages et axée plus particulièrement sur leur conception et réalisation, leurs modes de rupture et de dégradation et leur suivi et entretien (connaissances du domaine) couplée à une base de cas, SANBA-cas, décrivant de manière détaillée des incidents et accidents s'étant produits sur des ouvrages (diagnostic, conséquences et actions correctives). Ce couplage permet de rassembler en un seul outil les connaissances du domaine et les connaissances issues de retours d'expériences. Concernant les connaissances du domaine, cet outil est dans la lignée du produit VIGIE BARRAGE. L'outil SANBA-dom étend cependant l'outil VIGIE BARRAGE sous trois angles principaux : (i) des connaissances sur la conception et la réalisation des ouvrages, (ii) des types d'utilisateurs potentiels plus nombreux et aux niveaux de compétences différents et (iii) la possibilité de consultation des connaissances de manière interactive via Internet.

Cette base de connaissances est destinée à un public large notamment constitué par des étudiants, des enseignants, des ingénieurs débutants ou confirmés sur le domaine pouvant appartenir à différents organismes tels que services de contrôle de l'Etat, bureaux d'études, collectivités territoriales, gestionnaires et propriétaires d'ouvrages, établissements de recherche et d'enseignement.

Tableau 1. Comparaison des champs des différentes bases de cas passés d'accidents et incidents

	ARIA	NPDP	BHDF	SANBA-cas
Caractéristiques de l'ouvrage	Installations concernées : Site Unité concernée Etudes géologiques préalables* Mise en eau du barrage* * : uniquement pour une fiche	Identifiant NPDP Nom barrage Type ouvrage, Hauteur Classe de danger Etat géographique Ville la plus proche, distance à cette ville Cours d'eau Charge Site, structure et matériaux	Nom du barrage Pays Date de construction Type de barrages Hauteur Longueur Capacité	Identification (5 champs) Description technique (22 champs) Dispositif de mesure Données hydrologiques Etudes disponibles
Caractéristiques de l'accident ou incident	Accident, son déroulement, ses effets et ses conséquences Origine, causes, circonstances de l'accident	Date de l'événement Rupture de l'ouvrage (oui/non) Description de la rupture Mode de rupture Sous-type de l'événement Description de l'événement	Date de la rupture ; Causes de la rupture Données dommages sur personnes Données pertes économiques	Date Mode de dégradation
Suites données à l'accident ou incident	Suites données	Post-rupture – suites aux événements Plan d'action d'urgence implémenté Conséquences		Actions correctives Comportement après actions correctives
Enseignements tirés	Enseignements tirés	Leçons tirées		
Références et mots-clés	Références	Références Mots-clés	Références	Sources utilisées

Démarche de développement de l'outil SANBA

Le développement de l'outil SANBA a débuté avec la définition d'un cahier des charges organisé selon les rubriques : contexte du projet, dispositions générales (délais, propriétés, confidentialité), description générale du produit (spécifications de l'outil, description des utilisateurs), objectifs de la base de connaissance (spécifications fonctionnelles, contraintes générales de développement, spécifications d'interface), qualités requises (facilité d'utilisation, fiabilité...), intégrité et sécurité. Nous nous sommes appuyés sur deux types d'utilisateurs finaux afin de définir les différentes spécifications du futur outil et son contenu : un étudiant en génie civil (dernière année d'école d'ingénieur) et des experts en génie civil, spécialistes des barrages.

La méthode que nous avons suivie pour le développement s'inspire de différents travaux et notamment ceux de [JON02, NOY01]. Elle s'articule selon quatre grandes étapes (cf. Figure 1) décrites dans les paragraphes suivants.

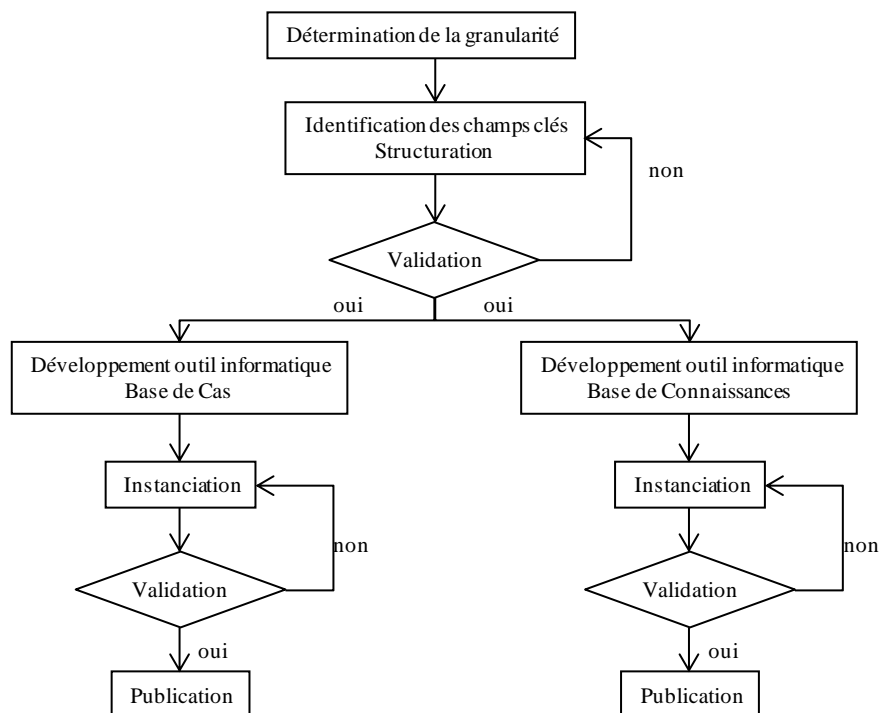


Figure 1. Démarche de construction de l'outil SANBA

3.1. Détermination de la granularité d'étude

Les objets de notre étude sont les phénomènes de vieillissement qui affectent le barrage au niveau de ses différents sous-systèmes (système de drainage, d'étanchéité) et composants (pour le sous-système de drainage : drain vertical, drain horizontal). Nous travaillons ainsi principalement à ce niveau et à celui des matériaux : par exemple, pour la description de l'érosion interne du remblai (rang intermédiaire), il sera précisé que ce mécanisme dépend notamment du transport des grains de matériau (rang inférieur) du remblai.

3.2. Identification et structuration des champs

La deuxième étape vise à identifier les champs structurant la base (« phénomènes », « indicateurs », « actions correctives »...) et des liaisons entre ces champs (indicateurs « permet d'évaluer » phénomène, actions correctives « permet de corriger » phénomène...). Cette phase est suivie d'une étape de validation auprès des experts. Une nouvelle phase d'identification et/ou de structuration des champs est menée le cas échéant après les séances de validation.

3.3. Développement d'un outil informatique

L'outil a été construit de manière à respecter un certain nombre de contraintes concernant :

- sa structuration : les champs de la base doivent être définis de manière à renseigner l'utilisateur de manière pertinente et sans ambiguïté. Les champs essentiels pour un retour d'expérience pertinent doivent être bien réfléchis (exhaustivité) ;
- sa validité : l'ensemble des champs et de leurs instances doivent être consensuels c'est-à-dire avoir reçu l'approbation d'un groupe d'experts ;
- son apport pédagogique ;
- sa convivialité ;
- son évolutivité : de nouvelles connaissances doivent pouvoir être intégrées dans la base de manière simple.

Deux technologies informatiques différentes ont été utilisées pour chacune des composantes de l'outil SANBA : la composante SANBA-cas utilise une implémentation sous Symfony (framework PHP open-source) [ZAI11] et la composante SANBA-dom une technologie Wiki. L'utilisation de technologies Web permet de rendre facilement accessibles les connaissances et de simplifier leur saisie.

3.4. Instanciation

L'étape d'instanciation permet de renseigner les différents champs. Elle est menée par des experts habilités. Les sources de connaissances sont multiples : littérature scientifique et technique, rapports d'expertise, données expertes...

Résultats

4.1. Base de connaissances SANBA-dom

SANBA-dom est un outil de type encyclopédique axé sur la conception et réalisation et sur les modes de rupture et de dégradation des barrages. La Figure 2 présente les champs décrivant les connaissances du domaine et leur organisation. Il aurait été bien sûr possible de proposer d'autres structurations. Toutefois, celle-ci a été montrée comme pertinente auprès d'un groupe d'experts et d'étudiants en génie civil.

Bien que la technologie utilisée soit de type Wiki, nous avons choisi de réaliser une structuration de cette base et de renseigner chacun des champs par au moins une instance. Cet outil peut être en effet à usage pédagogique : cette structuration introduit un premier parcours pédagogique possible pour les apprenants.

La structuration est réalisée selon quatre grandes rubriques : Ouvrages, Systèmes de surveillance, Entretien de l'ouvrage et Organisation de la prévention. Nous détaillons ci-dessous le contenu de la rubrique Ouvrages.

La rubrique Ouvrages se décompose elle-même en 5 champs (cf. Figure 2) : Choix d'un site et d'un type d'ouvrage, Barrage, Fondations, Ouvrages Annexes et Cuvette-Retenue.

Pour le champ Barrage, sont ensuite décrits les différents types (barrage remblai, barrage poids, barrage contreforts multi-voûtes, barrage voûte) et pour chacun de ces types :

- des exemples d'ouvrages caractéristiques de ce type d'ouvrages : par exemple, le barrage de Serre-Ponçon pour un ouvrage en remblai en enrochements à noyau étanche ;
- les composants de ces ouvrages : d'une part, la fonction remplie par le composant du barrage à proprement parler (remblais amont et aval, système de drainage, système d'étanchéité...) et les informations sur leur conception et réalisation ;
- les modes de rupture et de dégradation les caractérisant. Par exemple, pour les barrages poids, le cisaillement dans le corps du barrage.

Il est à noter que certaines pages sont communes à plusieurs instances : ainsi, la page décrivant les systèmes de drainage (Rubrique Composant) est commune à l'ensemble des ouvrages (remblai, poids et voûte). Il n'y a donc pas une duplication de la Figure 2 pour chacun des Types d'ouvrages.

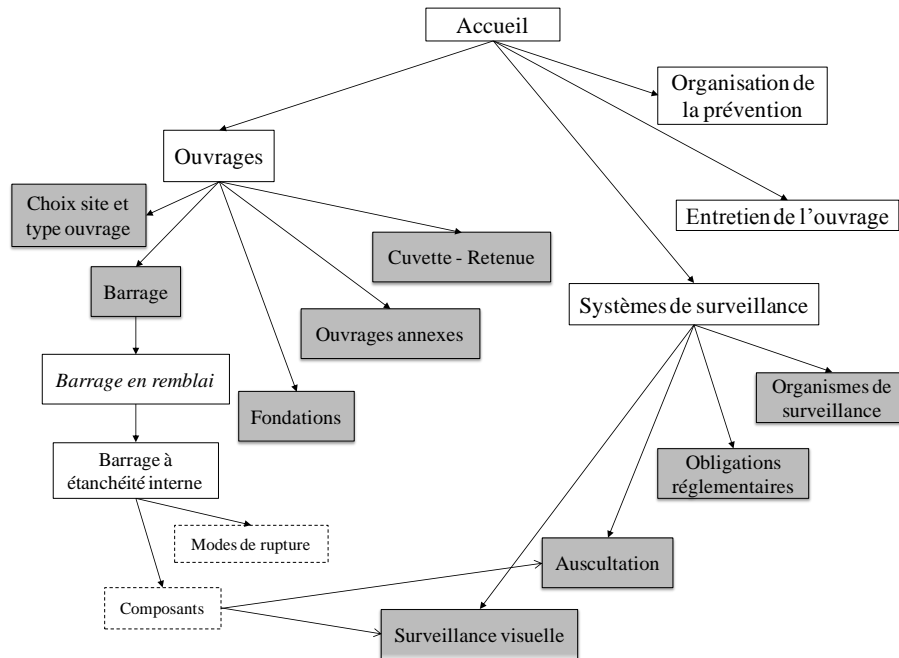


Figure 2. Structuration générale de la composante SANBA-dom (en fonction du niveau, les vues sont partielles)

Les différents champs peuvent être instanciés par des données de différents formats : textes, photographies, vidéos.

La Figure 3 fournit un exemple de page de l'outil SANBA-dom : description du phénomène d'érosion interne.

Mécanisme d'érosion interne

Les ruptures par érosion interne et par renard hydraulique ont représenté un peu plus de la moitié des ruptures des barrages en remblai entre 1950 et 1986, en excluant les ruptures pendant la construction (Foster et al., 2000). Elle constitue la première source d'incidents sur les ouvrages hydrauliques en terre (CFGB, 1997). Le mode de rupture par érosion interne peut toucher aussi bien la fondation que le remblai, y compris le noyau étanche. Il peut également se propager du remblai vers la fondation. Pour la période jusqu'à 1986, soixante-cinq pourcents des érosions internes se sont produites dans le remblai, trente pourcents dans la fondation et cinq pourcents du barrage vers la fondation (Foster et Fell, 2000).




Photo Irstea - Exemple de brèche suite à érosion interne.

Table des matières

- Mécanisme d'érosion interne
- Phénomènes d'arrachement
- Phénomènes de transport
- Les quatre phases de l'érosion interne
- Actions préventives et correctives
- Ouvrages de référence
- Références bibliographiques

Phénomènes d'arrachement

L'érosion interne est provoquée par l'existence de fuites 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. Huit phénomènes d'arrachement peuvent être à l'origine d'une érosion interne (IREX, 2003) :

- la boulangée : état d'un volume de sol dans lequel les grains flottent, entourés d'une phase liquide continue, sous l'effet d'une pression d'eau qui annule la contrainte effective. La boulangée se distingue de la liquéfaction par le mécanisme initiateur qui est d'origine hydraulique (l'écoulement) pour le premier et mécanique (les vibrations) pour le second ;
- la suffusion : mouvement des grains de petite taille non structuraux lorsque la vitesse locale (ou le gradient local) dépasse une certaine limite. Le mouvement des grains est ensuite conditionné par les conditions hydrauliques et géométriques de site ;
- l'érosion régressive : arrachement des particules, une à une, à la surface d'un matériau sous l'effet de la poussée de l'écoulement percolant à travers le matériau. La valeur locale du gradient hydraulique de sortie et les vitesses d'écoulement sont suffisantes pour détacher les particules de la surface. Sont distingués :
 - le débouillage : déséquilibre d'un volume de sol sous l'action de la poussée de l'eau que la résistance au cisaillement sur le pourtour du volume ne parvient plus à compenser. Il peut se produire dans le cas d'une fissure rocheuse ou d'un conduit karstique rempli de matériaux argileux et peut provoquer un élargissement de la fissure ;
 - la dissolution : disparition d'une partie des constituants des particules, sous une action chimique ou thermique ;
 - la défloculation ou dispersion : phénomène physico-chimique qui tend à diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses, disperser les plaquettes d'argile et faciliter leur mobilité.
- l'arrachement ou l'entraînement : détachement des particules des parois d'un canal ou d'une rivière à partir d'une certaine valeur du cisaillement engendré par l'écoulement. Ce phénomène commande la vitesse de développement des renards. Le débit solide évacué est fonction du rapport entre la contrainte de cisaillement réelle et la contrainte de cisaillement critique ;
- l'exsolation : de l'air piégé dans le noyau lors de la mise en eau est comprimé et partiellement dissous dans l'eau en partie amont du noyau. L'air est ensuite transporté par l'eau via le corps du barrage et relâché dans les parties aval du noyau où la pression de l'eau interstitielle est plus faible. Il en résulte une diminution locale de la perméabilité lors du piégeage de l'air et de fait une augmentation nette des pressions interstitielles (St-Arnaud, 1995)

Phénomènes de transport

Figure 3. Exemple de page de la base SANBA-dom

4.2. Base de cas passés d'accidents ou incidents : SANBA-cas

La page d'entrée de la base SANBA-cas présente la liste des barrages classés par type d'ouvrage : remblai en terre, remblai en enrochements, barrages poids, barrages à contreforts, barrages voûte, barrages à voûtes multiples, barrages poids voûte, autre, inconnu. Un clic sur un barrage particulier ouvre une deuxième fenêtre décrivant le barrage selon les 5 catégories de champs présentées dans le Tableau 1 : caractéristiques de l'ouvrage, caractéristiques de l'accident ou incident, suites données, enseignements tirés et références.

D'après le Tableau 1, en fonction de l'outil considéré, les champs sont plus ou moins détaillés. Pour ce qui concerne l'outil SANBA-cas, nous avons choisi de :

- Fournir une description poussée du barrage : 22 champs (dimensions, type de système d'étanchéité des fondations, type de drainage...) peuvent être renseignés ;
- Lister l'ensemble des dispositifs d'auscultation et leur type : par exemple, le barrage est équipé de 3 instruments de mesure piézométrique de type cellules de pression. Il nous est apparu important de présenter ces dispositifs de mesure qui ont un rôle essentiel dans le suivi du comportement des barrages. Ces dispositifs ne sont pas listés dans les 3 autres outils ;
- Ne pas indiquer de champs spécifiques « Leçons tirées » mais d'indiquer les enseignements tirés dans un champ commentaires. Un enseignement spécifique ne peut pas toujours être tiré d'un accident : il peut être lié à une cause déjà connue telle qu'une conception ou une réalisation inappropriée, une maintenance inadaptée ou insuffisante...

Nous avons cherché à faciliter la tâche du rédacteur par la mise en place notamment de deux structures. Primo, des listes déroulantes sont proposées pour renseigner la plupart des champs (hormis les commentaires) : ceci permet l'utilisation des mêmes termes d'un ouvrage à l'autre. Secundo, des champs commentaires peuvent être renseignés pour de nombreux champs : ils permettent de fournir des informations complémentaires intéressantes.

De la même manière nous avons cherché à faciliter la tâche du lecteur : seuls les champs renseignés apparaissent à l'écran ; une première page permet d'avoir un aperçu global et des zones « Voir » permettent d'avoir plus de détails (cf. Figure 4), libre au lecteur d'approfondir ou non ses connaissances sur l'ouvrage consulté.

La Figure 4 donne un exemple de descriptif pour le barrage de Cublize ayant subi une érosion interne et un début de glissement dans le corps du barrage. La page montre la description de l'incident ainsi qu'une partie des actions correctives initiées suite à cet incident. Un clic sur « Voir » fournit plus de détails sur les actions correctives. Un schéma présentant une coupe du barrage est également disponible.

Différents types de barrage ayant subi des défaillances plus ou moins sérieuses ont été renseignés dans la base [MIA12]. La base en cours de remplissage comporte actuellement une dizaine de cas documentés pour l'ensemble des champs de la base.

Cubize (1988 - Erosion interne) : 09/1988 - Érosion interne dans le remblai...

Typologie

Barrage	Cubize (1988 - Erosion interne)
Date	09/1988
Type de mode de rupture	Progressive + Partielle
Mode de dégradation	Érosion interne dans le remblai à étanchéité interne
Origine	Conception / Réalisation
Cause	Mauvaise conception du dispositif du drainage vertical

Description

A l'occasion d'une visite de contrôle en septembre 1988, soit dix ans après la mise en eau du barrage, une zone particulièrement humide est repérée au pied aval du remblai. Cette constatation, jamais observée précédemment, donne lieu à des recommandations de surveillance rapprochée. En mi-octobre 1988, la zone humide s'est agrandie et des glissements localisés sont observables sur une dizaine de mètres de longueur sous la risberme aval (autour de la cote 429,50). Deux jours plus tard, des venues d'eau avec entraînement de matériaux sont alors visibles dans les mêmes secteurs et la décision de vidanger totalement le plan d'eau est alors prise en urgence.

L'analyse des mesures d'auscultation et des reconnaissances complémentaires ont mis en évidence :

- les pressions interstitielles

Après une montée des pressions lors du premier remplissage (octobre 1978), les mesures se stabilisent rapidement à des cotes normales.

C'est à partir d'avril 1979 que les pressions mesurées indiquent des valeurs non conformes à un fonctionnement normal : tout d'abord, une première montée des pressions sur les cellules inférieures (C4 et C5) est constatée. Ensuite en juillet 1980, c'est au tour de C3 de connaître une augmentation pour atteindre des valeurs correspondant à la cote du NNE dès novembre 1980. Ces mesures montrent le colmatage effectif de la partie inférieure du drain dès avril 79. A compter juillet 80 et jusqu'à novembre 1980, la montée rapide de la ligne piézométrique dans le remblai en amont immédiat du drain indique clairement le colmatage du drain et une diminution sensible de sa capacité à évacuer les infiltrations.

- les débits des drains

Après une montée progressive et normale des débits de drainage jusqu'en novembre 1980, une première diminution est observée de novembre 1980 à novembre 1981, indiquant le colmatage du drain vertical. Ces mesures concordent avec celles de la piézométrie, avec un léger effet retard classique sur les débits.

La vidange partielle de la retenue en novembre 1981 a certainement eu un effet de nettoyage partiel des drains et les débits sont alors remontés autour d'un maximum de 1,5 l/s environ. A partir d'octobre 1982, les débits décroissent progressivement jusqu'en octobre 1984 pour atteindre des valeurs très basses de l'ordre de 0,1-0,2 l/s. Ces dernières valeurs traduisent le colmatage quasi-intégral du dispositif de drainage.

- des tranchées de reconnaissance

Réalisées quelques semaines après la vidange d'urgence, elles ont mis en évidence une zone de circulation préférentielle dans le remblai aval, autour de la cote 429,50 (cote atteinte par le remblai lors de la longue interruption des travaux au cours de l'hiver 1977-1978). Ainsi, la zone du matériau saturé intéresse toute l'épaisseur du remblai sous la risberme aval.

L'ensemble des investigations menées sur le barrage de Cubize ont conduit au 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 (granulométrie grossière) 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 du NNE). La saturation des matériaux du talus aval a abaissé ses caractéristiques mécaniques et provoqué les premiers glissements superficiels (les rapports d'expertise ont évalué le critère de stabilité au glissement du remblai aval à 1,10 en octobre 1988). 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.

Actions correctives

Action corrective	Vidange totale de la retenue	<input type="button" value="Voir"/>
Action		

Figure 4. Exemple de page de la base SANBA-cas

4.3. Les droits d'accès

Pour ce qui concerne la lecture, tout public pourra avoir accès à la composante SANBA-dom une fois les données publiées donc validées (cf. Figure 1). Pour la composante SANBA-cas, deux modalités sont distinguées. Certaines fiches seront accessibles à tout public : il s'agit de cas connus d'incidents déjà analysés dans des publications. Ces fiches pourront faire l'objet de renvoi depuis et vers la base SANBA-dom. D'autres ne seront pas accessibles à tout public mais le seront auprès d'experts disposant de droits spécifiques : ce sont les cas confidentiels et non publiés.

Pour ce qui concerne l'écriture, seuls des experts habilités par l'équipe projet pourront renseigner les deux composantes de l'outil.

Applications

L'outil SANBA peut être utilisé à des fins de formation. La structuration de la base SANBA-dom, que nous avons voulue forte dès le départ, doit permettre de comprendre les différents éléments importants d'un barrage, son fonctionnement et le contexte : composants, modes de rupture, législation... Deux perspectives nous paraissent intéressantes en termes de pédagogie :

- d'une part, la description de parcours pédagogiques plus ou moins longs ou axés sur un thème donné comme par exemple appréhender un mécanisme spécifique comme l'érosion interne. Il s'agira de fournir une séquence d'apprentissage découpée en modules : pour l'érosion interne, les modules pourront concerner les composants touchés, les causes du phénomène, sa détection, les actions correctives préconisées, la présentation de cas de barrages ayant subi ce mécanisme... Ce parcours pourra être séquencé : il sera par exemple indispensable dans le cas de l'étude du mécanisme d'érosion interne de connaître les composants concernés, qui constitue alors un module pré-requis, avant de pouvoir étudier les causes du phénomène ;
- d'autre part, le développement de pages spécifiques proposant des exercices (calculs, QCM, résolution de cas). Ces pages pourront constituer un module spécifique dans le parcours pédagogique.

Ces éléments pourront être complétés par l'étude des cas réels fournis par la base SANBA-cas.

La composante SANBA-cas est également un outil de formalisation du retour d'expérience. Il permet à des spécialistes d'étendre leur palette de cas connus par des cas très rarement rencontrés voire pour les ruptures d'ouvrages, par des cas uniques du fait que les barrages sont eux-mêmes uniques. Il rejoint les préoccupations de l'ingénierie forensique dans le sens où les causes de la défaillance sont recherchées. SANBA-cas dans sa configuration actuelle reste néanmoins uniquement axé sur les aspects techniques et organisationnels.

Conclusion

Nous avons proposé dans cet article une démarche de développement d'un outil de capitalisation des connaissances et de retour d'expérience dédié aux barrages et à leur sécurité. L'outil prototype SANBA est composé d'une base de connaissances, SANBA-dom, dédiée aux barrages et axée plus particulièrement sur leur conception et réalisation, leurs modes de rupture et de dégradation, leur suivi et entretien (connaissances du domaine) couplée à une base de cas, SANBA-cas, décrivant de manière détaillée des incidents et accidents s'étant produits sur des ouvrages (diagnostic, conséquences et actions correctives). Les technologies informatiques mises en œuvre sont adaptées à l'objectif de chacune des composantes. L'utilisation de technologies Web permet de rendre facilement accessibles les connaissances et de simplifier leur saisie. Ces deux outils seront prochainement liés par un certain nombre de champs : par exemple, dans SANBA-dom le chapitre décrivant l'érosion interne dans le remblai, phénomène pouvant mener à la ruine de l'ouvrage, renvoie à des exemples de barrages, présents dans SANBA-cas, ayant subi cette pathologie et réciproquement.

Ces bases sont en cours de remplissage et de validation, actuellement en interne au sein d'Irstea Aix-en-Provence, puis seront ensuite accessibles à un public extérieur à des fins de lecture et d'écriture selon les droits conférés à chaque type d'utilisateur.

La démarche et la structure de l'outil peuvent être utilisées pour d'autres ouvrages du génie civil ou pour d'autres domaines.

Références

- [CUR07] Curt C., Boissier D., "Pathologie des barrages : développement d'une base de connaissances et application aux ouvrages en remblai", *Actes XXVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bordeaux, France, 2007.
- [EDF98] EDF-CEMAGREF, Vigie-Barrages, EDF-CEMAGREF, pages, 1998.
- [FAU07] Faure N., Faure R. M., Hémond G., "Le projet RAMCESH et son application aux tunnels", *Tunnels et ouvrages souterrains*, 2007, 351-363.
- [ICO73] ICOLD, World register of dams, ICOLD, Paris, France, 1973.
- [ICO74] ICOLD, Lessons from dam incidents, ICOLD, Paris, France, 1974.
- [ICO94] ICOLD, Ageing of dams and appurtenant works - Review and recommendations, CIGB, 1994.
- [ICO95] ICOLD, Bulletin 99 - Dam failures, statistical analysis, ICOLD, Paris, France, 1995.
- [JON02] Jones D., Bench-Capon T., Visser P., Methodologies for ontology development, Midterm Rapid Knowledge Formation evaluation project, 2002.

[MIA12] Mialet G., Méthodes de formalisation des connaissances - Application aux barrages hydrauliques et de correction torrentielle, Rapport de stage Irstea - Polytech Clermont-Fd.

[NOY01] Noy N. F., McGuinness D. L., A Guide to Creating Your First Ontology, Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880, 2001.

[VOG04] Vogel A., Busswald P., Niederl F., "The world largest data base on dam failures data acquisition, management, protection and Internet-based applications", *Actes 6th International Conference on Hydroinformatics*, Singapore, 2004.

[ZAI11] Zairi M., Développement d'une base de connaissances interactive dédiée aux barrages, Rapport de stage Cemagref- ISIMA, 2011.

Liste des sites Internet cités dans l'article

Analyse, Recherche et Information sur les Accidents : www.aria.developpement-durable.gouv.fr

Association Mondiale de la Route : <http://tunnels.piarc.org/fr/>

Centre d'Etudes des Tunnels : <http://www.outils-cetu.fr/didactu/Index.html>

Département de génie civil de l'Institut Indien de Technologie de Delhi : <http://ws2.cdacmumbai.in/projects/vidyakash/online-content/webiit/bridge/homefra.htm>

National Performance of Dams Program : npdp.stanford.edu/index.html

UNIT - Cyberrisques : <http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/index.htm>