

---

# Efficacité des ouvrages de correction torrentielle

## Indicateurs basés sur la sûreté de fonctionnement

Jean-Marc Tacnet <sup>1</sup> — Benjamin Rey <sup>1</sup> — Corinne Curt <sup>2</sup> — Didier  
Richard <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cemagref-ETGR

2, rue de la papèterie - B.P. 76 - F-38402 Saint Martin d'Heres Cedex

contact : jean-marc.tacnet@cemagref.fr

<sup>2</sup> Cemagref-OHAX

3275, route Cézanne - CS 40061 - F-13182 Aix-en-Provence Cedex 5

---

*RÉSUMÉ.* Les concepts classiques de la sûreté de fonctionnement sont discutés pour analyser l'efficacité des ouvrages de protection contre les crues torrentielles. Des intervalles flous sont utilisés pour évaluer les indicateurs décrivant les défaillances possibles et le niveau de performance des dispositifs. La méthodologie contribue à expliciter les raisonnements expert et caractériser le niveau de danger d'un ouvrage.

*ABSTRACT.* Classic concepts of dependability are discussed to assess the efficiency of protection works against torrential floods. Fuzzy intervals are used to assess the indicators that describe the possible failures and the performance level of disposals. The methodology allows to elicit the expert reasoning process and also evaluate the danger level of the protection works.

*MOTS-CLÉS :* risques naturels, montagne, ouvrages de protection, expertise, génie civil, performance, efficacité, sûreté de fonctionnement

*KEYWORDS:* Mountain natural hazards, mitigation, defence works, civil engineering, performance, efficiency, dependability

---

## 1. Introduction

Les crues torrentielles constituent une menace aussi intense que soudaine pour les enjeux humains et matériels. Les matériaux solides arrachés au lit et aux berges par l'eau accélérée par la pente se déposent en majorité sur le cône de déjection là où les populations sont préférentiellement installées. Pour se protéger, les barrages de consolidation visent à stabiliser le profil en long des torrents et recentrer les écoulements en limitant les divagations latérales dans le chenal d'écoulement des torrents. Les digues et canaux de correction torrentielle contiennent les écoulements alors que les barrages de sédimentation stockent les matériaux (figure 1).

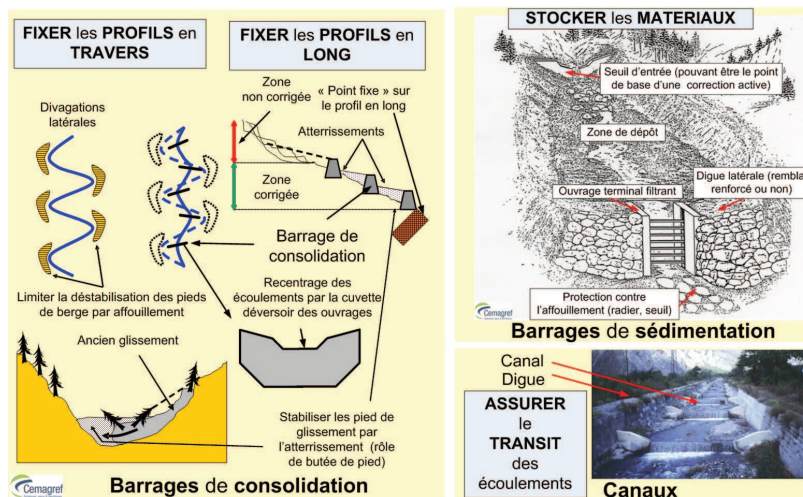
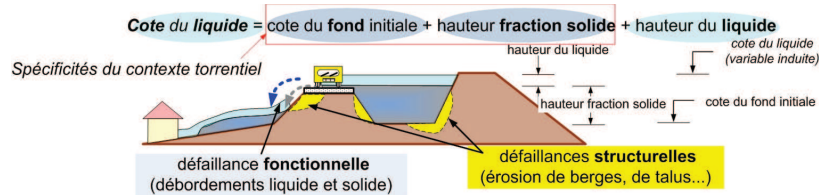


Figure 1. Principaux types et fonctions des ouvrages de correction torrentielle

Le débordement, forme de défaillance fonctionnelle d'ouvrages de type digue ou canal, ou barrages de sédimentation est ainsi dû à la fois au fort transport solide et à la fraction liquide (figure 2).

La question de l'efficacité de ces ouvrages est primordiale. Elle se pose de manière récurrente aux gestionnaires et maîtres d'ouvrage par exemple dans le cadre d'analyse de situations de dangers relatives aux digues et barrages (MEEDDAT, 2008)<sup>1</sup> mais aussi de priorisation d'actions de maintenance, investissement, renforcement ... L'objectif est donc de mieux définir le concept d'efficacité et de proposer des modes de quantification. Les ouvrages de correction torrentielle sont soumis à des cas de charges extrêmes et sont implantés dans des contextes géotechniques particuliers. Des situations telles que l'affouillement à l'aval d'un barrage de consolidation

1. devenu le MEDDTL (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement) en 2011



**Figure 2.** Défaillances structurelles et fonctionnelles d'une digue de correction torrentielle

font, contrairement aux ouvrages de génie civil classiques, partie du fonctionnement normal et attendu de l'ouvrage. L'efficacité (ou la performance) de ces types d'ouvrages nécessite donc des approches spécifiques adaptées aux cas de charges (Tacnet *et al.*, 2010a). Cet article discute le concept d'efficacité des ouvrages de correction torrentielle et propose une démarche pour l'évaluer d'un point de vue structurel et/ou fonctionnel. La section 2 rappelle et critique les méthodes et critères de la sûreté de fonctionnement dans le contexte d'ouvrages de protection. La section 3 décrit la méthodologie adoptée et discute les concepts d'efficacité et de performance avant d'envisager leur évaluation floue dans le cadre d'une approche experte. Enfin, la discussion et la conclusion (section 4) décrivent les principaux résultats et les perspectives de développement.

## 2. Sûreté de fonctionnement et performance

Issue du domaine industriel, la sûreté de fonctionnement (SdF), présentée comme la "science des défaillances et des pannes" (Mortureux, 2001), vise à mesurer et justifier un niveau de confiance vis-à-vis des services attendus d'un système (Magne *et al.*, 2006). Elle vise à réduire le nombre de défaillances potentielles du système et à maîtriser les conséquences des défaillances résiduelles contribuant ainsi à optimiser les performances techniques et économiques du système. La sûreté d'un système est mesurée par quatre indicateurs. La fiabilité quantifie la capacité du système à rester en service pendant un intervalle de temps prédéfini. La maintenabilité représente la capacité de l'organisation à détecter/diagnostiquer l'état de dysfonctionnement partiel ou total d'un système puis à le réparer et le remettre en service. La disponibilité décrit la durée pendant laquelle le système est apte à assurer sa mission. La sécurité correspond à la capacité d'un système à éviter de produire des événements critiques pour lui-même et son environnement.

La mise en œuvre repose essentiellement sur une analyse fonctionnelle préalable, définie selon l'AFNOR<sup>2</sup> comme "une démarche consistant à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions du système". Cette structuration

2. Norme NF C01-191, décembre 1992

du système est suivie par une AMDE<sup>3</sup> et une AMDEC<sup>4</sup> pour chaque fonction des composants du système. La criticité combine la gravité, la fréquence et la capacité à détecter la défaillance (Mortureux, 2001). Dans notre contexte, il s'agit par exemple d'identifier les défaillances structurelles et fonctionnelles puis d'évaluer leur criticité par rapport aux fonctions principales des ouvrages (centrer les écoulements, stabiliser le profil ...) (figure 3).

Composant cuvette déversoir				
Fonction	Mode de défaillance	Causes possible de la défaillance	Effets possible de la défaillance	Symptômes (mesurables par des indicateurs)
Recentrer l'écoulement du torrent	Orientation de l'écoulement inadapté (Ecoulement non centré)	- Erreur d'implantation - Calibrage hydraulique insuffisant - Obturation de la section par dépôt excessif, embâcles	- Déviation de l'écoulement - Erosion de berge aval - Affouillement fondation des ailes - Contournement de l'ouvrage - Impact couronnement cuvette	- Angle de déviation de l'écoulement (°) - Volume de berge (aval) érodée (m <sup>3</sup> ) - Pourcentage d'obturation de la section (%) - Longueur d'aile submergée (m) - Largeur d'érosion extrémité d'aile (m)

**Figure 3.** Exemple d'AMDE de la fonction "recentrer les écoulements" du composant cuvette déversoir d'un système barrage de consolidation

Dans leur version originale, les critères de la SdF (fiabilité, maintenabilité ...) nécessitent la définition d'un "objectif de référence" ou mission "nominale" devant être assurée pendant un intervalle de temps donné. En première approche, ces références font défaut sous une forme aussi explicite dans le contexte des risques naturels. Les objectifs de conception des barrages de consolidation, par exemple, se limitent la plupart du temps à la définition de cas de charges relatifs au volet structurel. D'un point de vue fonctionnel, les objectifs de conception manquent. Les volumes de berges à stabiliser, les longueurs de pied de versant à protéger, les modes de fonctionnement en cas de crue d'eau claire, de charriage hyper-concentré ou de lave torrentielle sont rarement explicitement décrits. D'autres verrous méthodologiques portent sur la différence effective entre les notions de performance et d'efficacité et sur la définition des systèmes étudiés (Tacnet *et al.*, 2010b) : l'environnement extérieur fait-il partie ou pas du système relatif à la description d'un ouvrage de protection ? Des éléments méthodologiques d'adaptation sont proposés et discutés ci-dessous.

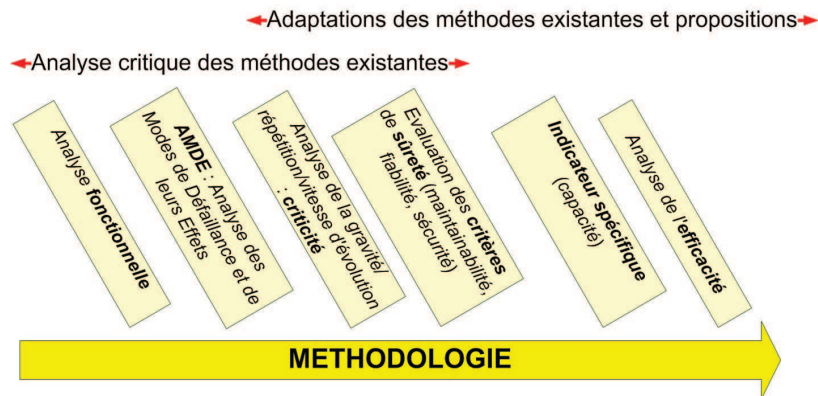
3. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

4. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

### 3. Concept et méthodologie d'évaluation de l'efficacité

#### 3.1. Méthodologie globale

La méthodologie globale de la sûreté de fonctionnement est conservée. Trois étapes apparaissent comme essentielles pour mettre en oeuvre ces méthodes dans notre contexte : l'analyse fonctionnelle, la définition du concept d'efficacité et la proposition de mode d'évaluation des critères de la sûreté de fonctionnement (figure 6).



**Figure 4.** Description de la méthodologie SdF adaptée au contexte des ouvrages de protection

#### 3.2. Analyse des défaillances structurelles et fonctionnelles

Le concept de défaillance se réfère à une fonction nominale pré-définie d'un système, identifiée dans le cadre d'une analyse fonctionnelle. Pour les ouvrages de correction torrentielle, cette analyse fonctionnelle systématique et complète fait encore défaut, contrairement à d'autres ouvrages de nature industrielle voire d'ouvrages hydrauliques plus classiques (barrages, digues). Elle pose aussi une question méthodologique car la notion de défaillance porte ici à la fois sur les composants anthropiques que l'on a mis en place dans le système pour tenter de réduire les effets dommageables d'un phénomène naturel mais aussi sur le contexte d'implantation des ouvrages (environnement géotechnique, hydrogéologique ...).

La méthodologie proposée reprend les phases classiques d'analyse fonctionnelle interne et externe des systèmes comprenant la décomposition en composants et l'identification des modes de défaillance à partir d'objectifs de conception structurels et fonctionnels (voir exemple sur la figure 2). Les défaillances structurelles sont analysées en terme de pathologies d'ouvrages de génie civil (Tacnet *et al.*, 2010a). L'originalité consiste ici à expliciter et décrire les défaillances fonctionnelles associées aux

ouvrages de protection (figure 5) et s'en servir de base pour évaluer l'efficacité fonctionnelle (figure 7) .

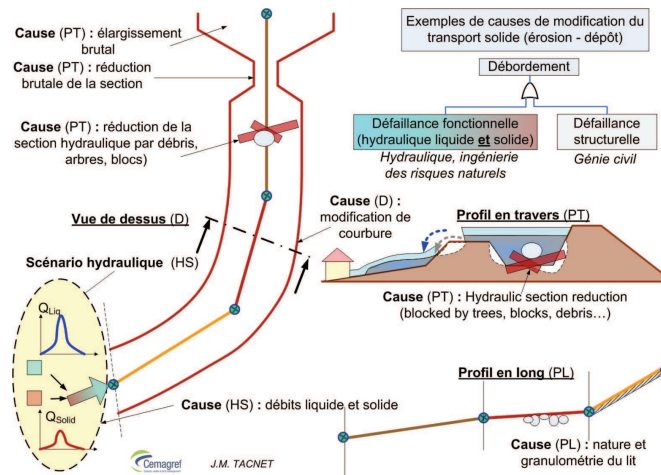


Figure 5. Méthodologie et critères d'efficacité fonctionnelle des digues torrentielles

### 3.3. Concepts de capacité et d'efficacité

La perte de performance des ouvrages hydrauliques, associée au vieillissement des barrages, est analysée en utilisant les méthodes de la sûreté de fonctionnement (Peyras, 2003; Curt, 2008). La performance correspond ici à *l'aptitude du système à réaliser sa mission*. Elle dépend de performances unitaires évaluées par rapport à la dégradation de chacune des fonctions principales du système. L'efficacité, critère d'appréciation important pour les gestionnaires, n'est pas un des critères natifs de la sûreté de fonctionnement. Les concepts de capacité, d'efficacité et de performance sont liés à la réalisation des fonctions du système. La capacité correspond aux caractéristiques techniques mesurables associées à une fonction : le volume d'atterrissement associée à la fonction "*stabiliser le profil en long*" (figure 8) . L'efficacité peut être considérée comme équivalente au concept de performance. Elle repose sur la définition d'un objectif de référence nominal liant un composant, une fonction et un objectif ou une mission (figure 6).

Un ouvrage est jugé efficace si sa capacité (ou niveau de performance) est conforme à ses objectifs de conception. Cette définition induit une difficulté d'application au contexte des risques naturels dans la mesure où les objectifs nominaux des ouvrages sont rarement clairement explicités notamment dans le cas des barrages de consolidation. D'autre part, dans la mesure où les ouvrages de protection visent à limiter le niveau de risque, leur efficacité, dépendant des défaillances observées, est in-

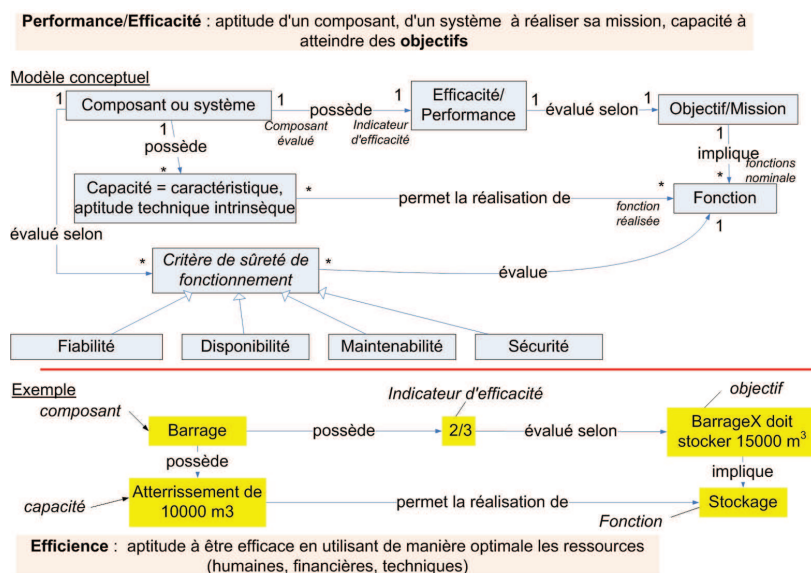


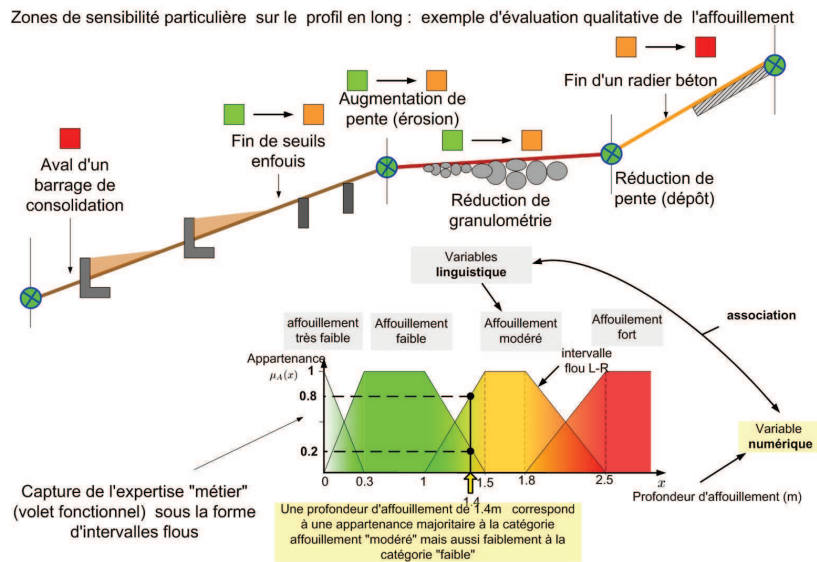
Figure 6. Définition des concepts d'efficacité et de performance

directement liée au niveau de danger en aval ou à proximité des ouvrages. L'efficacité globale dépend des deux volets structurels et fonctionnels (?). L'efficacité structurelle est ainsi une condition nécessaire mais pas suffisante pour assurer l'efficacité globale de l'ouvrage.

### 3.4. Indicateurs pour l'évaluation de l'efficacité

Les notions de fiabilité, de maintenabilité, de sécurité et de disponibilité sont transposables au contexte des ouvrages de protection torrentielle à condition d'établir les références temporelles d'évaluation et les objectifs fonctionnels. Ces notions sont les critères mesurés à l'aide d'indicateurs liés à l'environnement et aux composants du système. La fiabilité correspond à la réalisation des fonctions du système relativement à la durée de référence choisie (durée de vie de l'ouvrage, durée d'exploitation...). La maintenabilité du système est liée aux conditions d'entretien par les gestionnaires. La sécurité correspond à l'étude des menaces de l'environnement ou du système extérieur pouvant engendrer une situation critique. Des indicateurs mesurables sont nécessaires pour évaluer les critères de la sûreté du système et son efficacité. En effet, les tableaux d'analyse des défaillances (AMDE) ne permettent pas d'évaluer directement l'efficacité de l'ouvrage. Des indicateurs relatifs aux différentes fonctions des ouvrages sont nécessaires (Curt, 2008). Nous proposons ici des indicateurs associant les capacités des ouvrages et leurs fonctions.

La démarche consiste à introduire et baser l'évaluation de la performance/efficacité sur l'utilisation de nombres (et/ou intervalles) flous. Des grandeurs quantitatives telles que des volumes mobilisables, des volumes d'atterrissement, des profondeurs d'incision du lit... sont ainsi rattachées à des classes qualitatives sur lesquelles les experts peuvent plus facilement s'exprimer et raisonner (variables linguistiques). La profondeur d'affouillement (figure 7) est un exemple de grandeur numérique associée à des classes qualitatives linguistiques (faible, modéré,...) par le biais d'intervalles flous (Zadeh, 1965). L'identification de ces nombres flous permet au final l'évaluation comparative d'ouvrages et de tronçons de torrent, même en situation de méconnaissance partielle et d'informations vagues. Elle constitue aussi une formalisation et une capitalisation du savoir-faire et de la connaissance thématique des experts en hydraulique torrentielle.



**Figure 7.** Evaluation qualitative de la sensibilité du lit à l'affouillement

La mise en oeuvre consiste ainsi, dans un premier temps, à définir explicitement les capacités des ouvrages (associées à leurs caractéristiques techniques) qui sont les critères de base pour décrire le système puis, dans un second temps, à évaluer l'efficacité dès lors que des objectifs de référence sont identifiés.

Cette approche présente un autre intérêt et objectif : l'évaluation d'indicateurs de performance (ou d'efficacité), pour des ouvrages dont la fonction est de limiter les risques, est implicitement associée à un niveau de risque à l'aval de ces ouvrages. Un ouvrage très performant (efficace) joue son rôle de protection. Un ouvrage peu efficace n'assure pas ou mal sa fonction de protection et peut aussi induire un danger supplémentaire en cas de rupture. Ces indicateurs permettent donc de discriminer les



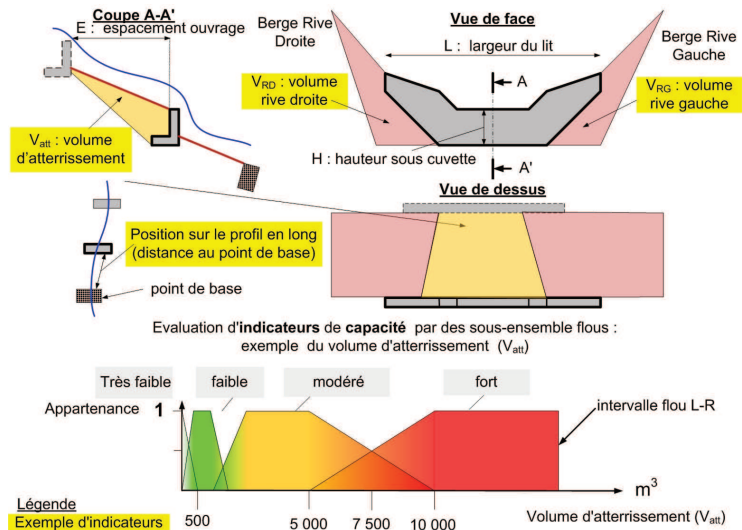


Figure 8. Exemples d'indicateurs de capacité d'un barrage de consolidation

zones les plus exposées aux diverses défaillances d'ordre fonctionnel et structurel, avec une application dans le cadre de la prévention des risques (protection) mais aussi des phases préliminaires et qualitatives des études de danger qui s'intéressent aux dangers additionnels liés à la rupture d'ouvrage.

#### 4. Discussion - Conclusion

L'approche proposée explicite clairement le concept d'efficacité et permet de le positionner par rapport aux concepts classiques de la sûreté de fonctionnement. La méthodologie proposée ici exploite les méthodes issues de la sûreté de fonctionnement pour caractériser l'efficacité des ouvrages de protection contre les risques torrentiels à partir des critères de sûreté et de capacité. Le concept d'efficacité, équivalent à notre sens à celui de performance, n'a finalement de sens que par rapport à une référence fixée au niveau fonctionnel et temporel : quel objectif, mission est-ce que l'ouvrage doit assurer pendant combien de temps ? En l'absence de référence, seules des capacités peuvent être identifiées. Ces références existent rarement et les définir en reconstituant l'objectif initial d'ouvrages ou de dispositifs anciens est difficile. La mise en oeuvre et l'utilisation opérationnelle d'analyse de défaillance nécessitent la proposition d'indicateurs pouvant être mesurés effectivement. La représentation par la logique floue permet l'évaluation d'indicateurs d'efficacité issus de l'analyse experte. Même sous une forme floue, ces indicateurs contribuent au classement qualitatif de zones, ouvrages plus sensibles que d'autres sur les plans structurels mais aussi fon-

tionnels, cet aspect étant plus original et innovant. Ils constituent ainsi des aides pour les décisions de gestion des ouvrages.

Ce travail<sup>5</sup> sert d'ores et déjà de support méthodologique dans le cadre des approches exploratoires d'extension des études de danger au contexte des ouvrages de protection contre les risques torrentiels. Une première série d'indicateurs ont été proposés et constituent une base de discussion pour les experts. Certains verrous subsistent cependant. L'évaluation quantitative de la criticité (associée à la fréquence des défaillances) reste délicate : les probabilités associées aux défaillances demeurent bien souvent subjectives. L'association de la sûreté de fonctionnement aux théories de l'incertain (telle que la logique floue) et aux méthodes d'aide multi-critères à la décision (Tacnet *et al.*, 2009) constitue une piste pour formaliser la connaissance experte et expliciter cette criticité.

## 5. Bibliographie

- Curt C., Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances - Application aux barrages en remblai- Thèse de doctorat, PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont 2, Clermont-Ferrand, 2008.
- Magne L., Vasseur D., *Risques industriels. complexité, incertitude et décision : une approche interdisciplinaire*, Lavoisier, Paris, 2006.
- MEEDDAT, *Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu (J.O. du 19 juin 2008)*, Journal Officiel de la République Française, 2008.
- Mortureux Y., *Traité "L'entreprise industrielle" - "Sécurité et gestion des risques"*, Techniques de l'Ingénieur, chapitre La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques - Ref. AG 4 670, 2001.
- Peyras L., Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise - Thèse de doctorat, PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 2003.
- Tacnet J.-M., Batton-Hubert M., Dezert J., *Advances and applications of DSMT for Information Fusion - Collected works - Volume 3 - <http://fs.gallup.unm.edu/DSMT.htm>*, American Research Press, Rehoboth, USA, chapter Information fusion for natural hazards in mountains, p. 565-659, 2009.
- Tacnet J.-M., Richard D., « De la conception à la sûreté des barrages de correction torrentielle - <http://www.set-revue.fr/de-la-conception-la-surete-des-barrages-de-correction-torrentielle> », *Revue SET (Sciences, Eaux, Territoires)*, vol. 2, p. 164-175, 2010a.
- Tacnet J.-M., Richard D., Dezert J., Batton-Hubert M., « Aide à la décision et fusion d'information pour l'expertise des risques naturels : analyse de l'efficacité des ouvrages de protection », *Actes du colloque JFMS'10 - 6<sup>èmes</sup> journées de la fiabilité des matériaux et des structures*, Toulouse, France, 24-26 mars 2010, 2010b.
- Zadeh L., « Fuzzy sets », *Information and Control*, vol. 8, p. 338-353, 1965.

---

5. réalisé notamment dans le cadre du projet PARAMOUNT<sup>6</sup> 2009-2012 (programme européen InterReg Espace Alpin 2007-2013)