
Aide à la décision et fusion d'information pour l'expertise des risques naturels

Analyse de l'efficacité des ouvrages de protection

Jean-Marc Tacnet * — Didier Richard * — Jean Dezert — Mireille Batton-Hubert*****

* Cemagref- Unité Erosion Torrentielle Neige Avalanches (ETNA)
2, rue de la papeterie – B.P. 76, F-38402 Saint Martin d'Hères Cedex
{jean-marc.tacnet, didier.richard}@cemagref.fr

** Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA)
29, avenue de la division Leclerc – B.P. 72, F-92322 Châtillon Cedex
jean.dezert@onera.fr

*** Ecole des Mines de Saint-Etienne (EMSE) - Centre SITE
29, rue Ponchardier, F-42100 Saint-Etienne
batton@emse.fr

RÉSUMÉ. L'expertise permet d'analyser les phénomènes et les risques naturels, proposer des mesures de protection et qualifier leur efficacité. Pour aider à la décision, une approche polyvalente associant l'analyse multi-critères, la logique floue et la théorie des fonctions de croyance est proposée. Elle est compatible et complémentaire avec les principes des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement.

ABSTRACT. Expertise is essential to assess natural hazards and risks, to choose protection measures and evaluate their efficiency. A versatile method, mixing multicriteria decision making and imperfect information related theories (fuzzy logics, evidence theory) is proposed. This approach is compatible and complementary to safety and reliability based methods

MOTS-CLÉS : risques naturels, montagne, ouvrages de protection, expertise, génie civil, aide multicritères à la décision, information imparfaite, fusion d'information, logique floue, théorie des fonctions de croyance

KEYWORDS: Mountain natural hazards, mitigation, defence works, civil engineering, multicriteria decision making, information imperfection, information fusion, fuzzy logic, evidence theory

1. Introduction

Les phénomènes gravitaires rapides en montagne tels que les crues des torrents constituent un réel danger pour les enjeux humains et matériels en raison de l'intensité et de la soudaineté des phénomènes. Dans un bassin versant torrentiel, les eaux se concentrent tout d'abord dans le bassin de réception (partie somitale du bassin versant) soumis en montagne à des précipitations violentes et orageuses. L'eau s'écoule par ruissellement sur les versants puis se concentre en ravines convergeant vers le chemin d'écoulement. L'eau accélérée par la pente entraîne des matériaux solides de plus en plus gros allant des particules les plus fines à des blocs rocheux de grande taille. Le lit s'incise, les berges se déstabilisent avant que la crue ne débouche à forte vitesse sur la partie aval du bassin versant, le cône de déjection où la pente plus faible va entraîner un dépôt des matériaux et provoquer des débordements. C'est dans cette partie plus plate du bassin versant, où le torrent rejoint la vallée que les populations se sont préférentiellement installées (figure 4). Pour ces phénomènes, les mesures d'urgence et d'évacuation sont difficilement envisageables. Les travaux de protection contre les crues torrentielles réalisés de l'aval à l'amont des bassins versants ont un rôle essentiel pour agir à la fois sur les causes (la production de sédiments) dans le cadre d'une protection dite "active" et les effets (débordement, impacts de blocs) des phénomènes dans le cadre d'une protection dite "passive". L'expertise des risques torrentiels vise à déterminer les apports liquides, identifier, localiser et quantifier les apports en matériaux solides, analyser leurs transports, caractériser les conséquences sur les enjeux et proposer des mesures de protection. La prise en compte des ouvrages en tenant compte de leur état dans l'analyse du risque reste une question primordiale pour les gestionnaires avec notamment des obligations réglementaires (MEEDDAT, 2008). L'enjeu apparaît donc comme double. Il s'agit d'une part d'expliquer les facteurs et critères d'efficacité des ouvrages et des stratégies de protection et, d'autre part, de prendre en compte le caractère vague et incertain de l'information dans le cadre du processus de décision associé à la gestion des ouvrages.

Cet article présente tout d'abord les problématiques globales d'expertise et de décision associées à l'analyse de l'efficacité des ouvrages de correction torrentielle. Il décrit ensuite une méthodologie générique d'aide à la décision dans un contexte d'information imparfaite associant l'aide multi-critères hiérarchique à la décision et la fusion d'information. La section 2 décrit le contexte de la gestion du risque, les différents types de mesures de prévention mises en œuvre et rappelle le contexte d'application de la sûreté de fonctionnement au cas des barrages. La section 3 rappelle les principes des méthodes d'aide multicritères à la décision et des théories de représentation de l'information imparfaite. La section 4 décrit les principes de la méthodologie associant l'analyse multicritères hiérarchique (*AHP*) et la fusion d'information en donnant quelques extraits d'une application réalisée dans le domaine de la gestion du risque. Enfin, une conclusion et une description des perspectives de développement associées à la méthodologie proposée sont données en section 5.

2. Expertise, décision et fiabilité

2.1. Les mesures structurelles et non-structurelles de gestion des risques

Dans le contexte des phénomènes gravitaires rapides, le risque est défini par une combinaison entre d'une part l'aléa, correspondant à un phénomène caractérisé par son intensité et sa fréquence et d'autre part la vulnérabilité correspondant aux conséquences des dommages.

Les actions de prévention visent à réduire le risque en agissant sur l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité des enjeux au travers de mesures structurelles et non-structurelles implantées dans les zones de déclenchement, propagation et d'arrêt des phénomènes gravitaires.

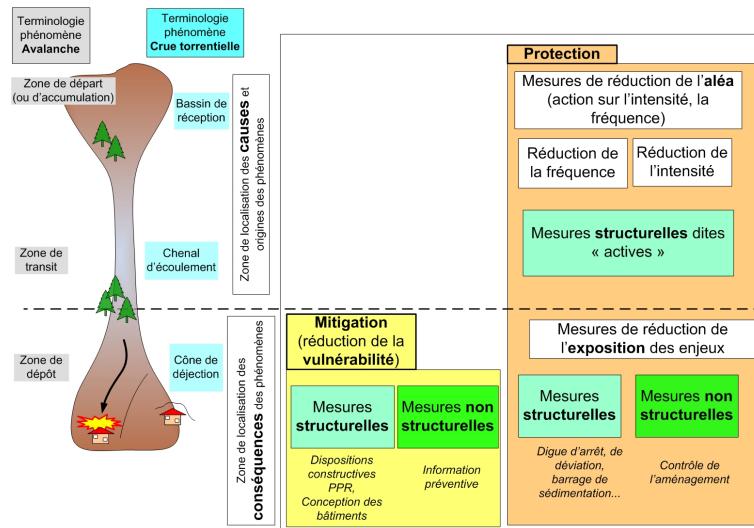


Figure 1. La déclinaison spatiale des action de prévention des risques

Dans ce cadre, la question globale de l'efficacité des ouvrages et du choix entre différentes stratégies est posée (Chambon *et al.*, 2007)¹ : faut-il privilégier des stratégies basée sur un principe de correction active ou bien se limiter à des travaux de protection passive ? Dans le premier cas, la protection agit sur les causes du phénomène de manière a priori plus durable et induit moins de frais d'entretien. Dans le second cas, des ouvrages de type plage de dépôt sont efficaces immédiatement mais ne le restent que tant qu'il demeure une capacité de stockage résiduelle : le maître d'ouvrage doit assumer financièrement ces coûts de fonctionnement plus importants pour garantir la fonction de protection.

1. disponible sur Internet à <http://www.uved.fr>

2.2. Efficacités structurelle et fonctionnelle des barrages de correction torrentielle

Les barrages de correction torrentielle visent à stabiliser le profil en long des torrents et limiter les divagations latérales (figure 2).

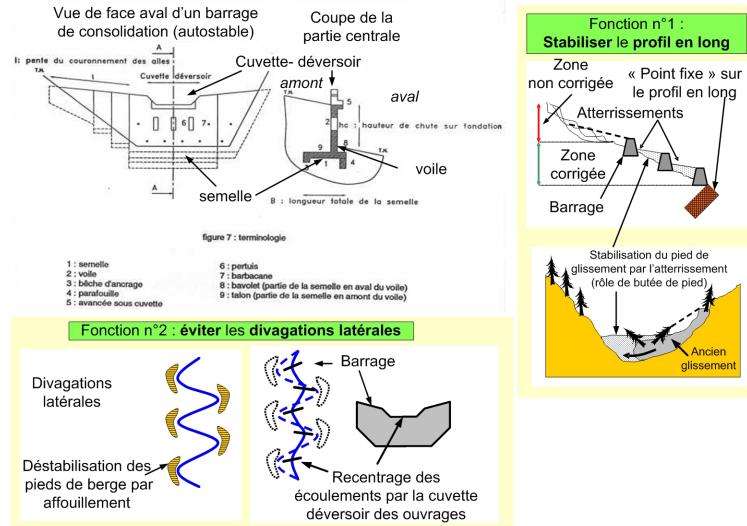


Figure 2. Composants et fonction des barrages de correction torrentielle de type consolidation

Ces ouvrages sont soumis à des actions quasi-statiques telles que la poussée des terres mais aussi dynamiques liées à l'impact des laves torrentielles. Ils sont implantés dans des contextes géotechniques souvent délicats et mal connus associés par exemple à des glissements de berges, des hétérogénéités de caractéristiques, de nature du sol en fondation, des circulations d'eau souterraines mal connus. La méconnaissance partielle des cas de charges, du contexte géotechnique, les conditions de réalisation en altitude avec des accès souvent difficiles distinguent ces barrages des ouvrages de génie civil plus classiques. Des méthodes spécifiques, très fortement inspirées par des retours d'expériences et d'analyse de pathologies (Tacnet *et al.*, 1999) sont proposées pour analyser les actions, dimensionner et réaliser ces ouvrages (Deymier *et al.*, 1995; Tacnet *et al.*, 2000).

La contribution effective des ouvrages de protection à la réduction du risque dépend donc largement de la nature des ouvrages et de leur état. L'efficacité des ouvrages de protection contre les risques naturels doit être analysée d'un point de vue fonctionnel et structurel (Tacnet *et al.*, 2009b). Dans le cas des barrages de correction torrentielle (figure 3), l'efficacité fonctionnelle est définie par rapport à l'effet

sur la stabilisation du profil en long et des profils en travers en fonction du contexte hydrologique, géomorphologique, géologique Un ouvrage peut ainsi avoir été parfaitement conçu d'un point de vue génie civil mais s'avérer modérément utile voire inutile pour assurer une fonction de stabilisation. Il peut par exemple s'agir d'une mauvaise implantation sur le profil en long ou d'une erreur d'orientation, d'une largeur insuffisante par rapport à la fonction de stabilisation du profil en travers. L'efficacité structurelle fait quand à elle référence à l'état d'endommagement de l'ouvrage. Les méthodes d'aide multi-critères à la décision peuvent être exploitées pour caractériser les pathologies et analyser l'efficacité des ouvrages (figure 3).

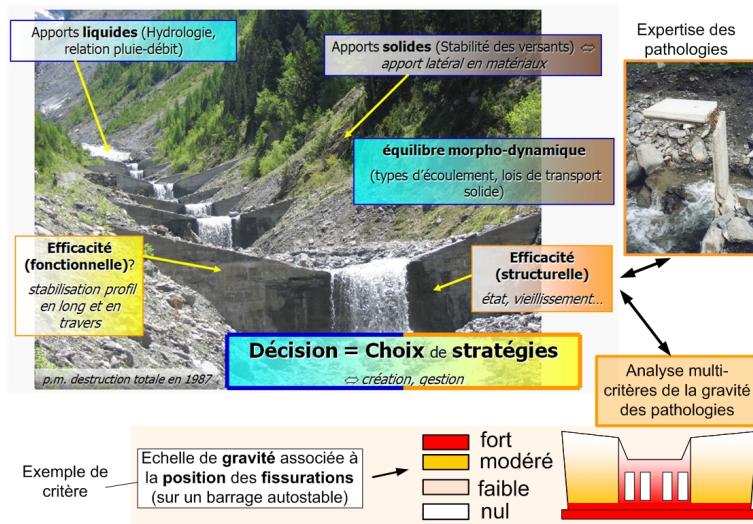


Figure 3. Eléments du contexte décisionnel associé aux barrages de correction torrentielle

Dans le contexte des crues torrentielles, les mesures structurelles visent soit à agir sur les causes des phénomènes dans le cadre de mesures dites "actives", soit à limiter leurs effets dommageables sur les enjeux dans le cadre de mesures dites passives. Choisir la part relative de ces mesures dans une stratégie de protection consiste ainsi à rechercher le meilleur compromis entre des critères économiques, techniques et environnementaux (figure 4). Aujourd'hui, les stratégies passives sont privilégiées. Dans le même temps, les ouvrages de protection active existants vieillissent et se dégradent. Deux questions sont posées : quels sont les critères les plus pertinents pour caractériser l'état des ouvrages par rapport à des objectifs de protection nominaux ? comment définir des priorités d'intervention en matière de mesures de sauvegarde et d'entretien de ces ouvrages anciens ? Les problématiques actuelles concernent ainsi l'explicitation des fonctions nominales associées aux ouvrages de correction, la détermination des critères d'efficacité fonctionnelle et structurelle des ouvrages, la caractérisation de

l'état des ouvrages et l'analyse de l'impact d'une dégradation éventuelle sur les fonctions attendues. Ces éléments doivent permettre de hiérarchiser des scénarios d'interventions.

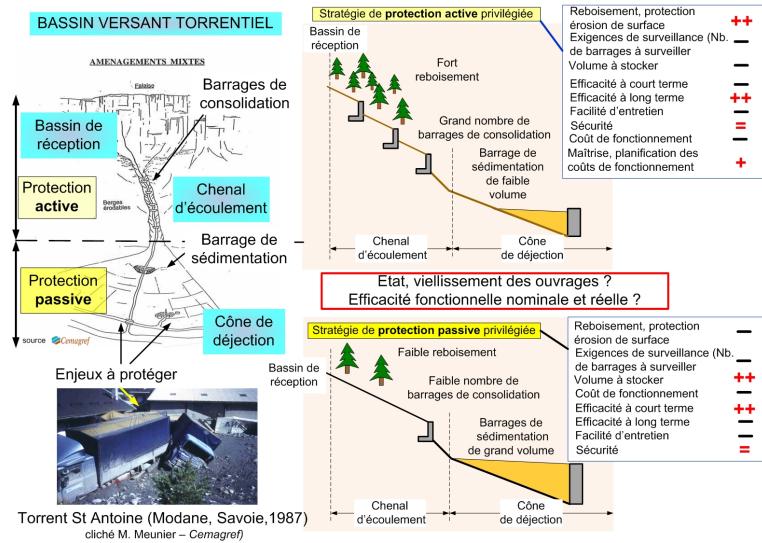


Figure 4. La fiabilité des ouvrages intervient dans le choix des stratégies de protection

2.3. Expertise et sûreté de fonctionnement

L'analyse de l'efficacité des ouvrages renvoie indirectement aux concepts de la sûreté de fonctionnement défini comme la "science des défaillances et des pannes" (Mortureux, 2001). La sûreté de fonctionnement définit classiquement quatre indicateurs principaux (Magne *et al.*, 2006). La fiabilité quantifie la capacité du système à rester en service pendant un intervalle de temps. 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 part du temps pendant laquelle le système est apte à assurer sa mission. La sécurité correspond à la capacité d'un système à éviter de produire des évènements critiques pour lui-même et son environnement. L'efficacité peut donc être définie comme l'aptitude du système à accomplir sa mission. La fiabilité quantifie alors la capacité du système à rester efficace pendant un intervalle de temps donné. Plusieurs méthodes, basées sur une analyse systémique des problèmes, utilisent des représentations arborescentes correspondant à des approches *a priori* par rapport à un événement redouté (arbres d'événement ou de défaillance) ou *d'après* (arbre de causes)(figure 5).

Les méthodes de la sûreté de fonctionnement et d'analyse des risques sont classiques dans le contexte industriel. Elles peuvent s'appliquer dans le cadre du génie ci-

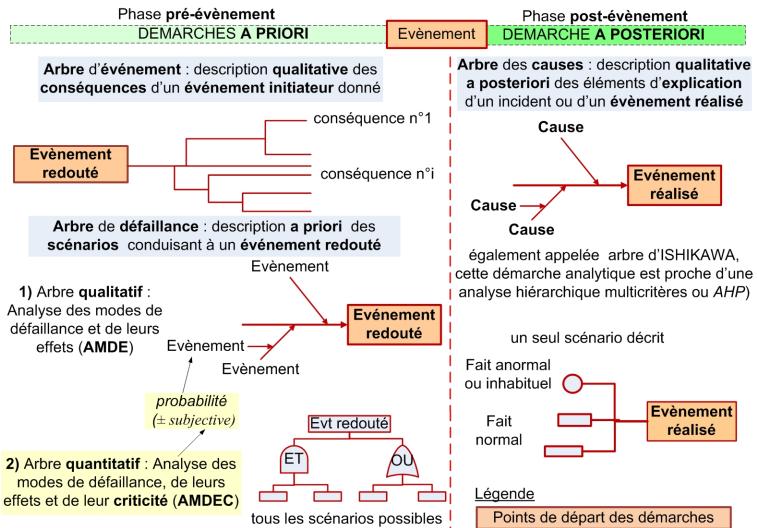


Figure 5. Arbres d'évènementement, de causes et de défaillances (Tacnet, 2009) d'après (Mortureux, 2001)

vil (Verdel, 2000), des ouvrages hydrauliques (Peyras, 2003; Curt, 2008) mais restent paradoxalement peu développées dans le domaine des risques naturels en montagne. Les principes d'analyse systémique sur lesquels reposent les méthodes de la sûreté de fonctionnement sont pourtant des moyens de formaliser et tracer le raisonnement d'expert associé à l'analyse du fonctionnement et de l'état des ouvrages (Tacnet, 2009). Leur application directe au contexte des ouvrages de protection soulève par contre des questions relatives à l'identification des systèmes, des composants et à la caractérisation de la criticité associée aux éventuelles défaillances. L'utilisation d'arbres de défaillances basés sur une quantification probabiliste de défaillances est confrontée à l'absence ou l'insuffisance de données relatives aux pathologies et permettant de réellement définir les probabilités. L'expertise associée à l'analyse de l'efficacité des ouvrages de protection se ramène donc finalement à un problème de décision basé sur des critères multiples, évalué sur la base d'informations imparfaites. Pour évaluer ces critères, il est possible d'utiliser une méthodologie permettant de combiner l'aide à la décision et la représentation de l'information imparfaite.

3. Prise en compte de l'imperfection de l'information dans l'expertise et la décision

L'expertise des risques naturels peut être considérée comme une série de décisions basées sur des informations imparfaites provenant de sources plus ou moins fiables et

conflictuelles (Tacnet, 2009). Cette prise en compte de l'imperfection de l'information en général et de l'incertitude dans un processus de décision peut être envisagée au travers des méthodes d'aide à la décision ou de représentation et de traitement de l'information imparfaite.

3.1. Aide multi-critères à la décision et théories de représentation de l'information imparfaite

Les principales problématiques de décision correspondent au choix, au tri et au rangement de solutions. Les méthodes d'aide multi-critères à la décision constituent une classe de méthodes qui intègrent les préférences des décideurs et autorisent l'agrégation de critères différents. La description exhaustive de toutes les méthodes d'analyse multi-critères est impossible mais il existe des synthèses comparatives (Guitouni *et al.*, 1998; Linkov *et al.*, 2006). Les méthodes peuvent être classées en deux familles principales (Vincke, 1989; Schärlig, 1985) : 1) les méthodes basées sur la théorie de l'utilité multi-attribut (*MAUT*) et ses dérivés (*AHP*). Ces méthodes utilisent un principe d'agrégation complète transitive. Ces approches reposent sur un critère unique de synthèse évacuant toute incomparabilité (figure 6). 2) les méthodes dites de sur-classement de synthèse qui construisent des relations de sur-classement. Ces méthodes acceptent l'incomparabilité et sont basées sur des méthodes d'agrégation partielle.

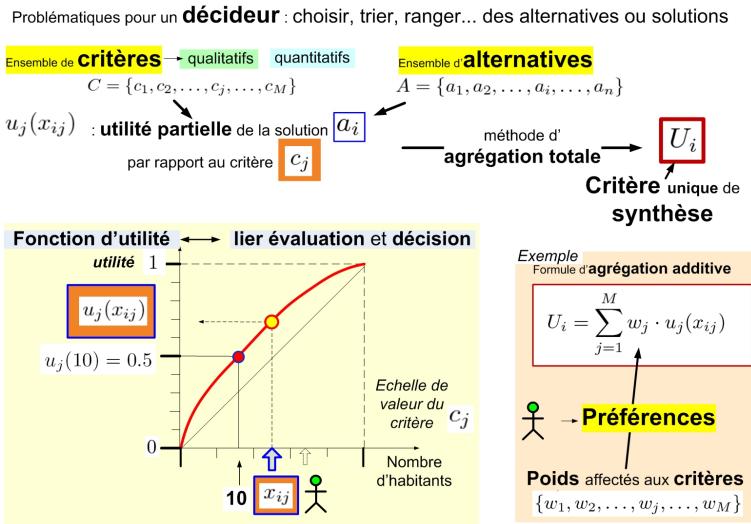


Figure 6. Principe des méthodes d'aide multi-critères basées sur une agrégation totale

La méthode hiérarchique multicritères (Analytic Hierarchy Process -AHP) (Saaty, 1980) appartient à la famille des méthodes du critère unique de synthèse (ou d'agrégation totale)(Dyer, 2005). Elle utilise une décomposition et une représentation hiérarchique pour formuler un problème sous une forme multicritères (phase d'analyse).

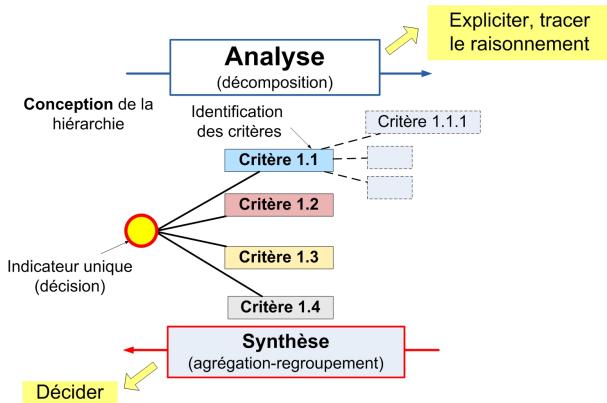


Figure 7. Principe de l'analyse multi-critère hiérarchique originale (AHP)

Les préférences entre critères, traduites par les poids w_j , sont explicitées à partir de matrices de comparaison par paires entre critères selon une échelle de ratio sémantique. L'agrégation des poids et de l'évaluation se fait de la racine vers les feuilles selon un principe qui s'apparente à une somme pondérée.

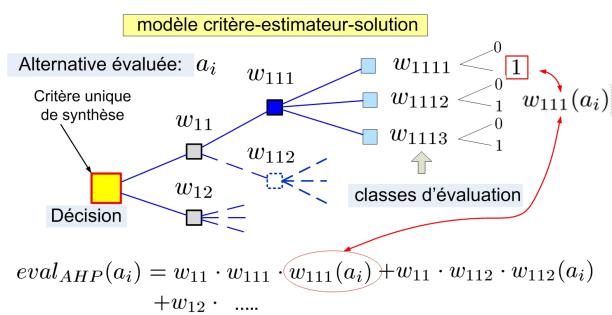


Figure 8. Principe de l'agrégation additive dans un modèle critère-estimateur-solution (AHP)

3.2. Théories de représentation de l'information imparfaite et fusion d'information

La théorie des probabilités constitue le cadre classique et historique pour mesurer et prendre en compte l'incertitude. La notion de probabilité n'est cependant pas, à la base, adaptée pour représenter une vision subjective de l'information et des incertitudes d'ordre psychologique telle que la fiabilité d'un informateur (Bouchon-Meunier, 1995). D'autres théories ont été proposées pour manipuler l'information imparfaite. Les théories des ensembles flous (Zadeh, 1965) et des possibilités (Zadeh, 1999; Dubois *et al.*, 1988) constituent le cadre global de ce qui est communément appelé la "logique floue" (Bouchon-Meunier, 1995). La théorie des sous-ensembles flous permet la représentation de la forme la plus générale d'imprécision exprimée sous forme linguistique. Elle repose sur l'hypothèse de fonctions d'appartenance partielle à un ensemble. La théorie des possibilités est basée sur une extension de la logique classique pour manipuler des connaissances imparfaites dans un cadre non probabiliste. La théorie des possibilités concerne des propositions alors que la théorie des ensembles flous ne considère qu'une appartenance à un ensemble.

La théorie de l'évidence ou théorie des fonctions de croyance, également nommée théorie de *Dempster-Shafer* (Shafer, 1976)(*DST*)², permet de manipuler des degrés de confiance (ou masses de croyance) associés à la validité d'une information. Ces masses de croyance s'appliquent non plus seulement à des singletons comme dans la théorie des probabilités mais à des sous-ensembles. Plusieurs évolutions de la théorie initiale ont suivi. Un cadre théorique indépendant de la théorie des probabilités a ensuite été formulé par (Smets *et al.*, 1994) dans le cadre du modèle des croyances transférables (*TBM*)³. Enfin, la théorie de *Dezert-Smarandache*(*DSmT*)⁴ ou Théorie du raisonnement plausible et paradoxal constitue l'évolution la plus récente (Smarandache *et al.*, 2004-2009)⁵.

La combinaison des différentes informations dans le cadre de la théorie de l'évidence nécessite de définir un espace de fusion commun ou *cadre de discernement*. Dans la théorie de *Dempster-Shafer*, ce *cadre de discernement* noté $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$ est un ensemble discret, fini, exhaustif de n hypothèses élémentaires et exclusives muni des opérateurs ensemblistes classiques de conjonction \cup et de disjonction \cap (figure 9). Les hypothèses notées θ_i correspondent à des notions vagues et imprécises. Θ représente l'événement certain et \emptyset représente l'événement impossible. L'ensemble des parties de Θ ($P(\Theta)$) est noté 2^Θ et s'appelle le *power-set* : il est défini comme l'ensemble des sous-ensembles de Θ quand tous les éléments θ_i sont disjoints. Une connaissance imparfaite affectée à un élément de 2^Θ est représentée par un jeu de

2. Dempster-Shafer Theory

3. Transferable Belief Model

4. Dezert-Smarandache Theory

5. <http://fs.gallup.unm.edu//DSmT.htm>

masse généralisée de croyances ou *masse de croyance* (en anglais *basic belief assignment* ou *bba*) est défini comme la fonction $m(\cdot)$ telle que :

$$\begin{cases} m(\cdot) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1] \\ m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{X \in 2^\Theta} m(X) = 1 \end{cases}$$

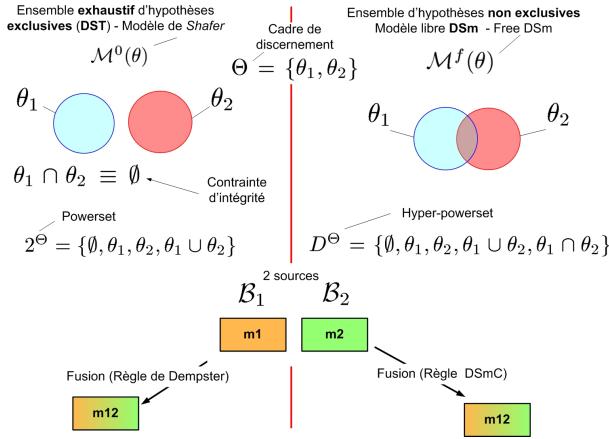


Figure 9. Cadre de discernement dans les théories DST et DSmT

La fusion d'information est un des atouts essentiels de cette théorie. Elle consiste à prendre en compte la qualité (ou véracité) de l'information dans le processus de décision et peut être définie de la manière suivante : '*La fusion d'information consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources pour prendre des décisions, répondre à des questions*' (Bloch *et al.*, 2001)⁶. Cette fusion d'information consiste à produire une fonction de masse de croyance unique à partir de plusieurs fonctions de masse de croyance issues de sources distinctes (Lefevre *et al.*, 2002). Des facteurs d'affaiblissement, noté α , permettent de considérer la fiabilité des sources. La règle de fusion de *Dempster*, basée sur un principe de consensus conjonctif, est la première à avoir été proposée : soient $A, B, C \in 2^\Theta$ et deux sources B_1 et B_2 exprimant des masses de croyance $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ sur les éléments de 2^Θ . La masse de l'hypothèse C résultant de la fusion des jeux de masses $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ par application de la règle de Dempster est égale à :

$$m(C) \triangleq [m_1 \oplus m_2] = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B)}$$

La théorie de *Dezert-Smarandache(DSmT)* ne repose plus un cadre de discernement d'hypothèses exclusives. Contrairement à la *DST*, elle permet de représenter

6. Groupe de travail européen FUSION

des hypothèses vagues avec des limites floues entre elles sans raffiner le modèle de discernement, de modéliser les problèmes conformément à la réalité en définissant des modèles hybrides autorisant des intersections partielles entre hypothèses (figure 9) et de gérer le conflit à l'aide de règles de redistribution proportionnelle (règles *PCR*⁷) (Dezert *et al.*, 2006)(Martin *et al.*, 2006).

Les masses sont attribuées aux éléments de l'hyper-powerset D^Θ de Θ , défini comme l'ensemble de toutes les propositions possibles des éléments de 2^Θ construites avec les opérateurs \cup et \cap telles que $\forall A, B \in D^\Theta$, $(A \cup B) \in D^\Theta$ et $(A \cap B) \in D^\Theta$.

La règle classique conjonctive notée *DSmC* ou consensus conjonctif dans le cadre de la *DSmT* se définit de la manière suivante. Soit un élément C de l'hyper-powerset D^Θ , soit deux jeux de masses de croyance $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ associées aux deux sources β_1 et β_2 . La masse fusionnée est égale à :

$$m(C) \triangleq [m_1 \oplus m_2] = \sum_{\substack{A, B \in D^\Theta \\ A \cap B = C}} m_1(A)m_2(B)$$

4. Une méthodologie mixte associant fusion

L'imperfection de l'information peut être déclinée en incertitude, imprécision, incomplétude et inconsistance (Smets, 1997). Les méthodes et théories d'aide à la décision, de représentation et de traitement de l'information apportent isolément des réponses partielles à l'objectif d'association de la décision et de l'information imparfaite dans le cadre de l'expertise. Les méthodes d'aide multicritères à la décision permettent de décrire un processus de décision en agrégant des évaluations de critères hétérogènes sur lesquels le décideur exprime ses préférences ou une importance relative. Dans leurs versions originales, elles ne permettent pas de prendre en compte des évaluations imparfaites et multiples des critères.

Une méthodologie dénommée de manière générique *ER – MCDA*⁸ est proposée pour aider à la décision dans un contexte de décision basée sur des informations imparfaites (imprécises, incertaines, incomplètes ou contradictoires) et provenant de plusieurs sources plus ou moins fiables et conflictuelles (Tacnet *et al.*, 2009a; Tacnet *et al.*, 2010). Elle associe l'aide multicritères hiérarchique (*AHP*)⁹, les théories des ensembles flous, des possibilités et la fusion d'information au travers des théories de Dempster-Shafer (*DST*) et de Dezert-Smarandache (*DSmT*). Elle complète des travaux décrivant l'associant la théorie des fonctions de croyance (*DST*) et des approches d'aide multicritères à la décision (Beynon *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006; Omrani *et al.*, 2007).

7. Proportional Conflict Redistribution

8. Evidential reasoning - Multicriteria Decision Making

9. Analytical Hierarchy Process

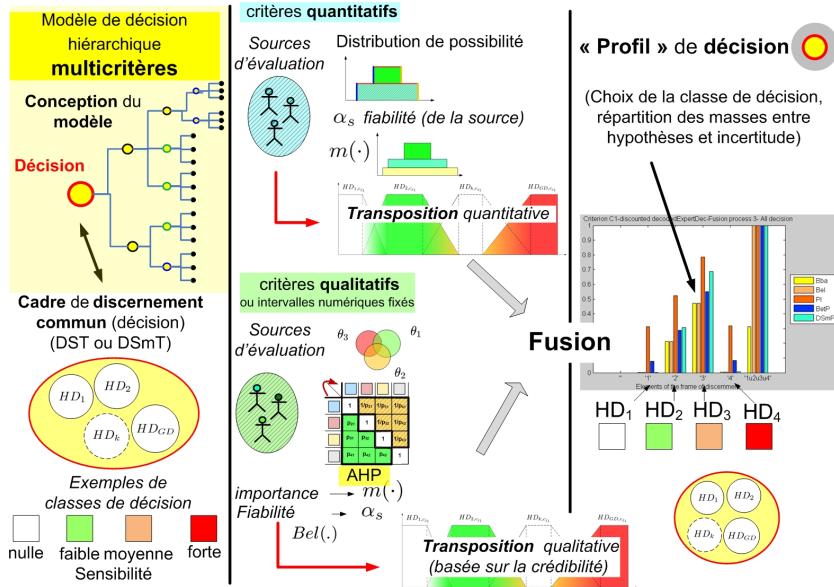


Figure 10. Démarche globale de la méthodologie ER – MCDA

4.1. Principes de la méthode

La première étape de cette méthodologie (figure 10) correspond à la formulation du problème de décision fondée sur une analyse experte pour identifier les critères (quantitatifs, qualitatifs) et expliciter les priorités (ou préférences) entre critères dans le cadre d'une approche multicritères hiérarchique (*AHP*) basée sur une approche *critère-estimateur-solution*. L'*AHP* ne constitue plus qu'un cadre conceptuel de formalisation du problème. Cette étape permet de définir le cadre de discernement de décision commun sous forme d'un ensemble de classes $\{HD_1, \dots, HD_k, \dots, HD_{GD}\}$ correspondant aux classes d'évaluation de la décision par exemple des sensibilités {nulle, faible, moyenne, forte} (figure 14) ;

La décision est le résultat de l'enchaînement d'une phase d'évaluation et de deux étapes de fusion (figure 11) :

- définition des modèles de transposition utilisés pour la fusion (cadre de la *DST* et/ou *DSmT*) et évaluations des critères par les sources éventuellement affaiblies. Les jeux de masse de croyance $m(\cdot)$ sont déduits des évaluations par les sources puis transposés ;

- 1^{ère} étape de fusion des jeux de masses de croyance exprimés par les sources et "transposés". On obtient finalement pour chaque critère, un jeu de masse de croyance défini dans le cadre de discernement de décision commun ;

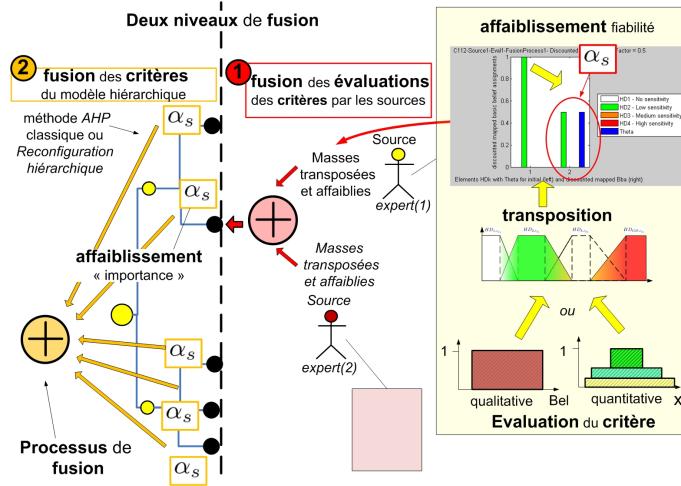


Figure 11. Un processus avec une étape d'évaluation et deux étapes de fusion

- 2^{ème} étape de fusion des critères, considérés comme des sources plus ou moins importantes, sur la base des préférences du modèle multicritères hiérarchique. La fusion permet de choisir une classe de décision mais aussi de décrire la "confiance" dans le résultat au travers de la répartition des masses de croyance entre les différentes hypothèses et sur l'incertitude globale.

4.2. Application à la sensibilité d'un site à risque

Les décisions associées à l'expertise des risques naturels résultent de la prise en compte de critères qualitatifs et quantitatifs provenant de sources hétérogènes et inégalement fiables. Dans le cas de la problématique des ouvrages de protection, l'objet de la décision concerne le choix d'un niveau d'état du dispositif, d'une stratégie de protection en fonction des critères fonctionnels et structurels Pour illustrer la méthodologie *ER – MCDA*, un cas d'application issu du contexte des phénomènes gravitaires mais dans le domaine des avalanches est présenté ci-dessous. Il s'agit ici de déterminer la sensibilité d'un site d'avalanche en évaluant les critères intervenant dans la qualification d'un niveau de risque (figure 12).

Cette application correspond à une version simplifiée et fictive d'un modèle d'évaluation de la sensibilité au risque d'avalanche considéré dans le cadre d'une expertise multiple. Une première phase concerne l'identification des critères (quantitatifs, qualitatifs) et l'explicitation des priorités (ou préférences) entre critères dans le cadre d'une approche multicritères hiérarchique basée sur une approche *critère-estimateur-*

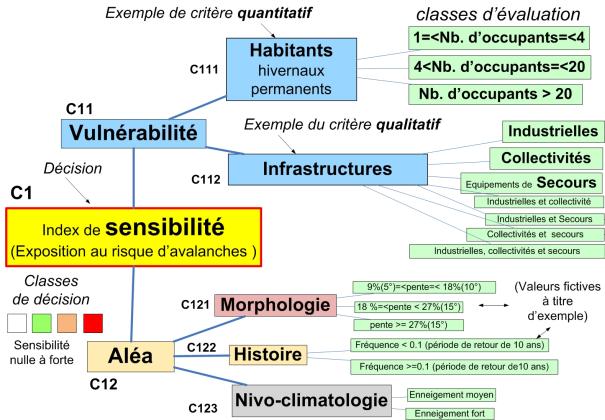


Figure 12. Exemple de modèle hiérarchique : évaluation de la sensibilité au risque d'avalanche

solution. La seconde phase concerne le volet de la méthodologie relatif à la mise en œuvre de la fusion.

La sensibilité d'un site d'avalanche est définie sur la base de critères descriptifs relatifs à la vulnérabilité, la morphologie, les conditions nivo-climatologiques et l'histoire. Dans la version initiale, chaque critère est décomposé en classes d'évaluation que l'observateur choisit de retenir de manière exclusive en fonction des caractéristiques du site. Chaque choix est affecté d'un score résultant d'un barème de cotation. Les scores obtenus sont ensuite agrégés selon deux méthodes empiriques (simple somme et multiplication de groupes de critères). Les résultats permettent de placer le site considéré dans l'une des trois catégories correspondant à un niveau de sensibilité fort, douteux ou faible.

La transposition correspond à la transformation de masses de croyances affectées à des intervalles. Le principe, détaillé dans (Tacnet, 2009; Tacnet *et al.*, 2010), repose sur une répartition proportionnelle entre les intervalles flous de la masse affectée à chacun des intervalles numériques. Ils exploitent les relations entre la théorie des possibilités et la théorie des fonctions de croyance (Dubois *et al.*, 2006). Les modèles de transposition peuvent, dans une certaine mesure, être comparés aux fonctions d'utilité de la théorie MAUT reliant évaluation et décision (figure 6).

Les jeux de masses de croyance affectés à chacun des critères (vulnérabilité, infrastructures, ...) résultant de la 1^{ère} étape de fusion sont ensuite fusionnés en prenant en compte leur importance (figure 11). La décision correspondant au choix de la classe de décision peut-être prise par exemple selon un critère de maximum de masses de croyances. L'originalité par rapport à la méthode AHP provient de l'obtention d'un

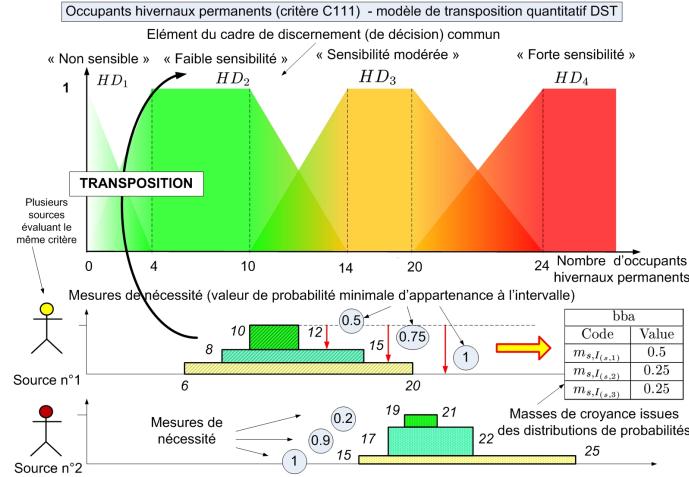


Figure 13. Principe du modèle de transposition quantitative

profil de décision permettant de mesurer comment les différents critères (et les sources ayant procédé à l'évaluation) supportent cette décision (figure 14).

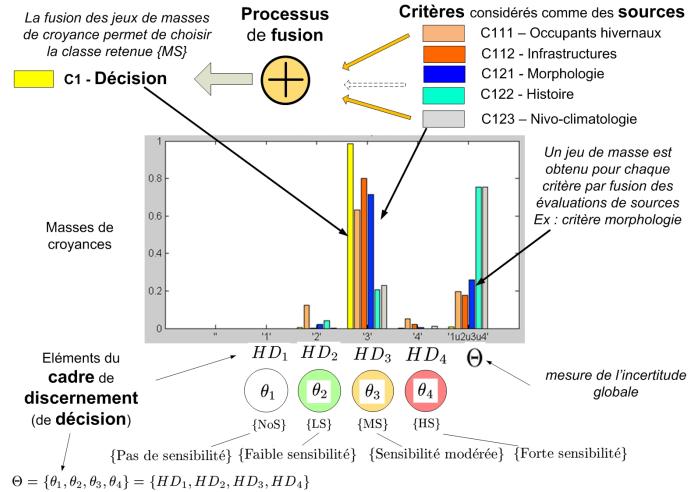


Figure 14. La fusion permet d'obtenir un profil de décision

La démarche est mise en œuvre en exploitant de manière comparative le cadre théorique classique de la théorie de Dempster-Shafer (*DST*) et de la théorie de Dezert-Smarandache (*DSmT*). La *DSmT* permet une modélisation plus réaliste des hypo-

thèses du cadre du discernement et propose des règles de fusion gérant de manière plus satisfaisante le conflit entre les sources (Dezert *et al.*, 2006)(Martin *et al.*, 2006).

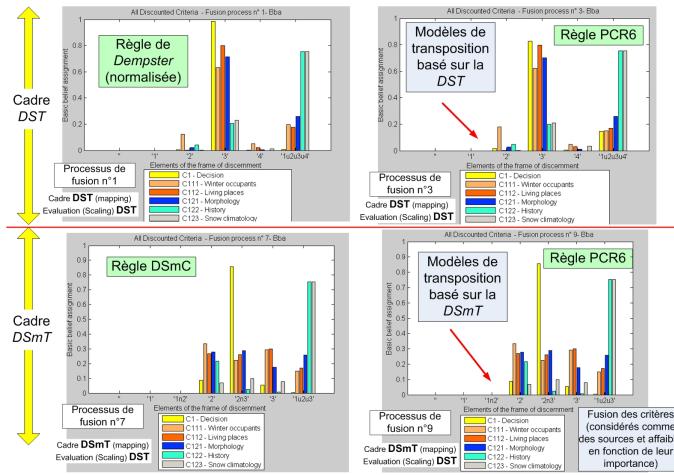


Figure 15. Comparaison des règles de fusion dans le cadre de la DST et la DSmT

5. Conclusion - Perspectives

L'expertise, résultant d'approches qualitatives et quantitatives, reste indispensable pour identifier les phénomènes, analyser les risques qu'ils induisent sur les enjeux, proposer des mesures de protection et qualifier leur efficacité. La description du domaine thématique et la détermination des critères conditionnant le niveau d'efficacité fonctionnelle est une première étape essentielle. La connaissance de l'occurrence et de la physique des phénomènes naturels reste partielle et imparfaite. De même, l'information nécessaire à l'évaluation des critères de diagnostic de l'état et de l'efficacité des ouvrages reste largement imparfaite et provient de sources hétérogènes et d'avis d'experts.

Pour améliorer le processus d'expertise et de décision associée à l'expertise des risques naturels, une approche associant l'aide multi-critères à la décision et la fusion d'information a été proposée. Elle associe l'analyse multi-critères hiérarchique basée sur une approche analytique et systémique et les théories de la représentation de l'incertain (logique floue, théorie des fonctions de croyance). Les premières applications concernent pour le moment les mesures non-structurelles de protection telles que le zonage des risques.

Au niveau thématique, cette méthodologie peut être transposée dans le cadre de l'analyse de l'efficacité des ouvrages qui constitue, elle aussi, une problématique de décision associée à la gestion des risques. Le cadre méthodologique des méthodes is-

sues de la sûreté de fonctionnement pour l'analyse des défaillances présente de nombreux points communs notamment au travers de l'approche systémique. Des adaptations au contexte particulier des risques naturels restent cependant nécessaires notamment en terme de modélisation des systèmes et de quantification des risques de défaillance basées sur des probabilités qui demeurent bien souvent subjectives.

Sur un plan plus général, cette approche montre l'intérêt de développer des outils d'aide à la décision pour l'expertise des risques naturels dans un cadre pluridisciplinaire.

Sur le fond de la méthode, les perspectives de développement concernent l'analyse de sensibilité des méthodes, le choix des processus de fusion, la définition et le test de protocoles de validation et enfin le développement du volet spatial de la démarche.

6. Remerciements

Les calculs de fusion ont été réalisés grâce aux routines de calcul développées par Arnaud Martin¹⁰. Les développements réalisés dans le domaine de l'analyse de l'efficacité des ouvrages s'intègrent dans le cadre du projet PARAmount¹¹ 2009-2012 (programme européen InterReg Espace Alpin 2007-2013).

7. Bibliographie

- Beynon M., Curry B., Morgan P., « The Dempster-Shafer theory of evidence : an alternative approach to multicriteria decision modelling », *Omega*, vol. 28, n° 1, p. 37-50, 2000/2, 2000.
- Bloch I., Hunter A., Appriou A., Ayoun A., Benferhat S., Besnard P., Cholvy L., Cooke R., Cuppens F., Dubois D., Fargier H., Grabisch M., Kruse R., Lang J., Moral S., Prade H., Saffiotti A., Smets P., Sossai C., « Fusion : General concepts and characteristics », *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 16, n° 10, p. 1107-1134, 2001.
- Bouchon-Meunier B., *La logique floue et ses applications*, Editions Addison-Wesley France, SA, Paris, 1995.
- Chambon G., Naaim F., J.M. T., *Université numérique thématique - Université virtuelle environnement et développement durable - Module Analyse et gestion des risques*, AgroCampus Ouest, Rennes, chapter Avalanches et crues torrentielles, 2007.
- 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.
- Deymier C., Tacnet J.-M., Mathys N., *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle - n°18*, "Etudes" du Cemagref - Série Equipements pour l'eau et l'environnement, Cemagref - Dicova, Antony, 1995.

10. laboratoire E³I²-EA3876 ENSIETA Brest, France

11. <http://www.paramount-project.eu>

- Dezert J., Smarandache F., *Advances and applications of DSmT for Information Fusion - Collected works - Volume 2*, American Research Press, Rehoboth, USA, chapter Proportional Conflict Redistribution Rules for Information Fusion, 2006.
- Dubois D., Prade H., *Possibility Theory : An approach to Computerized Processing of Uncertainty*, Plenum Press, New York (U.S.A), 1988.
- Dubois D., Prade H., *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1 - Outils de modélisation*, Hermès - Lavoisier, Paris, chapter 3 - Représentations formelles de l'incertain et de l'imprécis, 2006.
- Dyer J., *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*, International Series in Operations Research and Management Science, Springer, New-York, chapter Maut - Multiattribute Utility theory, 2005.
- Guitouni A., Martel J.-M., « Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method », *European Journal of Operational Research*, vol. 109, n° 2, p. 501-521, 1998/9/1, 1998.
- Lefevre E., Colot O., Vannoorenbergh P., « Belief function combination and conflict management », *Information Fusion*, vol. 3, n° 2, p. 149-162, 2002.
- Linkov I., Satterstrom F., Kiker G., Batchelor C., Bridges T., Ferguson E., « From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management : Recent developments and applications », *Environment International Environmental Risk Management - the State of the Art*, vol. 32, n° 8, p. 1072-1093, 2006/12, 2006.
- Magne L., Vasseur D., *Risques industriels. complexité, incertitude et décision : une approche interdisciplinaire*, Lavoisier, Paris, 2006.
- Martin A., Osswald C., *Advances and applications of DSmT for Information Fusion - Collected works - Volume 2*, American Research Press, Rehoboth, USA, chapter A new generalization of the proportional conflict distribution rule stable in terms of decision, 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, chapter La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques - Ref. AG 4 670, 2001.
- Omrani H., Ion-Boussier L., Trigano P., « A new approach for impacts assessment of urban mobility », *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, vol. 4, n° 3, p. 439-444, 2007, 2007.
- 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.
- Saaty T., *The analytic hierarchy process*, McGraw Hill, New York, 1980.
- Schärlig A., *Décider sur plusieurs critères - Panorama de l'aide à la décision multicritère*, Diriger l'entreprise, 3 ème edn, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1985.
- Shafer G., *A mathematical theory of Evidence*, Princeton University Press, 1976.
- Smarandache F., Dezert J. (eds), *Advances and applications of DSmT for information fusion (Collected works)*, vol. 1-3, American Research Press, 2004-2009.

- Smets P., *Uncertainty Management in Information Systems. From Needs to Solutions*, Kluwer Academics Publishers, chapter Imperfect Information : Imprecision - Uncertainty, p. 225-254, 1997.
- Smets P., Kennes R., « The transferable belief model », *Artificial Intelligence*, vol. 66, n° 2, p. 191-234, 1994.
- Tacnet J.-M., Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information - Thèse de doctorat., Sciences et génie de l'environnement, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2009.
- Tacnet J.-M., Batton-Hubert M., Dezert J., *Advances and applications of DSmT for Information Fusion - Collected works - Volume 3*, American Research Press, Rehoboth, USA, chapter Information fusion for natural hazards in mountains, p. 565-659, 2009a.
- Tacnet J.-M., Batton-Hubert M., Dezert J., « A two-step fusion process for multi-criteria decision applied to natural hazards in mountains (submitted) », *International Workshop on Belief function theory proceedings, Brest (France), 1-2 april 2010*, vol. X, p. X-X, 2010.
- Tacnet J.-M., Garin L., Cheruy O., « Calcul global des barrages de correction torrentielle - Prise en compte des interactions sol/structure », *Colloque International Interpraevent 2000*, Villach, Autriche, p. 295-306, 2000.
- Tacnet J.-M., Mathieu G., Rapin F., Eléments d'aide à la décision pour la gestion d'ouvrages de protection contre les risques naturels - Pathologies - diagnostic - réparation : Application aux ouvrages de correction torrentielle et de protection contre les avalanches. Rapport d'étude n°5.7 - Convention n°5/99 du 1/3/99 - titre V - 57.20 article 50., Technical report, Cemagref - Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (M.A.T.E.) / Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (D.P.P.R.) -, décembre 1999, 1999.
- Tacnet J.-M., Richard D., « De la conception à la sûreté des barrages de correction torrentielle (in press) », *Ingénieries (EAT) Eau Agriculture Territoires*, vol. X, p. X, 2009b.
- Verdel T., « Méthodologies d'évaluation globale des risques - Applications potentielles au Génie Civil », *Congrès Risques et Génie Civil - 8 et 9 novembre 2000, Paris.*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, p. 22-38, 2000.
- Vincke P., *L'aide multicritère à la décision*, Statistiques et mathématiques appliquées, Ellipses, Paris, 1989.
- Wang Y. M., Yang J. B., Xu D. L., « Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach », *European Journal of Operational Research*, vol. 174, n° 3, p. 1885-1913, 2006.
- Zadeh L., « Fuzzy sets », *Information and Control*, vol. 8, p. 338-353, 1965.
- Zadeh L. A., « Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility », *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 100, n° SUPPL. 1, p. 9-34, 1999.

ANNEXE POUR LE SERVICE FABRICATION
A FOURNIR PAR LES AUTEURS AVEC UN EXEMPLAIRE PAPIER
DE LEUR ARTICLE ET LE COPYRIGHT SIGNE PAR COURRIER
LE FICHIER PDF CORRESPONDANT SERA ENVOYÉ PAR E-MAIL

1. ARTICLE POUR LES ACTES :

JFMS'10, Toulouse, 24-26 mars 2010

2. AUTEURS :

*Jean-Marc Tacnet * — Didier Richard * — Jean Dezert** — Mireille Batton-Hubert****

3. TITRE DE L'ARTICLE :

Aide à la décision et fusion d'information pour l'expertise des risques naturels

4. TITRE ABRÉGÉ POUR LE HAUT DE PAGE MOINS DE 40 SIGNES :

Expertise, décision et fusion d'information

5. DATE DE CETTE VERSION :

12 février 2010

6. COORDONNÉES DES AUTEURS :

– adresse postale :

** Cemagref - Unité Erosion Torrentielle Neige Avalanches (ETNA)
2, rue de la papeterie – B.P. 76, F-38402 Saint Martin d'Hères Cedex
{jean-marc.tacnet, didier.richard}@cemagref.fr*

*** Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA)
29, avenue de la division Leclerc – B.P. 72, F-92322 Châtillon Cedex
jean.dezert@onera.fr*

**** Ecole des Mines de Saint-Etienne (EMSE) - Centre SITE
29, rue Ponchardier, F-42100 Saint-Etienne*

batton@emse.fr

– téléphone : 04 76 76 27 68

– télécopie : 04 76 51 38 03

– e-mail : *jean-marc.tacnet@cemagref.fr*

7. LOGICIEL UTILISÉ POUR LA PRÉPARATION DE CET ARTICLE :

*L^AT_EX, avec le fichier de style `article-hermes.cls`,
version 1.23 du 17/11/2005.*

8. FORMULAIRE DE COPYRIGHT :

Retourner le formulaire de copyright signé par les auteurs, téléchargé sur :
<http://www.revuesonline.com>