



HAL
open science

Approche intégrée d'aide à la décision basée sur la propagation de l'imperfection de l'information – application à l'efficacité des mesures de protection torrentielle

Simon Carladous

► To cite this version:

Simon Carladous. Approche intégrée d'aide à la décision basée sur la propagation de l'imperfection de l'information – application à l'efficacité des mesures de protection torrentielle. Autre. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSEM008 . tel-01665142

HAL Id: tel-01665142

<https://theses.hal.science/tel-01665142>

Submitted on 15 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2017LYSEM008

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'Ecole des Mines de Saint-Etienne

Ecole Doctorale N° 488
Sciences, Ingénierie, Santé

Spécialité de doctorat : Sciences et génie de l'environnement

Soutenue publiquement le 05/04/2017, par :
Simon Carladous

**Approche intégrée d'aide à la décision
basée sur la propagation
de l'imperfection de l'information –
application à l'efficacité des mesures
de protection torrentielle**

Devant le jury composé de :

Breul, Pierre	Professeur	Univ. Blaise Pascal	Président
Bossé, Eloi	Professeur	Mc Master Univ.	Rapporteur
Grandjean, Gilles	Directeur de recherche	BRGM	Rapporteur
Dezert, Jean	Maître de recherche	ONERA	Examineur
Flaus, Jean-Marie	Professeur	Univ. Grenoble Alpes	Examineur
Batton-Hubert, Mireille	Professeure	IMT-Mines, St-Etienne	Directrice de thèse
Tacnet, Jean-Marc	Docteur, ICPEF	Irstea-UR ETGR	Co-encadrant de thèse
Marco, Olivier	Docteur, IGPEF	ONF, Dép. RN	Invité
Rudolf-Miklau, Florian	Directeur de recherche	BMLFUW, TAC	Invité

Spécialités doctorales
 SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L' ENVIRONNEMENT

Responsables :
 K. Wolski Directeur de recherche
 S. Drapier, professeur
 F. Gruy, Maître de recherche
 B. Guy, Directeur de recherche
 D. Graillet, Directeur de recherche

Spécialités doctorales
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables
 O. Roustant, Maître-assistant
 O. Boissier, Professeur
 JC. Pinoli, Professeur
 X. Delorme, Maître assistant
 Ph. Lalevée, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'Etat ou d'une HDR)

Nom	Responsable	Grade	Spécialité	Responsable
ABSI	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AUGUSTO	Vincent	CR	Image, Vision, Signal	CIS
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BADEL	Pierre	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BEIGBEDER	Michel	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BONNEFOY	Olivier	MA(MDC)	Génie des Procédés	SPIN
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
CHRISTIEN	Frédéric	PR	Science et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSE	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DELORME	Xavier	MA(MDC)	Génie industriel	FAYOL
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DJENIZIAN	Thierry	PR	Science et génie des matériaux	CMP
DOUCE	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FAVERGEON	Loïc	CR	Génie des Procédés	SPIN
FEILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FOREST	Valérie	MA(MDC)	Génie des Procédés	CIS
FOURNIER	Jacques	Ingénieur chercheur CEA	Microélectronique	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GAVET	Yann	MA(MDC)	Image Vision Signal	CIS
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GONDRAN	Natacha	MA(MDC)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche	Mécanique et ingénierie	CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
OWENS	Rosin	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
PERES	Véronique	MR	Génie des Procédés	SPIN
PICARD	Gauthier	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
PIJLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Génie industriel	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP

« On commence à vieillir quand on finit d'apprendre »
proverbe japonais



à Sophie et Guilhèm,
et à toi qui est bien au chaud...



Remerciements

Si une thèse peut apparaître comme le résultat d'un exercice solitaire, elle est en fait le fruit du support de personnes qui ont cru en vous et de collaborations riches et diverses qui se sont créées.

Comment ne pas commencer par remercier M. le Docteur Jean-Marc TACNET qui a encadré ce travail dans l'exigence et la bonne humeur. Tout d'abord, je le salue pour avoir accepté cette tâche et, au-delà, pour avoir porté ce projet à bout de bras. Ensuite, je le remercie pour m'avoir guidé dans les limbes de l'aide à la décision et de l'imperfection de l'information qui étaient des concepts intéressants mais flous pour un ingénieur de terrain. Finalement, je loue son honnêteté ainsi que ses analyses critiques et directes dont il serait dommage de s'arrêter à la forme car elles permettent d'avancer dans un esprit constructif. Jean-Marc, merci pour tout. J'espère sincèrement que les occasions de travailler ensemble, mais aussi de boire un verre, ne manqueront pas.

Je sais gré à Mme la Professeure Mireille BATTON-HUBERT d'avoir accepté l'encadrement académique de cette thèse. Même si le travail à distance peut être compliqué, elle a toujours été présente. Non seulement elle m'a accompagné auprès de l'Ecole Doctorale mais elle a toujours accepté de répondre à mes questions de manière pédagogique et de mobiliser les savoirs autour d'elle. Mireille, merci pour ta gentillesse, tes critiques et ton soutien.

En outre, je suis honoré par la composition de mon jury, pluridisciplinaire s'il en est. Je remercie M. le Professeur Éloi BOSSÉ et M. le Directeur Scientifique Gilles GRANDJEAN pour leur lecture attentive, critique et détaillée de la thèse, ce qui permet une amélioration sensible de son contenu. J'exprime ma gratitude à MM. les Professeurs Pierre BREUL et Jean-Marie FLAUS d'avoir accepté de critiquer mon travail et de l'attention qu'ils y portent. Je remercie M. le Directeur de recherche Florian RUDOLF-MIKLAU pour l'intérêt qu'il a manifesté. J'espère que cela accompagnera la collaboration sur la gestion des risques naturels en montagne en Autriche et en France.

Dans ce jury, je souhaite exprimer ma reconnaissance particulière à M. le Maître de recherche Jean DEZERT et M. le Docteur Olivier MARCO, chef du Département Risques Naturels de l'ONF. J'ai eu la chance de collaborer avec Jean DEZERT, ce que je souhaite à tout doctorant dans le domaine du Raisonnement Évidentiel. Sans aucune condescendance, il est toujours disponible pour répondre aux questions les plus basiques, d'une clarté absolue et d'une bienveillance communicative. Jean, merci d'avoir accepté de m'accompagner dans cette démarche. Ensuite, Olivier MARCO a été un soutien très important pour ce projet. Lorsque j'ai émis l'idée de m'engager dans une thèse, il a été très attentif à cette volonté de passerelle entre pratique et formation académique. Il a orienté la démarche vers les problématiques d'aide à la décision et il l'a ensuite portée auprès des ministères concernés. Finalement, je reviens aujourd'hui vers la pratique, sous ses ordres. J'espère arriver à rendre ce que m'a apporté cette expérience qu'Olivier a permise.

À ce stade, je souhaite saluer les membres de la commission de suivi de la FCPR du MAAF qui ont permis la réalisation de cette thèse dans d'excellentes conditions. Je suis également reconnaissant à Cyril KAO puis Alexandre PERY et Sophie LE CALVAR pour le suivi administratif à

AgroParisTech. Je remercie Didier RICHARD, Martine GIRIER, Gwenola REY, Thomas GOÏTRÉ et Damien BUTTIGLIERI qui, au jour le jour, ont permis les bonnes conditions administratives et techniques de réalisation de cette thèse à l'Irstea-Grenoble. En outre, je sais gré à M. le Professeur Arnaud MARTIN de m'avoir transmis les codes permettant d'implémenter les étapes de fusion.

Cette thèse s'est inscrite dans un premier collectif, celui de l'équipe ADRET de l'Irstea, co-encadrée par Jean-Marc TACNET et Corinne CURT. Je remercie Corinne pour sa disponibilité et sa convivialité ainsi que tous les personnels de cette équipe. Plus particulièrement, Guillaume DUPOUY m'a accompagné de manière très pédagogique dans mes réflexions relatives aux probabilités et aux possibilités. Félix PHILIPPE a mené l'analyse géographique et de l'état des lieux des pratiques. Michaël DESCHÂTRES et Pascal HUMBERT m'ont aidé pour tous les aspects relatifs aux systèmes d'informations géographiques. Dans cet esprit collectif, je dois beaucoup aux stagiaires de l'équipe qui ont participé à cette thèse : Rémy PELTIER puis Geoffroy DI CIOCCO ont permis de développer un outil d'aide au dimensionnement structural des ouvrages ; Matthieu BASTIANELLI a aidé ma compréhension de la logique floue.

Cette thèse s'est ensuite inscrite dans un deuxième collectif, celui des doctorants de l'Irstea-Grenoble. Même si je ne peux pas être exhaustif, je les remercie tous pour les échanges et la bonne humeur qui ont participé à la réalisation de ce travail. Je pense particulièrement à mes collègues de bureau, Perrine FREYDIER et Hugo LAFAYE DE MICHEAUX, qui ont permis des conditions de travail studieuses mais dans la bonne humeur. Comme moi, Guillaume PITON s'est engagé dans cette démarche un peu folle de faire une thèse après avoir déjà travaillé en tant qu'ingénieur d'études. Tous nos échanges et réflexions ont notamment permis d'aboutir à la formalisation de notre compréhension historique des fonctions des ouvrages de correction torrentielle.

Les collègues des services de l'ONF-RTM m'ont également accompagné, parfois sans le savoir, dans cette démarche. Mes ex-collègues du service des Pyrénées-Orientales ont supporté son démarrage : Roland CLAUDET, Etienne EBRARD, Jean-Paul PERRON, Olivier DECOMBAS, Jean-Luc DECOUX et Eric CHOZNACKI ont ainsi paré à mes absences répétées pour la continuité du service. Ingrid BONCOMPAIN a initié la réflexion sur l'aide à la décision au sein du RTM. Je remercie les collègues des différents services RTM qui ont participé aux tournées d'échanges durant l'été 2014, alors qu'il y avait plus de questions que de réponses. Finalement, je suis reconnaissant aux collègues du département Risques Naturels de l'accueil qu'ils m'ont réservé à mon arrivée en octobre 2016 et d'avoir accepté de me laisser le temps de finir de rédiger cette thèse.

Je souhaite que tous mes amis d'enfance, d'école, ou encore établis au gré des rencontres professionnelles et personnelles, soient conscients que leur soutien inconditionnel, malgré mes absences physiques ou téléphoniques, a été, et est toujours, une source de stabilité très importante qui permet la réalisation de ce type de travail. Je remercie notamment Xavier SAVOIE, Benoît GRUEZ et Aurélie DUBRANA qui ont suivi (ou subi) de très près la réalisation de cette thèse et m'ont permis de m'aérer l'esprit au cours de mes semaines grenobloises. Je remercie également mes colocataires successifs, Pauline, Noé, Mylène, Susanne, Clémence et Dominik, qui m'ont soutenu malgré ma présence limitée et m'ont permis de réaliser ce travail dans la sérénité.

À travers ces quelques mots, je veux que mes parents et ma belle-mère sachent à quel point leur appui psychologique et logistique ont été importants au cours de ces trois années de thèse qui n'ont pas été de tout repos. Depuis le sud-ouest, ma famille, et plus particulièrement les familles de mes deux sœurs, ont également été un soutien important. Au moment d'écrire ces lignes, j'ai une pensée émue pour mes grands-parents et ma tante Paulette.

Finalement, Sophie, je crois que les mots ne suffisent pas pour te remercier de ton soutien quotidien, de ton courage pour avoir supporté ces absences et de m'avoir donné tant de bonheur, avec encore beaucoup de bonheur à venir. Peut-être que les actes y arriveront...

Sommaire

Introduction	1
I Risques naturels en montagne, protection, efficacité et expertise	5
II Etat de l'art : sciences de la décision, ingénierie des risques, traitement de l'imperfection de l'information	49
III Formulation systémique multi-échelle : contextes et problèmes de décision .	107
IV Aide à la décision pour l'évaluation multicritère de l'efficacité en contexte d'information imparfaite.	139
V Intégration des échelles et composantes de la décision pour une évaluation globale de l'efficacité	189
VI Discussion	223
Conclusion.	247
Bibliographie : productions	251
Bibliographie : références	255

Annexes

Table des matières

Introduction	1
I Risques naturels en montagne, protection, efficacité et expertise	5
I.1 Mesures de protection et réduction des risques naturels	5
I.1.1 Phénomènes naturels en montagne : cause de dommages	5
I.1.1.1 Physique des phénomènes torrentiels : rapides et destructeurs	5
I.1.1.2 Vulnérabilité des enjeux exposés et dommages associés	10
I.1.2 Analyse, évaluation et réduction des risques naturels	12
I.1.2.1 Risque : combinaison de l'aléa et des dommages potentiels	12
I.1.2.2 Mesures structurelles de protection pour réduire le risque	14
I.1.2.3 De l'analyse à l'évaluation du risque	16
I.1.2.4 Efficacité des mesures de réduction du risque	18
I.2 Évaluer l'efficacité de la protection pour gérer le risque	19
I.2.1 Diminution de l'efficacité de la protection dans le temps.	19
I.2.1.1 Des mesures de protection aux échelles imbriquées.	19
I.2.1.2 Conception technique pluridisciplinaire sans objectif explicite	20
I.2.1.3 Conception fonctionnelle et dimensionnement structural	22
I.2.1.4 Vieillesse des ouvrages et réduction de leur efficacité	25
I.2.1.5 Défaillances et sécurité à l'aval des ouvrages	27
I.2.2 Efficacité des ouvrages et décisions de gestion du risque	28
I.2.2.1 Efficacité et coût de la protection : au centre de la gestion du risque	29
I.2.2.2 Efficacité et efficacité pour décider des priorités d'actions	29
I.2.2.3 Efficacité des mesures de protection dans celles non structurelles	32
I.3 Limites actuelles de l'évaluation de l'efficacité de la protection	33
I.3.1 Problème de décision multi-dimensionnel mal formulé	33
I.3.1.1 Ambiguïté des concepts associés à l'efficacité	33
I.3.1.2 Diversité des références pour évaluer l'efficacité multi-dimensionnelle	35
I.3.2 Pratiques d'évaluation hétérogènes et liées à l'expertise	36
I.3.2.1 Différents outils et méthodes d'évaluation de l'efficacité	36
I.3.2.2 Besoin de traçabilité et de validation à plusieurs échelles.	38

I.3.3	Contexte décisionnel basé sur des informations imparfaites	40
I.3.3.1	De nombreuses informations fournies par des sources hétérogènes et inégalement fiables.	40
I.3.3.2	Formes d'imperfection de l'information et évaluation associée	41
I.3.3.3	Phénomènes torrentiels et incertitude épistémique.	44
I.4	Émergence de la problématique de recherche.	45
I.4.1	Spécification des problèmes	45
I.4.2	Besoins : expliciter, combiner, décider, valider, intégrer	46
I.4.3	Implication de plusieurs domaines scientifiques : de l'ingénierie des risques à la fusion d'informations pour l'aide à la décision	48
II	Etat de l'art : sciences de la décision, ingénierie des risques, traitement de l'imperfection de l'information	49
II.1	De la théorie de la décision rationnelle à l'aide à la décision selon plusieurs critères.	49
II.1.1	Bases formelles de l'aide à la décision	49
II.1.1.1	Plusieurs alternatives et problématiques de décision	49
II.1.1.2	Décision en univers certain, risqué, d'ignorance, incertain	50
II.1.1.3	Critères : fonctions des objectifs et préférences du décideur	51
II.1.1.4	Attributs ou indicateurs pour évaluer les critères	51
II.1.1.5	Formalisme de la structure de préférences d'un décideur	52
II.1.2	Théorie de la décision rationnelle et solution optimale.	52
II.1.2.1	Optimiser selon une structure de préférences de préordre total	52
II.1.2.2	Fonctions de monétarisation et d'utilité de préordre total	53
II.1.2.3	Hypothèses de la théorie de la décision rationnelle.	53
II.1.2.4	Risque naturel et analyse coûts bénéfiques (ACB) : applications de la théorie de la décision rationnelle.	55
II.1.2.5	Critiques : monocritère, préordre total, décision implicite, décision dans l'incertain	57
II.1.3	Approches multicritères pour aider à décider selon plusieurs points de vue	58
II.1.3.1	Des modèles de décision au processus d'aide à la décision	59
II.1.3.2	Optimisation multicritère pour des solutions efficaces	60
II.1.3.3	Systèmes à base de règles pour une agrégation logique.	61
II.1.3.4	Élicitation des préférences entre critères pour l'aide multicritère à la décision (AMC)	62
II.1.3.5	AMC de préordre total pour un critère unique	64
II.1.3.6	AMC de pseudo-ordre par surclassement	67
II.1.4	Vers un processus d'aide multicritère à la décision	69
II.1.4.1	Processus d'aide à la décision pour formaliser les problèmes sous-jacents	69
II.1.4.2	Systèmes à base de règles pour agréger les indicateurs	70
II.1.4.3	AMC pour agréger selon les préférences entre plusieurs critères.	70
II.1.4.4	Méthodes limitées pour décider avec différentes formes d'imperfection	71

II.2	Modélisation systémique : du domaine industriel aux ouvrages de protection	73
II.2.1	Analyse fonctionnelle du système	73
II.2.1.1	Méthodes d'analyse fonctionnelle (AF)	73
II.2.1.2	Analyse fonctionnelle externe (AFE) selon APTE	74
II.2.1.3	Analyse fonctionnelle interne (AFI) selon APTE	74
II.2.2	De l'analyse des défaillances à la sûreté de fonctionnement	75
II.2.2.1	Analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE).	75
II.2.2.2	Modélisation des scénarios de défaillance	76
II.2.2.3	Évaluation des composantes de la sûreté de fonctionnement	77
II.2.3	Vers une modélisation systémique multi-échelle	77
II.2.3.1	Critères de la SdF pour aider à expliciter le concept d'efficacité	77
II.2.3.2	AF pour décomposer en sous-problèmes	78
II.2.3.3	AMDE et arbre des causes pour identifier les indicateurs.	78
II.2.3.4	Une autre aide à la décision en univers incertain	78
II.3	Traitement et propagation de l'imperfection d'informations issues de plusieurs sources pour aider à décider	79
II.3.1	Représentation des formes d'imperfection de l'information.	79
II.3.1.1	Théorie des ensembles flous : pour le vague du langage	79
II.3.1.2	Théorie des possibilités : pour l'imprécision et l'incertitude	80
II.3.1.3	Raisonnement Évidentiel (ER) : une extension théorique.	82
II.3.1.4	Association des formalismes	85
II.3.1.5	Préférences du décideur : du flou à une fonction de masse	86
II.3.2	Combinaison de plusieurs sources d'informations	87
II.3.2.1	Fiabilité et/ou importance des sources d'information	87
II.3.2.2	Distances entre deux fonctions de masse	88
II.3.2.3	Fusion de plusieurs sources d'information	88
II.3.2.4	Fusion et agrégation multicritère	89
II.3.3	Aider à décider dans un contexte d'information imparfaite	91
II.3.3.1	Règles pour décider selon l'information obtenue après combinaison	91
II.3.3.2	Méthodes avancées d'AMC en Raisonnement Évidentiel	92
II.3.3.3	Aide à la décision dans l'incertain basée sur le Raisonnement Évidentiel	95
II.3.4	Vers l'adaptation et l'amélioration des méthodes avancées d'aide à la décision	98
II.3.4.1	Association des formalismes pour représenter l'imperfection	98
II.3.4.2	Limites des méthodes en Raisonnement Évidentiel.	98
II.4	Hypothèses de recherche et méthodologie	101
II.4.1	Processus intégré d'aide à la décision basée sur le Raisonnement Évidentiel.	101
II.4.1.1	Description historique et décomposition systémique	101
II.4.1.2	Agrégation multicritère : adaptable à l'évaluation de l'efficacité?	102
II.4.1.3	Aider à décider en contexte d'information imparfaite : le Raisonnement Évi- dentiel peut-il s'adapter?	102
II.4.1.4	Une validation nécessaire : vers l'établissement d'une référence	103
II.4.1.5	Intégration multi-temporelle et multi-échelle	104

II.4.2	Définition des hypothèses de recherche	104
II.4.3	Méthodologie : décrire, décomposer, formuler, modéliser, valider, intégrer . . .	106
III	Formulation systémique multi-échelle : contextes et problèmes de décision . . .	107
III.1	Identification systémique des composants et échelles d'évaluation de l'efficacité . . .	107
III.1.1	Schéma conceptuel de l'efficacité des systèmes de protection	107
III.1.2	Analyse structurelle multi-échelle : définition des systèmes	110
III.1.2.1	Analyse structurelle du système « ouvrage » : micro-échelle	110
III.1.2.2	Analyse structurelle du système « dispositif » : méso-échelle	111
III.1.2.3	Analyse structurelle du système « bassin d'enjeux » : macro-échelle	112
III.1.3	Analyse fonctionnelle multi-échelle : identification des fonctions pour chaque système et ses composants	114
III.1.3.1	Fonctions des dispositifs : identification historique	114
III.1.3.2	Analyse fonctionnelle externe (AFE) multi-échelle	116
III.1.3.3	Analyse fonctionnelle interne (AFI) multi-échelle	117
III.1.4	Analyse des modes de défaillance (AMDE) : identification des indicateurs et critères d'efficacité	120
III.1.4.1	Démarche multi-échelle à deux niveaux de complexité	120
III.1.4.2	Approche 1 : extraction multi-échelle de critères d'efficacité	122
III.1.4.3	Approche 2 : identification exhaustive des indicateurs et évaluation détaillée de chaque critère	125
III.1.4.4	Comparaison des deux approches d'identification des critères	128
III.2	Description évolutive et multi-échelle des problèmes de décision	129
III.2.1	Description du contexte évolutif : identification des objectifs	129
III.2.1.1	Déploiement multi-échelle et multi-temporel de la méthode « 5WH »	129
III.2.1.2	Spécification des objectifs et fonctions de protection torrentielle	130
III.2.2	De la capacité à l'efficacité des systèmes	133
III.2.2.1	Capacité et effet des systèmes de protection torrentielle	133
III.2.2.2	Évaluation séquentielle selon les concepts et échelles de système	135
III.3	Synthèse : décomposition puis formulation des problèmes d'évaluation	137
III.3.1	Méthodologie de décomposition du problème initial	137
III.3.2	Formulation des « sous-problèmes » d'évaluation de l'efficacité	137
IV	Aide à la décision pour l'évaluation multicritère de l'efficacité en contexte d'information imparfaite	139
IV.1	Adaptation des méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel . . .	140
IV.1.1	Nouveau formalisme pour l'évaluation multidimensionnelle de l'efficacité	140
IV.1.1.1	Description formelle des problèmes d'aide à la décision	140
IV.1.1.2	Données d'entrée spécifiques à chaque méthode	143
IV.1.2	Échelle ouvrage : évaluation qualitative par ER-MCDA	143
IV.1.2.1	Efficacité structurale (exemple 1)	144
IV.1.2.2	Efficacité fonctionnelle (exemple 2)	147

IV.1.3	Échelle dispositif : tri multicritère par Soft Electre Tri selon l'efficacité fonctionnelle (exemple 3)	149
IV.1.4	Échelle dispositif : classement des actions par FCOWA-ER selon leur efficacité en univers incertain (exemple 4)	153
IV.1.5	Analyse de l'adaptabilité des méthodes avancées pour évaluer l'efficacité . . .	155
IV.2	Améliorations techniques pour aider à décider selon la connaissance disponible. . . .	158
IV.2.1	Aide à la validation de l'évaluation selon une référence	158
IV.2.1.1	Dégradation de l'évaluation par rapport à une référence	158
IV.2.1.2	Évaluation de l'affouillement d'un ouvrage de stabilisation	160
IV.2.1.3	Vers le déploiement de la méthodologie de validation	166
IV.2.2	Nouvelle méthode de transposition pour ER-MCDA	167
IV.2.2.1	Rappel du principe de la transposition	167
IV.2.2.2	Étapes détaillées de la nouvelle méthode de transposition	167
IV.2.2.3	Application à l'évaluation de l'affouillement d'un ouvrage	170
IV.2.3	Nouvelle méthode de décision basée sur les distances	172
IV.2.3.1	Principe de la nouvelle méthode de décision.	173
IV.2.3.2	Application à des cas théoriques élémentaires	173
IV.3	Association des méthodes pour une aide multicritère à la décision en univers incertain	177
IV.3.1	Classement multicritère basé sur des évaluations imparfaites.	177
IV.3.1.1	Association des méthodes ER-MCDA et BF-TOPSIS	178
IV.3.1.2	Échelle dispositif : classement de plusieurs dispositifs selon leur efficacité fonctionnelle (exemple 3)	179
IV.3.2	Aide multicritère à la décision dans l'incertain	182
IV.3.2.1	Association des méthodes ER-MCDA et FCOWA-ER : deux approches. . .	184
IV.3.2.2	Échelle ouvrage : classement selon l'efficacité fonctionnelle par l'approche 2 (exemple 2)	186
IV.4	Synthèse : une nouvelle méthodologie d'aide à la décision avancée	188
V	Intégration des échelles et composantes de la décision pour une évaluation globale de l'efficacité	189
V.1	Méthodologie d'intégration multi-échelle séquentielle	190
V.1.1	Principe général : tri puis évaluation multi-échelle	191
V.1.1.1	Réduction des dommages : formalisation adaptée au contexte multicritère et incertain	191
V.1.1.2	Nouveau formalisme pour une évaluation multi-composante de l'efficacité .	193
V.1.1.3	Approche séquentielle multi-échelle.	196
V.1.2	Aide à la décision intégrée.	199
V.1.2.1	Phase 1 : tri multi-échelle préalable.	199
V.1.2.2	Phase 2 : de l'efficacité technique des ouvrages à l'efficacité de réduction des dommages	202
V.1.2.3	Phase 3 : évaluation multi-échelle des actions de protection pour retenir la plus efficiente	205

TABLE DES MATIÈRES

V.2 Échelle bassin d'enjeux : application pour choisir la meilleure solution de protection (exemple 5)	207
V.2.1 Formalisation du problème multicritère, en univers incertain.	207
V.2.1.1 Représentation de la connaissance sur les états de la nature	207
V.2.1.2 Problème multicritère pour décider selon l'efficience	208
V.2.1.3 Évaluation des conséquences	211
V.2.2 Classement multicritère en univers risqué : comparaison des méthodes ACB, AHP et BF-TOPSIS	211
V.2.2.1 Application de l'analyse coûts bénéfiques (ACB)	212
V.2.2.2 Application de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP)	213
V.2.2.3 Application des quatre méthodes BF-TOPSIS.	214
V.2.2.4 Comparaison des résultats obtenus	215
V.2.3 Application de l'aide multicritère à la décision en univers incertain.	216
V.2.3.1 Évaluation imparfaite des critères en univers incertain	216
V.2.3.2 Application de ER-MCDA-Rank pour classer les alternatives.	219
V.2.3.3 Résultats : la propagation de l'imperfection permet de tracer les décisions intermédiaires aléatoires	221
VI Discussion	223
VI.1 Apports méthodologiques	224
VI.1.1 Contribution au génie décisionnel	224
VI.1.2 Une approche holistique d'analyse et d'intégration du risque.	227
VI.1.3 Contribution au développement de l'aide multicritère à la décision en contexte d'information imparfaite	229
VI.2 Limites et perspectives méthodologiques.	232
VI.2.1 Génie décisionnel	232
VI.2.2 Analyse et intégration du risque	234
VI.2.3 Aide à la décision en contexte d'information imparfaite	237
VI.3 Aspects opérationnels	241
VI.3.1 Apports	241
VI.3.2 Perspectives opérationnelles	244
Conclusion.	247
Bibliographie : productions	251
Bibliographie : références	255

Annexes

Liste des figures

1	Maison détruite par la crue du 18 juin 2013xxxv
2	Ouvrages en forêt domaniale et développement de la végétation (1887-1909)xxxvi
3	Une vision synthétique de la thèse	2
I.1	Massifs, départements de montagne et départements avec un service ONF/RTM en France	6
I.2	Des ouvrages sont implantés dans l'ensemble d'un bassin versant torrentiel	7
I.3	Phénomène de divagation torrentielle et impacts associés	7
I.4	Phénomène de lave torrentielle et impacts associés	8
I.5	Exemple simplifié d'un profil en long de torrent	9
I.6	Propagation gravitaire de la magnitude et de l'intensité des phénomènes torrentiels .	10
I.7	Courbes de taux d'endommagement d'une habitation exposée aux laves torrentielles	11
I.8	Le risque naturel est la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux	13
I.9	Définition de la période de retour à partir d'un échantillon de données sur la magnitude du phénomène	13
I.10	Les mesures de protection ont des fonctions différentes pour réduire l'aléa et le risque associé	15
I.11	Répartition des mesures structurelles de protection torrentielle dans un bassin versant torrentiel	15
I.12	Les approches de l'analyse et du calcul du risque : mono-scénario, valeur espérée des dommages, courbe iso-risque complète	16
I.13	La protection est une mesure de prévention, pour réduire le risque initial à un risque résiduel	18
I.14	Les trois échelles de mesures de protection torrentielle	19
I.15	La conception de la protection torrentielle est pluridisciplinaire	20
I.16	Conception fonctionnelle d'un dispositif de stabilisation	22
I.17	Etapes de conception fonctionnelle puis structurale d'un ouvrage de stabilisation torrentielle	24
I.18	Exemple de la dégradation d'ouvrages, jusqu'à la perte de résistance et la rupture .	26
I.19	La stabilité des ouvrages diminue dans le temps. Leur maintenance aide à augmenter leur durabilité et à limiter les défaillances	27
I.20	L'évaluation de l'efficacité est au centre du processus de gestion du risque	28
I.21	Répartition des ouvrages de protection gérés en forêts domaniales RTM	29

I.22 Principe général de l'analyse coûts-bénéfices (ACB) pour évaluer l'efficacité d'une mesure de protection	31
I.23 Prise en compte de l'effet des ouvrages de protection dans un PPRn	32
I.24 Synthèse de l'organisation et des indicateurs analysés pour le suivi des ouvrages en forêts domaniales RTM.	34
I.25 Démarche suisse d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection	35
I.26 En France, la prise en compte des ouvrages de protection torrentielle dans les PPRn est hétérogène	38
I.27 De nombreuses informations sont nécessaires pour évaluer l'efficacité des mesures de protection	40
I.28 Exemple de l'impact des imperfections de l'information sur l'évaluation de la stabilité structurale d'un ouvrage	43
I.29 Les trois composantes de l'efficacité d'un dispositif de protection	46
I.30 De la conception à l'intégration multi-échelle de l'évaluation de l'efficacité.	48
II.1 Exemple d'un système à base de connaissances pour agréger plusieurs indicateurs selon des règles	61
II.2 Étapes de la méthode originale AHP selon SAATY (1980)	65
II.3 Principe de la méthode Electre Tri pour affecter chaque alternative à une classe	68
II.4 Analyse fonctionnelle externe appliquée aux barrages de rétention d'eau en remblai	74
II.5 Analyse fonctionnelle interne : analyse structurale et Bloc diagramme fonctionnel	75
II.6 Ensembles flous : ignorance totale, connaissance certaine, ensemble flou trapezoïdal, complément	80
II.7 Modèle de transposition et union de deux sous-ensembles flous	80
II.8 Distribution de possibilité et sous-ensemble flou pour une mesure de possibilité du sous-ensemble	81
II.9 D'une distribution de possibilité à des probabilités imprécises et des masses par α -coupes	81
II.10 Comparaison de deux modèles pour relaxer l'hypothèse d'exhaustivité de la DST : la TBM et le modèle de clôture	84
II.11 La méthode classique de transposition d'une distribution de possibilité en fonction de masse, selon un « modèle de transposition »	86
II.12 Exemple de BBAs finales obtenues selon la méthode ER-MCDA, pour deux alternatives et un cadre de discernement à trois éléments.. . . .	93
II.13 Comparaison du principe général des méthodes d'aide multicritère à la décision classiques et basées sur le Raisonnement Évidentiel	99
II.14 Comparaison des méthodes d'aide à la décision en univers incertain : classique et (F)COWA-ER	100
II.15 De la formalisation de sous-problèmes décomposés à leur traitement par des modèles AMC et d'AD dans l'incertain	104
II.16 Synthèse des développements menés du chapitre III au chapitre V.	106
III.1 Le schéma conceptuel de l'efficacité	108

III.2 Définition du système à micro-échelle : l’ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle.	110
III.3 Analyse structurale à micro-échelle : ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle.	111
III.4 Définition du système à méso-échelle : dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle.	111
III.5 Analyse structurale à méso-échelle : l’ouvrage est un composant du dispositif de stabilisation	112
III.6 Analyse structurale à macro-échelle : bassin d’enjeux équipé de dispositifs de protection	113
III.7 Fonctions détaillées des ouvrages de consolidation/stabilisation.	115
III.8 Diagramme pieuvre d’un dispositif de protection torrentielle à fonction de stabilisation (<i>ST</i>).	116
III.9 Diagramme pieuvre d’un ouvrage de consolidation/stabilisation	117
III.10 Bloc diagramme fonctionnel d’un dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle pour l’interaction 5	119
III.11 Bloc diagramme fonctionnel d’un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle pour les interactions 5 et 6.	120
III.12 AMDE et SBC multi-échelle pour extraire des indicateurs et évaluer les critères que sont la performance selon chaque mode de défaillance	121
III.13 Critères simplifiés d’évaluation par observation de chaque mode de rupture structurale d’un ouvrage de consolidation/stabilisation en stabilité externe.	123
III.14 Critères simplifiés d’évaluation de l’efficacité fonctionnelle d’un ouvrage de consolidation/stabilisation	123
III.15 Critères simplifiés d’évaluation de l’efficacité fonctionnelle d’un dispositif de consolidation/stabilisation	124
III.16 De l’AF aux indicateurs de performance d’un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle selon un mode de défaillance.	126
III.17 Système à base de règles pour évaluer la performance d’un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle selon le mode de rupture par affouillement	127
III.18 La méthode « 5WH » multi-temporelle et multi-spatiale	130
III.19 Évolution de la prévention contre les risques torrentiels depuis le XIX ^{ème} siècle. .132	
III.20 Évaluation séquentielle, multi-échelle et multi-dimensionnelle de l’efficacité135	
IV.1 Le chapitre IV dans les développements de la thèse.	139
IV.2 Adaptation des méthodes d’aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel aux échelles de protection torrentielle	140
IV.3 Exemples 1 et 2 : ER-MCDA à l’échelle de l’ouvrage (micro) pour un scénario. . .144	
IV.4 Exemple 1 : formalisation du problème selon l’AHP	145
IV.5 Exemple 1 : définition des modèles de transposition pour chaque critère	146
IV.6 Exemple 1 : évaluations imprécises de l’ouvrage par deux experts produisant les distributions de possibilité pour six critères	146
IV.7 Exemple 3 : Soft Electre Tri à l’échelle du dispositif (méso) pour un scénario. . .149	
IV.8 SET-données d’entrée (ex. 3) : alternatives à affecter à des classes d’efficacité . . .150	

IV.9 Exemple 4 : FCOWA-ER à l'échelle du dispositif (mésos).	153
IV.10 Synthèse des méthodes appliquées aux sous-problèmes d'évaluation de l'efficacité	156
IV.11 Ouvrage autostable et situations considérées (dimensions notées en m.)	161
IV.12 Hypothèses simplificatrices de prise en compte de l'affouillement et des contraintes au sol sous la fondation	163
IV.13 Etude paramétrique de la stabilité externe de l'ouvrage en fonction de son taux d'affouillement pour les trois situations de calcul.	164
IV.14 Établissement d'une échelle d'évaluation floue de la stabilité d'un ouvrage selon son taux d'affouillement en situation transitoire.	165
IV.15 Principe général de la transposition : d'une distribution de possibilité et un « modèle de transposition » à une BBA	167
IV.16 Étapes 1 et 2 de la nouvelle méthode de transposition	168
IV.17 Étape 3 de la nouvelle méthode de transposition pour une distribution de possibilité et un « modèle de transposition » avec trois éléments de décision	169
IV.18 Exemple d'évaluation de la stabilité (efficacité) structurale d'un ouvrage selon son taux d'affouillement par l'expert 3	170
IV.19 Exemple 3 : ER-MCDA-Rank à l'échelle du dispositif (mésos) pour un scénario	177
IV.20 Étapes de la nouvelle méthode ER-MCDA-Rank	178
IV.21 Deux approches d'association pour une aide multicritère à la décision en univers incertain	183
IV.22 Exemple 2 : Association de ER-MCDA et FCOWA-ER à l'échelle d'un ouvrage (mi- cro)	183
V.1 Le chapitre V dans les développements de la thèse.	189
V.2 Principe multi-échelle de la méthodologie intégrée	190
V.3 Mesures des dommages sur des enjeux du même type pour chaque scénario	192
V.4 Approche séquentielle multi-échelle d'évaluation de l'efficacité des mesures de protec- tion	198
V.5 Phase 1 de la méthodologie intégrée - tri multi-échelle	199
V.6 Phase 2 de la méthodologie intégrée - évaluation de l'efficacité.	202
V.7 Phase 3 de la méthodologie intégrée - classement des actions de protection	205
V.8 Exemple 5 - échelle du bassin d'enjeux : cinq solutions de protection à comparer	208
V.9 Exemple 5 : cartes d'intensité selon la situation initiale et en tenant compte de chaque alternative, pour chaque période de retour	210
V.10 Exemple 5 : définition des « modèles de transposition » pour les cinq critères	218
VI.1 Les trois axes de développements	224
VI.2 L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est maintenant au cœur de l'ana- lyse du risque et de la gestion qui en découle	228

Liste des tableaux

I.1	Magnitude, effets et paramètres d'intensité caractéristiques des phénomènes (inondation, crues avec charriage, laves torrentielles)	9
I.2	Intensité des laves torrentielles selon la hauteur de dépôt et la vitesse d'écoulement .10	
I.3	Typologie des dommages directs / indirects, tangibles / intangibles	12
I.4	Coefficients partiels des actions en France et en Autriche	24
I.5	Références pour comparer les pratiques d'évaluation de l'efficacité en France, Autriche et Suisse	33
II.1	Evaluation du niveau de préférence entre deux éléments <i>a</i> et <i>b</i>	63
II.2	Tableau d'analyse fonctionnelle appliqué au noyau interne, composant d'un ouvrage de rétention d'eau	75
II.3	AMDE Processus appliquée au voile d'étanchéité d'un barrage en remblai	76
II.4	AMDE Produit appliquée au drain aval d'un barrage	76
II.5	Tableau de correspondance entre problèmes, hypothèses et méthodes retenues . . .105	
III.1	Fonctions de service d'un dispositif de protection torrentielle à fonction de stabilisation 116	
III.2	Ensemble des fonctions principales des dispositifs de consolidation/stabilisation . .117	
III.3	Fonctions de service d'un ouvrage de consolidation/stabilisation.	118
III.4	Extrait du tableau d'analyse fonctionnelle d'un dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle	118
III.5	Fonctions techniques des composants 10 et 30 d'un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle	119
III.6	Les modes de défaillance d'un ouvrage de consolidation/stabilisation	122
III.7	AMDE Processus de la fondation sous cuvette d'un ouvrage de stabilisation125	
III.8	AMDE Produit de la fondation sous cuvette d'un ouvrage de stabilisation126	
III.9	Documents analysés pour décrire l'évolution du contexte de décision relatif aux me- sures de protection torrentielle en montagne	131
III.10	Évaluer la capacité et l'effet des dispositifs de protection torrentielle	134
IV.1	Exemple 1 : BBA finale obtenue après application des étapes de ER-MCDA147	
IV.2	Exemple 2 : BBAs d'évaluation de chaque alternative fournies par chaque source, selon chaque critère	148

IV.3 Exemple 2 : BBAs finales pour chaque ouvrage, obtenues après application des étapes de ER-MCDA	149
IV.4 Exemple 3 - données d'entrée : scores des cinq profils de décision selon les sept critères, pour quatre classes d'affectation	152
IV.5 Exemple 3 - données d'entrée : coefficients d'importance et seuils d'indifférence, de préférence, et de veto selon les sept critères	152
IV.6 Exemple 3 : affectations probabilisées de chaque dispositif à chaque classe d'efficacité fonctionnelle	152
IV.7 Exemple 4 : BBA obtenue après application des trois premières étapes de FCOWA-ER	155
IV.8 Exemple 4 : crédibilité, probabilité subjectives et plausibilité du niveau d'efficacité fonctionnelle que chaque action permet au dispositif d'atteindre	155
IV.9 Combinaisons d'actions pour établir la résultante des charges verticales et horizontales selon les états-limites et les situations.	162
IV.10 Combinaisons d'actions pour établir la résultante des moments stabilisants et déstabilisants selon les états-limites et les situations.	162
IV.11 Éléments de calcul du taux de stabilité d'un ouvrage, pour chaque section, selon les cinq critères de stabilité externe retenus	162
IV.12 Trois fonctions d'appartenance et six distributions de possibilité	170
IV.13 Nouvelle transposition-1 à 3 : mesures de plausibilité pour chacune des six distributions de possibilité	171
IV.14 Résultats intermédiaires de crédibilité pour la nouvelle méthode de transposition	171
IV.15 BBAs obtenues selon les deux méthodes de transposition : classique et nouvelle	172
IV.16 Exemples de différents BBAs et des décisions associées, sans limiter la décision aux seuls singletons du cadre de discernement avec deux éléments de décision	174
IV.17 Exemples de différents BBAs et des décisions associées, en limitant la décision possible aux seuls singletons du cadre de discernement avec deux éléments de décision	175
IV.18 Exemples de différents BBAs et des décisions associées, sans limiter la décision aux seuls singletons du cadre de discernement avec trois éléments de décision	175
IV.19 Exemples de différents BBAs et des décisions associées, en limitant la décision possible aux seuls singletons du cadre de discernement avec trois éléments de décision	176
IV.20 Exemple 3 : matrice de BBAs obtenue après les quatre premières étapes de ER-MCDA	180
IV.21 Exemple 3 : résultats obtenus en appliquant la méthode ER-MCDA	180
IV.22 Exemple 3 : scores, et qualité de ces scores, établis à partir de la matrice de BBAs (ER-MCDA-Rank-2)	181
IV.23 Exemple 3 : matrice de BBAs obtenue pour l'ensemble des quatre dispositifs (ER-MCDA-Rank-2)	182
IV.24 Exemple 3 : classement des dispositifs selon leur efficacité fonctionnelle (ER-MCDA-Rank-3).	182
IV.25 Exemple 2 : les deux BBAs à combiner, BBA issue de leur combinaison par la règle de fusion PCR6 et résultats selon les règles de décision possibles pour chaque alternative	187
V.1 Exemple 5 : hypothèses pour le calcul des dommages selon chaque critère	209

V.2 Matrice des scores transformés en euro pour les deux cas : cas 1 (sans A_5) et cas 2 (avec A_5)213

V.3 Résultats de l'application de l'ACB aux données du tableau V.2, selon les deux méthodes : 1) sans ou 2) avec monétarisation de la valeur de la vie humaine.213

V.4 AHP-3 : Matrices de scores pour chaque cas : cas 1 (sans A_5) et cas 2 (avec A_5) . .213

V.5 BF-TOPSIS : Matrices de scores pour le cas 1 (sans A_5) et le cas 2 (avec A_5) en tenant compte des sens de préférence pour chaque critère215

V.6 Résultats selon les ACB, AHP et BF-TOPSIS dans le cas 1 (sans A_5)215

V.7 Résultats selon les ACB, AHP et BF-TOPSIS dans le cas 2 (avec A_5)215

V.8 Exemple 5 : évaluations imprécises de chacune des cinq solutions, selon chacun des cinq critères, fournies par chacune des deux sources218

V.9 Exemple 5 : BBAs obtenues pour chaque solution de protection et chaque critère (ER-MCDA-Rank-1)219

V.10 Exemple 5 : scores, et qualité de ces scores, établis à partir de la matrice de BBAs (ER-MCDA-Rank-2)220

V.11 Exemple 5 : résultats pour classement des solutions de protection selon leur efficience selon deux attitudes extrêmes (ER-MCDA-Rank-3)221

action : ce terme peut avoir différentes définitions selon le domaine.

a) En génie civil, une action (F) est un ensemble de forces (charges) appliquées à la structure (action directe) et de déformations ou accélérations imposées (action indirecte) (AFNOR 2003a).

b) En aide à la décision, une action est une alternative potentielle d'un problème de décision donné (Schärlig 1985).

action accidentelle (A) : action de grandeur significative dont la probabilité d'intervenir sur une structure au cours de sa durée d'utilisation de projet est faible (AFNOR 2003a)

action permanente (G) : action dont la probabilité de durer pendant la durée de référence est élevée, dont la variation dans le temps est d'ampleur négligeable ou monotone jusqu'à une valeur limite (AFNOR 2003a)

action variable (Q) : action dont la variation dans le temps n'est d'ampleur ni négligeable ni monotone (AFNOR 2003a)

adaptation : adéquation des choix de conception du composant (ou du système) au contexte d'implantation physique ou socio-économique (Tacnet et Curt 2013)

alternative : aussi appelée « solution », « action » ou « décision », plusieurs alternatives sont potentielles, possibles, envisageables ou candidates pour un problème de décision donné qui a pour objet d'aider à les comparer pour décider parmi elles (Schärlig 1985)

besoin : nécessité ou un désir éprouvé par un utilisateur (AFNOR 2014a)

capacité : caractéristiques techniques mesurables associées à une fonction (Tacnet et al. 2011a)

combinaison d'actions : ensemble de valeurs de calcul permettant de vérifier la fiabilité structurale pour un état-limite sous l'effet simultané de différentes actions (AFNOR 2003a)

défaillance : cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise (AFNOR 2001)

dégradation : diminution de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions selon les performances définies par des spécifications techniques (Curt 2008)

disponibilité : aptitude du système à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné (AFNOR 2001). Par extension, elle est évaluée par la part du temps où la fonction est assurée relativement à sa durée totale d'exploitation (Magne et Vasseur 2006).

durabilité : aptitude du système à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'usage et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint (AFNOR 2001). Par extension, elle est évaluée par la part du temps où les performances ne sont pas abaissées au-dessous de celles escomptées relativement à sa durée d'utilisation de projet (Magne et Vasseur 2006).

durée de référence : intervalle de temps choisi, utilisé comme base d'évaluation d'actions variables et accidentelles sur le plan statistique (AFNOR 2003a)

durée d'utilisation de projet : durée pendant laquelle une structure est censée pouvoir être utilisée en faisant l'objet de la maintenance prévue, mais sans réparations majeures (AFNOR 2003a)

effet : ce terme peut avoir différentes définitions selon le domaine.

a) En physique, manifestation d'un phénomène prédit par la théorie (dictionnaire Larousse 2016).

b) Résultat, conséquence de l'action d'un agent, d'un phénomène quelconque (dictionnaire Larousse 2016).

efficacité : niveau de réalisation des activités planifiées et d'obtention des résultats escomptés (AFNOR 2005c)

efficience : rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées (AFNOR 2005c)

enjeu : éléments potentiellement exposés (Leone 1996), personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés directement ou indirectement par un phénomène naturel (MATETL 1999)

erreur : l'information donnée, stockée est différente de la vraie information (Motro et Smets 1997)

état-limite : état au-delà duquel la structure ne satisfait plus aux critères de dimensionnement pertinents (AFNOR 2003a)

états-limites de service : états correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service spécifiées pour une structure ne sont plus satisfaites (AFNOR 2003a)

états-limites ultimes : états associés à un effondrement ou à d'autres formes similaires de défaillance structurale (AFNOR 2003a)

fiabilité : ce terme peut avoir différentes définitions selon le domaine.

a) En sûreté de fonctionnement, aptitude du système à accomplir une fonction requise dans des conditions données durant un intervalle de temps donné (AFNOR 2001). Par extension, elle est évaluée par la part du temps où le système reste en service relativement à un intervalle de temps donné (Magne et Vasseur 2006).

b) En fusion d'informations, elle est relative à la source (Martin 2005). Elle correspond à la capacité objective de la source à fournir la vraie information (Smarandache et al. 2010).

fonction : actions d'un produit ou de l'un de ses constituants (AFNOR 2011) exprimée exclusivement en terme de finalité (AFNOR 1996)

importance : ce terme peut avoir différentes définitions selon le domaine.

a) En sûreté de fonctionnement, part relative de l'influence de la fiabilité des composants sur la fiabilité globale du système qu'ils composent. L'importance est établie selon la fiabilité de chaque composant (Birnbaum 1968).

b) En aide à la décision et en fusion d'information, l'importance d'un critère est son poids subjectif relativement aux autres dans la prise de décision (Schärlig 1985 ; Smarandache et al. 2010).

imprécision : représentée par un ensemble de valeurs parmi lequel se trouve la vraie information (Motro et Smets 1997)

incertitude : degré de confiance attribué au fait que l'information donnée soit la vraie information (Motro et Smets 1997)

incomplétude : mesure du manque d'information apporté par une source (Martin 2005)

inconsistance : forme d'erreur, lorsque l'information est représentée plusieurs fois sans que ces représentations ne soient conciliables (Motro et Smets 1997)

indicateur : information ou donnée formalisée de manière à rendre son utilisation répétable et reproductible et qui donne des indications sur l'état d'un phénomène ou la performance d'une fonction (Curt 2008)

inspection : action de contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien (AFNOR 2001)

maintenabilité : dans des conditions d'utilisation données et de maintenance prescrites, aptitude du système à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise (AFNOR 2001) et relativement à une durée de fonctionnement donnée (Magne et Vasseur 2006)

maintenance : ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise (AFNOR 2001)

maintenance corrective : maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Elle intègre les maintenances différée et d'urgence (AFNOR 2001).

maintenance de routine : activités élémentaires de maintenance régulières ou répétitives qui ne requièrent généralement pas de qualifications, autorisation(s) ou d'outils spéciaux (AFNOR 2001)

maintenance préventive : maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. Elle intègre les maintenances sous surveillance (conditionnelle et prévisionnelle), programmée et systématique (AFNOR 2001).

mode de défaillance : non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte de fonction, dégradation de fonction, fonction intempestive (Vuillet 2012)

objectif : but, cible à atteindre (dictionnaire Larousse 2016)

performance : état d'un système à réaliser chacune des fonctions pour lesquelles il a été conçu (Curt 2008)

réparation : actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne (AFNOR 2001)

rupture : rupture ou mouvement d'une partie du barrage ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau (CIGB 1995)

sécurité : aptitude d'un système à éviter de produire des événements critiques pour lui-même ou pour son environnement dans des conditions et pour une durée de fonctionnement données (Magne et Vasseur 2006)

structure : assemblage de pièces conçu pour supporter des charges et assurer un degré suffisant de rigidité (AFNOR 2003a)

sûreté de fonctionnement : propriété qui permet de placer une confiance justifiée dans les services attendus d'un système décrite par la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenance et logistique de maintenance (AFNOR 2001)

système : ensemble d'éléments organisés pour remplir une mission déterminée dans un environnement défini (Lair 2000)

utilité : aptitude d'un système à satisfaire un besoin ou à créer les conditions favorables à cette satisfaction (contribution à une fonction) (Tacnet et Curt 2013)

vieillesse : phénomène physique qui entraîne une modification des caractéristiques physiques et/ou chimiques de la matière (AFNOR 2001)

Liste des acronymes

ACB	analyse coûts bénéfiques
AD	aide à la décision
AF	analyse fonctionnelle
AFE	analyse fonctionnelle du besoin (ou externe)
AFI	analyse fonctionnelle technique (ou interne)
AgroParisTech	Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement
AHP	analyse multicritère hiérarchique (<i>Analytic Hierarchy Process</i> en anglais)
AMC	aide multicritère à la décision
AMDE	analyse des modes de défaillance
APTE	APplication aux Techniques d'Entreprise
BBA	fonction de masse (<i>Basic Belief Assignment</i> en anglais)
BdF	bloc diagramme fonctionnel
BD-RTM	base de données RTM
BF-TOPSIS	TOPSIS basées sur les fonctions de croyance (<i>Belief function-based TOPSIS</i> en anglais)
BLFUW	Ministère fédéral autrichien de l'agriculture, des forêts, de l'environnement et des eaux
COWA-ER	OWA prudente selon le ER (<i>Cautious OWA with Evidential Reasoning</i> en anglais)
DDAF	Directions départementales de l'agriculture et de la forêt
DEMO	Décision en Entreprise : Modélisation et Optimisation
DSmT	théorie de Dezert-Smarandache du raisonnement plausible et paradoxal
DST	théorie de Dempster-Shafer
EDD	étude de danger
EL	état-limite
Electre	élimination et choix traduisant la réalité
ELS	états-limites de service
ELU	états-limites ultimes
EME	éléments du milieu extérieur
ENSMSE	École nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne

LISTE DES ACRONYMES

ER	Raisonnement Évidentiel (<i>Evidential Reasoning</i> en anglais)
ERC	événement redouté central
ER-MCDA	ER pour une AMC (<i>Evidential Reasoning for Multi Criteria Decision Analysis</i> en anglais)
ERV	estimation du vecteur d'ordonnancement (<i>estimator ranking vector</i> en anglais)
ET	Electre Tri
FAST	méthode d'analyse des fonctions d'un système (<i>Function Analysis System Technique</i> en anglais)
FC	fonctions contraintes
FCOWA-ER	COWA-ER floue (<i>Fuzzy COWA-ER</i> en anglais)
FCPR	formation complémentaire par la recherche
FoD	cadre de discernement (<i>Frame of Discernement</i> en anglais)
FP	fonctions principales
FT	fonctions de conception (ou techniques)
GPI	gestion patrimoniale des infrastructures
HACCP	analyse des risques et maîtrise des risques au point critique (<i>hazard analysis critical control point</i> en anglais)
HAZOP	analyse du risque et de l'exploitabilité (<i>hazard and operability analysis</i> en anglais)
HIRA	identification des dangers et analyse de risque (<i>hazard identification and risk analysis</i> en anglais)
IA	intelligence artificielle (<i>Artificial Intelligence</i> en anglais)
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
LiDAR	Light Detection And Ranging terrestre ou aéroporté
MAAF	Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
MAUT	théorie de l'utilité multi-attribut (<i>Multi Attribute Utility Theory</i> en anglais)
MEEM	Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
ONF	Office National des Forêts
ONR	normes de l'institut autrichien de normalisation
OWA	ordonnancement selon une moyenne pondérée (<i>Ordered Weighted Averaging</i> en anglais)
PAPAM	programmes d'action et de prévention contre les aléas de montagne
PAPI	programmes d'action et de prévention contre les inondations

LISTE DES ACRONYMES

PCR	redistribution proportionnelle du conflit (<i>Proportional Conflict Redistribution</i> en anglais)
PER	plans d'exposition aux risques
PIC	contenu de l'information probabiliste (<i>Probabilistic Information Content</i> en anglais)
PL	programmation linéaire
PLANAT	plate-forme fédérale suisse sur les risques naturels
PPRn	plans de prévention contre les risques naturels
PZRN	plans de zonage des risques naturels
RCB	Service de rationalisation des choix budgétaires
RO	recherche opérationnelle
RTM	Restauration et conservation des Terrains en Montagne
SADT	méthode structurée d'analyse et de conception (<i>Structured Analysis Design Technique</i> en anglais)
SBC	systèmes à base de connaissances
SdF	sûreté de fonctionnement
SET	Soft Electre Tri
SHS	sciences humaines et sociales
SIG	système d'informations géographiques
TBM	modèle de la crédibilité transférable (<i>Transferable Belief Model</i> en anglais)
TOPSIS	technique pour un ordonnancement par similitude avec la solution idéale (<i>technique for order preference by similarity to ideal solution</i> en anglais)
VAN	Valeur Actuelle Nette

Liste des notations mathématiques

\mathcal{A}	ensemble des alternatives potentielles
A_i	alternative potentielle dans un ensemble discret
A_i^*	la meilleure alternative dans un ensemble discret
A^{best}	solution idéalement la meilleure (méthode TOPSIS)
A^{worst}	solution idéalement la pire (méthode TOPSIS)
$\{a, b, c, d\}$	quadruplet de définition d'un ensemble flou (ou distribution de possibilité) trapézoïdal
$B(A_i)$	bénéfice global selon l'alternative A_i
$\text{Bel}^\Theta(\cdot)$	fonction de crédibilité pour le FoD Θ
BI^Θ	intervalle de croyance pour le FoD Θ
b_{h-1}	limite basse de la classe (ou catégorie) C_h
b_h	limite haute de la classe (ou catégorie) C_h
\mathcal{C}	ensemble des classes (ou catégories) d'affectation possibles
C_h	une classe (ou catégorie) d'affectation possibles
C_i	conséquence globale attendue pour A_i étant donné \mathcal{S}
C_{ik}	conséquence attendue pour A_i étant donné le scénario S_k
$C(A_i)$	coût global selon l'alternative A_i
$C(A_i, A^{\text{best}})$	proximité relative entre A_i et A^{best}
$c(A_i, b_h)$	indice de concordance global avec l'hypothèse « A_i est au moins préférée b_h »
$c_j(A_i, b_h)$	indice de concordance partiel (pour g_j) avec l'hypothèse « A_i est au moins préférée b_h »
\mathbf{C}	matrice de conséquences
$D_{z_e, T_k}(0)$	évaluation des dommages initiaux sur z_e pour T_k
$D_{z_e, T_k}(A_i)$	évaluation des dommages sur z_e pour T_k avec une alternative A_i
$d(m_1^\Theta, m_2^\Theta)$	distance entre les deux BBAs m_1^Θ et m_2^Θ , pour le FoD Θ
$d_{\text{BI}}(m_1^\Theta, m_2^\Theta)$	distance euclidienne basée sur BI^Θ entre les deux BBAs m_1^Θ et m_2^Θ
d_i^{best}	distance euclidienne entre A_i et A^{best}
d_i^{worst}	distance euclidienne entre A_i et A^{worst}
$d_j(A_i, b_h)$	indice de discordance partiel (pour g_j) avec l'hypothèse « A_i est au moins préférée b_h »

\mathcal{G}	ensemble des critères de décision
g_j	un critère de décision
M	nombre total d'alternatives dans \mathcal{A}
$m^\Theta(\cdot)$	fonction de masse (BBA) pour le FoD Θ
$m_{PCR6}^\Theta(\cdot)$	fonction de masse (BBA) pour le FoD Θ après combinaison de plusieurs BBAs par la règle de fusion PCR6
\mathbf{M}^Θ	matrice de BBAs pour le FoD Θ
N	nombre total de critères dans \mathcal{G}
$N(Y)$	mesure de nécessité de l'ensemble Y
n	nombre total d'éléments du FoD Θ
$P(S_k)$	probabilité de survenance du scénario S_k
$P^\Theta(\cdot)$	fonction de probabilité subjective pour le FoD Θ
$PL_{a>b}$	niveau avec lequel l'élément a est préféré à l'élément b , $a, b \in \mathcal{A}$
$Pl^\Theta(\cdot)$	fonction de plausibilité pour le FoD Θ
P_α	problématique de choix
P_β	problématique de tri
P_δ	problématique de description des conséquences
P_γ	problématique de classement
p_j	seuil de préférence pour le critère g_j
$p_j(b_h)$	seuil de préférence pour le critère g_j par rapport à la limite b_h
$\mathbf{P}_{\mathbf{A},g_j}$	matrice de préférences entre alternatives pour le critère g_j
$\mathbf{P}_{\mathbf{g}}$	matrice de préférences entre critères
Q	nombre total de sources d'informations s_q
q_j	seuil d'indifférence pour le critère g_j
$q_j(b_h)$	seuil d'indifférence pour le critère g_j par rapport à la limite b_h
q_t	taux d'actualisation à l'année t
\mathbb{R}	ensemble des réels
\mathcal{S}	ensemble des états de la nature
S_k	scénario (ou événement) d'un ensemble \mathcal{S} discret
s_i	évaluation finale de l'alternative A_i selon un critère unique de synthèse (méthode AHP)
s_q	une source d'information
\mathbf{S}	matrice multicritère de scores
\mathbf{s}_j	vecteur de scores normalisés pour le critère g_j (méthode AHP)
T_k	période de retour basse pour le scénario S_k

LISTE DES NOTATIONS MATHÉMATIQUES

T_{k+1}	période de retour haute pour le scénario S_k
t_{projet}	horizon temporel de projet
v_j	seuil de veto pour le critère g_j
$v_j(b_h)$	seuil de veto pour le critère g_j et la limite b_h
\mathbf{W}_i	vecteur des coefficients de pondération ω_{ik} (approche OWA)
\mathbf{w}	vecteur des poids de l'ensemble des critères de \mathcal{G}
X_j	ensemble d'évaluation du critère g_j
x_{hj}	score du profil b_h selon le critère g_j
x_{ij}	score de A_i selon le critère g_j
z_e	élément exposé (ou enjeu)
$\Pi(Y)$	mesure de possibilité de l'ensemble Y
Θ	cadre de discernement (FoD)
α_d	seuil de coupe d'une distribution de possibilité pi
α_q	coefficient de fiabilité de la source s_q
ϵ	paramètre de calage pour le calcul de la transformation probabiliste par la DSMP
λ	seuil de coupe (méthode ET)
μ_θ	fonction d'appartenance à l'ensemble flou θ
ω_j	poids (importance relative) du critère g_j
π	distribution de possibilité
θ	un ensemble flou
$\bar{\theta}$	complément de l'ensemble flou θ
θ^c	élément de clôture du FoD $\Theta^{o.w.}$, d'après Yager (1983)
θ_e	élément du FoD Θ
$\hat{\theta}(A_i)$	élément choisi dans le FoD Θ pour une alternative A_i
2^Θ	power-set du FoD Θ
\emptyset	ensemble vide

Avant-propos... le contexte institutionnel

L'événement torrentiel du 18 juin 2013 dans les Pyrénées centrales a fait 2 victimes et plus de 500 millions d'euros de dégâts (figure 1). Il s'agit d'un exemple, parmi tant autres, des dommages dus aux phénomènes naturels en montagne, comme les crues torrentielles, chutes de blocs et avalanches.



FIGURE 1 – Maison détruite par la crue du Bastan du 18 juin 2013 à Barèges, dans les Hautes-Pyrénées (photo du 03/07/2013, S. Carladous).

Pour protéger les populations et les infrastructures, l'Etat français a, depuis le XIX^{ème} siècle, acquis plus de 380 000 ha de forêts publiques, dites domaniales, au titre de la Restauration et conservation des Terrains en Montagne (RTM). La construction de nombreux ouvrages de génie civil y a été indispensable (figure 2). Aujourd'hui, l'Etat a une double responsabilité en tant que maître d'ouvrage, propriétaire de ces structures, et garant de la sécurité des personnes.

Ainsi, le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF) confie à l'Office National des Forêts (ONF) la gestion sylvicole des forêts domaniales mais aussi celle du parc d'ouvrages, par l'intermédiaire du service spécialisé RTM. Ces ouvrages, comme la forêt, vieillissent. Le MAAF s'interroge sur leur niveau d'efficacité actuel et, dans un contexte de réduction des budgets publics, souhaite établir des priorités d'intervention.

Le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM), en charge de la politique de prévention des risques, définit notamment les directives pour l'élaboration des plans de prévention contre les risques naturels (PPRn), document réglementaire d'occupation des sols. De nombreux ouvrages ont été construits par les collectivités locales pour protéger leurs administrés. Elles posent la question de leur prise en compte dans les PPRn, selon leur niveau d'efficacité.

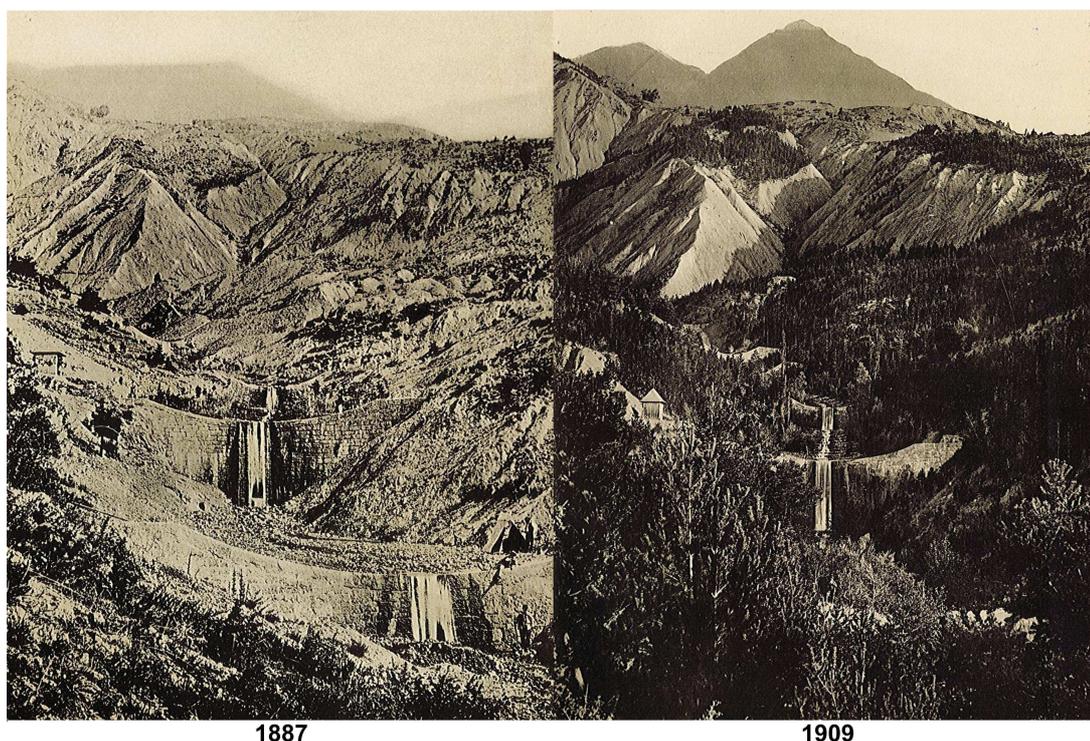


FIGURE 2 – Ouvrages mis en place en forêt domaniale et développement de la végétation entre 1887 et 1909 - torrent du Bourget, Faucon-de-Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence (École Forestière 1911a).

L'évaluation de l'efficacité des ouvrages est ainsi un enjeu opérationnel important pour le MAAF, le MEEM et le RTM. Il n'existe cependant pas de méthode formelle d'aide à cette évaluation. Pour répondre à ce besoin de développement, un partenariat a été établi entre les organismes précités et l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea). Ce dernier a hébergé et encadré cette thèse, appuyé par l'équipe Décision en Entreprise : Modélisation et Optimisation (DEMO) de l'École nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSMSE).

Pour mener ce travail pluridisciplinaire, un profil d'ingénieur RTM, de huit années d'expérience professionnelle, a été privilégié. Le MAAF a financé le salaire par une formation complémentaire par la recherche (FCPR) dépendant administrativement de l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech). Le MEEM a financé l'Irstea pour les frais d'encadrement, d'hébergement et de déplacement. Les services RTM ont été un appui opérationnel. Cet aspect multi-partenarial a ancré cette thèse comme une étape d'un parcours professionnel orienté vers l'ingénierie et l'expertise en appui aux décisions publiques.

Introduction

En montagne, les phénomènes naturels comme les crues torrentielles, les mouvements de terrain et les avalanches se propagent sur des pentes raides, avec des vitesses et des pressions d'impact sur les obstacles plus élevées que celles des inondations de plaine. Lors d'un événement, ils peuvent avoir des effets dévastateurs sur des enjeux humains et matériels comme les habitations, les réseaux ou les industries. Le risque, selon la définition développée dans le domaine industriel, correspond au croisement entre la fréquence des événements et la gravité de leurs conséquences. Il est représenté par la courbe de Farmer (figure I.8, p.13). Dans le domaine des phénomènes naturels, le risque sur un territoire donné est alors classiquement défini comme le croisement entre un aléa (phénomène caractérisé en intensité et en fréquence) et la vulnérabilité des enjeux exposés qui représente leur potentiel d'endommagement. S'il est trop important, les gestionnaires de ce territoire souhaitent réduire ce risque à un niveau socialement acceptable (Leone et al. 2010).

Au titre de la politique de gestion du risque, le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM) est en charge du suivi de la mise en œuvre des mesures de prévention sur le territoire national. Parmi elles, les mesures structurelles, comme les ouvrages de protection, agissent sur les phénomènes naturels pour réduire leur intensité et leur fréquence. Dans les montagnes françaises, comme ailleurs en Europe, des ouvrages ont ainsi été implantés depuis le XIX^{ème} siècle. Les mesures non structurelles de prévention, comme les plans de prévention des risques (PPRn), agissent sur la vulnérabilité des enjeux en définissant les règles d'occupation du sol. Elles s'appuient sur la connaissance des phénomènes naturels mais aussi de la réduction induite par les mesures de protection structurelles. Depuis leur construction, les ouvrages ont vieilli, impliquant une possible diminution de leur efficacité. En parallèle, les besoins de protection ont évolué, avec une diminution de la population rurale et une augmentation de la population touristique et péri-urbaine (Brugnot et Cassayre 2002). Deux problèmes opérationnels apparaissent pour s'assurer 1) que le niveau de protection offert par les ouvrages existant est suffisant et 2) que leur entretien est en adéquation avec les besoins effectifs pour utiliser au mieux des ressources budgétaires limitées.

Pour y répondre, les gestionnaires du risque naturel, et les experts qui les aident, cherchent à évaluer l'efficacité des ouvrages de protection. Ce concept apparaît comme essentiel au processus et plusieurs problèmes de décision y sont associés. Les systèmes existant, dégradés et impactés par des phénomènes destructeurs, sont-ils en capacité de résister structurellement ? d'atteindre les objectifs fonctionnels fixés comme de limiter l'érosion, les débordements, etc. ? Quelle stratégie choisir pour maintenir, voire augmenter, leur efficacité grâce à des actions de maintenance ou de construction de nouveaux ouvrages ?

Souvent, la connaissance des conditions de déclenchement et de propagation des phénomènes, de l'état des ouvrages du point de vue structural et fonctionnel, et de leur capacité réelle de réduction du risque reste imparfaite (incomplète, imprécise, incertaine). Cette problématique décisionnelle,

et les besoins opérationnels associés, soulèvent donc des questions de recherche particulières liées aux processus de décision en contexte d'informations imparfaites. Mobilisant fortement l'expertise, l'évaluation de l'efficacité est un processus pluridisciplinaire qui allie l'analyse de la stabilité des ouvrages à celle de la réduction du risque induite. Elle provient de plusieurs sources, inégalement fiables et possiblement hétérogènes : archives, indicateurs visuels, mesures, modèles numériques, ou différents experts. Ces sources exploitent et manipulent des informations imparfaites comme des mesures imprécises, des données incertaines ou des qualificatifs linguistiques. Dans un contexte de forte incertitude sur la connaissance des phénomènes naturels, l'expertise combine l'ensemble de ces informations imparfaites pour aider à décider (Roqueplo 1997 ; Tacnet 2009).

Lors de la réalisation de l'expertise, la traçabilité des actions ayant conduit aux résultats doit être assurée (AFNOR 2003b). L'explicitation et la transparence des hypothèses sont notamment des facteurs clés d'appréciation d'une expertise par les juges (Tacnet et al. 2008). La propagation de l'imperfection des informations, sur lesquelles s'appuie la prise de décision, est un enjeu important pour assurer la traçabilité dans l'expertise.

Pour y parvenir dans le contexte particulier de l'analyse de l'efficacité des ouvrages de correction torrentielle, l'hypothèse de travail est que les différents problèmes de décision, associés à l'évaluation de l'efficacité, à sa prise en compte dans le processus de gestion des risques et basés sur des informations imparfaites, peuvent être formulés, modélisés, traités puis intégrés. La description du contexte de décision doit aider à formuler chaque problème en spécifiant l'objet, les critères de décision, les sources d'information et leurs formes d'imperfection. Les différents modèles et méthodes d'aide à la décision (AD) et de représentation de l'imperfection de l'information sont alors candidats pour leur traitement et leur intégration.

Sur la base de cette hypothèse, la thèse est organisée en six chapitres, comme illustré sur la figure 3.

chapitres	sections	démarche scientifique
I	I.1 Contexte métier : concepts de risque et de protection	→ contexte ↓ → problématique ←
	I.2 Efficacité : problématique, définition	
	I.3 Problèmes liés à l'évaluation de l'efficacité	
	I.4 Synthèse	
II	II.1 Aide à la décision (AD) : théorie de la décision, aide multicritère	↓ → état de l'art ↓ → hypothèses et méthodologie ←
	II.2 Sûreté de fonctionnement (SdF)	
	II.3 Imperfection de l'information et aide à la décision (AD) basée sur le raisonnement évidentiel (ER)	
	II.4 Synthèse	
III	III.1 Décomposition multi-échelle : approche systémique	↓
	III.2 Description, formulation des problèmes : aide à la décision	
	III.3 Synthèse	
IV	IV.1 Aide à la décision basée sur le ER	→ développements et applications
	IV.2 adaptation pour évaluer l'efficacité	
	IV.3 améliorations techniques	
	IV.4 Synthèse	
V	V.1 Intégration des problèmes	↓
	V.2 méthodologie séquentielle application au bassin d'enjeux	
VI	VI.1 Apports méthodologiques	→ discussion analyse
	VI.2 Limites et perspectives méthodologiques	
	VI.3 Aspects opérationnels	

FIGURE 3 – Une vision synthétique de la thèse.

Le chapitre I identifie la problématique scientifique. Le chapitre II expose l'état de l'art. Les chapitres III à V présentent les développements réalisés, les appliquant à l'efficacité des ouvrages de protection. Enfin, le chapitre VI discute ces développements et propose des perspectives tant opérationnelles que scientifiques. Par souci de clarté, des encadrés synthétisent les éléments principaux qui sont issus de chaque section et sous-section.

Le *chapitre I* précise le contexte opérationnel et détermine les problèmes associés. La section I.1 décrit les phénomènes torrentiels et dommages occasionnés. Elle introduit le concept de risque naturel et de sa réduction par des mesures non structurelles comme les PPRn et des mesures structurelles de protection. La section I.2 qui suit expose les différentes échelles de protection, la démarche de conception et identifie l'efficacité comme un concept central et multi-dimensionnel de la gestion du risque. La section I.3 présente l'hétérogénéité et les limites de la pratique de l'expertise mobilisée pour évaluer l'efficacité des mesures de protection. Elle repose sur un concept ambigu, avec une traçabilité du raisonnement partielle et l'absence de validation. Réalisée dans un temps réduit, elle s'appuie sur de multiples sources inégalement fiables et hétérogènes, fournissant des informations imparfaites.

La synthèse de la section I.4 détermine la problématique de recherche et les domaines scientifiques associés. Les différentes composantes de l'efficacité doivent être explicitées. Les indicateurs et critères permettant de les évaluer doivent être identifiés, formalisés, évalués puis agrégés. L'ingénierie des risques, les méthodes de la sûreté de fonctionnement (SdF) et d'aide à la décision (AD) tenant compte de plusieurs critères sont mobilisables. Pour assurer la traçabilité du raisonnement, les théories permettant de représenter les différentes formes d'imperfection de l'information, puis de fusionner celles fournies par des sources inégalement fiables, sont candidates. Une méthode de validation des évaluations doit être proposée. Finalement, une méthodologie permettant d'intégrer les différentes échelles doit être développée.

Le *chapitre II* présente l'état de l'art correspondant aux domaines identifiés. La section II.1 expose l'établissement des méthodes d'AD, depuis la théorie de la décision rationnelle, dont l'analyse coûts bénéfiques (ACB) et le calcul du risque naturel sont des applications, jusqu'à l'aide multicritère à la décision (AMC). Les étapes du processus d'AD sont par ailleurs rappelées. La section II.2 explore la modélisation systémique et les méthodes de la SdF. Devant les limites des probabilités, la section II.3 introduit ensuite les théories des ensembles flous, des possibilités, des fonctions de croyance et du Raisonnement Évidentiel (*Evidential Reasoning* en anglais) (ER) pour représenter l'imperfection de l'information, la propager et aider à décider. Cette section met en évidence l'intérêt des méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) et d'AD dans l'incertain basées sur le ER.

La synthèse de la section II.4 identifie trois axes de développement. Tout d'abord, dans le cadre d'un processus d'AD, le contexte doit être décrit, le besoin et le problème multi-échelle formulés puis décomposés en plusieurs problèmes. Les méthodes de la SdF sont candidates mais l'aspect multi-échelle sera développé dans le chapitre III. Ensuite, les méthodes d'AD basées sur le ER aident à tracer le raisonnement, mais doivent être adaptées, améliorées et associées (chapitre IV), ainsi qu'appuyées par une méthode de validation utilisant les modèles physiques comme référence. Enfin, une méthodologie d'analyse séquentielle doit être proposée (chapitre V). L'intégration multi-échelle et multi-temporelle y sera développée en incorporant les méthodes utilisées pour décider selon chaque problème individuel, en univers incertain.

Le *chapitre III* décrit et formalise les problèmes de décision selon une approche systémique multi-échelle. Après avoir précisé le concept d'efficacité, la section III.1 développe une analyse systémique multi-échelle permettant d'identifier les fonctions données aux mesures de protection. Les indicateurs et critères permettant d'évaluer leur efficacité sont finalement extraits. La section III.2 développe ensuite un processus d'aide à la décision multi-échelle. Pour cela, l'analyse historique du contexte de décision met en évidence l'évolution des objectifs donnés aux ouvrages de protection. Les concepts à analyser pour permettre l'évaluation de l'efficacité sont précisés. Finalement, la section III.3 synthétise la méthodologie développée, depuis la décomposition du problème à plusieurs échelles jusqu'à la formulation des problèmes associés.

Le *chapitre IV* adapte, améliore et associe les méthodes d'aide à la décision (AD) basées sur le Raisonnement Évidentiel (ER). La section IV.1 modélise, pour chaque échelle de système, les problèmes de décision multicritère en univers incertain. Les méthodes d'AD basées sur le ER y sont adaptées et comparées. La section IV.2 améliore les méthodes d'analyse multicritère basées sur le ER selon trois aspects. Une méthode générique de validation de l'évaluation experte des indicateurs et critères est d'abord proposée. Elle s'appuie sur les modèles physiques pour établir une référence objective. Ensuite, la méthode permettant la transposition d'une distribution de possibilité en fonction de masse, sur la base d'ensembles flous, est perfectionnée pour représenter l'évaluation imparfaite d'un critère. Puis, une nouvelle méthode de décision, développée avec l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA), est présentée. Elle se base sur le calcul de la distance entre deux fonctions de masse et établit le niveau de qualité de la décision recommandée. La section IV.3 développe l'association des méthodes pour permettre de propager l'imperfection de l'information dans l'ensemble du processus d'aide multicritère à la décision en univers incertain. La section IV.4 synthétise la méthodologie permettant d'aider l'évaluation sur la base de la connaissance disponible, mais limitée à une évaluation à chaque échelle de système.

Le *chapitre V* développe une méthodologie intégrée et séquentielle. La section V.1 formalise l'intégration multi-échelle et multi-temporelle de l'évaluation de l'efficacité et de l'efficacité des mesures de protection dans un bassin d'enjeux. Les développements des chapitre III et IV sont intégrés. La section V.2 propose, sur un exemple simplifié, de comparer des actions de protection potentielles à l'échelle d'un bassin d'enjeux. L'application des méthodes classiques d'aide à la décision (AD) et des méthodes basées sur le Raisonnement Évidentiel (ER) met en évidence l'apport des développements réalisés.

Le *chapitre VI* discute les apports de cette thèse et identifie des perspectives. La section VI.1 rapporte sa contribution au développement d'un processus d'AD intégré, à l'analyse de risque torrentiel et à l'AD, basée sur plusieurs critères, en contexte d'information imparfaite. La section VI.2 identifie les perspectives pour poursuivre l'intégration de l'évaluation de l'efficacité dans l'analyse de risque et pour continuer d'améliorer les méthodes d'AD basées sur le ER. La section VI.3 décline les apports opérationnels pour l'explicitation du concept d'efficacité et l'aide à la formalisation des problèmes de décision, pour lesquels l'expertise aura toujours une place prépondérante dans le processus d'aide à la décision.

La *conclusion* synthétise les besoins et objectifs initiaux, les hypothèses et la méthodologie de travail, les développements réalisés et les principales contributions associées.

Risques naturels en montagne, protection, efficacité et expertise

I.1 Mesures de protection et réduction des risques naturels

En montagne, les phénomènes naturels tels les crues torrentielles sont destructeurs à l'échelle d'un bassin versant. Ils provoquent des dommages sur des enjeux vulnérables (habitations, industries, routes, etc.) qui y sont exposés. Pour les limiter, les ouvrages de protection agissent sur les phénomènes tandis que les mesures de gestion de l'occupation du sol, comme les PPRn, limitent l'exposition et la vulnérabilité des enjeux. Au travers de l'exemple des phénomènes torrentiels, cette section décrit d'abord la physique de ces phénomènes. L'effet attendu des mesures de protection structurelles est ensuite établi en abordant le concept de réduction du risque naturel, son analyse et son évaluation.

I.1.1 Phénomènes naturels en montagne : cause de dommages

En France, les inondations sont les phénomènes naturels qui provoquent le plus de dommages économiques, après les tempêtes et la grêle (Ledoux 2006). Les crues torrentielles, comme les avalanches et les mouvements de terrain rapides (glissements de terrain, chutes de blocs, coulées de débris), sont spécifiques aux zones de montagne, comme celles des massifs français (Alpes, Pyrénées, Cévennes, Massif Central, Jura et Vosges) (figure I.1).

I.1.1.1 Physique des phénomènes torrentiels : rapides et destructeurs

Si les inondations sont lentes dans les rivières de plaine (pente inférieure à 1%), elles sont rapides dans les rivières torrentielles (pente comprise entre 1% et 6%) et les torrents (pente supérieure à 6%) (Meunier 1991). Cette section détaille la physique spécifique aux phénomènes torrentiels.

- **Bassin versant : du déclenchement à l'interaction avec les obstacles**

Les crues des rivières torrentielles et torrents sont caractérisées par « une mise en mouvement gravitaire et rapide de mélanges complexes de fluides (air, eau) et de solides (blocs, graviers, particules fines, débris végétaux) » (Tacnet 2009). Elles sont localisées dans des petits bassins versants, de moins d'une centaine de kilomètres carrés (Mathys et al. 2013), physiquement composés de trois parties, liées au processus de production et de transfert des matériaux (Surell 1841). Les torrents affluent dans une rivière principale (figure I.2). Depuis le XIX^{ème} siècle, de nombreux ouvrages de protection y ont été implantés (Brugnot et Cassayre 2002).

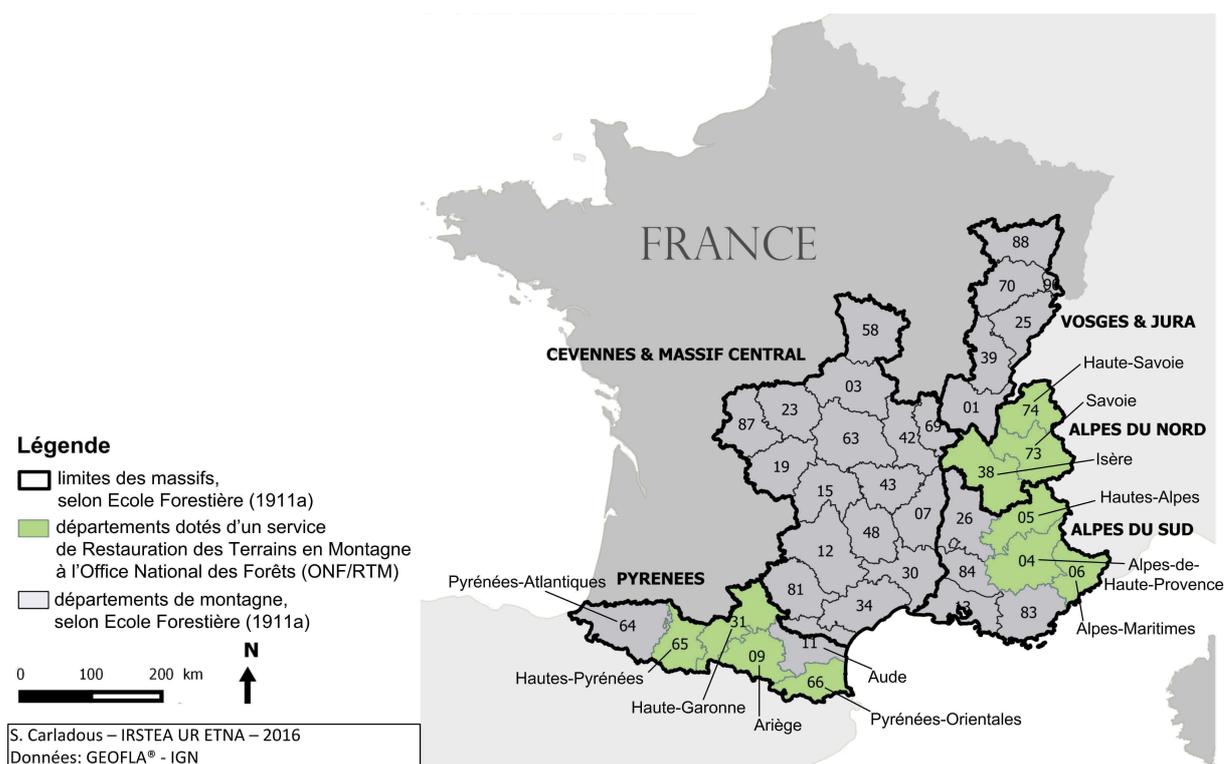


FIGURE I.1 – Massifs, départements de montagne et départements avec un service ONF/RTM en France (Nota Bene - dans les Pyrénées, trois services bi-départementaux : 11-66, 09-31, 64-65).

1. Le *bassin d'alimentation* (ou de réception) amont concentre les écoulements lors d'un événement pluvieux et regroupe les sources qui les rechargent en matériaux. Ceux-ci sont prélevés selon la capacité de transport des écoulements, liée au débit liquide (conditionné par la pluie) et à la pente. Le déclenchement des phénomènes torrentiels dépend alors de la météorologie et de la recharge sédimentaire (Brochot 1998). Les sources ponctuelles, comme les glissements de terrain, se distinguent des sources chroniques, telles les zones de ravinement (Reid et Dunne 2003). Pour les premières, le déclenchement est brutal, avec un volume d'apports solides important. A l'inverse, les secondes fournissent de manière récurrente de faibles volumes solides (Liébault et al. 2010).
2. Le *chenal* transfère l'écoulement chargé en matériaux selon deux types d'écoulement : le charriage et les laves torrentielles (Meunier 1991). L'incision longitudinale du lit, les érosions de berges et de pieds de glissements contribuent à des apports solides supplémentaires.
3. Le *cône de déjection* constitue la zone de dépôt des matériaux où le lit peut divaguer au cours du temps. En montagne, comme montré par l'exemple du torrent de la Grollaz (38) (ONF-RTM 38 2014), les enjeux sont souvent implantés dans cette zone où ils sont exposés aux phénomènes (Flez et Lahousse 2002).
4. Le *couplage* du bassin torrentiel avec la rivière dépend de la continuité du transport sédimentaire. Selon sa capacité de transport, des phénomènes de dépôts (capacité de transport insuffisante) et d'érosion (apport en matériaux insuffisant) se produisent le long de la rivière principale (Breton 1867 ; Gras 1850, 1857).

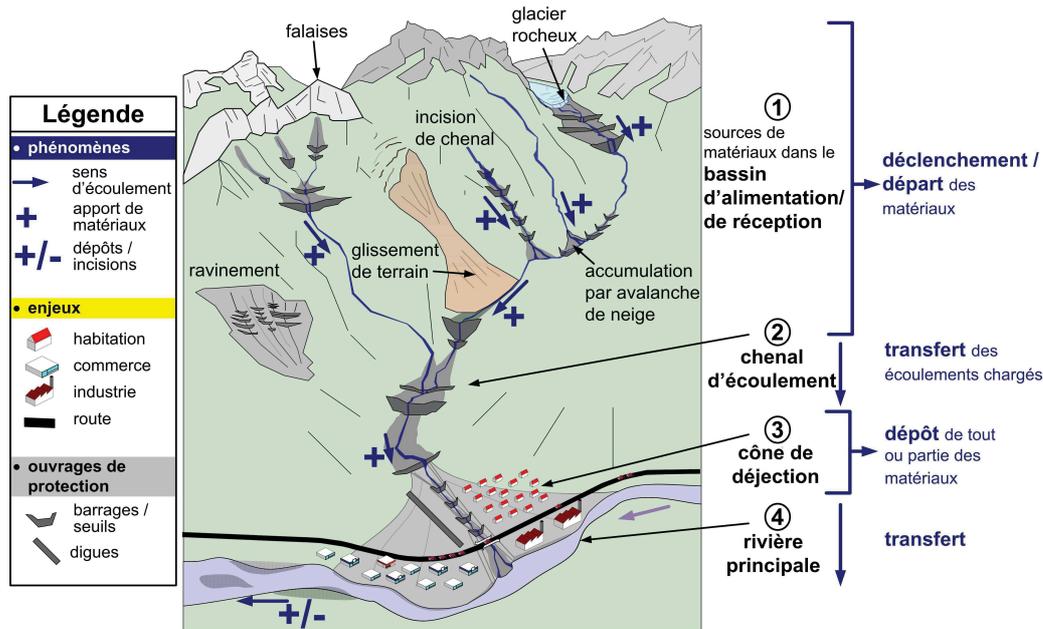


FIGURE I.2 – Des ouvrages sont implantés dans l'ensemble d'un bassin versant torrentiel pour agir sur la propagation gravitaire du phénomène et protéger les enjeux exposés à l'aval.

Le *charriage* torrentiel est un écoulement bi-phasique avec transport de particules et de blocs par roulement ou saltation sur le fond du lit. Il peut survenir dans tous les types de rivières, la concentration volumique en matériaux solides restant inférieure à 30%. Pour des concentrations supérieures, les matériaux peuvent se déplacer sur plusieurs épaisseurs pour un écoulement à charriage hyperconcentré dans les rivières torrentielles et les torrents (Koulinski 1993 ; Meunier 1991). Le charriage « classique » ou hyperconcentré engendre des phénomènes de divagation torrentielle qui provoquent une évolution temporelle de la localisation du lit d'écoulement (figure I.3).



FIGURE I.3 – Phénomène de divagation torrentielle et impacts associés (Carladou 2013).

Les *laves* torrentielles sont un écoulement monophasique en masse, prenant la forme de bouffées successives et se propageant sur quelques mètres de hauteur à des vitesses de plusieurs m/s . Chaque bouffée est précédée d'un front formé des plus gros blocs, suivi du corps et de la queue (figure I.4). Dans les laves boueuses, les blocs sont enchâssés et enveloppés dans une matrice fine. Dans celles granulaires, la proportion de matrice fine est faible par rapport à celle des blocs (Chambon et Laigle 2013).

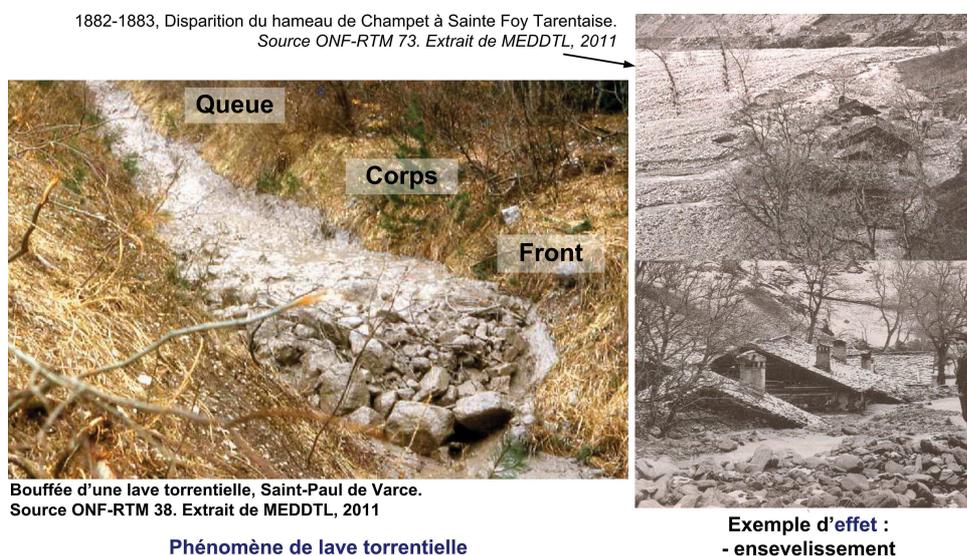


FIGURE I.4 – Phénomène de lave torrentielle et impacts associés (Carladous 2013).

- **Magnitude, effet et intensité des phénomènes torrentiels gravitaires**

Les phénomènes naturels s'expriment dans l'espace par une magnitude, une intensité, un impact et une fréquence (Thouret et D'Ercole 1996). La différence entre la magnitude et l'intensité a été introduite par Richter (1935) pour les séismes. Cette distinction a été transposée aux phénomènes gravitaires comme les glissements de terrain (Corominas et al. 2014). La magnitude M mesure l'ampleur décrite par le volume ou la surface du glissement localisé. L'intensité y mesure un ensemble de paramètres distribués spatialement, caractérisant l'effet destructeur, comme la vitesse de déplacement, ou la profondeur de la masse en mouvement. Les inondations sont comparées aux phénomènes torrentiels selon ce principe dans le tableau I.1.

La *magnitude* des phénomènes torrentiels est établie selon différentes unités. L'hydrogramme de lave torrentielle (débit de lave Q_{lave} en m^3/s en fonction du temps t) permet d'évaluer le volume de matériaux mobilisés ($V_{lave}(m^3) = \int_t Q_{lave}(t)dt$) ou le débit de pointe de la lave ($Q_{lave,p}$ en m^3/s) (Chambon et Laigle 2013). Pour une crue avec charriage, un hydrogramme (débit liquide $Q_L(t)$ en m^3/s) permet d'établir un sédimentogramme (débit solide $Q_S(t)$ en m^3/s) grâce aux formules physiques de transport solide (Recking et al. 2013a). La magnitude en est déduite : débits de pointe liquide $Q_{L,p}$ et solide $Q_{S,p}$; volume liquide $V_L(m^3) = \int_t Q_L(t)dt$ et volume de matériaux solides $V_S(m^3) = \int_t Q_S(t)dt$.

La magnitude M , établie en un point localisé du torrent, évolue d'amont en aval. Le débit liquide $Q_L(t)$ augmente avec la superficie du bassin versant. Comme les matériaux se déposent dans des zones de faible pente ou sont repris pour des pentes plus fortes, les débits solides ($Q_S(t)$ et $Q_{lave}(t)$) évoluent au fil du profil en long du torrent (figures I.5-I.6).

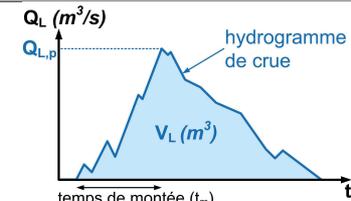
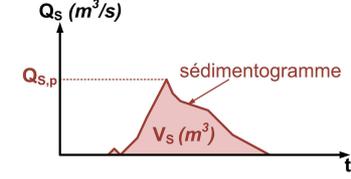
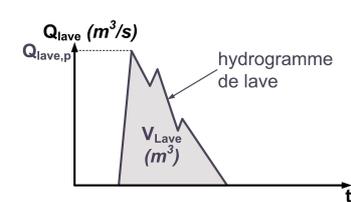
Phénomène	Magnitude M	Effet	Intensité y
inondations (eaux claires) (Merz et al. 2010)		submersion	h (m)
			v (m/s)
crues avec charriage (MEDDTL 2011)		dépôt	h_d (m)
		affouillement	p_a (m) l_a (m)
		poussée	P (kPa) EC (kJ)
laves torrentielles (MEDDTL 2011)		submersion	h (m)
		dépôt	h_d (m)
		impact	EC (kJ)
		poussée	P (kPa) EC (kJ)

TABLEAU I.1 – Magnitude M , effets et paramètres d'intensité y caractéristiques des phénomènes d'inondation, de crues avec charriage et de laves torrentielles.

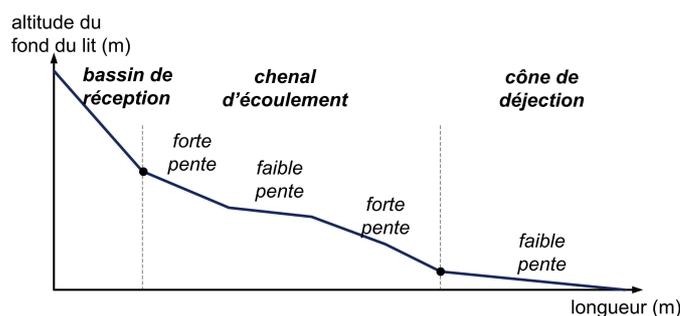


FIGURE I.5 – Exemple simplifié d'un profil en long de torrent.

Les *effets* potentiels des phénomènes torrentiels sont multiples. Le lit peut se creuser (érosion) ou se combler (dépôt), ce qui impacte les obstacles. Les crues torrentielles affouillent le lit du torrent et les berges (photos 1 et 3 de la figure I.3). Par dépôt, elles ensevelissent les enjeux (photo 4 de la figure I.3 et photos de droite de la figure I.4). Les blocs transportés à grande vitesse sont à l'origine d'impacts (photo 2 de la figure I.3) (Tacnet 2009).

Différents critères d' *intensité* y caractérisent chaque type d'effet. Leur niveau varie dans l'espace. On considère notamment la vitesse de l'écoulement (v), la hauteur d'écoulement (h) et de dépôt (h_d), la profondeur (p_a) et la largeur (l_a) d'affouillement, la durée de submersion ou de dépôt (d en heures h), la pression (P), ou l'énergie cinétique (EC). Si chaque critère d'intensité peut être évalué individuellement (Eckert et al. 2012), des classes sont généralement proposées sur la base de tables de vérité. Par exemple, les guides suisses ont établi le tableau I.2 pour évaluer l'intensité des laves torrentielles (OFAT 1997), en combinant hauteur de dépôt et vitesse d'écoulement.

L'intensité y est analysée spatialement, au niveau des enjeux exposés, situés sur le cône de déjection et dans le bassin versant (pistes forestières, ouvrages de protection, etc.) (figure I.6).

	$v = 0$	$0 < v < 1 \text{ m/s}$	$v \geq 1 \text{ m/s}$
$h_d = 0$			–
$0 < h_d < 1 \text{ m}$			–
$h_d \geq 1 \text{ m}$	–	–	

TABLEAU I.2 – Intensité y des laves torrentielles selon la hauteur de dépôt (h_d) et la vitesse d'écoulement (v) (OFAT 1997).

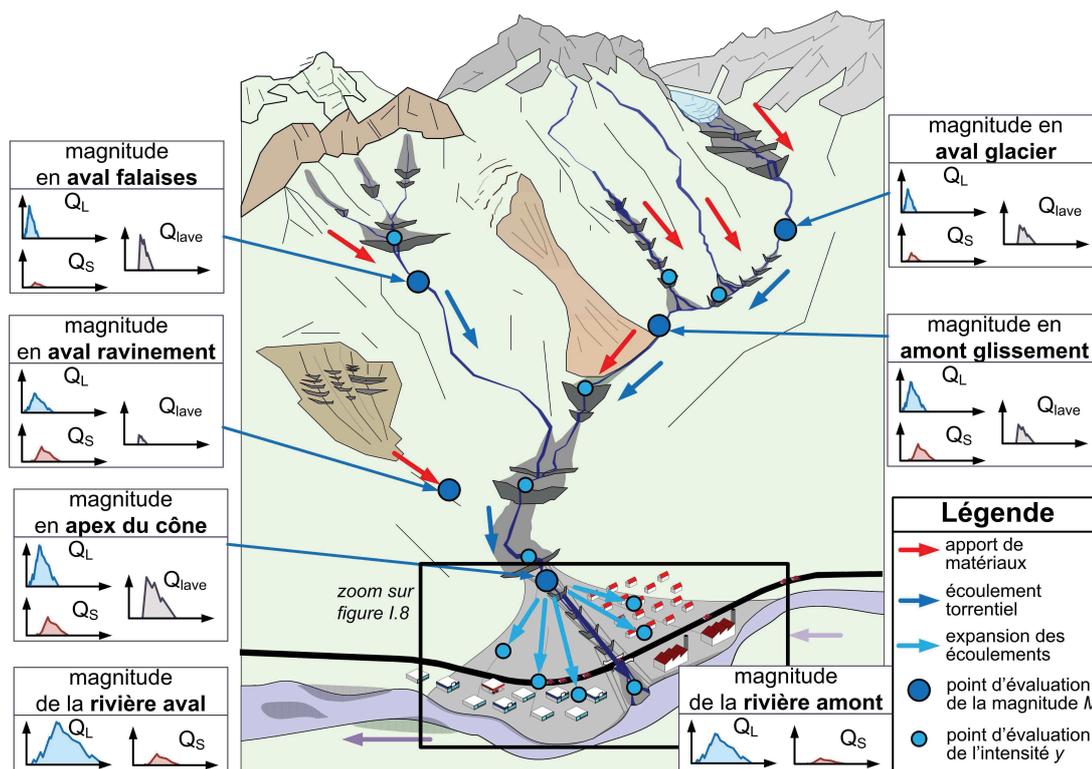


FIGURE I.6 – Propagation gravitaire de la magnitude et de l'intensité des phénomènes torrentiels.

L'expertise est nécessaire pour décrire les phénomènes torrentiels, qui sont difficiles à appréhender dans leur ensemble. Les effets et critères de magnitude et d'intensité à considérer sont multiples. L'analyse de ces phénomènes gravitaires dans le bassin versant est réalisée de l'amont vers l'aval, où sont constatés les effets sur les enjeux.

I.1.1.2 Vulnérabilité des enjeux exposés et dommages associés

En montagne, les *enjeux* se concentrent sur les cônes de déjection des torrents (Flez et Lahousse 2002) car le positionnement des activités humaines est limité dans l'espace. Sur un territoire donné, on définit par Ω le nombre total d'enjeux z_e , $e = 1, \dots, \Omega$, ainsi exposés aux phénomènes torrentiels. Une typologie de ces enjeux, inspirée de Hubert et Ledoux (1999), est établie dans le guide du CEPRI (2008). Elle identifie, entre autres, l'habitat, les activités économiques, les établissements publics, les réseaux, la santé humaine, l'environnement, etc.

Le *taux d'endommagement* potentiel mesure le niveau de dégradation d'un enjeu exposé pour un niveau d'intensité du phénomène donné. Il dépend du critère d'intensité et du mode d'endommagement, propre à chaque type d'enjeu. Chaque élément potentiellement exposé au phénomène naturel est alors défini par une courbe d'endommagement potentiel (Papathoma-Köhle et al. 2011), également dénommée « courbe de vulnérabilité » pour les biens et « courbe de létalité » pour la mortalité humaine (Bründl et al. 2009). Pour chaque classe d'intensité, un taux d'endommagement moyen de l'enjeu considéré peut aussi être établi, comme dans l'outil EconoMe[®] utilisé en Suisse (OFEV 2010). Le taux d'endommagement, noté $V(z_e, y_l)$, est donc une fonction du type d'enjeu z_e et de l'intensité y_l pour un effet du phénomène.

A titre d'exemple, la figure I.7 montre la connaissance actuelle limitée et imparfaite sur le taux d'endommagement potentiel d'une habitation exposée aux laves torrentielles. Les courbes continues, avec h_d comme paramètre d'intensité, sont extraites de Papathoma-Köhle et al. (2012) et celle discrète est issue de EconoMe[®]. Ces courbes proviennent de plusieurs sources : collecte de données suite à des événements (Akbas et al. 2009; Fuchs et al. 2007a; Papathoma-Köhle et al. 2012; Totschnig et al. 2011); modélisations physiques et numériques (Quan Luna et al. 2011).

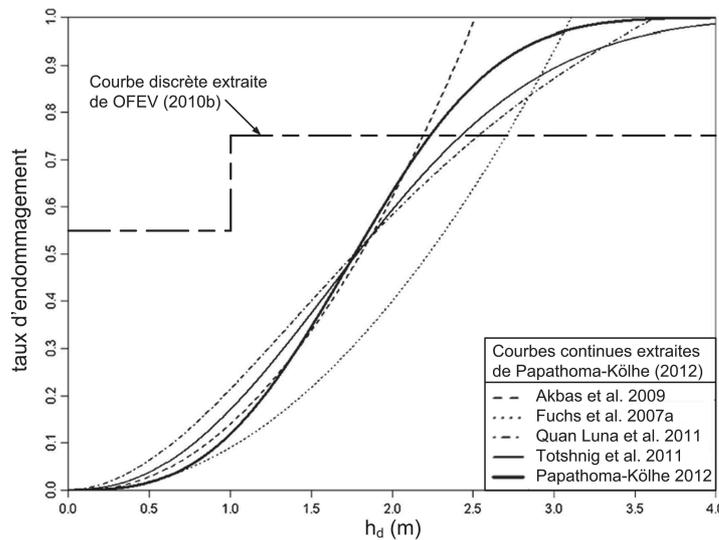


FIGURE I.7 – Exemples de courbes de taux d'endommagement d'une habitation exposée aux laves torrentielles.

La *vulnérabilité* est le potentiel de dommages sur les éléments exposés (Leone et al. 2010). La vulnérabilité directe évalue le potentiel de dommages physiques directs sur chaque enjeu, à partir des courbes de taux d'endommagement potentiel (figure I.7). La vulnérabilité indirecte analyse les conséquences potentielles qui sont externes à la zone d'impact, dans le temps et dans l'espace (Leone et al. 2010; Werey et al. 2016).

En montagne, les réseaux sont particulièrement importants pour accéder à des vallées isolées et permettre la mobilité professionnelle (PARN 2011). L'étude de la vulnérabilité indirecte liée nécessite des méthodes spécifiques (Tacnet et al. 2013). Cependant, si de nombreux travaux portent sur la vulnérabilité directe, ceux sur l'indirecte sont limités (Meyer et al. 2012). Un système d'informations géographiques (SIG) aide à l'évaluation de celle d'une route, affectée par une coupure de sa fonction de liaison (Leone et al. 2014; Tacnet et al. 2013). Elle permet d'étendre l'analyse à différentes échelles territoriales : celle du cône de déjection d'un bassin versant, d'une région, ou d'un pays (Leone et al. 2010; Tacnet 2012). Dans ce cadre, l'évaluation s'appuie sur des classes qualitatives (faible, moyenne, forte) permettant de prendre en compte son imprécision et d'assurer une meilleure lisibilité pour communiquer (Manche 2000).

Les *dommages* D sur les enjeux dépendent de leur vulnérabilité et de l'effet des phénomènes naturels, caractérisé par l'intensité y . On distingue alors dommages directs et indirects (D4E 2007). Les dommages peuvent aussi être différenciés selon leur valorisation. Les dommages tangibles sont définis par la capacité à leur affecter une valeur monétaire liée à un marché (Bubeck et Kreibich 2011), à l'inverse des dommages intangibles (Hubert et Ledoux 1999). Le tableau I.3 donne des exemples de classification selon cette typologie croisée.

Le cas de la mortalité humaine est particulier. Une vie humaine est quantifiable en valeur monétaire selon des techniques économiques (Garrabé 1994), pour 3.5 Millions € (M€) en Suisse (PARN 2011) et pour 2.5 M€ en France (Meunier et Mardsen 2009). Cependant, en France, comme en Autriche, les limites philosophiques conduisent à considérer la mortalité humaine comme un dommage intangible (BLFUW 2009b ; CGDD 2012).

	Directs	Indirects
Tangibles	Dommages physiques sur : - bâti - infrastructures - voitures, train	Dommages distant par : - perte d'exploitation - coupure de réseau
Intangibles	- santé humaine (morts, blessés) - biens environnementaux	- désordres psychologiques - patrimoine socio-culturel - environnement

TABLEAU I.3 – Typologie et exemples de dommages directs / indirects, tangibles / intangibles (Bubeck et Kreibich 2011 ; Carlados 2013).

En France, dans le domaine des inondations, des courbes de dommages potentiels tangibles identifient directement une valeur monétaire de dommages selon l'intensité, caractérisée par la hauteur d'écoulement (Torterotot 1993). En pratique, une confusion apparaît entre les « courbes de vulnérabilité » qui sont celles du taux d'endommagement potentiel (figure I.7) et la vulnérabilité qui intègre implicitement la valeur des dommages et le potentiel d'endommagement (Leone et al. 2010). Tacnet (2009) a mis en évidence cette ambiguïté dans le concept de risque naturel, défini en pratique comme le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité (figure I.8).

Les phénomènes naturels ont des effets multiples qui causent des dommages sur les enjeux. Le concept de vulnérabilité, associé à un endommagement et une valeur, reste ambigu : le taux d'endommagement est souvent confondu avec la vulnérabilité. Son évaluation ne prend pas en compte tous les effets en ne considérant qu'un ou deux critères d'intensité. En pratique, seule la vulnérabilité directe est analysée. Quantitative ou qualitative, elle est basée sur des informations imparfaites pouvant provenir de différentes sources.

I.1.2 Analyse, évaluation et réduction des risques naturels

La définition classique du risque est le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité. Les mesures de protection ont pour objectif d'agir sur l'aléa pour réduire le risque. L'évaluation de leur efficacité est donc liée à celle de la réduction du risque qu'ils permettent.

I.1.2.1 Risque : combinaison de l'aléa et des dommages potentiels

Le risque naturel est la combinaison des composantes décrites précédemment (figure I.8). La fréquence représente l'incertitude aléatoire associée à la connaissance des phénomènes. Le lien avec la courbe iso-risque introduite dans le domaine industriel par Farmer en 1967 (Pigeon 2010 ; Tacnet 2009) est mis en évidence. Le risque y est évalué par la gravité selon la fréquence.

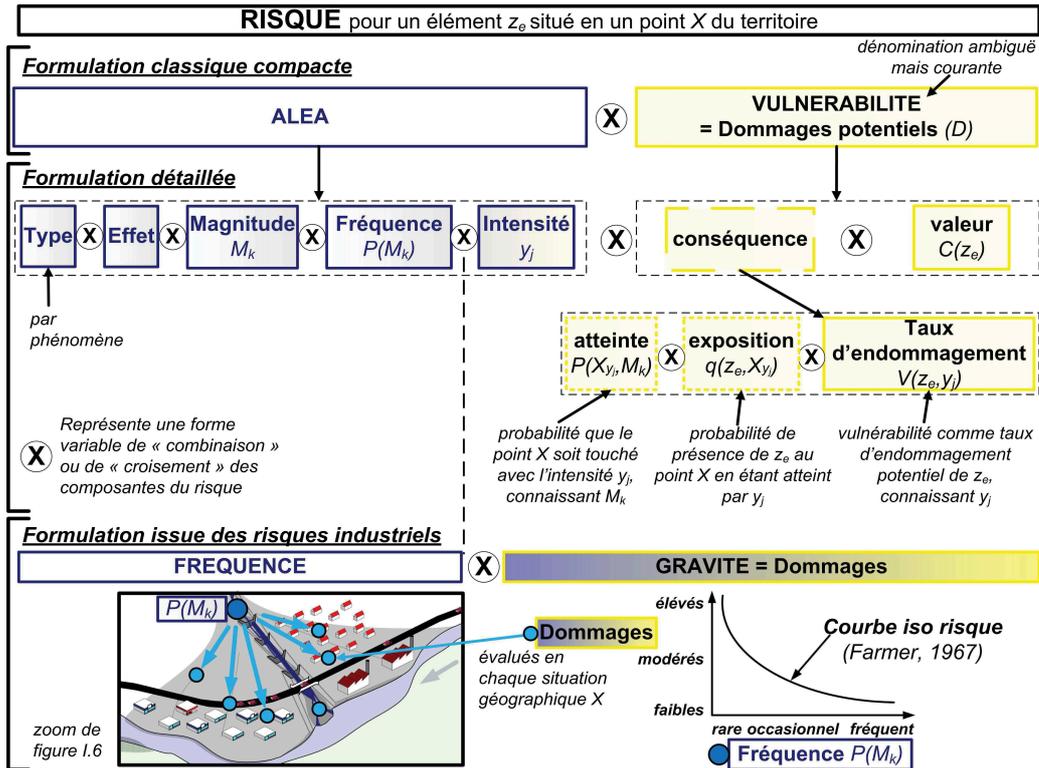


FIGURE 1.8 – Le risque naturel est la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux (Tacnet 2009).

L' *aléa* naturel dépend de la fréquence d'apparition d'un phénomène avec une magnitude atteignant au moins la valeur du seuil M_k . L'unité de la magnitude M est choisie parmi celles du tableau I.1 (p. 9). Sur une période d'analyse donnée, les N valeurs de M sont classées dans un ordre décroissant, avec $M_1 > \dots > M_k > \dots > M_N$ (figure I.9). La fréquence $f_k = \frac{k}{N}$ est associée à la valeur M_k , avec k le nombre de fois où M_k est atteint ou dépassé. Pour la même période d'analyse, la période de retour T_k est l'intervalle de temps moyen entre deux événements pour lesquels M_k est atteint ou dépassé. Dans le domaine des risques naturels, T est établie en années. La probabilité $P(M_k)$ de non dépassement de M_k dans l'année est alors $P(M_k) = 1 - 1/T_k$ tandis que la probabilité de son dépassement est $P(\bar{M}_k) = 1/T_k$ (Mathys et al. 2013). Par exemple, si on considère la magnitude $Q_{L,p}$ d'une inondation et une période de retour centennale $T = 100$ ans, la valeur de débit $Q_{L,p,100}$ a une probabilité de 0.01 d'être dépassée dans l'année.

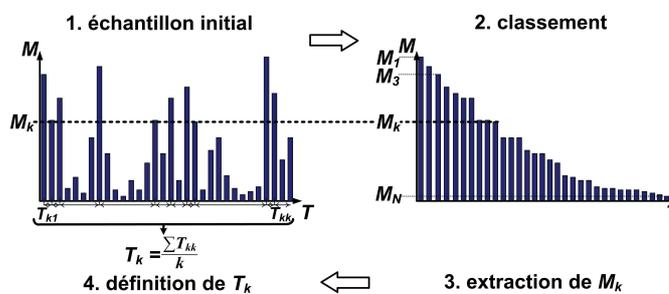


FIGURE I.9 – Définition de T_k à partir d'un échantillon de données sur la magnitude M du phénomène.

Connaissant M_k , l'intensité y_l doit être évaluée en chaque point du territoire noté X (figure I.8), pour établir une carte dite « d'aléa » (MATETL 1999). Cependant, pour les phénomènes gravitaires comme ceux torrentiels, la probabilité spatiale $P(X_{y_l}|M_k)$ d'atteinte de X avec l'intensité y_l , connaissant M_k , doit être préalablement définie (Brochot et al. 2003 ; Bründl et al. 2009 ; Corominas et al. 2014). Dans le logiciel EconoMe[®], elle est donnée pour chaque type de phénomène et chaque période de retour (OFEV 2010).

Les *dommages potentiels* sont évalués en chaque point géographique X . Ils dépendent du taux d'exposition $q(z_e, X_{y_l})$ qui est la probabilité de présence d'un enjeu z_e , $e = 1, \dots, \Omega$, quand l'événement entraînant une intensité y_l en X survient (Bründl et al. 2009 ; Corominas et al. 2014 ; Eckert et al. 2012). Le taux d'endommagement $V(z_e, y_l)$, de l'enjeu z_e connaissant y_l , est établi à partir de la figure I.7 (p. 11). Une valeur $C(z_e)$ est attribuée en euros (€) aux dommages tangibles et dans une autre unité pour les dommages intangibles.

L'analyse du risque naturel dépend d'hypothèses sur ses différentes composantes. La probabilité de dépassement d'un niveau de magnitude, la probabilité d'atteinte de chaque zone du territoire et le niveau d'intensité caractérisent l'aléa. Les types d'enjeux et leur valeur, leur taux d'endommagement potentiel et d'exposition caractérisent les dommages potentiels.

I.1.2.2 Mesures structurelles de protection pour réduire le risque

Dès le XIX^{ème} siècle, l'Etat français a engagé une politique de protection des zones de montagne contre les phénomènes torrentiels, dite de Restauration et de conservation des Terrains en Montagne (RTM). Il a ainsi acquis plus de 380 000 ha de forêts domaniales de protection dans les montagnes françaises. Environ 100 000 ouvrages dits de correction torrentielle (seuils de moins de 2 m de haut et barrages de plus de 2 m) y ont été construits (Messines du Sourbier 1964). La protection s'est ensuite étendue à d'autres phénomènes comme les avalanches, à partir des années 1970 (Brugnot et Cassayre 2002).

Aujourd'hui, les ouvrages sont répertoriés et suivis dans la base de données RTM (BD-RTM). Le parc actuel compte environ 21 000 ouvrages de protection gérés par les services RTM de l'ONF pour le compte du MAAF dans les forêts domaniales RTM des dix départements de montagne des Pyrénées et des Alpes (figure I.1, p. 6). Plus de 17 000 protègent contre les phénomènes torrentiels et l'érosion des zones sources (Annexe A).

Pour réduire le risque, ces mesures structurelles de protection ont un effet sur les composantes de l'aléa que sont la magnitude, l'intensité et/ou la fréquence du phénomène (figure I.8, p. 13). Ceci peut être représenté par une évolution de la courbe iso-risque de Farmer (figure I.10).

Pour cela, les mesures de protection ont différentes fonctions (Hübl et al. 2005). Par exemples, la consolidation et la stabilisation du profil en long du lit du torrent par des ouvrages de correction limitent le départ de matériaux depuis les zones sources. La canalisation par l'endiguement évite le débordement des écoulements vers les zones d'enjeux. Les plages de dépôts retiennent un volume de matériaux pour limiter leur transport puis leur dépôt au niveau des enjeux (figures I.10 et I.11). Les mesures biologiques comme la forêt, l'engazonnement, le fascinage ou le clayonnage, sont différenciées des mesures structurelles de génie civil (École Forestière 1911b).

Les mesures de protection active agissent sur les causes des phénomènes en zone de déclenchement pour diminuer la probabilité de dépasser un certain niveau de magnitude ($P(\bar{M}_k)$) : elles consolident et stabilisent les zones sources de matériaux dans la zone de déclenchement du bassin

versant. 93% des ouvrages de protection torrentielle en forêts domaniales RTM sont de consolidation et stabilisation pour la protection active (Annexe A). Les mesures de protection passive agissent sur l'écoulement en zone de transfert ou de dépôt pour diminuer la probabilité d'atteinte des zones d'enjeux ($P(X_{y_i}|M_k)$) : leurs fonctions sont d'assurer la rétention, la canalisation, etc.

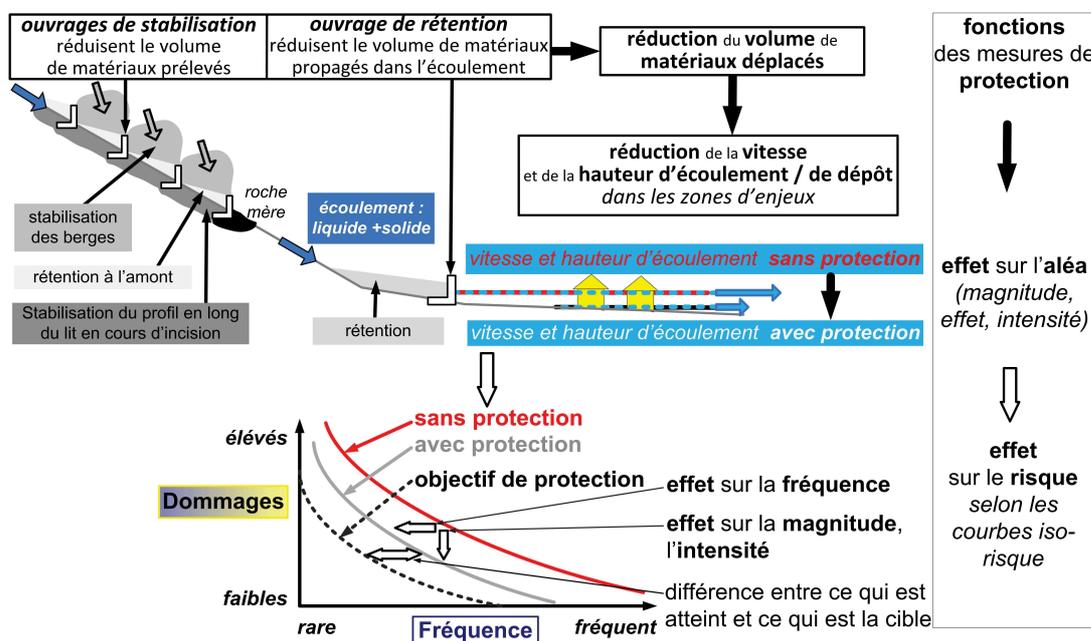


FIGURE I.10 – Les mesures de protection ont des fonctions différentes pour réduire l'aléa et le risque associé.

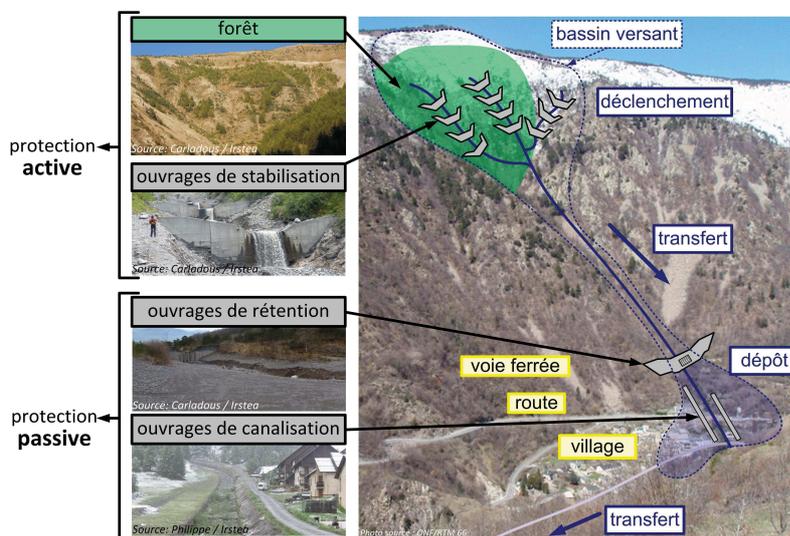


FIGURE I.11 – Répartition des mesures structurelles de protection torrentielle dans un bassin versant.

Pour réduire le risque, les mesures de protection ont des fonctions différentes selon la composante de l'aléa sur laquelle ils agissent. Les ouvrages de consolidation et stabilisation constituent la majorité du parc actuel en forêts RTM, où ils ont été implantés dès la fin du XIX^{ème} siècle.

I.1.2.3 De l'analyse à l'évaluation du risque

Des mesures de protection ont été mises en place pour réduire le risque. Cela signifie qu'il était considéré comme trop élevé. La décision de mettre en place de telles mesures dépend donc, au préalable, de l'analyse et l'évaluation du risque.

- De l'analyse au calcul du risque

La figure I.12 présente 1) l'analyse du risque puis 2) son calcul selon trois approches. La probabilité annuelle de dépassement $P(\bar{M}_k)$ d'une valeur de magnitude M_k , appelé scénario, correspond à une période de retour T_k . Cette probabilité est établie selon une distribution de probabilité continue (Eckert et al. 2012) ou discrète pour un nombre limité de scénarios M_k , $k = 1, \dots, P$ (Bründl et al. 2009). Sur le cône de déjection d'un bassin versant torrentiel, Ω est le nombre total d'enjeux individuels z_e , $e = 1, \dots, \Omega$ (figure I.6, p. 10). Les conséquences sur chaque z_e pour chaque scénario M_k sont les dommages potentiels notés $D_{z_e}(M_k) = D_{z_e, T_k}$, évalués par l'équation (I.1). L'ensemble des dommages $D_\Omega(M_k) = D_{\Omega, T_k}$ pour Ω est défini par l'équation (I.2) : l'unité de valeur $C(z_e)$ est la même pour chaque z_e et les dommages D_{z_e, T_k} correspondant. La courbe iso-risque est établie à partir de l'évaluation de D_{Ω, T_k} pour les P scénarios M_k (figure I.12).

$$D_{z_e, T_k} = P(X_{y_l} | M_k) \cdot q(z_e, X_{y_l}) \cdot V(z_e, y_l) \cdot C(z_e) \quad (I.1)$$

$$D_{\Omega, T_k} = \sum_{e=1}^{\Omega} D_{z_e, T_k} \quad (I.2)$$

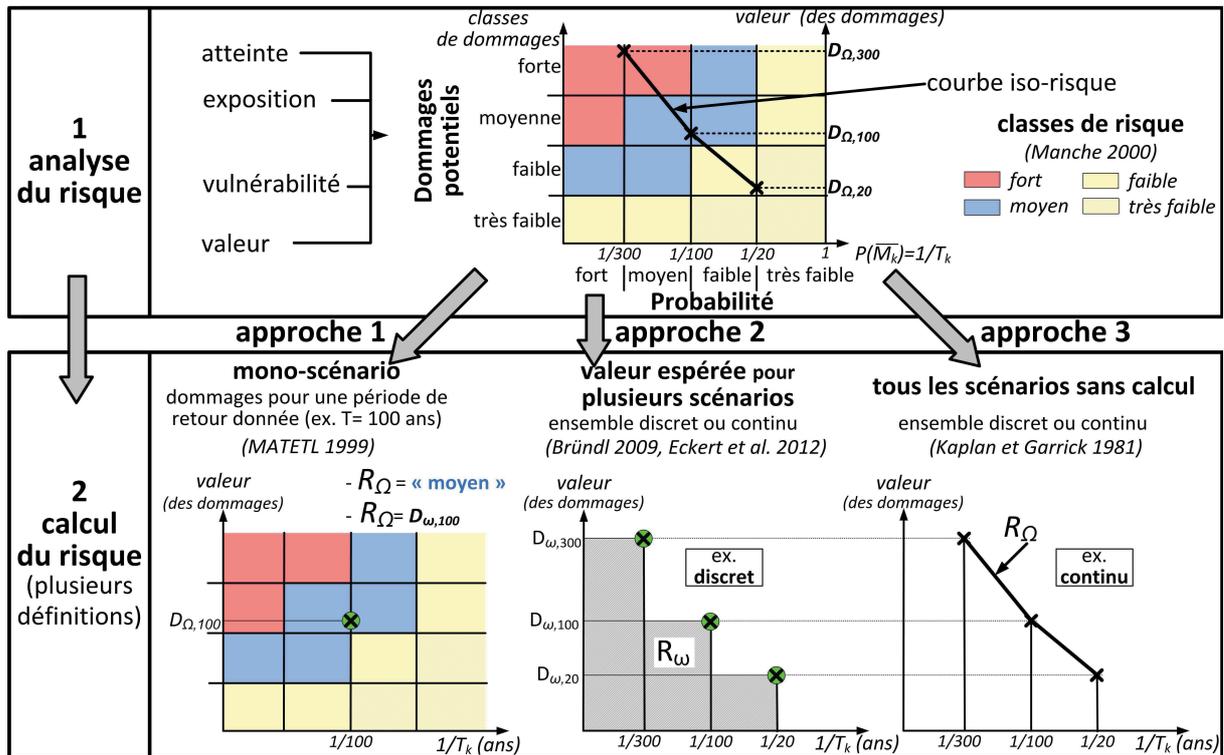


FIGURE I.12 – Les approches de l'analyse et du calcul du risque : mono-scénario, valeur espérée des dommages, courbe iso-risque complète.

Sur la base de cette courbe, la mesure du risque R_Ω dépend de l'approche choisie, parmi les trois suivantes.

Approche 1 - Le risque « mono-scénario » est établi pour un scénario unique M_k , $k = 1$, avec en général $T_1 = 100$ ans (MATETL 1999). Une matrice de risque (ou de criticité) peut être établie au préalable pour permettre d'identifier des classes de risque en fonction des classes de vulnérabilité (ou de gravité) et de probabilité (Manche 2000). Le risque mono-scénario est soit la valeur $D_{\Omega,100}$ calculée, soit son évaluation qualitative selon la matrice de risque (figure I.12, approche 1). Un autre scénario que $T_1 = 100$ ans peut être considéré selon l'attitude du décideur : un scénario plus rare ($T_1 = 300$ ans) correspond à une attitude plus pessimiste.

Approche 2 - Le risque de l'équation (I.3) est la valeur espérée des dommages selon un nombre discret de scénarios, avec $T_{k+1} \geq T_k$, $T_0 = 1$ et $\frac{1}{T_{P+1}} = 1 - \sum_{k=0}^P (\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{k+1}})$ (Bründl 2009) : R_{Ω} est une aire (figure I.12, approche 2). En présence de la connaissance des dommages associés à une distribution continue $P(M_k)$, R_{Ω} est l'aire sous l'ensemble de la courbe iso-risque (ou intégrale des dommages) (Eckert et al. 2012).

$$R_{\Omega} = \sum_{k=1}^P \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{k+1}} \right) \cdot D_{\Omega, T_k} \quad (I.3)$$

Approche 3 - Selon Kaplan et Garrick (1981), l'ensemble de la courbe iso-risque est nécessaire à l'analyse complète du risque (figure I.12, approche 3). Cependant, il est difficile de décider en pratique selon cette approche qui n'est pas utilisée dans le domaine des risques naturels.

Quelle que soit l'approche, R_{Ω} dépend de la valeur $C(z_e)$ choisie pour caractériser les dommages, parmi plusieurs possibles (tableau I.3, p. 12). Ainsi, pour un même territoire et une même approche du calcul risque, il existe autant de valeurs de R_{Ω} qu'il y a de types de dommages considérés (Kaplan et Garrick 1981). Le gestionnaire du risque leur attribue une importance plus ou moins forte. Actuellement, les modalités d'agrégation de ces différentes valeurs de risque, tenant compte de leur importance, ne sont pas spécifiées (CGDD 2014).

• Évaluation socio-économique et gestion du risque

L'analyse de risque est une approche technique d'identification puis de mesure du risque, issue des sciences de l'ingénieur. Dans le concept de risque, la valeur des dommages, souvent monétaire via les sciences économiques (Kaplan et Garrick 1981), définit le niveau de leur acceptation. D'autres unités de valeurs existent et le risque est évalué selon sa perception par les acteurs d'un territoire, leur aversion et leur niveau de tolérance (ou d'acceptabilité) (Renn et Graham 2006 ; Tacnet et al. 2010). Pour aider cette évaluation, les sciences humaines et sociales (SHS) analysent le territoire et les interactions en son sein entre objets, organisations et acteurs, à un moment donné (November 2002).

L'analyse de risque puis son évaluation sont donc une aide à la décision des gestionnaires d'un territoire, s'appuyant sur les sciences de l'ingénieur, économiques et les SHS (Tacnet et al. 2010). Leur objectif doit être discuté car il conditionne l'évaluation : gérer un territoire sur lequel il y a des risques ou gérer le risque sur ce territoire (Meschinat de Richemond et Reghezza 2010). Dans tous les cas, les gestionnaires décident s'il est nécessaire de réduire le risque par des mesures de gestion adaptées pour descendre en-dessous du seuil d'acceptabilité.

La quantification du risque se base sur celle, délicate, de l'aléa et des dommages potentiels. La mesure du risque repose sur le choix d'une approche n'intégrant pas toutes ses dimensions. Son évaluation dépend de sa perception et son acceptation dans un territoire, à un moment donné : sa prise en compte est limitée en pratique.

I.1.2.4 Efficacité des mesures de réduction du risque

Les mesures structurelles de protection réduisent le risque en agissant sur l'aléa. Les mesures non structurelles, comme l'information des populations, les règles de construction et la gestion de l'occupation des sols, agissent sur la vulnérabilité des enjeux (Tacnet 2009).

Les PPRn établissent les règles d'occupation des sols, en intégrant la connaissance de l'aléa, analysé pour un scénario unique. Sa magnitude M_k est celle de l'événement historique connu si sa période de retour $T \geq 100$ ans. M_k est définie pour $T_k = 100$ ans si la magnitude de l'événement historique correspond à $T < 100$ ans (MATETL 1999). Pour M_k , une carte d'intensité, dite d'« aléa », est établie : une classe d'intensité est affectée à chaque point du territoire selon le tableau I.2 (p. 10). Après analyse des enjeux présents et une phase de concertation avec les élus locaux, la carte de zonage réglementaire est établie selon trois zones (MATETL 1999) : constructible (blanche), constructible sous conditions (bleue), inconstructible (rouge) (figure I.13).

Pour réduire le risque, les gestionnaires s'appuient sur les mesures de prévention, notées d , structurelles (d_{struct}) et non structurelles ($d_{non\ struct}$). Elles sont intégrées au processus de gestion du risque (figure I.13) où on les distingue des mesures de préparation, d'alerte, de gestion de crise et de réparation. Le retour d'expérience fait partie de la prévention (Bourrelier et al. 2000).

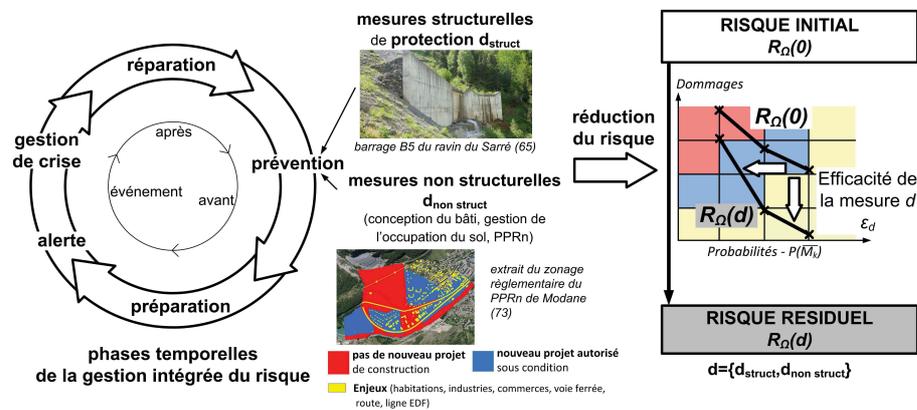


FIGURE I.13 – La protection est une mesure de prévention d dans la gestion intégrée du risque, pour réduire le risque initial $R_{\Omega}(0)$ à un risque résiduel $R_{\Omega}(d)$.

Les mesures de prévention d visent toutes à réduire le risque initial sans mesure $R_{\Omega}(0)$ à un risque résiduel $R_{\Omega}(d)$ tenant compte de leur effet. Rheinberger et al. (2009) ont noté l'effet attendu de la mesure d par ϵ_d , aussi définit comme son efficacité, et ont posé l'équation (I.4). Le coefficient ϵ_d permet le passage de la courbe de risque initiale à celle résiduelle (figure I.13). Son évaluation repose sur une analyse experte.

$$R_{\Omega}(d) = (1 - \epsilon_d) \cdot R_{\Omega}(0) \tag{I.4}$$

Synthèse de la section I.1

Les mesures de protection ont un effet sur l'aléa. Leur efficacité est définie par la réduction du risque qu'elles permettent. Son évaluation dépend donc de celle du risque et de celle de l'effet. L'expertise est convoquée car les connaissances pour mener cette évaluation restent partielles. Les effets et critères d'intensité des phénomènes à considérer ne sont pas tous pris en compte. La connaissance sur les taux d'endommagement est imparfaite. La vulnérabilité indirecte est rarement évaluée. Les multiples dimensions de valeurs des dommages ne sont pas considérées. La perception et l'acceptation sont difficiles à quantifier.

I.2 Évaluer l'efficacité de la protection pour gérer le risque

Protéger à l'aide d'ouvrages fait partie du processus de gestion préventive et de réduction du risque. Les structures de protection sont ainsi conçues pour réaliser des objectifs multi-dimensionnels : résister et fonctionner dans la durée, protéger les enjeux socio-économiques. L'évaluation de leur efficacité polymorphe impacte l'ensemble du processus de gestion du risque dans lequel les mesures de protection sont impliquées.

I.2.1 Diminution de l'efficacité de la protection dans le temps

Les structures de protection doivent assurer des fonctions spécifiques en lien avec le phénomène dont on cherche à limiter les effets. Pour cela, elles sont dimensionnées pour résister structurellement aux sollicitations auxquelles elles sont soumises (Suda et Rudolf-Miklau 2010). Fortement sollicitées en zone de montagne et vieillissantes, elles se dégradent, réduisant leur efficacité à réaliser leurs objectifs.

I.2.1.1 Des mesures de protection aux échelles imbriquées

Dans un bassin versant, les mesures structurelles ont pour objectif de protéger les enjeux exposés aux phénomènes. Les ouvrages ayant une fonction technique commune sont regroupés dans des dispositifs (DTRTM 2007). Ainsi, trois échelles de mesures sont imbriquées (figure I.14).

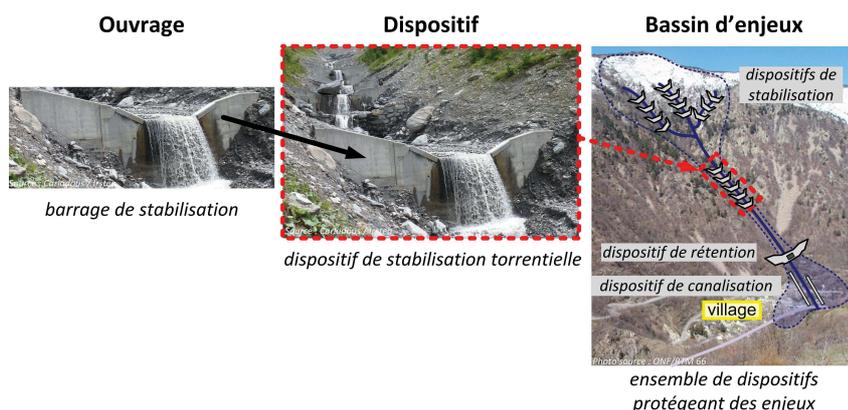


FIGURE I.14 – Les trois échelles de mesures de protection torrentielle (Carladous et al. 2014c).

1. Le *bassin d'enjeux* regroupe les enjeux, les zones de déclenchement, de propagation et d'arrêt des phénomènes pouvant les affecter ainsi que l'ensemble des mesures de protection, actives ou passives, ayant pour rôle de les protéger.
2. Le *dispositif* regroupe un ensemble d'ouvrages ayant la même fonction, dans une zone géographique donnée du bassin versant. Par exemple, un dispositif actif de stabilisation du lit d'un torrent en incision regroupe plusieurs barrages et seuils de stabilisation.
3. L' *ouvrage* assure une fonction technique qui, couplée à celle des autres ouvrages, permet au dispositif d'assurer sa fonction. Par exemple, chaque barrage (ou seuil) stabilise localement le lit du torrent, jusqu'à l'ouvrage amont.

Les mesures de protection agissent à plusieurs échelles. Un ouvrage est implanté localement dans un dispositif pour réduire le risque à l'échelle d'un bassin d'enjeux, pour des objets et infrastructures distantes.

I.2.1.2 Conception technique pluridisciplinaire sans objectif explicite

La conception des mesures de protection s'appuie sur des compétences dans des disciplines diverses. Elle vise à répondre aux objectifs qui leur sont donnés, sur la base des connaissances disponibles.

- Démarche de conception pluridisciplinaire

Les systèmes de protection agissent sur des phénomènes naturels auxquels ils sont eux-mêmes soumis. Ils sont donc conçus, selon un objectif de réduction du risque, à la fois pour assurer une fonction spécifique et pour que leur structure résiste. La démarche de conception théorique n'est pas nouvelle et existait déjà dans le cours de RTM de Bernard (1927) qui synthétisait l'expérience acquise par la mise en œuvre des actions RTM depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Elle repose sur les étapes principales suivantes (Piton et Recking 2016a ; Tacnet et Richard 2010) :

1. analyse de la nature et de la cause des phénomènes auxquels la zone d'enjeu est soumise par une étude du bassin versant torrentiel ;
2. identification du besoin de protection et de la fonction à assurer ;
3. choix du type de dispositifs et d'ouvrages le constituant ;
4. conception des dispositifs et ouvrages pour assurer la fonction attribuée ;
5. dimensionnement des ouvrages pour résister structuralement en stabilité externe et interne.

À chacune de ces étapes, des disciplines différentes, mais complémentaires (Brochot 1998) sont convoquées, comme identifié sur la figure I.15 inspirée de Tacnet (2009) (Annexe B.4, p. 337).

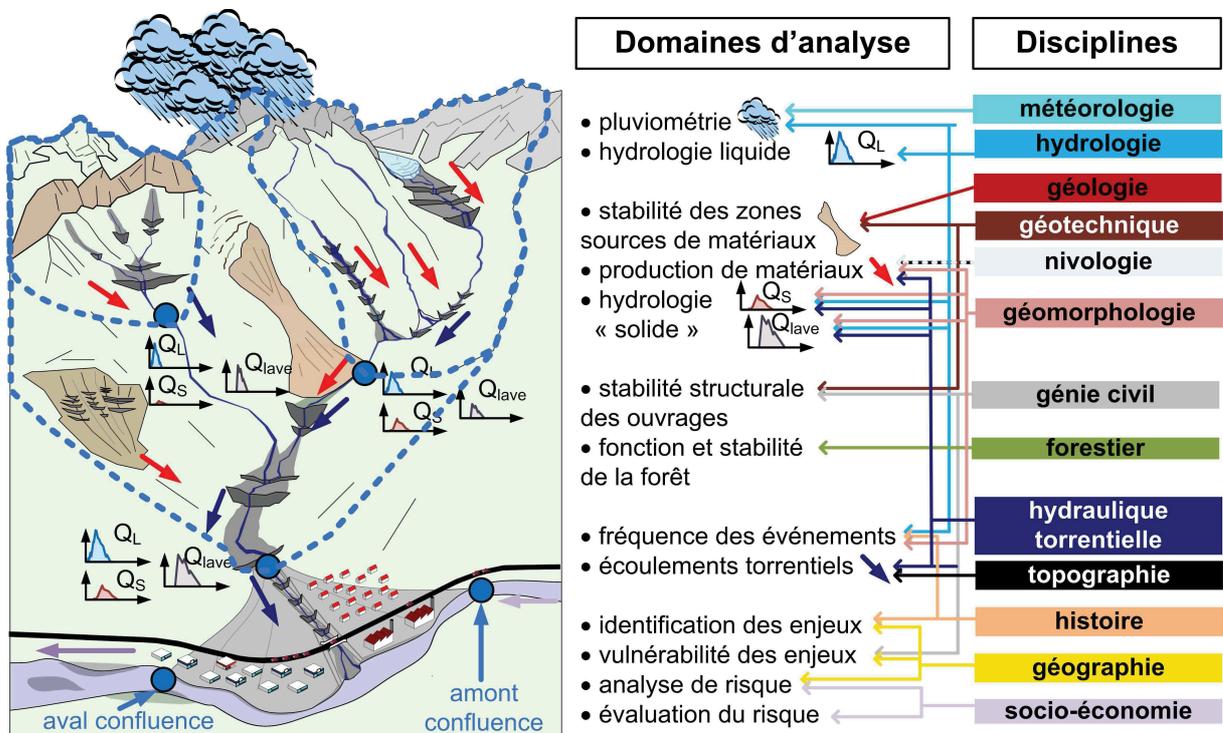


FIGURE I.15 – La conception de la protection dans un bassin versant torrentiel est pluridisciplinaire.

- **Étude de bassin versant et limites des données disponibles**

Cette partie résume les éléments théoriques nécessaires pour analyser l'aléa à l'échelle d'un bassin versant. En pratique, l'accès à l'ensemble de ces données est restreint. L'expertise pluridisciplinaire requise s'appuie alors sur les archives historiques, des observations visuelles, et les données enregistrées dans des bases de données et systèmes d'informations géographiques.

La pluviométrie (intensité de pluie dans le temps) est établie d'après les données météorologiques. L'hydrologie aide à prédire l'hydrogramme de crue (tableau I.1, p. 9). Elle s'appuie sur différents modèles hydrologiques qui restent imparfaits en zones de montagne (influence du relief, de la fonte des neiges, etc.) (Mathys et al. 2013).

Les études géologiques et géotechniques identifient la stabilité des zones productrices de matériaux. Plusieurs sources d'information sont possibles : cartes géologiques, observations visuelles et mesures expérimentales de terrain intrusives (sondages) ou non intrusives géophysiques (sismique, imagerie électrique) (Grandjean et al. 2006), modèles de rupture et de propagation.

La géomorphologie prédit les apports de versants et la recharge sédimentaire. Elle s'appuie sur la géologie, des investigations de terrain, des méthodes d'auscultation, de caractérisation et de suivi des phénomènes utilisant des mesures topographiques, photogramétriques ou de Light Detection And Ranging terrestre ou aéroporté (LiDAR) (Liébault et al. 2013).

L'hydraulique torrentielle analyse la propagation des débits liquides et solides. Couplée à l'analyse géomorphologique (Kaitna et Hübl 2013) et à l'analyse historique des événements (D'Agostino 2013), elle établit les types de phénomènes torrentiels se produisant dans le bassin versant. Elle prédit les sédimentogrammes et hydrogrammes de lave (Laigle et Peteuil 2010; Recking et al. 2013a) et calcule les conditions d'écoulement selon les critères d'intensité du tableau I.1 (vitesse, pression, dépôt, érosion). Elle peut s'appuyer sur des modèles théoriques, physiques et numériques (Chambon et Laigle 2013; Zollinger 1985). La connaissance topographique du profil en long du chenal et du cône de déjection est nécessaire (Liébault et al. 2010), comme l'identification de processus particuliers conditionnant les écoulements (formation d'embâcles, dépôts réduisant la capacité hydraulique de transfert, etc.) (Mazzorana et al. 2012; Piton et Recking 2016a).

- **Absence d'identification des besoins et fonctions à réaliser**

Le besoin de protection se définit par l'effet attendu de réduction du risque. L'évaluation du risque étant difficile (section I.1.2.4), l'identification et la quantification de ce besoin est généralement absente.

Pour identifier la fonction à réaliser et choisir l'ouvrage adapté, la connaissance des fonctions potentielles des ouvrages est cependant indispensable. Si des typologies des fonctions d'ouvrages existent (Hübl et al. 2005), leur identification reste délicate. De plus, la typologie a varié dans le temps. Par exemples, les fonctions de consolidation et stabilisation sont connues depuis les actions RTM (Demontzey 1882); les fonctions de filtration des blocs ou de stockage temporaire des bois flottants sont récentes dans des pays comme l'Autriche (Hübl et al. 2005) et ne sont que peu utilisées ou mentionnées en France (DTRTM 2007). En conséquence, l'identification de la fonction à réaliser n'est pas toujours spécifiée en pratique (Piton et al. 2016).

La conception des mesures de protection dépend de l'effet attendu à réduire le risque. Elle s'appuie sur une analyse pluridisciplinaire de bassin versant pour laquelle les données accessibles sont limitées par rapport aux connaissances théoriques. L'objectif de réduction de l'aléa n'est que rarement établi et l'identification des fonctions attribuées aux ouvrages reste délicate.

I.2.1.3 Conception fonctionnelle et dimensionnement structural

La conception des systèmes de protection doit leur permettre de réaliser les fonctions attendues. Les ouvrages sont des structures de génie civil dimensionnées pour résister aux sollicitations.

- Conception fonctionnelle du dispositif et des ouvrages

La démarche de conception fonctionnelle se base sur quatre étapes (Tacnet et Degoutte 2013) : 1) prise en compte des conditions naturelles (topographie, géotechnique, accès, etc.), 2) choix d'un « scénario de vie de l'ouvrage » de magnitude M_{projet} , 3) conception générale (forme, matériau) selon la (ou les) fonction(s) à réaliser et M_{projet} et 4) adaptation aux contraintes foncières, budgétaires et réglementaires. Ce processus est itératif car, par exemple, l'adaptation aux contraintes peut amener à modifier le choix du scénario de projet. En Autriche, les normes de l'institut autrichien de normalisation (ONR) 24800 et 24802 règlementent les termes employés et la démarche de conception (ON 2009, 2010). Les objectifs et fonctions d'un dispositif de stabilisation torrentielle sont, par exemple, décrits sur la figure I.16.

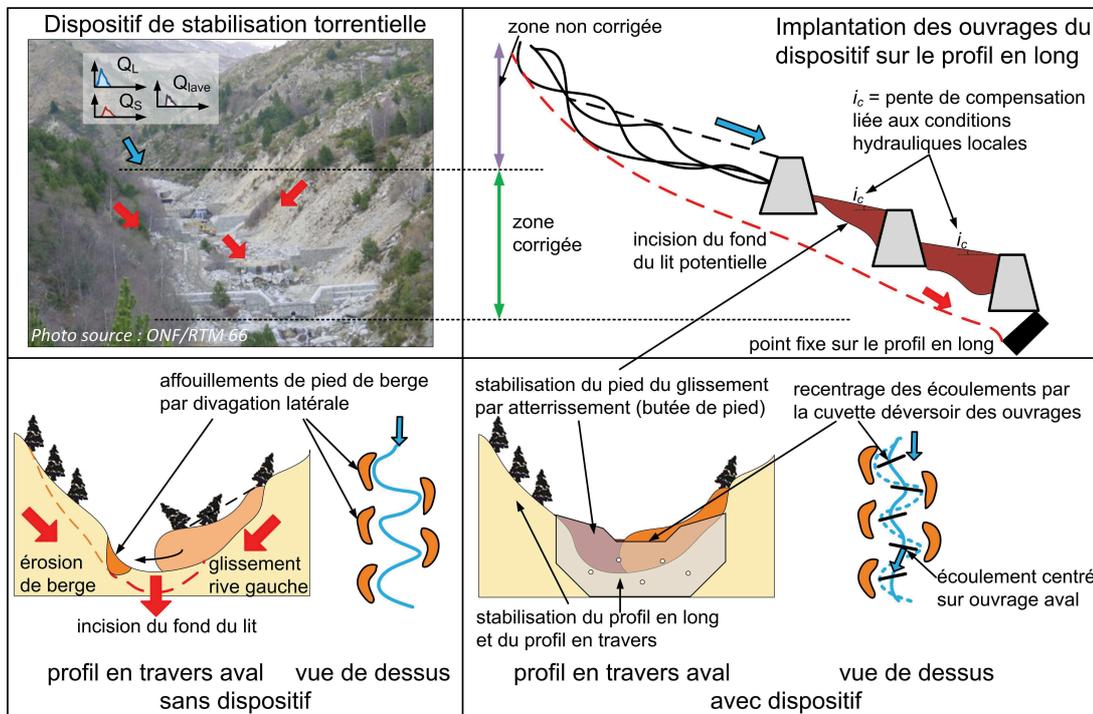


FIGURE I.16 – Conception fonctionnelle d'un dispositif de stabilisation (Tacnet et Richard 2010).

1. Les conditions naturelles géotechniques et topographiques sont mesurées et prises en compte dans le dimensionnement (Tacnet et Degoutte 2013). Les études hydrauliques établissent les scénarios potentiels et les conditions locales d'écoulement (type de phénomène, hauteur d'écoulement, de dépôt local, etc.).
2. Le « scénario de vie de l'ouvrage » de magnitude M_{projet} est décidé pour une période de retour T_{projet} donnée (Mazzorana et al. 2009). Pour une durée d'utilisation de projet attendue notée t_f , la probabilité de dépasser au moins une fois M_{projet} durant t_f est définie par $P(M > M_{projet}) = 1 - (1 - 1/T_{projet})^{t_f}$ (Mathys et al. 2013). En Autriche, par exemple, $t_f = 100$ ans (Rudolf-Miklau et Suda 2013). En France, M_{projet} est généralement choisie pour $T_{projet} = 100$ ans sans référence à une durée d'utilisation t_f .

3. La conception générale du dispositif est proposée suivant des règles. L'implantation des ouvrages sur le profil en long est définie à partir d'un point supposé fixe d'un point de vue géotechnique et d'une hypothèse de pente de compensation de l'atterrissement à l'amont de chaque ouvrage. Il protège la fondation de l'ouvrage amont de son affouillement (figure I.17) qui est une érosion entraînant le lessivage des matériaux en place et l'absence de sol sous la fondation. En planimétrie, chaque ouvrage doit être orienté vers le centre de la cuvette de l'ouvrage aval (Tacnet et Richard 2010). La section utile des cuvettes doit être dimensionnée pour permettre le passage de la crue de magnitude M_{projet} et assurer le centrage des écoulements. Les ailes sont prolongées dans les berges et dotées d'une pente pour éviter le contournement (figure I.17).
4. D'autres contraintes doivent être respectées. Les limites budgétaires peuvent amener à réduire les dépenses en études. La présence dans un espace naturel réglementé (parc national, naturel régional, etc.) et la réglementation sur la transparence piscicole et au transit sédimentaire, peuvent nécessiter d'adapter la conception (JORF 2015a).

• Dimensionnement structural des ouvrages

Les premiers ouvrages de stabilisation torrentielle étaient de type poids, en pierres sèches et maçonnées jusque avant les années 40 (Bernard 1927). Le béton armé a permis le dimensionnement des premiers ouvrages autostables dès les années 50 (Poncet 1968). À partir des années 90, les normes de dimensionnement des ouvrages de soutènement ont été appliquées aux ouvrages de protection torrentielle (MEFI 1999; MELT 1993). En France, Deymier et al. (1995) constitue, sur cette base, le document technique de référence pour le dimensionnement de ces ouvrages. Il reprend une démarche classique de conception d'un ouvrage de génie civil en l'adaptant au contexte spécifique des torrents (contexte géotechnique, cas de charges).

Le dimensionnement s'appuie sur des modèles de génie civil. Une approche bi-dimensionnelle (2D) découpe l'ouvrage en sections d'un mètre de large sur lesquelles la justification est effectuée. Si le modèle 2D est généralement utilisé en pratique (figure I.17), il ne prend pas en compte des sollicitations non perpendiculaires au voile, comme la poussée par un glissement latéral, ou l'hétérogénéité des appuis en fondation comme le fait un modèle tri-dimensionnel (3D) (Tacnet et Degoutte 2013). La modélisation 2D d'un ouvrage de stabilisation autostable en béton armé est une simplification (Tacnet et al. 2000).

La structure est dimensionnée par justification aux états-limites ultimes (ELU), correspondant au risque de sa ruine, et aux états-limites de service (ELS), dont le dépassement compromet son aptitude au service et sa durabilité. La démarche itérative, normalisée par les Eurocodes (AFNOR 2003a, 2005a,b, 2014b), se divise en deux étapes de 1) conception et de 2) dimensionnement (figure I.17). La seconde commence par le 2.1) bilan des actions suivi de la 2.2) justification en stabilité externe et 2.3) en stabilité interne. En Autriche, elle est réglementée par les ONR 24801 et 24802 (ON 2010, 2013).

1. La conception tient compte des conditions d'approvisionnement en site éloigné, des contraintes budgétaires, des phénomènes naturels auxquels sont soumis les ouvrages, du contexte géotechnique et topographique à partir d'investigations de terrain et de sondages, s'ils sont disponibles. Cela aboutit au choix de t_f , du type et de la forme de l'ouvrage. Il existe plusieurs types de structures de génie civil (poids, autostables, voûtes, etc.) ainsi que de matériaux mobilisables (pierres sèches ou maçonnées, béton cyclopéen ou armé, gabions, bois, etc.) (DTRTM 2007).

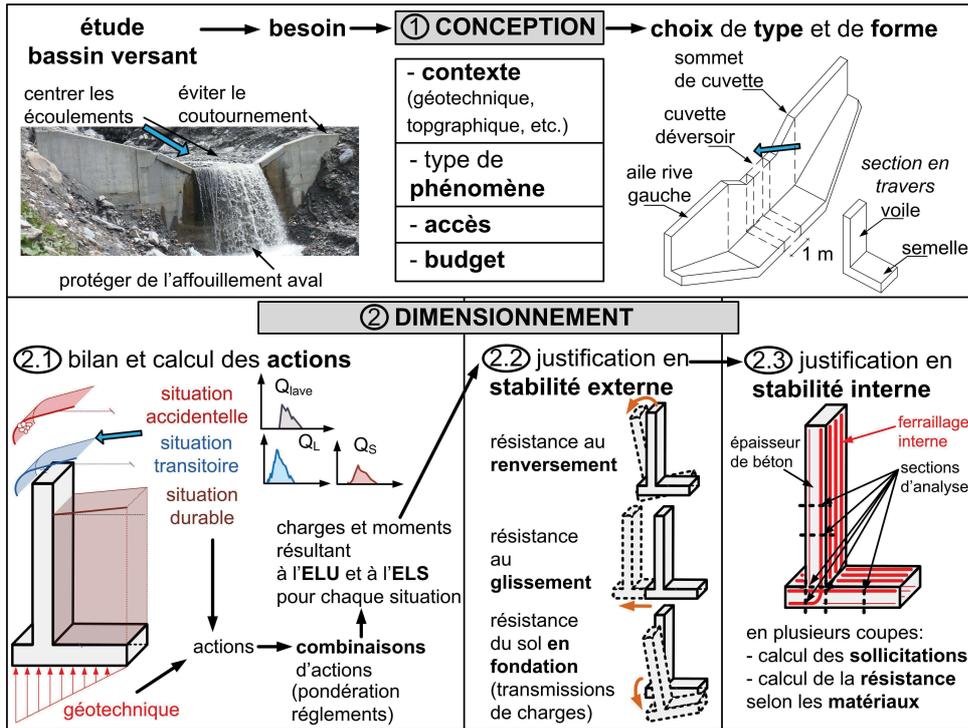


FIGURE I.17 – Etapes de conception fonctionnelle puis structurale d'un ouvrage de stabilisation torrentielle.

2.1. Selon t_f , trois types de situations sont définis (AFNOR 2003a). La durée d'une situation durable (*dur*) est comparable à t_f , comme pour la présence de l'atterrissement amont de l'ouvrage. Une situation transitoire (*trans*) est plus courte que t_f et est hautement probable, comme une crue identifiée pour $T = 50$ ans ayant une probabilité de 87% de survenir pendant $t_f = 100$ ans. Une situation accidentelle (*acc*) est exceptionnelle comme une lave établie pour $T = 100$ ans.

Le bilan des actions permanentes (G), des actions variables (Q) et actions accidentelles (FA) est réalisé. Pour chaque situation et chaque état-limite (EL), les coefficients partiels des actions (γ) et d'accompagnement par les actions variables (Ψ) sont établis. Ces derniers ne sont en général pas considérés. En France, ils ne sont pas spécifiques aux phénomènes torrentiels (ceux de l'Eurocode 0 sont utilisés), contrairement à ceux appliqués en Autriche (tableau I.4). Des cas défavorables (γ_{sup}) et favorables (γ_{inf}) sont établis sur la base d'un objectif minimal de fiabilité.

Situations →	ELU			ELS	
	<i>dur</i>	<i>trans</i>	<i>acc</i>	<i>dur</i>	<i>trans</i>
$\gamma_{G,inf}$	1,35	1,35	1,2	1	1
$\gamma_{G,sup}$	1	1	1	1	1
$\gamma_{G,inf}$	–	1,5	1,5	1	–
$\gamma_{G,sup}$	–	0	1	–	1

TABLEAU I.4 – Coefficients partiels des actions en France (AFNOR 2003a) et en Autriche (Suda et Rudolf-Miklau 2010), dont ceux qui diffèrent sont notés en **gras**.

2.2. Pour justifier la stabilité externe, l'ouvrage est considéré dans son ensemble. Pour un ouvrage de soutènement, six critères sont considérés (AFNOR 2005b, 2014b) : la stabilité externe d'ensemble (non représentée), aux ELU de charges transmises au sol, aux ELS de mobilisation de

la capacité portante, aux ELU de glissement, aux ELU de renversement, et aux ELS de décompression du sol.

Pour chaque EL et chaque situation, la combinaison d'actions tient compte des coefficients partiels. Les résultantes sont établies en charges verticales (V_d) et horizontales (H_d), en moments stabilisants (M_{stb}) et déstabilisants (M_{dstb}). A l'inverse, les résultantes de la résistance de la structure sont identifiées. Pour chaque situation, section et critère de stabilité, un taux de stabilité τ est calculé, représentant la résultante des actions sur celle de la résistance : si $\tau \leq 1$, l'ouvrage est stable ; si $\tau > 1$, l'ouvrage est instable, comme illustré sur la figure I.19.

2.3. La stabilité interne est justifiée en différentes sections du voile et de la semelle. Pour chacune, les actions sont transformées en contraintes internes (force normale N , moment de flexion M , force de cisaillement V) puis combinées. La résistance dépend des caractéristiques des matériaux et des dimensions de la section. Un taux de stabilité interne τ est établi, pour chaque EL et chaque section, en flexion pure, en flexion avec compression ou traction axiale, et en cisaillement.

L'efficacité d'un ouvrage dépend des conditions de sa conception et de sa construction. La démarche de conception fonctionnelle et de dimensionnement structural est connue mais repose sur des hypothèses qui ne sont pas toujours formalisées et accessibles. Les connaissances topographiques, géotechniques et hydrauliques nécessaires sont imparfaites. L'objectif de la durée d'utilisation t_f est, en pratique, rarement identifié. La modélisation pour le dimensionnement structural est une simplification et dépend de paramètres dont la définition varie selon les pays. Les conditions de construction peuvent amener à modifier les hypothèses faites à la conception. En l'absence d'un dossier des ouvrages exécutés, elles ne sont pas connues.

I.2.1.4 Vieillessement des ouvrages et réduction de leur efficacité

Les ouvrages vieillissent dans le temps. Pour limiter leur dégradation, ils sont régulièrement inspectés et maintenus. L'inspection repose sur la connaissance des pathologies spécifiques à chaque type d'ouvrages.

- Des pathologies connues

Les ouvrages situés dans les torrents sont sollicités par des phénomènes destructeurs et l'environnement géotechnique (instabilité des berges, hétérogénéité du sol en fondation). Les conditions climatiques extrêmes de froid sévère et d'alternances de gel-dégel accélèrent leur vieillissement (figure I.18). De nombreuses pathologies les affectent. Par exemple, le sapement du sol au pied de l'ouvrage par la chute d'eau entraîne son affouillement, avec une perte d'appui de la fondation. Ce phénomène est connu depuis les premières constructions (Bernard 1927) et est une des causes majeures de destruction des ouvrages (Dell'Agnesse et al. 2013). Les laves torrentielles, dont le front est composé de blocs, provoquent des impacts. Les poussées latérales de glissement sont à l'origine de désordres avec l'apparition de fissures allant jusqu'au décalage des parties d'ouvrage, et à la ruine. Les structures vieillissent prématurément, par perte d'enrobage en béton, mettant le ferrailage à nu, ce qui est à l'origine d'une perte de résistance (Suda 2013).

Les pathologies des ouvrages sont connues (Suda 2009). Elles sont détaillées dans des guides techniques qui accompagnent les visites d'inspection, comme celui de la BD-RTM en France (DTRTM 2007) ou ceux en Autriche (Suda 2013) et en Suisse, dans les cantons de Berne, du Valais et des Grisons (Frei et al. 2012). À partir de ces pathologies, ces guides identifient des indicateurs d'état de l'ouvrage.

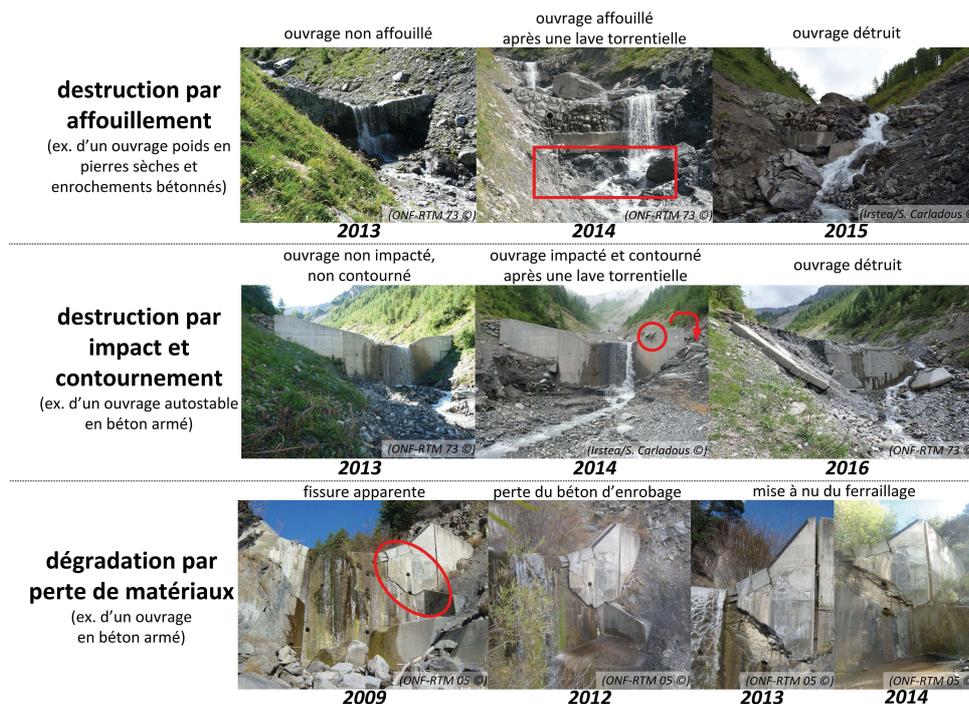


Figure I.18 – Exemple de la dégradation d'ouvrages dans le temps par affouillement, impact, contournement et perte d'enrobage, jusqu'à la perte de résistance et la rupture.

• Maintenance et vitesse de dégradation

Les effets des phénomènes et sa dégradation entraînent la défaillance de la structure. Si la stabilité aux ELU est mise en cause ($\tau_{ELU} > 1$), la structure est détruite. Si celle aux ELS l'est ($\tau_{ELS} > 1$), c'est son aptitude au service et sa durabilité qui sont diminuées (Suda 2013). Comme illustré sur la figure I.19, la durabilité d'une structure correspond au temps pendant lequel elle assure sa fonction comparé à celui d'utilisation t_f prévu (AFNOR 2003a).

La défaillance structurale ou les phénomènes naturels peuvent entraîner la défaillance fonctionnelle. Par exemple, le dépôt de blocs sur la cuvette d'un ouvrage, par une lave, réduit sa capacité et peut provoquer son contournement (Suda 2013).

Pour permettre d'assurer la stabilité et le fonctionnement des ouvrages dans le temps, leur maintenance est nécessaire (ON 2008), comme illustré sur la figure I.19. Elle regroupe « l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie [de l'ouvrage], destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » (AFNOR 2001). On distingue la maintenance de routine dans laquelle s'intègre l'inspection, la maintenance préventive qui programme des actions d'entretien régulières et la maintenance corrective lorsque l'ouvrage n'est plus apte au service, incluant la réparation.

• Inspection et évaluation du niveau d'efficacité

L'inspection permet d'évaluer, à un instant t_i , l'état et l'efficacité de l'ouvrage en identifiant, à partir des indicateurs extraits des pathologies, s'il est stable, apte au service et si les conditions de durabilité sont assurées (ON 2008). En fonction, des actions de maintenance peuvent être proposées au moment de l'inspection (DTRTM 2007). A titre d'exemple, en forêts domaniales RTM, des inspections régulières sont menées, à intervalles de temps définis selon l'importance

donnée à chaque dispositif et ouvrage (de tous les ans à tous les dix ans). L'efficacité de chaque dispositif est évaluée.

Cependant, l'inspection et la maintenance des ouvrages de protection torrentielle est difficile, réalisée en contexte isolé et jusqu'à haute altitude. Elles sont limitées dans le temps par l'accessibilité sans neige. Les ouvrages ont été construits dans des zones dangereuses, sans mécanisation et avec un nombre d'ouvriers important (Brugnot et Cassayre 2002). Ces conditions de travail, acceptées à l'époque, ne le sont plus de nos jours. L'inspection doit être réalisée dans un temps restreint, en sécurité, la limitant souvent à des observations visuelles, avec peu de mesures.

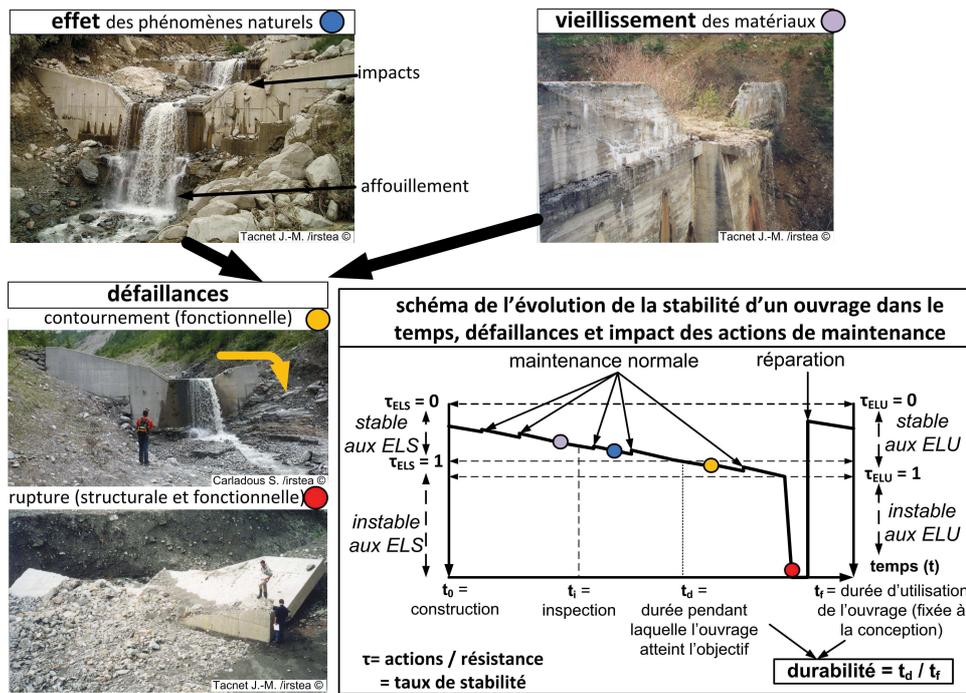


FIGURE 1.19 – Selon la courbe adaptée de Suda (2013), la stabilité des ouvrages diminue dans le temps. Leur maintenance aide à augmenter leur durabilité et à limiter les défaillances.

À partir de leur construction à t_o , l'efficacité des mesures de protection en service diminue avec le temps. Son évaluation repose sur des visites d'inspection des ouvrages à t_i . Elle intègre les évaluations des composantes structurales et fonctionnelles à t_i et la projection de leur évolution dans le temps, traduite par l'évaluation de la durabilité.

Les pathologies associées aux ouvrages étant connues, des indicateurs d'état en sont déduits pour aider cette évaluation. Réalisée dans des conditions difficiles d'analyse, l'évaluation de ces indicateurs repose principalement sur des observations visuelles.

1.2.1.5 Défaillances et sécurité à l'aval des ouvrages

Les ouvrages sont conçus fonctionnellement et structuralement pour un objectif défini par M_{projet} , correspondant à une période de retour. Une question se pose néanmoins : si M_{projet} est dépassée au cours d'un événement et que l'ouvrage est détruit (Rheinberger et al. 2009 ; Tourment et al. 2014), ce dernier est-il défaillant, inefficace ? L'efficacité doit-elle être considérée comme un concept « borné » ou « ouvert » ?

Les dispositifs de stabilisation torrentielle retiennent des matériaux par leur atterrissement,

ce qui peut représenter un volume global important. Lors d'un événement, le dépassement du scénario de projet ou leur défaillance peut entraîner la rupture en cascade d'un dispositif complet d'ouvrages de correction (Chen et al. 2015; Jaeggi et Pellandini 1997; Wang 2013). Dans les cas décrits dans ces références, ils n'ont pas provoqué d'augmentation de la magnitude du phénomène. L'événement torrentiel d'Aras (Espagne) est cependant un contre exemple, avec quatre-vingt-sept morts dans un camping suite à la rupture en cascade de 35 ouvrages sur 40. Les ouvrages ont été affouillés et contournés, ce qui a entraîné leur rupture (García-Ruiz et al. 2004). Devant ces conséquences potentielles, la maintenance de l'aptitude fonctionnelle et de la stabilité structurale de ces ouvrages anciens doit être assurée (Sodnik et al. 2015).

De fait, les conséquences des défaillances fonctionnelles et structurales des dispositifs et du dépassement du scénario de projet doivent être prises en compte dans l'analyse de risque, comme identifié pour les ouvrages hydrauliques de protection contre les inondations (Tourment et al. 2014). La réglementation française a ainsi récemment évolué pour que les digues et barrages de protection contre les inondations, classés selon un certain niveau de risque, soient l'objet d'une étude de danger (EDD) qui intègre l'analyse de la sécurité à celle du risque (JORF 2015b).

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection à réduire le risque repose sur celle attendue à la conception, après construction et en service. Elle évolue dans le temps, est multi-composante (structurale, fonctionnelle) et multi-échelle. Elle est locale au niveau des ouvrages et dispositifs pour réaliser les fonctions attendues mais aussi globale pour réduire l'aléa au niveau des enjeux. La sécurité ne doit pas être diminuée.

Cette évaluation multi-dimensionnelle repose sur des connaissances limitées. L'effet attendu de réduction de l'aléa et les fonctions à assurer ne sont pas explicités. Les hypothèses de conception, modifiées à la construction, sont simplificatrices et pas toujours accessibles. L'évaluation en service se concentre sur l'échelle de l'ouvrage, sur la base d'observations visuelles.

I.2.2 Efficacité des ouvrages et décisions de gestion du risque

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est impliquée dans les différentes phases de la gestion du risque (figure I.20). Associée à leur coût, elle aide à décider des actions de maintenance. Par ailleurs, elle conditionne leur prise en compte dans les mesures non structurales comme les plans de prévention des risques naturels (PPRn).

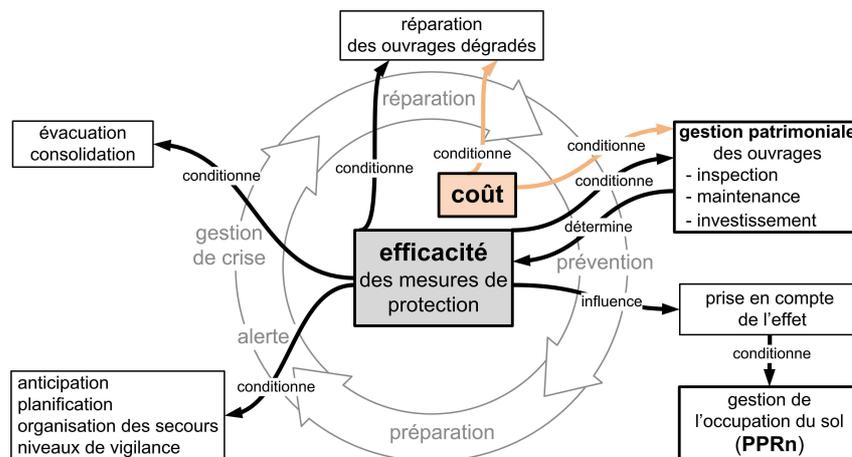


FIGURE I.20 – L'évaluation de l'efficacité est au centre du processus de gestion du risque.

1.2.2.1 Efficacité et coût de la protection : au centre de la gestion du risque

En phase de prévention, le choix des actions de maintenance et/ou d'investissement, pour la gestion patrimoniale des infrastructures (GPI) que sont les ouvrages de protection, dépend de l'évaluation de leur efficacité, lors de leur inspection (Suda 2013 ; Wery et al. 2016). Par exemple, en France, le coût de la gestion du parc d'ouvrages en forêts domaniales RTM est estimé 12 M€ par an (8 M€ de travaux et 4 M€ de coût de personnel) pour protéger environ 15 000 habitations, 320 activités économiques, 500 routes et voies ferrées, etc. (ONF 2011). Connaissant la répartition spatiale de ces ouvrages sur le territoire (figure I.21), le MAAF, propriétaire, souhaite évaluer leur efficacité pour pouvoir identifier les actions de maintenance prioritaires. La composante économique de l'efficacité en terme de réduction du risque doit être prise en compte pour être comparée au coût nécessaire. L'analyse coûts bénéfices (ACB) aide à cette comparaison (Bründl et al. 2009).

Pour la gestion de l'occupation des sols par les PPRn, l'effet des mesures de protection dépend, selon Margreth et Romang (2010) en Suisse, de leur efficacité, en terme de fiabilité. En France, il n'existe pas de règle explicite sur la prise en compte de l'effet des ouvrages dans les PPRn mais le MEEM l'identifie comme un élément clef à évaluer (Philippe et al. 2016).

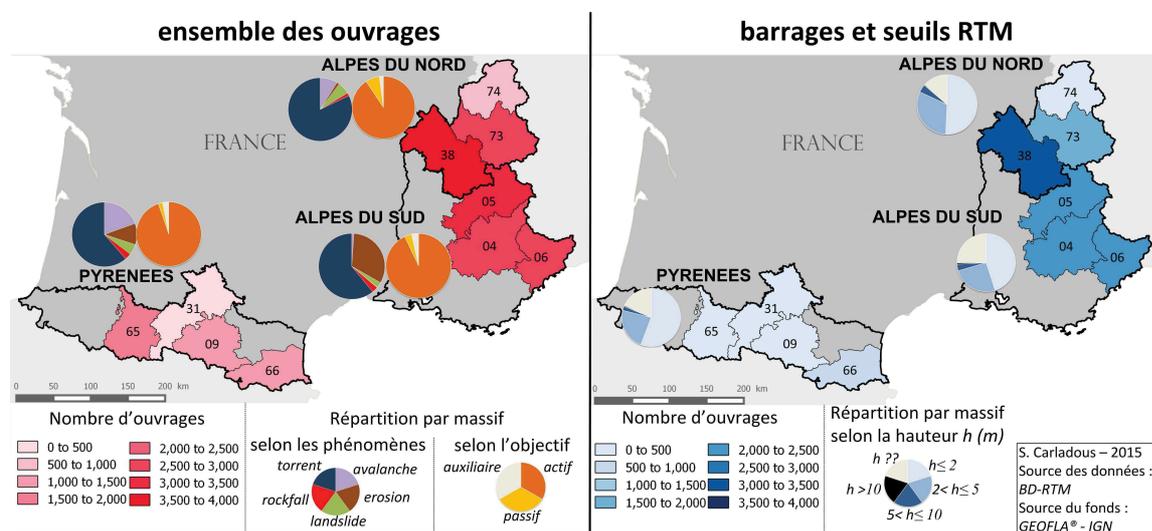


FIGURE I.21 – Répartition spatiale des ouvrages de protection gérés en forêts domaniales RTM, dans les 10 départements des Alpes et des Pyrénées avec un service ONF/RTM (Carladous et al. 2016b).

En phase de préparation, la connaissance de l'efficacité aide à établir les niveaux de vigilance liés aux défaillances potentielles des ouvrages, pour définir les actions d'anticipation, de planification et d'organisation des secours. En gestion de crise, elle permet d'identifier s'il faut les consolider ou si l'évacuation des zones exposées est nécessaire. Après événement, l'efficacité des ouvrages impactés est évaluée pour établir s'il faut les réparer.

Pour aider les décisions de gestion, l'évaluation de l'efficacité intègre la composante économique en plus des aspects techniques (structural et fonctionnel).

1.2.2.2 Efficacité et efficacité pour décider des priorités d'actions

Même si le terme anglais d'« effectiveness » définit aussi bien l'efficacité que l'efficience, la norme AFNOR (2005c) permet de distinguer ces deux termes en français. L'efficacité correspond au « niveau de réalisation des activités planifiées et d'obtention des résultats escomptés ». L'efficience est le « rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées ». Ainsi l'efficacité est une

évaluation relative à un objectif. L'efficacité intègre les moyens, économiques, nécessaires pour l'atteindre (Garrabé 1994). Comme identifié sur la figure I.20, l'efficacité est utilisée pour décider des actions de protection à mener.

- **Décider des actions de maintenance sur un parc d'ouvrages existant**

La GPI est définie selon trois niveaux de décision (Merad 2010 ; Tacnet et al. 2016). L'exemple de celle des ouvrages en forêts domaniales RTM est utilisé.

1. Au niveau stratégique, les décisions prises sont d'ordre économique et financier, à long terme. Par exemple, cela correspond à la programmation quinquennale des travaux de maintenance et d'investissements en forêts domaniales RTM.
2. Au niveau tactique, les décisions à moyen terme définissent les modalités de mise en œuvre de chaque objectif stratégique. Par exemple, cela correspond à la définition technique du type de mesures à mettre en œuvre dans un bassin versant torrentiel pour proposer la programmation quinquennale et à la programmation annuelle de travaux qui adapte la programmation quinquennale en fonction des contraintes de mise en œuvre (réglementaires, retards de travaux, reports, délais d'études, etc.).
3. Au niveau opérationnel, les décisions concernent la réalisation concrète des travaux à court terme. Par exemple, cela correspond au détail technique des travaux en chaque localisation dans le bassin versant, pour répondre à la décision tactique.

Au niveau opérationnel, la technique la plus efficace pour atteindre l'objectif fixé au niveau du bassin versant doit être choisie. Au niveau tactique, les actions proposées au niveau du bassin versant doivent permettre une efficacité maximale de protection des enjeux. La planification stratégique est réalisée à l'échelle d'un territoire regroupant plusieurs bassins d'enjeux pour atteindre un niveau d'efficacité le plus élevé possible. Pour chacun de ces niveaux de décision, l'efficacité et l'efficacité sont des critères de décision parmi plusieurs possibles (valorisation patrimoniale, sécurité des actions, etc.).

- **Analyse coûts bénéfiques (ACB) : aide à la décision selon l'efficacité**

Pour une mesure de protection d , l'ACB compare son coût monétaire (investissement et entretien) avec la réduction du risque monétaire $R_{\Omega}(0) - R_{\Omega}(d)$ qu'elle permet (figure I.22). Le coût et le bénéfice sont calculés sur l'ensemble de la durée d'utilisation t_f via un taux d'actualisation annuel propre à chaque pays (BLFUW 2009b ; Bründl 2012 ; Erdlenbruch et al. 2008) auquel les résultats restent très sensibles (Carladous et al. 2014c). L'évaluation de l'efficacité est prise en compte pour évaluer le risque résiduel (Bründl et al. 2009 ; Margreth et Romang 2010). Pour décider parmi plusieurs mesures potentielles de protection selon leur niveau d'efficacité, l'ACB est la méthode d'aide à la décision (AD) la plus répandue malgré la critique d'une réduction du risque évaluée selon les seuls dommages tangibles (Garrabé 1994).

Aux Etats-Unis, elle est appliquée depuis le Flood Control Act (1936) et imposée pour l'évaluation préalable de toute nouvelle réglementation depuis les années 70 (Grelot 2004).

En Suisse, suite aux avalanches de 1999 (Bründl et al. 2009 ; Wilhelm 2001), deux outils basés sur l'ACB ont été développés. Depuis 2001, RiskPlan[®] tient compte des différents types de phénomènes naturels qui se produisent dans un bassin versant et compare différentes solutions de gestion sur la base d'avis d'experts locaux. Les dommages se focalisent sur la mortalité humaine (Greminger et Balmer 2011). Développé initialement pour gérer les risques d'avalanches qui menacent les réseaux routiers (Fuchs et al. 2007b ; Rheinberger et al. 2009), EconoMe[®] prend en

compte les différents types de dommages (Bründl 2012). Actuellement, tout projet de protection au coût supérieur à 1 Million CHF doit faire l'objet d'une analyse par EconoMe® (OFEV 2010).

Le Ministère fédéral autrichien de l'agriculture, des forêts, de l'environnement et des eaux (BLFUW) a établi dès 1980 une directive préconisant l'ACB pour tous travaux de protection contre les risques torrentiels et d'inondation (Rudolf-Miklau 2008). Un outil ACB est disponible depuis 2009 (BLFUW 2009b). Il a été déployé aux inondations, phénomènes torrentiels et avalanches (Pfurtscheller et al. 2011). Les projets de protection doivent faire l'objet d'une analyse plus ou moins détaillée par cet outil selon leur coût. Une fois l'ACB réalisée, d'autres critères intangibles (social, environnemental) peuvent aider la décision (BLFUW 2009a).

En France, l'ACB a été recommandée pour tous les travaux publics nécessaires à la reconstruction d'après guerre 1939-1945 (Treich 2005). Favorisée dans les années 60 par le Mouvement de rationalisation des choix budgétaires pour les grands projets de nouvelles infrastructures, elle a été peu pratiquée dans les années 70-90 (Grelot 2004). Dans le domaine de la gestion des risques naturels, elle a d'abord été testée et abandonnée pour évaluer les actions RTM à l'échelle d'une vallée, celle de la Maurienne (73), sous la directive du Service de rationalisation des choix budgétaires (RCB) du Ministère de l'Agriculture (Commandeur 1979 ; RCB 1983 ; Verrier 1983 ; Verrier 1980). Des premiers tests d'application ont été menés à l'échelle d'un bassin versant torrentiel à laves du Manival (38) (Duclos et al. 1999), mettant en évidence de nombreuses difficultés d'application à ce contexte (Brochot et al. 2003). C'est finalement dans le domaine des inondations que la démarche ACB a été développée en France dans les années 2000 (Erdlenbruch et al. 2008 ; Grelot 2004 ; Saint-Geours 2012) sur la base des travaux engagés par Torterotot (1993). Depuis 2011, l'ACB est obligatoire pour évaluer les projets candidats à la labellisation en tant que programmes d'action et de prévention contre les inondations (PAPI) (CEPRI 2011). Étant donnée la limite de l'ACB à ne prendre en compte que des dommages tangibles, d'autres indicateurs de réduction de dommages intangibles complètent l'analyse pour aider à décider (CGDD 2014).

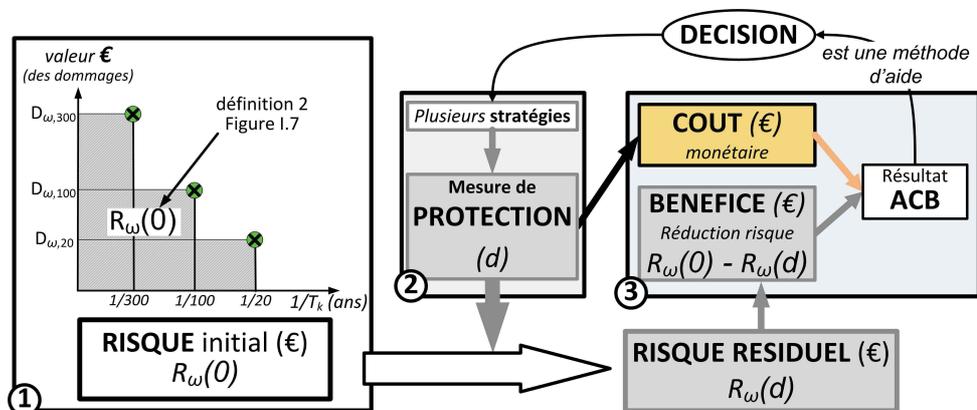


FIGURE I.22 – Principe général de l'analyse coûts-bénéfices (ACB) pour évaluer l'efficacité d'une mesure de protection : comparaison de la réduction du risque en valeur monétaire avec son coût monétaire.

L'ACB est la méthode la plus pratiquée pour aider à décider des mesures de protection à mettre en œuvre. Basée sur une évaluation économique de l'efficacité, elle repose sur celle de l'efficacité à réduire le risque et sur le coût de ces mesures.

La quantification du risque est limitée aux dommages tangibles. Les difficultés établies précédemment pour quantifier la réduction du risque torrentiel (section I.1, synthèse en p. 20) et évaluer l'efficacité ϵ_d des mesures de protection existantes (section I.2.1, synthèse en p. 30) affectent ainsi l'application de l'ACB.

I.2.2.3 Efficacité des mesures de protection dans celles non structurales

Les mesures non structurales que sont les PPRn se basent sur l'établissement d'une carte d'intensité selon trois classes (tableau I.2, p. 10), pour un scénario de phénomène dont la magnitude correspond à l'événement historique ou l'événement centennal. L'effet des mesures de protection peut être pris en compte dans la définition du scénario ou de la carte d'intensité correspondante, comme illustré sur la figure I.23.

Pour cet exemple réel de PPRn, le torrent du Saint-Antoine à Modane (73) est soumis aux laves torrentielles. Il est équipé de dispositifs de stabilisation et d'une plage de dépôt. Deux cartes d'intensité ont été établies : une sans tenir compte de l'effet des mesures de protection existantes dans le bassin, une autre en tenant compte. La carte de zonage réglementaire a été établie selon trois zones, sur la base de la deuxième carte. En conséquence, des zones qui auraient été en rouge sans les ouvrages (inconstructibles) sont transformées en zones bleues (constructibles sous conditions) grâce à cet effet.

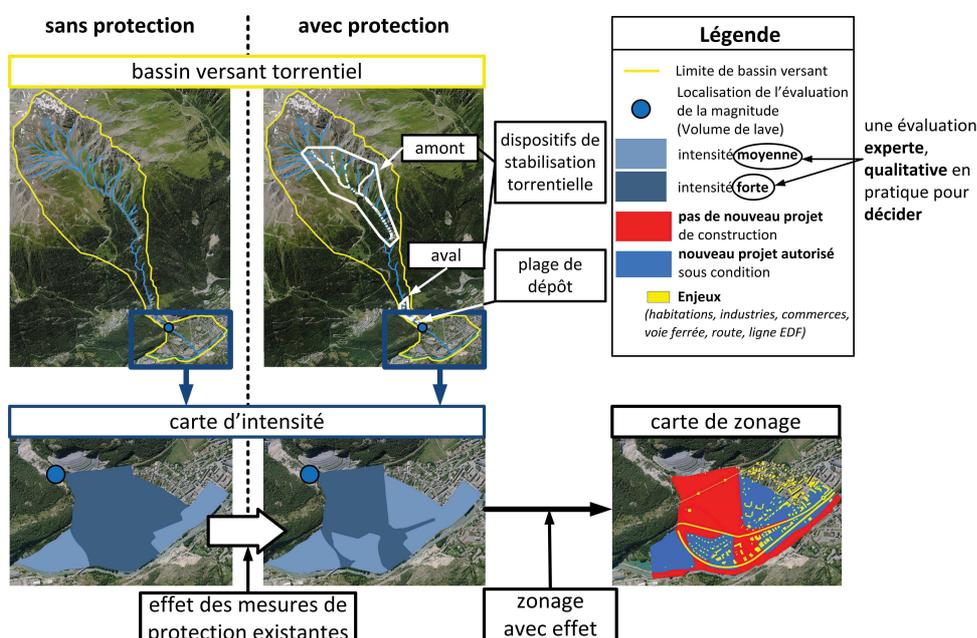


FIGURE I.23 – Prise en compte de l'effet des ouvrages de protection du torrent du Saint-Antoine dans le PPRn de Modane (73).

Synthèse de la section I.2

L'évaluation de l'efficacité de la protection à réduire le risque est un enjeu opérationnel important. Elle conditionne les décisions de maintenance et de gestion de l'occupation du sol. Elle se décline en composantes techniques (résister structurellement, réaliser les fonctions, réduire l'aléa au niveau des enjeux) et socio-économique de réduction du risque. Multi-composante et multi-échelle, elle évolue dans le temps et repose sur des informations limitées.

Pour la composante socio-économique, la quantification est liée à celle du risque qui est partielle. Pour les composantes techniques, l'effet attendu de réduction de l'aléa et les fonctions techniques à réaliser sont rarement explicités. Les hypothèses de conception et les conditions de construction ne sont pas toujours disponibles. L'évaluation de l'état d'un ouvrage en service est basée sur des observations visuelles.

1.3 Limites actuelles de l'évaluation de l'efficacité de la protection

L'évaluation de l'efficacité est centrale au processus de gestion du risque. Elle repose sur une expertise pluridisciplinaire qui reste empirique, appuyée par des approches quantitatives (Ancey 2006). Des outils opérationnels et scientifiques ont été développés pour l'aider et, parfois, des normes l'encadrent. Pour les phénomènes torrentiels, tous les pays de l'arc alpin sont concernés.

Les documents répertoriés dans le tableau I.5 permettent d'identifier les éléments de la pratique d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection en France, en Autriche et en Suisse. Les sections I.3.1 et I.3.2 en sont une synthèse. Par souci de clarté, il ne sera pas systématiquement fait appel à ces références dans le texte.

Pays	France	Autriche	Suisse
Guides d'inspection	DTRTM (2007)	Suda (2013)	Frei et al. (2012)
Documents méthodologiques techniques	Curt (2008) Tacnet et Richard (2010) Tourment et al. (2014)	Suda et Rudolf-Miklau (2010) Suda (2009)	Romang (2008) Margreth et Romang (2010)
Documents méthodologiques économiques	Erdlenbruch et al. (2008) CEPRI (2011) CGDD (2014)	BLFUW (2009b) BLFUW (2009a)	Bründl et al. (2009) OFEV (2010) Greminger et Balmer (2011)
Documents réglementaires	53 PPRn dans Philippe et al. (2016)		
Lois et normes	JORF (1995)	ON (2008)	

TABLEAU I.5 – Références pour comparer les pratiques d'évaluation de l'efficacité en France, Autriche et Suisse.

1.3.1 Problème de décision multi-dimensionnel mal formulé

L'efficacité est un concept polymorphe, difficile à appréhender. Sa compréhension peut être ambiguë en pratique. Son évaluation est normalement définie par rapport à des résultats escomptés (AFNOR 2005c). Sans définition claire, la nécessité de formuler ces objectifs n'est pas acquise.

1.3.1.1 Ambiguïté des concepts associés à l'efficacité

Les échelles de mesures de protection sur lesquelles portent l'évaluation sont différentes. En France, l'ouvrage, le dispositif et le bassin d'enjeux (qui peut aussi être appelé un site) sont considérées. L'importance d'un ouvrage dans le dispositif est évaluée qualitativement (figure I.24). En forêts domaniales RTM, l'évaluation de l'efficacité se limite aux ouvrages et dispositifs.

En Autriche, la distinction systématique entre ouvrages et dispositifs n'est pas établie, même si le concept d'importance de l'ouvrage est présent. L'évaluation de l'efficacité porte alors principalement sur l'ouvrage. En Suisse, les mesures de protection (équivalent du dispositif), regroupées dans le système global de protection (relatif bassin d'enjeux), font l'objet d'une évaluation.

Par ailleurs, l'évaluation ne porte pas sur les mêmes composantes de l'efficacité. En France et en Autriche, seules celles techniques (structurale et fonctionnelle) sont évaluées tandis qu'en Suisse, la composante économique de réduction du risque est intégrée.

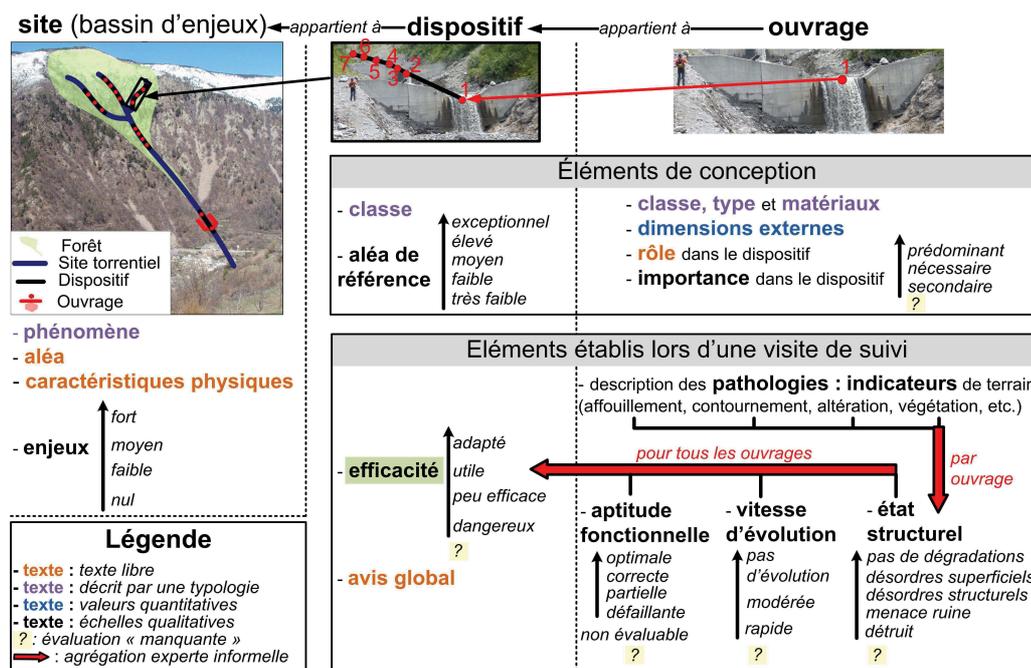


FIGURE I.24 – Synthèse de l'organisation selon trois échelles et des indicateurs analysés pour le suivi, par la BD-RTM, des ouvrages en forêts domaniales RTM, d'après DTRTM (2007).

La *performance* est un premier concept associé à l'évaluation de l'efficacité des ouvrages de protection contre les risques naturels (Tacnet et Richard 2010). Il s'agit du « jugement, à un instant donné, de son aptitude à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu » (Curt 2008). En ce sens, l'efficacité est l'évaluation ponctuelle à t_i du niveau d'atteinte d'un objectif fonctionnel.

D'autres concepts comme l' *adaptation*, l' *utilité* et la *dangerosité* sont utilisés en pratique pour évaluer les ouvrages et dispositifs de protection en forêts domaniales RTM (figure I.24). Cependant, ils ne permettent pas d'évaluer un niveau d'efficacité. Par exemple, la dangerosité renvoie à la question de la sécurité à l'aval de l'ouvrage, tandis que l'adaptation est liée au bon choix technique en conception par rapport aux fonctions à réaliser.

Par ailleurs, la *vitesse d'évolution* est constatée depuis la visite précédente à t_i . Ce concept peut être source de confusion dans le sens où il ne s'agit pas d'une évaluation de l'évolution à venir.

En Autriche et en Suisse, les concepts de l'Eurocode 0 (AFNOR 2003a) que sont la *sécurité structurale*, l' *aptitude au service* et la *durabilité* sont utilisés pour évaluer l'efficacité. En Autriche, au moment de l'inspection t_i , une mesure est efficace si elle est en état de résister structurellement et de fonctionner, mais aussi si elle est apte à assurer ce bon fonctionnement pendant la durée d'utilisation t_f décidée. Selon la courbe de la figure I.19 (p. 27), une hypothèse sur le tracé de la courbe de dégradation de la performance après t_i est ainsi faite.

Le concept de *fiabilité* est ajoutée dans la démarche de la plate-forme fédérale suisse sur les risques naturels (PLANAT) (figure I.25).

L' *effet* sur la carte d'aléa est relative à l'efficacité des mesures de protection. Cela est montré par l'exemple du PPRn de Modane (73) (figure I.23, p. 32) et formalisé par la démarche suisse (figure I.25). L'efficacité de la mesure de protection est finalement définie comme l'effet de réduction du risque économique (Bründl et al. 2009).

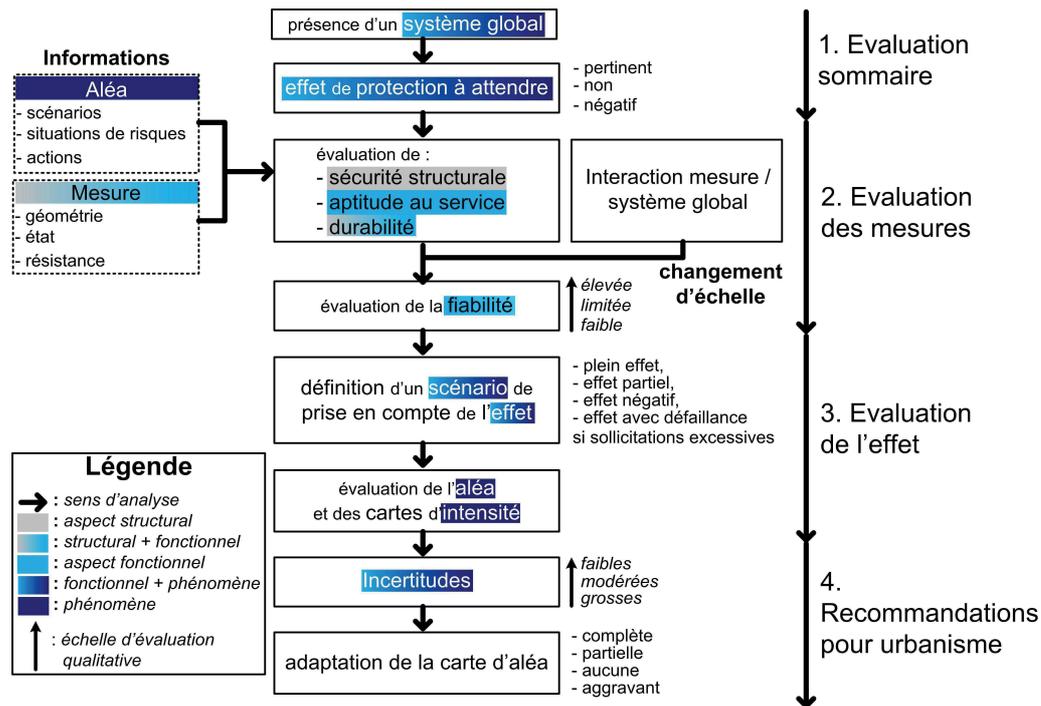


FIGURE I.25 – Démarche d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection selon leur fiabilité et leur effet sur l'aléa naturel, selon la PLANAT suisse (Margreth et Romang 2010).

Comme cela a déjà été montré, l' *efficience* est souvent confondue avec l'efficacité à travers le terme anglais d'« effectiveness ».

La *sécurité* d'un ouvrage est un autre concept associé à son efficacité. En France, l'EDD intègre l'évaluation de la performance d'un ouvrage dans une analyse globale de risque pour l'évaluer (JORF 2015b ; Tourment et al. 2014). Cette démarche intègre l'évaluation des conséquences socio-économiques des défaillances des ouvrages. Cela rejoint en partie la prise en compte d'un effet négatif ou d'un effet avec défaillances de la démarche suisse (figure I.25).

L'évaluation de l'efficacité est multi-échelle, multi-composante et évolue dans le temps. La transposition du concept d'efficacité en pratique est alors ambiguë. En conséquence, l'objet sur lequel porte la décision qui est l'évaluation n'est pas explicité clairement. L'échelle de la mesure de protection et la composante technique ou socio-économique évaluées ne sont pas explicites. Des confusions apparaissent entre de multiples concepts sur lesquels portent l'évaluation : importance, efficacité, performance, adaptation, utilité, dangerosité, sécurité structurale, aptitude fonctionnelle, durabilité, vitesse d'évolution, fiabilité, effet, efficience et sécurité.

I.3.1.2 Diversité des références pour évaluer l'efficacité multi-dimensionnelle

Selon la définition de l'AFNOR (2005c), l'efficacité s'entend comme la comparaison du niveau de réalisation effectif avec un objectif donné. En terme de performance et de durabilité, l'efficacité dépend de la réalisation d'une fonction, sans défaillance, dans la durée. La réalisation de cette fonction permet d'atteindre les objectifs fixés. L'évaluation de l'efficacité d'une mesure de protection dépend donc de la définition de l'objectif et de la fonction qui lui ont été attribués.

Les objectifs auxquels doivent répondre les mesures de protection sont multiples. En effet, lors de la démarche de conception des mesures de protection, plusieurs objectifs sont décidés aux différentes étapes (cf section I.2.1.3) et correspondent aux différentes dimensions de l'efficacité :

- objectif de réduction du risque au niveau des enjeux (composante socio-économique) ;
- objectif de réduction de l'aléa au niveau des enjeux (composante fonctionnelle globale) ;
- objectif de la fonction à réaliser dans le bassin versant (composante fonctionnelle locale) ;
- objectif de durée d'utilisation t_f (dimension temporelle de durabilité) ;
- objectif de stabilité structurale et de fonctionnement pour un scénario de projet (composantes structurale et fonctionnelle).

Ces objectifs doivent être établis pour évaluer l'efficacité selon ses différentes composantes. Cependant, ils sont généralement mal connus et susceptibles d'évoluer au cours de la vie de l'ouvrage. Par exemple, pour des ouvrages anciens comme ceux en forêts domaniales RTM, les objectifs initiaux de réduction du risque sont rarement quantifiés. De plus, ils peuvent évoluer avec les changements d'occupation du sol et les enjeux à protéger (Brugnot et Cassayre 2002), l'évolution du climat modifiant l'aléa, ou l'évolution des connaissances.

Les ouvrages et dispositifs de protection peuvent avoir différentes fonctions. Or, en pratique, le rôle de l'ouvrage est identifié textuellement, sans que la fonction ne soit spécifiée (figure I.24, p. 34). Le concept de fonction reste donc ambigu en pratique. Par ailleurs, pour des ouvrages anciens, la définition actuelle de la fonction pour laquelle ils avaient été construits peut être délicate (Piton et al. 2016). Par exemple, un ouvrage de consolidation du pied d'un glissement a pu entraîner sa stabilisation et il n'y a plus de traces actuelles (arbres penchés, mouvements de terrain) qui permettent d'identifier ce problème initial. Seul l'accès aux archives de conception peut permettre de l'établir, mais elles ne sont pas toujours disponibles.

En France, l'objectif de durée d'utilisation t_f n'est pas établi au moment de la conception. Le scénario de projet de magnitude M_{projet} est directement donné (Mazzorana et al. 2009).

Le concept d'efficacité est relatif à la définition d'un objectif. Ils sont multiples et peuvent être mal connus. Dans ce contexte, des hypothèses sur ces objectifs doivent être formulées pour évaluer l'efficacité.

Comme les objectifs évoluent, l'évaluation actuelle de l'efficacité d'une mesure de protection existante dépend des réponses à la série de questions suivantes : quel était l'objectif initial ? quelle était la fonction attribuée pour répondre à cet objectif ? quel est l'objectif actuel ? est-ce que la fonction attribuée initialement permet d'y répondre ?

I.3.2 Pratiques d'évaluation hétérogènes et liées à l'expertise

La comparaison des guides qui appuient l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection torrentielle met en évidence des pratiques différentes selon les pays. Cette évaluation repose sur l'expertise pour laquelle la traçabilité serait obligatoire selon la norme française (AFNOR 2003b).

I.3.2.1 Différents outils et méthodes d'évaluation de l'efficacité

L'évaluation de l'efficacité dépend de ses composantes techniques et de sa composante socio-économique. Pour chacune d'entre elles, des outils ont été développés dans les pays de l'arc alpin. Ils présentent des différences

• Évaluation technique : différents indicateurs et échelles d'évaluation

Les guides techniques d'inspection des ouvrages détaillent des indicateurs de terrain pour évaluer leur efficacité structurale et fonctionnelle (section I.2.1.4, p. 25). S'ils sont spécifiques à chaque pays, ils sont tous établis sur l'analyse des pathologies des ouvrages. Ils aident à évaluer l'efficacité dans ses composantes techniques en identifiant le niveau de dégradation des ouvrages. La comparaison des guides autrichien et français met en évidence des différences dans les indicateurs pris en compte (Annexe C) et dans les modalités d'évaluation.

Tout d'abord, le nombre d'indicateurs pris en compte pour évaluer l'efficacité des ouvrages de stabilisation torrentielle, en pierres maçonnées, pierres sèches et béton n'est pas le même. L'analyse est plus détaillée en Autriche qu'en France. Dans les deux pays, les indicateurs sont adaptés aux différents types d'ouvrages selon les fonctions qu'ils doivent assurer. Cependant, en Autriche, ils sont également adaptés selon les matériaux qui le composent (Annexe C).

Ensuite, les indicateurs sont évalués selon des échelles différentes.

En France, en forêts domaniales RTM, l'état structural de l'ouvrage au moment de l'inspection est défini selon 4 niveaux : {pas de dégradation ; dégradations superficielles ; dégradations structurales ; ouvrage en péril avec perte importante de résistance}. Chaque indicateur est évalué selon une échelle spécifique à 4 niveaux qui peut être mise en relation directe avec ceux de l'état structural. Par exemple, l'indicateur « fissures » est évaluée par : {pas de fissure ; fissures limitées ; ferraillements apparents ; ferraillements apparents généralisés}.

En Suisse, l'échelle d'analyse de la sécurité structurale, de l'aptitude au service et de la durabilité n'est pas spécifiée dans le guide PLANAT. Seule la fiabilité est évaluée qualitativement : {faible, moyenne, forte} (figure I.25, p. 35).

En Autriche, l'échelle à trois niveaux est commune à tous les indicateurs. Elle permet une évaluation directe de leur influence sur l'efficacité de l'ouvrage au moment t_i de l'inspection selon l'ensemble des composantes (structural, fonctionnel, évolution dans le temps). Elle intègre aussi un niveau d'urgence d'intervention (Suda 2013) :

- U : peu de dommages sans gravité / bonne aptitude au service à long terme / besoin d'intervenir à long terme (12 ans maximum) ;
- K : dommages de gravité modérée au niveau d'un composant ou de plusieurs petites zones de l'ouvrage / l'aptitude au service est garantie jusqu'à un scénario défini pour $T = 30$ ans / besoin d'intervenir à moyen terme (3 ans maximum) ;
- H : de nombreux dommages importants sur un composant ou une grande emprise de l'ouvrage / l'aptitude au service est très limitée à t_i / besoin d'une intervention immédiate.

Quel que soit le pays, l'évaluation des indicateurs repose sur des observations visuelles. Cependant, la définition des échelles d'évaluation varie : certaines sont absentes ; le nombre d'évaluations et les qualificatifs ne sont pas les mêmes ; chaque évaluation intègre plus ou moins d'éléments.

• Outils économiques et dommages intangibles

En Autriche et en Suisse, des outils ACB sont disponibles pour évaluer les différentes mesures de protection tandis qu'en France, seule une méthode générale est établie (section I.2.2.2, p. 30).

Ces outils se limitent à la prise en compte des dommages intangibles. En Autriche, la méthode d'aide à la décision propose de compléter les résultats de l'ACB avec d'autres unités de valeurs de dommages. En France, les indicateurs de réduction du risque sont établis dans différentes unités.

Pour un même problème d'évaluation de l'efficacité, technique ou économique, les approches diffèrent. Une démarche unifiée selon des principes communs permettrait une validation croisée. Pour la composante socio-économique, des méthodes visent à intégrer les dommages intangibles. Sans agrégation des résultats, elles ne permettent pas une évaluation globale.

I.3.2.2 Besoin de traçabilité et de validation à plusieurs échelles

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est utilisée pour décider la prise en compte de leur effet dans les PPRn et pour aider à les maintenir. La traçabilité du raisonnement expert est requise. La validation de l'évaluation pourrait aider à cela mais est absente.

• Absence de traçabilité du raisonnement expert dans les PPRn

Selon la démarche suisse, l'effet des ouvrages est représenté sur les cartes d'intensité puis sur la carte d'aléa (figure I.25, p. 35). En France, une telle démarche n'est pas spécifiée. Cela conduit à une hétérogénéité des pratiques mise en évidence par la comparaison détaillée de 53 PPRn (Philippe et al. 2016).

En application de la loi du 2 février 1995, les étapes de réalisation du PPRn sont l'établissement 1) du scénario de référence de fréquence et d'intensité données, 2) de la carte d'aléa, 3) de la carte de zonage réglementaire et 4) du document réglementant chacune de ces zones. Dix modes différents de prise en compte des mesures de protection ont été identifiés sur la figure I.26.

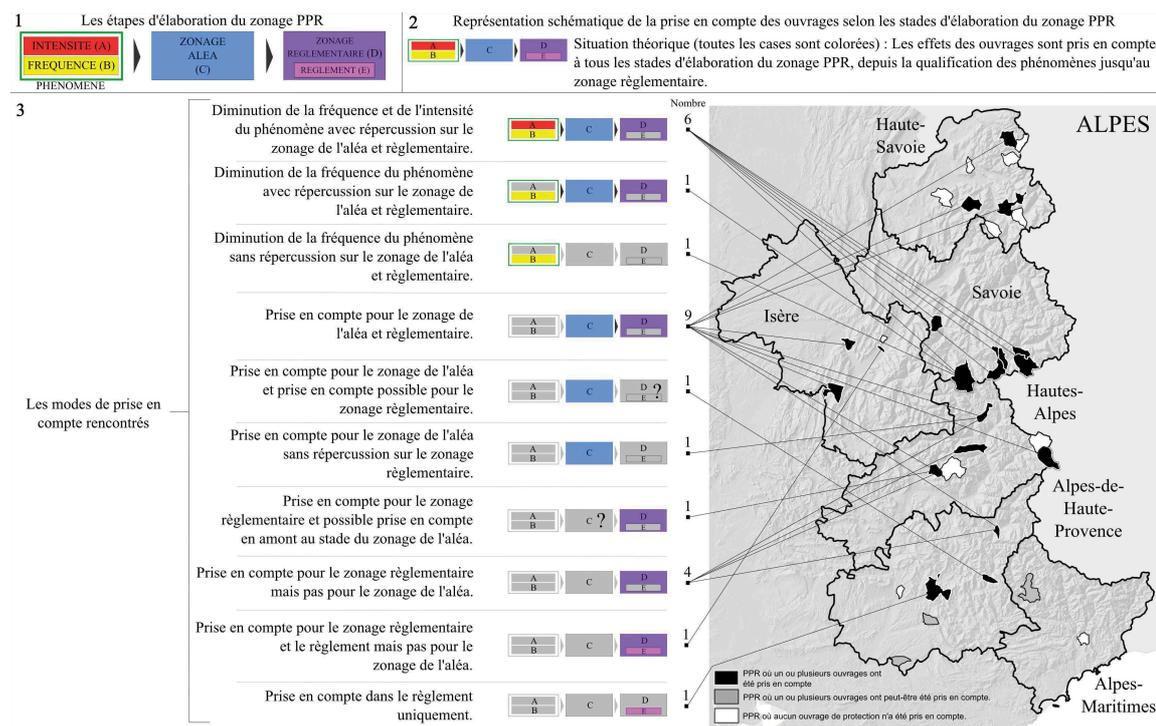


FIGURE I.26 – En France, la prise en compte des ouvrages de protection torrentielle dans les PPRn est hétérogène, traduit de Philippe et al. (2016)

Philippe et al. (2016) identifient les limites à la traçabilité du raisonnement expert dans l'établissement des PPRn en France : 1) l'absence d'une typologie commune, 2) les mesures de protection ne sont pas décrites, 3) le principe général de prise en compte des mesures n'est pas énoncé, et 4) la définition du scénario de référence n'est pas explicitée.

1. La typologie des phénomènes et leur caractérisation selon des critères d'intensité est hétérogène. Celle des structures de protection et des fonctions qui leur sont associées l'est également, conduisant à l'impossibilité de tracer le raisonnement.
2. La liste, la localisation et la description des mesures de protection est nécessaire pour tracer le raisonnement ayant conduit à leur prise en compte. Plus de 50% des 53 PPRn n'ont pas listé les ouvrages considérés et 80 % n'ont pas de cartographie pour les localiser.
3. Une absence de principe général (de prise en compte ou non) est constaté dans 30% des cas analysés. En l'absence de cadre méthodologique, le raisonnement ne peut pas être explicité.
4. L'évaluation de l'efficacité de la protection est liée à l'objectif constitué par le scénario de référence. Or le raisonnement ayant conduit à sa définition est généralement absent.

● Absence de validation de l'évaluation intégrée

L'évaluation de l'efficacité repose sur l'expertise qui 1) combine celle de plusieurs indicateurs et 2) intègre celle réalisée pour les différentes composantes et échelles de mesures de protection.

1. Pour l'inspection des ouvrages RTM, l'état structural de l'ouvrage correspond à sa stabilité et est évalué qualitativement (figure I.24, p. 34). La transformation depuis l'observation visuelle de l'indicateur à l'évaluation de la stabilité est directe, sans validation pour aider à tracer ce raisonnement. Pour un même ouvrage et une même observation visuelle d'un indicateur, deux experts peuvent proposer deux évaluations différentes de sa stabilité sans qu'il ne soit possible d'explicitier les deux raisonnements.

Pour évaluer chacune des composantes de l'efficacité, les évaluations de plusieurs indicateurs sont combinées à dire d'expert (Suda 2013). Le mode de combinaison n'est soumis à aucun processus de validation. Comme précédemment, cela peut conduire à des évaluations différentes de l'efficacité d'un ouvrage par deux experts, ayant pourtant une même évaluation de tous les indicateurs. La traçabilité de cette combinaison est requise pour celle de l'expertise (AFNOR 2003b).

2. Pour évaluer l'efficacité d'un dispositif, les évaluations de tous les ouvrages sont combinées à dire d'expert. Cela intègre l'importance attribuée à chaque ouvrage, évalué selon les conséquences de leur défaillance sur l'efficacité du dispositif. Cette notion est également prise en compte dans la démarche autrichienne. Cependant, comme en Suisse, les échelles de l'ouvrage et du dispositif ne sont pas clairement différenciées. L'évaluation de l'efficacité du dispositif, conditionnée par celles des ouvrages, n'est donc pas traçable.

Selon Philippe et al. (2016), seul l'aspect fonctionnel des mesures de protection est considéré pour les prendre en compte dans plus de 50% des PPRn analysés. L'évaluation selon leur performance structurale est limitée à 10 % des cas tandis que 15% évaluent l'efficacité selon l'aptitude de leur propriétaire à les maintenir en état de fonctionner (AFNOR 2001). D'une part ces évaluations ne sont que faiblement explicitées dans les documents accessibles. D'autre part, elles illustrent la compartimentation de l'analyse, sans traçabilité de l'intégration multi-échelle et multi-dimensionnelle.

Quelle que soit la composante de l'efficacité, son évaluation repose sur l'expertise. La traçabilité du raisonnement associé est limitée. Les modalités de combinaison des différents indicateurs ne sont pas identifiées. L'évaluation reste compartimentée à certaines composantes et échelles. De plus, la validation des résultats est absente.

I.3.3 Contexte décisionnel basé sur des informations imparfaites

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est pluridisciplinaire. Elle met en jeu des informations multiples produites par des sources hétérogènes (Martin 2005). Or « nulle donnée n'est parfaite » (Masson 2005) et leur imperfection est inhérente à cette évaluation.

I.3.3.1 De nombreuses informations fournies par des sources hétérogènes et inégalement fiables

Les informations nécessaires à l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection sont regroupées en quatre catégories sur la figure I.27.

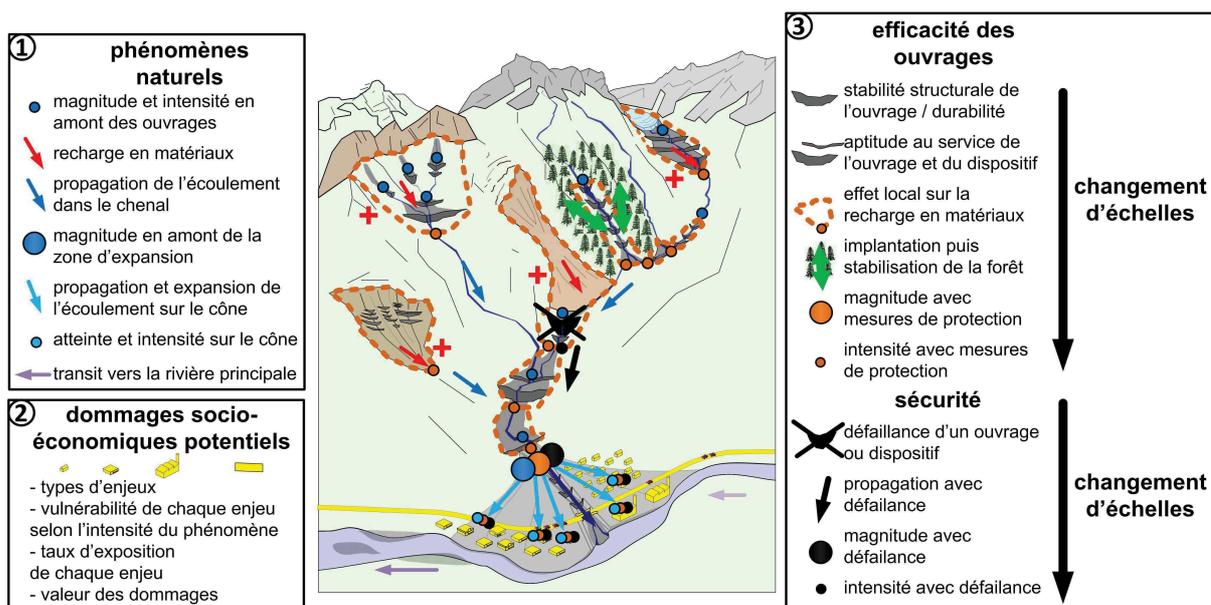


FIGURE I.27 – De nombreuses informations, fournies par des sources hétérogènes et inégalement fiables, sont nécessaires pour évaluer l'efficacité des mesures de protection dans un bassin versant torrentiel.

1. Les scénarios de phénomènes naturels (magnitude et intensité pour une fréquence donnée) sont établis en amont de chaque dispositif et à l'aval du chenal d'écoulement, avant expansion vers les enjeux. Les sources d'information sont (Tacnet et al. 2014b) :
 - bases de données : pluviomètres, radars, SIG, événements historiques, etc. ;
 - relevés de terrain, mesures et capteurs : topographie, photogrammétrie, LiDAR, granulométrie, sondages, géophysique, sismique, etc. ;
 - évaluations à dire d'experts ;
 - résultats de modèles numériques : hydrologie, géotechnique, hydraulique, etc. ;
 - résultats de modèles physiques réduits.
2. L'évaluation des dommages potentiels repose sur celles de la vulnérabilité, de l'exposition et de la valeur des enjeux. Les sources d'informations sont potentiellement :
 - bases de données : SIG, événements historiques, Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), etc. ;
 - enquêtes SHS ;
 - évaluations à dire d'experts ;
 - résultats de modèles numériques de génie civil.

3. Pour l'évaluation de l'efficacité des ouvrages et dispositifs selon les composantes techniques (structural, fonctionnel), les informations sont les hypothèses de conception, les conditions de construction et des indicateurs (Annexe C). Les indicateurs sur la relation entre structures et forêt est aussi prise en compte car de nombreux ouvrages en forêts domaniales RTM ont été conçus et construits pour permettre le développement de la forêt (Demontzey 1882, 1894). Les sources d'information pour l'évaluation technique sont alors principalement les observations visuelles mais peuvent être plus diversifiées :
 - évaluations à dire d'experts, par les techniciens en charge du suivi ;
 - capteurs : fissuromètres sur les ouvrages en béton (Suda 2013), caméras pour observer la réduction de la section d'écoulement (Piton et Recking 2016c), etc. ;
 - mesures : caractéristiques du béton après sondage, fissures, etc. ;
 - modèles numériques : hydrauliques pour la section d'écoulement, génie civil pour la stabilité, etc.

4. L'évaluation des coûts de maintenance des mesures de protection est nécessaire pour évaluer leur efficacité, même si cette catégorie n'est pas illustrée sur la figure I.27. Elle repose sur l'évaluation des coûts d'inspection, des coûts d'entretien et des coûts d'investissement.

Les sources d'information potentielles sont alors :

- bases de données : logiciel EconoMe[®] (Bründl 2012), BD-RTM, etc. ;
- évaluations à dire d'experts, car de nombreux paramètres comme la difficulté d'approvisionnement, la disponibilité en matériaux, etc. sont intégrés à l'évaluation (Boncompain et Queffélec 2013).

Les sources d'informations sont multiples et hétérogènes. Elles sont conflictuelles si elles fournissent des évaluations contradictoires (Shafer 1976). Elles peuvent aussi être inégalement fiables, ce qui est potentiellement à l'origine du conflit (Appriou 2002).

Par exemple, deux techniciens réalisent le suivi d'un même ouvrage. Le premier est en charge de son suivi depuis trente ans et le second effectue sa première visite. Même s'il s'agit de deux sources d'information homogènes, la fiabilité du premier technicien peut être considérée comme plus élevée que celle du second. Par ailleurs, ils peuvent fournir des évaluations contradictoires de chaque indicateur, comme pour l'affouillement évalué en « début d'érosion » pour le premier et « fondation affectée » pour le second.

L'évaluation de l'efficacité repose sur de nombreuses informations produites par des sources hétérogènes dont la fiabilité est inégale. Ces différentes sources font partie du processus de décision. Pour aider à décider, elles doivent donc être prises en compte. Cela implique leur acceptation, la capitalisation des informations fournies par chacune et l'explicitation de leur fiabilité et mode de combinaison.

1.3.3.2 Formes d'imperfection de l'information et évaluation associée

De nombreuses typologies de l'imperfection des données existent sans qu'aucune d'entre elles ne soit communément admise (Tacnet 2009). Comme proposé dans cette dernière référence concernant l'expertise des risques naturels en montagne, la typologie de Smets (1997) est retenue. Elle différencie l'incertitude de l'imprécision, l'incomplétude et l'inconsistance. Parmi les formes d'incertitude, l'aléatoire est différenciée de l'épistémique (Helton 1997). Des exemples relatifs aux informations décrites précédemment illustrent le fait qu'elles peuvent être affectées par une ou plusieurs des formes d'imperfection.

- Des informations fournies affectées par les différentes formes d'imperfection

« L'incertitude se réfère à l'état de la connaissance qu'a un agent [...] de la relation entre l'état réel de la nature et l'appréciation de cet état de la nature » (Tacnet 2009).

L'incertitude aléatoire, aussi appelée incertitude de type A, stochastique ou variabilité, est irréductible. Elle résulte d'un comportement aléatoire de l'objet sur lequel l'information est portée. La probabilité objective qui la représente est établie selon des données ou des expériences répétées.

Par exemple, les caractéristiques de résistance des matériaux comme le ferrailage font l'objet d'expériences répétées en laboratoire. Les coefficients de sécurité sur les ferrailages des Eurocodes (AFNOR 2005a) représentent l'incertitude aléatoire sur leur connaissance. Cette information de dimensionnement des ouvrages de protection est utilisée pour évaluer leur efficacité structurale.

L'incertitude épistémique, aussi appelée incertitude de type B, est réductible. Elle résulte d'un manque de connaissances défini par une ignorance partielle ou totale. Elle peut correspondre à une connaissance incomplète de la physique des phénomènes (Woo 1999), ou à un manque de fiabilité d'une source qui peut commettre des erreurs (Tacnet 2009). Ce type d'incertitude est représenté par des degrés de croyance. L'acquisition de données supplémentaires peut aider à réduire l'incertitude épistémique (Indrayan 2002).

Par exemple, pour un ouvrage en béton, sans aucune information sur sa conception et sa construction, le technicien ne peut caractériser le béton que par : « je crois que la résistance à la compression du béton est comprise entre 25 et 35 MPa ». L'information fournie par la source qu'est le technicien est ici incertaine et imprécise, et l'incertitude est de nature épistémique. La réalisation d'un prélèvement destructif d'une carotte de béton dans l'ouvrage fournira, après essai, une information sur la résistance à la compression du béton, réduisant son incertitude.

L'incomplétude correspond à une information partielle ou absente. Elle affecte les informations permettant l'évaluation de l'efficacité.

Par exemple, selon la figure I.24 (p. 37), l'efficacité du dispositif peut être évaluée par « ? », produisant une information incomplète. La cause peut être une mauvaise compréhension de l'échelle d'évaluation ou une évaluation impossible (pas d'accès, analyse trop complexe, etc.).

L'imprécision est représentée par un intervalle de valeurs pour encadrer la « vraie » valeur quantitative ou par une évaluation qualitative selon le langage naturel pour le vague (ou le flou) de la connaissance (Zadeh 1965). Les trois exemples suivants montrent que cette forme d'imperfection affecte tout le processus d'évaluation de l'efficacité.

Les observations visuelles d'inspection des ouvrages (section I.3.2.1) sont des évaluations floues.

Les catégories « faible », « moyenne » et « forte » du tableau I.2 (p. 10), utilisées pour établir les cartes d'intensité des phénomènes (figure I.23, p. 34), en sont une représentation floue.

Selon les courbes de vulnérabilité de la figure I.7 (p. 12), même si la hauteur de dépôt de lave au niveau d'une habitation était connue précisément ($h_d = 2$ m), le taux d'endommagement potentiel ne pourrait être évalué qu'avec imprécision (entre 40 et 75 %), selon l'ensemble des courbes.

L'inconsistance est issue d'informations contradictoires, généralement fournies par deux sources conflictuelles. Par exemple, un premier expert spécifie que le volume de lave torrentielle correspondant à $T = 100$ ans est compris dans l'intervalle $80000m^3 > V_{lave} > 120000 m^3$ alors qu'un second expert l'évalue par $120000 > V_{lave} > 140000 m^3$.

• Informations et qualité de l'évaluation

À travers l'exemple de l'évaluation de la stabilité structurale d'un ouvrage lors d'une inspection selon le principe de la figure I.24 (p. 37), la figure I.28 illustre que plusieurs des formes d'imperfection peuvent être impliquées pour une même évaluation. Les observations visuelles, comme le repérage d'une fissure, fournissent des informations imprécises et vagues et sont souvent incomplètes. Les informations sur les hypothèses de conception et les conditions de constructions sont rares et, dans ce cas, absentes. Sur cette base la visite d'inspection a conduit à évaluer l'état structural de l'ouvrage par des désordres superficiels avec une vitesse d'évolution modérée.

Deux ans après, l'ouvrage a été détruit, notamment par rupture au niveau de la fissure repérée visuellement. Ceci a constitué une validation, par la négative dans ce cas, de l'évaluation lors de l'inspection précédente. La rupture est due à un défaut de stabilité interne de l'ouvrage aux ELU qui dépend des caractéristiques des matériaux et du dimensionnement au niveau des sections (figure I.17, p. 26). La connaissance des hypothèses de conception et des conditions de construction aurait pu changer l'évaluation vers « désordres structurels » plutôt que « désordres superficiels ».

La prise en compte de la qualité de l'information disponible aurait pu changer la confiance dans l'évaluation, sans changer cette décision. En présence d'informations imparfaites, la confiance dans les résultats doit être réduite (Dezert et al. 2016a).

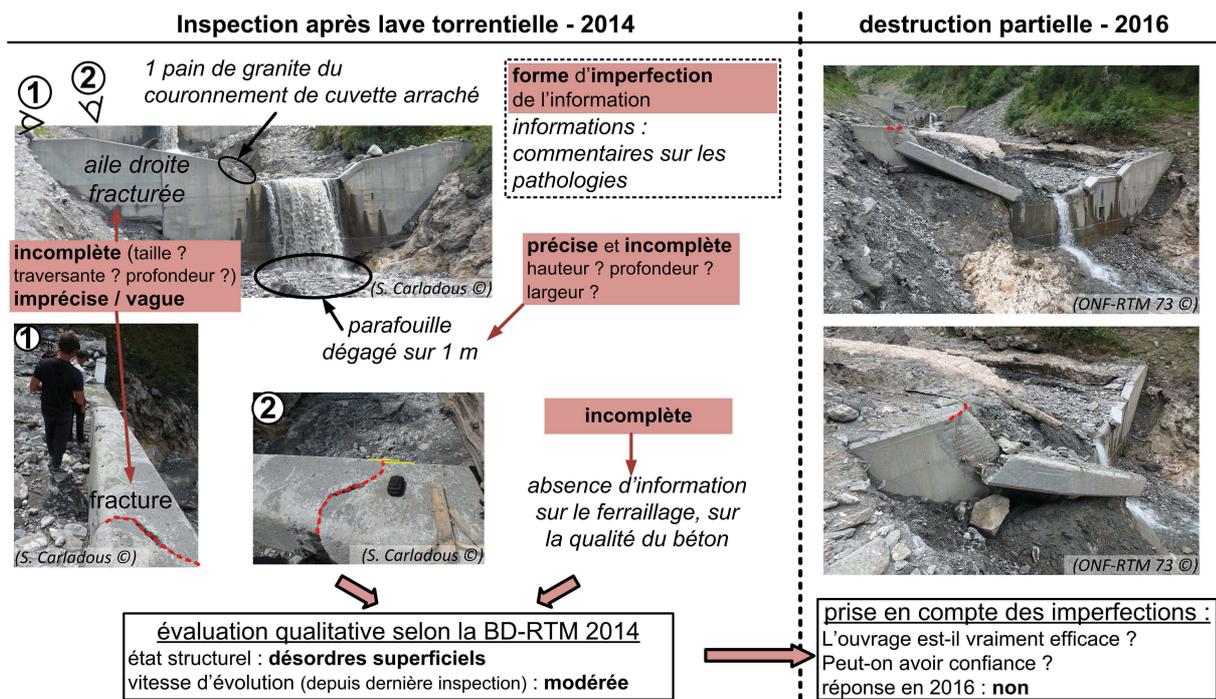


FIGURE I.28 – Exemple de l'impact des imperfections de l'information sur l'évaluation de la stabilité structurale d'un ouvrage autostable en béton armé.

Les différentes formes d'imperfection peuvent affecter les informations nécessaires à l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection. Elles sont inhérentes au processus de décision et conditionnent sa qualité. Dans ce contexte, la validation de l'évaluation reste un exercice délicat. Pour aider à évaluer et décider, les informations nécessaires doivent être identifiées. Leur imperfection doit être acceptée et caractérisée selon un formalisme adapté. La qualité de l'information doit être explicitée et capitalisée pour aider la validation.

I.3.3.3 Phénomènes torrentiels et incertitude épistémique

L'analyse des phénomènes torrentiels est nécessaire pour évaluer de la réduction du risque, concevoir les ouvrages et dispositifs et évaluer de l'efficacité des ouvrages. L'évaluation de l'aléa torrentiel repose sur une approche probabiliste : fréquence de dépassement d'un niveau de magnitude (figure I.9, p. 13) et probabilité d'atteinte des enjeux. L'application de cette approche issue de l'analyse des inondations aux phénomènes torrentiels est criticable (Tacnet et al. 2014b).

- **Approche probabiliste pour évaluer l'aléa torrentiel**

L'hypothèse d'un comportement aléatoire repose sur celle d'une connaissance suffisante de la physique du phénomène pour représenter ce comportement (Woo 1999). Si la complexité des phénomènes torrentiels est connue depuis le XIX^{ème} siècle (Gras 1857; Thiéry 1891), Meunier (1991) a différencié l'hydraulique torrentielle de celle à surface libre utilisée pour les inondations. Alors que Brochot et al. (2003) rappelait le comportement non aléatoire de l'écoulement des laves torrentielles, Chambon et Laigle (2013) (p. 201) les caractérisent par une « incertitude irréductible ».

La divagation torrentielle, illustrée par la figure I.3 (p. 7), dépend de la formation d'obstacles aux écoulements (embâcles, obstructions de ponts, etc). Ils provoquent le détournement du torrent, là où cela n'avait pas été imaginé (Mazzorana et al. 2009). Ces phénomènes ne peuvent pas être caractérisés par un comportement aléatoire (MEDDTL 2011; Piton et Recking 2016b).

La connaissance de l'effet des mesures de protection sur les phénomènes torrentiels est limitée. Des travaux ont été engagés pour quantifier l'effet sur la stabilisation des pentes (Ferro 2013; Kostadinov et Dragović 2013) ou sur la régulation du transport solide (Astrade et al. 2011; Piton et Recking 2016c; Remaître et Malet 2013; Remaître et al. 2008) mais leur transposition pratique paraît difficile (de Wolfé et al. 2008). En parallèle, l'effet de la dégradation des ouvrages sur le phénomène est un sujet très récent et limité à l'étude de cas locaux (Galia et al. 2016).

- **Connaissance sur les phénomènes torrentiels et limites des probabilités**

Les probabilités subjectives De Finetti (1937) sont utilisées pour représenter l'incertitude épistémique selon un degré de croyance sur les différents scénarios (Eckert et al. 2012; Mazzorana et al. 2012). Pour les établir, l'expert s'appuie sur son expérience et sur les informations disponibles sur l'hydrologie, la recharge sédimentaire, le transport des matériaux et la propagation du phénomène. Ces informations sont incomplètes, comme pour les données hydrologiques (Mathys et al. 2013). L'imprécision caractérise l'évaluation experte qualitative (Dupouy et al. 2012), avec une inconsistance possible en présence de plusieurs experts. Dans ce cadre, l'utilisation des probabilités, qui ne représentent que l'incertitude, est discuté (Baudrit 2005; Tacnet et al. 2014b).

Synthèse de la section I.3

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection repose en pratique sur un concept ambigu avec des objectifs et des fonctions non définis. Le problème de décision n'est pas explicité. Quelle que soit la composante de l'efficacité analysée, les méthodes utilisées sont diverses et s'appuient sur une expertise pluridisciplinaire dont la traçabilité est limitée. Il n'existe pas de méthode intégrée homogène pour aider la décision selon les différentes composantes de l'efficacité. L'imperfection des informations est inhérente au processus de décision qui, dans le contexte des phénomènes torrentiels, est établi sous incertitude épistémique. Le cadre probabiliste est limité dans ce contexte. La prise en compte de la connaissance réellement disponible est nécessaire.

I.4 Émergence de la problématique de recherche

Cette section identifie les différents problèmes mis en évidence dans ce chapitre I. Les besoins associés sont détaillés et les domaines scientifiques envisagés pour y répondre sont introduits.

I.4.1 Spécification des problèmes

Les mesures de protection réduisent le risque grâce à leurs fonctions. L'évaluation de leur efficacité est centrale au processus de gestion du risque. Cependant, elle est difficile en pratique. D'une part, la quantification du risque est partielle et les objectifs et fonctions attribués aux mesures ne sont pas explicites. D'autre part, l'évaluation de l'effet des mesures repose sur l'efficacité technique à résister aux phénomènes, à réaliser les fonctions et à réduire l'aléa. L'évaluation de l'efficacité est ainsi multi-composante (structurale, fonctionnelle, socio-économique), multi-échelle (ouvrage, dispositif, bassin d'enjeu) et évolue dans le temps.

Ce concept polymorphe d'efficacité et les problèmes de décision liés restent non explicités. Son évaluation n'est pas homogénéisée, et est basée sur la combinaison d'informations provenant de sources hétérogènes et inégalement fiables. Ces informations sont imparfaites et l'évaluation est établie sous incertitude épistémique de la connaissance des phénomènes torrentiels. La traçabilité du raisonnement expert sur lequel se base l'évaluation de l'efficacité reste alors limitée, ne respectant pas la norme (AFNOR 2003b).

La question de l'évaluation de l'efficacité peut être posée selon différents problèmes à résoudre.

1. Problèmes de formalisation des contextes de décision :
 - (a) Comment préciser le concept d'efficacité ?
 - (b) Comment expliciter les objectifs et fonctions donnés aux mesures de protection ?
 - (c) Comment formaliser les problèmes d'évaluation de l'efficacité selon ses différentes composantes et échelles de mesures de protection ?
 - (d) Comment identifier les indicateurs et critères à prendre en compte puis les combiner ?
2. Problèmes de prise en compte de l'imperfection de l'information pour décider :
 - (a) Comment combiner différentes sources d'informations selon leur fiabilité ?
 - (b) Comment représenter les différentes formes d'imperfection de l'information et caractériser la qualité de cette information ?
 - (c) Comment intégrer ces différentes formes d'imperfection dans l'évaluation pour identifier la qualité de l'évaluation ?
 - (d) Comment mieux évaluer sous incertitude épistémique que selon des probabilités subjectives ?
3. Problèmes de validation et d'intégration :
 - (a) Comment valider l'évaluation et les décisions qui y sont relatives ?
 - (b) Comment intégrer l'évaluation de l'efficacité à l'échelle du bassin d'enjeu ?

La problématique correspondante peut être synthétisée comme suit.

Un problème de décision sous incertitude épistémique, basé sur des informations imparfaites pouvant provenir de sources hétérogènes et inégalement fiables, est à expliciter pour chaque échelle de mesure de protection et chaque composante de l'efficacité. Les décisions doivent être formalisées aux différentes échelles puis validées et intégrées à l'échelle globale.

I.4.2 Besoins : expliciter, combiner, décider, valider, intégrer

Les apports envisagés pour chacun des problèmes identifiés sont synthétisés sur la figure I.30.

- **Expliciter et formaliser le concept d'efficacité selon ses composantes et échelles**

L'explicitation du concept d'efficacité doit le situer par rapport aux autres concepts utilisés pour le définir : adaptation, utilité, dangerosité, efficience, etc.

L'efficacité est relative à un objectif et une fonction à réaliser. Or, ils ont évolué depuis la construction des mesures de protection. La connaissance de leur évolution est indispensable pour identifier ceux qui avaient été potentiellement donnés aux mesures de protection existantes.

Trois composantes principales de l'efficacité sont identifiées (figure I.29). Pour chacune, les échelles de mesures de protection et la prospective temporelle doivent être considérées.

- La composante structurale est liée à la stabilité de la structure.
- La composante fonctionnelle évalue le niveau de réalisation de la fonction attribuée.
- La composante socio-économique correspond au niveau de réduction du risque.

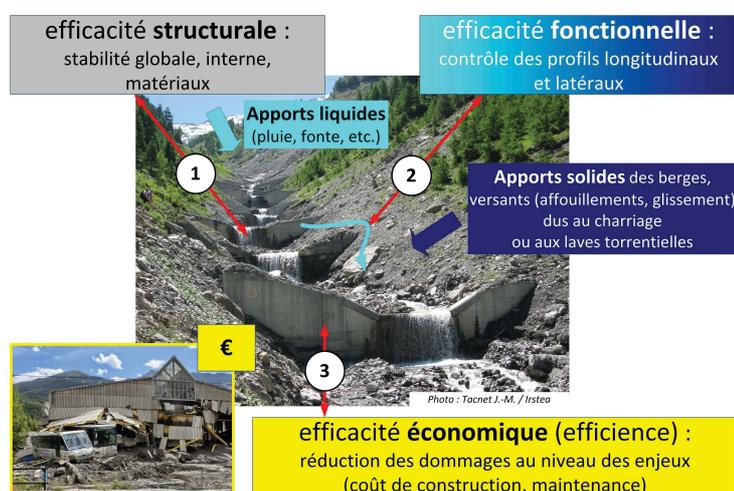


FIGURE I.29 – Les trois composantes de l'efficacité d'un dispositif de protection (Tacnet et al. 2016).

L'évaluation en tant que problème de décision (quel est le niveau d'efficacité ?) doit être différenciée de l'efficacité comme critère de décision (quelle est l'action à mettre en œuvre, selon son niveau d'efficacité ?). Ces différents problèmes de décision doivent être explicités et formalisés.

L'expertise est nécessaire pour aider à décider selon ces différents problèmes. Elle permet de combiner l'ensemble des informations disponibles. La décision repose généralement sur une présentation qualitative des résultats de l'expertise. Le raisonnement y ayant conduit fait partie du processus d'aide à la décision. L'explicitation et la formalisation des problèmes de décision et de la prise en compte de l'imperfection de l'information se limitent à aider à tracer ce raisonnement.

- **Identifier et combiner les indicateurs et critères d'évaluation**

Les nombreuses informations sur lesquelles reposent l'évaluation de l'efficacité doivent être identifiées et formalisées. Pour les composantes structurale et fonctionnelle, les indicateurs utilisés en pratique sont une première entrée (Annexe C). Cependant, leur élaboration est limitée à l'ouvrage, et doit être validée. Leur formalisation à l'échelle du dispositif doit être développée. Pour la composante socio-économique, les différents types de dommages qui conditionnent l'évaluation de la réduction du risque doivent être identifiés.

Les évaluations doivent ensuite être combinées. Le raisonnement expert utilisé doit être explicite. L'évaluation de l'efficacité socio-économique à réduire le risque doit prendre en compte les différents types de dommages, tangibles et intangibles, en non pas seulement les premiers, en caractérisant l'importance attribuée à chacun par le gestionnaire (CGDD 2014).

- **Combiner les sources et prendre en compte l'imperfection de l'information pour aider à décider**

Un formalisme adapté doit être choisi pour représenter l'information provenant d'une source puis la combiner à celles issues d'autres sources. La fiabilité de chaque source doit pouvoir être qualifiée et prise en considération dans la combinaison.

Les différentes formes d'imperfection (imprécision, flou, incomplétude, incertitude aléatoire et épistémique, inconsistance) doivent être représentées. Les probabilités étant limitées à représenter l'incertitude, d'autres formalismes permettant de les prendre en compte sont à rechercher. Ils doivent aider à qualifier la qualité de l'information.

Les différentes formes d'imperfection provenant des sources multiples doivent être intégrées au processus d'aide à la décision. Par ailleurs, le niveau de qualité des informations initiales doit être conservé au cours des combinaisons successives pour pouvoir identifier le niveau de qualité de la décision finale. Le processus doit permettre de différencier l'aide à la décision de la décision : la première aide à tracer le processus de raisonnement ; la seconde dépend de l'attitude du décideur.

Un processus d'aide à la décision sous incertitude épistémique, basé sur un autre formalisme que les probabilités subjectives, doit être proposé. Pour cela, d'autres formalismes doivent être explorés et testés dans ce contexte d'application.

- **Valider les résultats des méthodes et décisions associées**

La validation ne peut intervenir que dans le cadre de la connaissance existante. De fait, un processus de validation, tenant compte de l'ensemble des connaissances disponibles, mais prenant également en compte leur imperfection, doit être proposé pour aider à tracer le raisonnement. En pratique, cela peut permettre aux praticiens de se positionner par rapport à cette validation.

- **Intégrer les échelles spatiales et les méthodes**

Finalement l'intégration spatiale et méthodologique doit être développée. Il s'agit d'un enjeu qui reste peu appuyé méthodologiquement (Tacnet et al. 2014b). Les méthodes développées pour répondre aux problèmes de formalisation des contextes de décision et de prise en compte de l'imperfection de l'information doivent être combinées pour assurer l'intégration multi-échelle.

Cette intégration concerne 1) la démarche de conception et 2) l'évaluation de l'efficacité (figure I.30). Cette thèse n'a pas pour objectif d'aider la conception dont les règles sont connues. Cependant, les apports envisagés précédemment peuvent contribuer à l'améliorer.

1. Cette thèse ne porte pas sur la définition des scénarios pour évaluer l'aléa et concevoir les ouvrages. Par contre, un formalisme plus adapté pour représenter l'incertitude épistémique sur les scénarios améliorera la représentation de la connaissance sur les scénarios.
Elle n'envisage pas non plus d'améliorer les connaissances sur la vulnérabilité directe ou indirecte, ou sur la perception et l'acceptation du risque, qui relèvent des SHS. La possibilité d'intégrer les dommages tangibles et intangibles à l'analyse du risque sera une amélioration.
2. Une fois les objectifs et fonctions établis, l'évaluation de l'efficacité repose sur la formalisation des problèmes (décomposition des problèmes selon les échelles et les composantes,

combinaison des indicateurs), la prise en compte des informations imparfaites produites par différentes sources dans un contexte d'incertitude épistémique, la qualification de la qualité de la décision, et sa validation.

Finalement, l'évaluation de l'efficacité selon chaque sous-problème doit permettre une évaluation intégrée par la réalisation des étapes successives d'analyse aux différentes échelles.

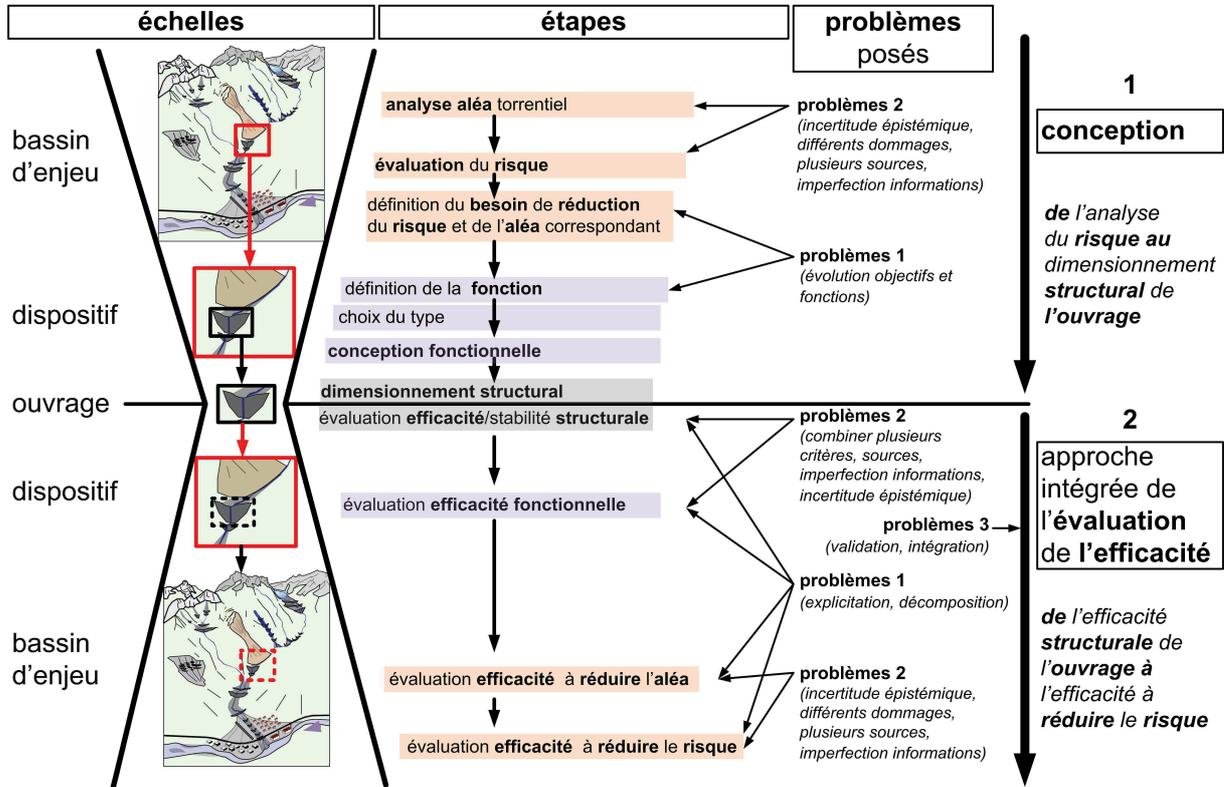


FIGURE I.30 – De la conception à l'intégration multi-échelle de l'évaluation de l'efficacité.

I.4.3 Implication de plusieurs domaines scientifiques : de l'ingénierie des risques à la fusion d'informations pour l'aide à la décision

Avec une application au domaine de l'ingénierie des risques torrentiels, plusieurs domaines scientifiques sont identifiés pour répondre à ces besoins.

- La modélisation systémique et les approches de la sûreté de fonctionnement sont envisagées comme cadre théorique de formalisation, conceptualisation de la fiabilité des ouvrages, d'analyse des fonctions d'un système et de sa décomposition.
- Les sciences de la décision pourraient permettre d'aider à établir les éléments nécessaires à la formalisation des problèmes de décision pour ensuite les combiner. Les méthodes d'aide à la décision sous incertitude épistémique seront explorées.
- Les différentes théories de représentation de l'imperfection de l'information doivent être comparées pour identifier quelles formes d'imperfection elles permettent de considérer et si la qualité de l'information peut être qualifiée. Leur prise en compte dans les méthodes d'aide à la décision doit être étudiée.
- La fusion d'information doit être explorée pour combiner plusieurs sources d'informations. Son association avec les méthodes d'aide à la décision doit être envisagée.

Etat de l'art : sciences de la décision, ingénierie des risques, traitement de l'imperfection de l'information

II.1 De la théorie de la décision rationnelle à l'aide à la décision selon plusieurs critères

La question opérationnelle de l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est assimilée à un processus d'aide à la décision multi-échelle. La question du recours aux méthodes existantes et l'analyse de leur pertinence est nécessaire. Après avoir rappelé les bases formelles de l'aide à la décision en section II.1.1, la théorie de la décision rationnelle utilisée classiquement pour trouver la solution optimale d'un problème de décision est présentée en section II.1.2. Devant ses limites, les approches multicritères sont ensuite introduites en section II.1.3.

Cet état de l'art décrit les éléments de compréhension principaux. Cependant, des éléments méthodologiques complémentaires sont disponibles si le lecteur souhaite approfondir ses connaissances dans le domaine (Annexe E).

II.1.1 Bases formelles de l'aide à la décision

Pour pouvoir aider à décider, les problèmes doivent être formalisés. Pour cela, les alternatives à comparer et problématiques associées sont d'abord définies. Pour réaliser la comparaison, deux approches d'aide à la décision sont présentées. Pour la première, chaque alternative a des conséquences évaluées sur la base d'une connaissance imparfaite des états de la nature. Pour la seconde, la décision est prise sur la base de plusieurs critères, dont l'évaluation dépend de celle d'indicateurs et d'une structure de préférence propre à chaque décideur.

II.1.1.1 Plusieurs alternatives et problématiques de décision

Une décision consiste à discriminer plusieurs alternatives, aussi appelées « solutions », « actions », « variantes », ou encore « décisions ». Elles sont potentielles, possibles, envisageables ou candidates (Schärlig 1985). L'ensemble des alternatives est noté \mathcal{A} . Les éléments de \mathcal{A} peuvent être définis explicitement sous la forme d'une liste formant l'ensemble fini $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_i, \dots, A_M\}$. Si leur définition est implicite, on note $a \in \mathcal{A}$.

Trois types de problématiques de décision sont identifiés. Un quatrième noté P_δ vise à décrire les conséquences potentielles des différentes actions de \mathcal{A} (Roy 1985 ; Schärlig 1985).

- Choix (P_α) : parmi l'ensemble des solutions de l'ensemble \mathcal{A} , la meilleure solution a^* , si \mathcal{A} est défini implicitement, ou A_{i^*} s'il est fini, doit être choisie.
Si on considère un ensemble Θ d'évaluations possibles de chaque action $A_i \in \mathcal{A}$, avec $\theta \in \Theta$ la variable d'évaluation, ou $\theta_e \in \Theta$, $e = 1, \dots, n$ si Θ est fini, évaluer chaque A_i revient à choisir un élément $\theta^*(A_i)$ (ou $\hat{\theta}(A_i)$) dans Θ .
- Tri (P_β) : soit un ensemble \mathcal{C} de classes (ou catégories) prédéfinies $\mathcal{C} = \{C_1, \dots, C_h, \dots, C_{h_{\text{tot}}}\}$, avec b_{h-1} et b_h les deux limites basses et hautes de chaque classe C_h , chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}$ doit être affectée à une de ces classes.
- Classement (P_γ) : les alternatives de \mathcal{A} sont ordonnées, classées dans un ordre de préférence.

II.1.1.2 Décision en univers certain, risqué, d'ignorance, incertain

Chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}$ peut avoir des conséquences différentes selon les événements susceptibles de se produire (Chateaufort et al. 2006a,b). Ces événements élémentaires s d'un ensemble \mathcal{S} sont des états de la nature, aussi appelés scénarios. Selon la connaissance, cet ensemble peut être établi de manière discrète avec $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$. L'évaluation de la conséquence attendue pour chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}$ et chaque scénario S_k est notée C_{ik} , selon une échelle d'évaluation à préciser.

La conséquence est l'objet sur lequel se prend la décision. Il peut s'agir d'un gain (préférence croissante pour le décideur) ou d'une perte (préférence décroissante). Ainsi, si les alternatives sont les mesures de protection et l'efficacité l'objet de décision, la conséquence peut, par extension, être assimilée à un niveau d'évaluation de l'efficacité.

Selon Yager (2008), dans le cas d'un ensemble discret \mathcal{S} , le problème de décision associé est formalisé par la matrice de conséquences \mathbf{C} , de dimensions $M \times K$, définie par l'équation (II.1) .

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} & S_1 & \dots & S_k & \dots & S_K \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_M \end{matrix} & \begin{pmatrix} C_{11} & \dots & C_{1k} & \dots & C_{1K} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{i1} & \dots & C_{ik} & \dots & C_{iK} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{M1} & \dots & C_{Mk} & \dots & C_{MK} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{II.1})$$

Le problème de décision consiste à comparer les alternatives $A_i \in \mathcal{A}$ selon le niveau de préférence de la conséquence globale, soit maximisation du gain ou minimisation de la perte. Pour chaque A_i , elle tient compte de l'ensemble des états de la nature et est notée C_i .

Selon la connaissance sur l'ensemble \mathcal{S} , quatre problèmes de décision sont distingués (Abdellaoui et Gonzales 2006 ; Tacnet et Dezert 2011).

- Décision en environnement certain : la conséquence de l'action est certaine et $C_{ik} = C_i$.
- Décision en univers risqué : la conséquence de l'action dépend de S_k , qui est une variable aléatoire. Une distribution de probabilité objective peut être établie avec $p_k = P(S_k)$.
- Décision sous ignorance : la conséquence de l'action dépend du scénario S_k . Le seul élément de connaissance à disposition est qu'il va se réaliser et est un élément de l'ensemble \mathcal{S} .
- Décision dans l'incertain : la conséquence de l'action dépend de S_k dont la connaissance est caractérisée par une incertitude épistémique. L'état de la connaissance sur S_k est défini par un degré de croyance. Les probabilités subjectives introduites par De Finetti (1937) peuvent alors être utilisées (Savage 1954).

II.1.1.3 Critères : fonctions des objectifs et préférences du décideur

Une décision se prend sur la base de l'analyse des conséquences attendues. Elles peuvent être établies selon un ou plusieurs points de vue, regroupés selon des catégories homogènes. Chacune de ces catégories est un critère de décision notés $g_j \in \mathcal{G}$, $j = 1, \dots, N$. L'évaluation de chaque critère se base sur la connaissance de plusieurs attributs (ou dimensions) (Schärlig 1985 ; Tsoukiàs 2006). Si $N = 1$, un seul critère est considéré ou est prédominant dans la décision monocritère. Si $N > 1$, plusieurs critères sont pris en compte dans une approche multicritère.

Chaque critère de \mathcal{G} est une fonction $g_j : \mathcal{A} \rightarrow X_j$ qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné X_j . Il modélise les préférences d'un décideur identifié pour comparer les différentes actions de \mathcal{A} (Vincke 1989), relativement à une catégorie j homogène de points de vue (Vincke 1989). L'ensemble X_j peut regrouper des valeurs quantitatives ou qualitatives. On note alors $g_j(a) = x_j \in X_j$, ou $g_j(A_i) = x_{ij} \in X_j$, l'évaluation de chaque alternative selon g_j .

Si plusieurs critères conditionnent la décision, ils sont potentiellement contradictoires : le choix de la solution dans \mathcal{A} est différent selon le critère. Par exemple, parmi plusieurs voitures potentielles, un particulier va choisir d'en acheter une selon quatre critères contradictoires : prix d'achat abordable (g_1), coût minimal à l'usage (g_2) mais un confort (g_3) et un caractère sportif (g_4) maximaux.

Dans le cas d'un ensemble fini de solutions \mathcal{A} , le problème de décision peut alors être modélisé par la matrice de scores \mathbf{S} , de dimensions $M \times N$, définie par l'Eq. (II.2).

$$\mathbf{S} \triangleq \begin{matrix} & g_1 & \dots & g_j & \dots & g_N \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_M \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{iN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{M1} & \dots & x_{Mj} & \dots & x_{MN} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{II.2})$$

Les deux matrices \mathbf{C} et \mathbf{S} sont deux modélisations complémentaires des problèmes de décision.

II.1.1.4 Attributs ou indicateurs pour évaluer les critères

Un attribut est une variable caractéristique observable, mesurable, qualitative qui permet de décrire chaque alternative de \mathcal{A} , sans tenir compte de préférences de la part du décideur (Tsoukiàs 2006). Cette définition se rapproche de celle d'un indicateur donnée par Curt (2008) comme « information ou donnée formalisée de manière à rendre son utilisation répétable et reproductible ». Ces informations peuvent être de natures différentes (observations visuelles, mesures, résultats de modèles, etc.), et provenir de plusieurs sources (capteur, modèle physique, modèle numérique, expert, etc.).

L'évaluation des critères est alors réalisée à partir de la connaissance de celle des attributs que l'on peut assimiler à des indicateurs. L'identification d'un critère doit donc s'accompagner de la description des indicateurs associés.

Pour un problème donné, l'ensemble fini de ces indicateurs \mathcal{I} (ou attributs, ou dimensions, ou variables) est noté $\mathcal{I} = \{I_1, \dots, I_l, \dots, I_L\}$. Chacun de ces indicateurs est évalué par un élément $y_l \in Y_l$ selon une échelle Y_l qui lui est propre, quantitative ou qualitative et on peut noter : $a = (y_1, \dots, y_L) \in Y_l^L$.

II.1.1.5 Formalisme de la structure de préférences d'un décideur

Étant donné l'ensemble \mathcal{A} , les éléments de tous les couples d'alternatives (A_i, A_m) , $A_i, A_m \in \mathcal{A}$, doivent être comparés par paires pour classer les alternatives de \mathcal{A} (P_γ) et choisir la meilleure (P_α). Pour évaluer chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}$ (P_α), ce sont les éléments des couples d'évaluations possibles (θ_e, θ_f) , $\theta_e, \theta_f \in \Theta$, qui sont comparés. Pour la problématique de tri (P_β), les couples (A_i, b_h) sont analysés.

Grâce à ces comparaisons, les alternatives sont rangées selon une relation de préordre si les ex aequo sont permis. Selon un préordre total, tous les éléments de \mathcal{A} sont rangés. Selon un préordre partiel, ce sont les éléments de certains sous-ensembles de \mathcal{A} qui sont rangés (Annexe E.1).

Pour réaliser la comparaison pour chaque paire, une relation de préordre est utilisée : la relation de préférence. Soit a et b deux éléments dans l'ensemble \mathcal{A} , cette relation permet de formaliser l'utilité associée aux réactions d'un individu pour comparer a et b par trois relations différentes (Schärlig 1985) : l'indifférence notée I , la préférence notée P et l'incomparabilité notée R .

Le triplet $\{I, P, R\}$ modélise alors le comportement du décideur : c'est sa structure de préférences (Teghem 2013). Une seule des possibilités suivantes est envisageable pour comparer a et b : aPb ou bPa ou aIb ou aRb (Vincke 1985). Une relation supplémentaire notée Q peut être introduite pour représenter la préférence faible (P représentant alors la préférence stricte), c'est à dire l'hésitation entre la préférence et l'indifférence (Roy 1980). La structure de préférence devient le quadruplet $\{I, P, Q, R\}$ (Teghem 2013).

L'aide à la décision repose sur la formalisation du problème de décision dont l'objectif est de décider parmi les différentes alternatives $A_i \in \mathcal{A}$, $i = 1, \dots, M$ selon une problématique de choix (P_α), de tri (P_β) ou de classement (P_γ).

Pour tenir compte de plusieurs critères dans la décision, les évaluations $y_l \in Y_l$ des indicateurs $I_l \in \mathcal{I}$, $l = 1, \dots, L$, aident à établir le score x_{ij} de chaque A_i selon chaque critère $g_j \in \mathcal{G}$, $j = 1, \dots, N$, en tenant compte de la structure de préférences du décideur $\{I, P, R\}$ (ou $\{I, P, Q, R\}$). Pour intégrer l'incertain dans le processus de décision, la conséquence de chaque A_i est évaluée par C_{ik} pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}$, $k = 1, \dots, K$. Elle peut être évaluée selon plusieurs critères.

II.1.2 Théorie de la décision rationnelle et solution optimale

Dans un problème mono ou multicritère, un score est établi pour chaque alternative, selon chaque critère. L'optimisation permet de choisir la solution optimale parmi toutes les alternatives d'un ensemble \mathcal{A} . Pour cela, la structure de préférences du décideur est représentée par une fonction de monétarisation ou d'utilité, pour un seul critère. La théorie de la décision rationnelle, et l'analyse coûts bénéfiques (ACB) qui en est une application, s'appuient sur ce modèle d'optimisation qui ne propose pas l'agrégation de plusieurs critères.

II.1.2.1 Optimiser selon une structure de préférences de préordre total

La structure de préférences $\{I, P, R\}$ traditionnellement utilisée est un préordre total (Annexe E.1). Ce terme de représentation traditionnelle renvoie aux problèmes de décision posés sous la forme de problèmes d'optimisation mono objectif dans la recherche opérationnelle (RO). En mathématiques, ils sont aussi appelés problèmes de programmation mathématique. Dans ce cas, le critère $g : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction « objectif », aussi appelée fonction coût ou fonction économique (Teghem 2013). Le problème d'optimisation consiste à définir la solution optimale $a^* \in \mathcal{A}$ telle

que la valeur $g(a^*)$ soit optimale au sens de Pareto. Les évaluations $y_l \in Y_l$ de chaque variable I_l , $l = 1, \dots, L$ permettent de calculer $g(a)$, $a \in \mathcal{A}$. Selon un problème classique de programmation linéaire (PL), des constantes c_l sont associées à chaque y_l et la fonction « objectif » à optimiser est définie par l'équation (II.3). Le problème présenté est un problème de minimisation, mais un problème de maximisation peut aussi être posé. Des fonctions contraintes sont associées à cette fonction « objectif ».

$$\arg \min g(a) = \sum_{l=1}^L c_l \cdot y_l, \forall a \in \mathcal{A} \quad (\text{II.3})$$

Reposant sur l'hypothèse de préordre total, les approches d'optimisation, si elles doivent tenir compte des préférences du décideur, font largement appel à l'évaluation monétaire du critère.

II.1.2.2 Fonctions de monétarisation et d'utilité de préordre total

Une fonction économique $g : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ permet d'apprécier la valeur de $a \in \mathcal{A}$, sur une échelle d'évaluation qui est un sous-ensemble de \mathbb{R} (Garrabé 1994). Comme énoncé par le paradoxe de l'eau et du diamant, la valeur objective d'échange d'un bien renvoie au prix comme unité de valeur alors que sa valeur subjective d'usage renvoie à la valeur-utilité (Bernoulli 1738, 1954). Deux types de fonctions économiques g sont à distinguer. Les fonctions de monétarisation $g : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{€}$ établissent la valeur de $a \in \mathcal{A}$ sur une échelle cardinale et continue monétaire. Les fonctions d'utilité $g = u : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ établissent une valeur sur une échelle ordinale d'utilité, pour laquelle seul l'ordre compte (Annexe E.1).

La fonction d'utilité est une relation de préordre total (Vincke 1982), qui représente le comportement propre à chaque décideur. Elle permet notamment de modéliser son aversion, sa neutralité ou son goût au risque (Arrow 1965 ; Pratt 1964). Les méthodes d'élicitation de ces fonctions (méthodes des loteries, méthodes analytiques) s'appuient sur des séances de questions. Les réponses du décideur permettent de construire sa fonction d'utilité (Mousseau 2009).

La fonction de monétarisation est une relation de préordre total qui peut être construite selon différentes méthodes (Grelot 2004). Les méthodes basées sur les coûts (coûts de remplacement, coûts évités, etc.) permettent de l'obtenir directement en récoltant directement les données issues du marché réel. Les méthodes basées sur les préférences déclarées (évaluation contingente, etc.) établissent un marché fictif pour établir les préférences du décideur. Les méthodes basées sur les préférences révélées (coûts de transport, prix hédoniques, etc.) s'appuient sur les observations de caractéristiques particulières d'un bien, qui le différencient des biens d'un marché existant.

La théorie de la décision rationnelle repose sur le principe de l'optimisation d'un seul critère dont l'évaluation dépend de l'utilité ou de la valorisation monétaire. En pratique, l'analyse coûts bénéfiques (ACB), appliquée dans le domaine des risques naturels, repose sur une fonction de monétarisation des dommages tangibles pour représenter les préférences du décideur.

II.1.2.3 Hypothèses de la théorie de la décision rationnelle

Une décision concerne généralement plusieurs acteurs, représentant des individus ou des groupes d'individus, qui peuvent avoir des préférences différentes. Les préférences énoncées par un décideur ne sont alors pas forcément représentatives de l'ensemble des acteurs de ce groupe (Schärlig 1985).

Dans la poursuite des travaux sur la théorie de l'équilibre général de Walras (1874), Pareto (1912) définit une situation optimale, dite « optimum de Pareto » où le point d'équilibre du « bien-

être collectif », c'est à dire de l'utilisation optimale des ressources collectives, est atteint. Pour cela, une fonction d'utilité collective associe les fonctions d'utilité individuelles afin de représenter la structure de préférence collective. Selon le critère de Pareto, la décision optimale ne peut pas correspondre à une situation de concurrence, où l'augmentation de l'utilité individuelle d'un des acteurs implique la diminution de celle d'au moins un des autres acteurs. En d'autres termes, la décision optimale selon le critère de Pareto est conditionnée par l'absence d'individus perdants.

Cette condition a été relaxée par la définition de l'optimum selon le critère de Kaldor-Hicks. La décision optimale peut être établie avec des individus perdants, sous condition que l'utilité marginale induite des individus gagnants (somme de l'augmentation de leurs utilités individuelles) compense celle des individus perdants. Cette définition est la base du principe de compensation sur lequel repose l'ACB pratiquée dans le domaine des risques naturels (Treich 2005).

Les années 1930 marquent le début d'un mouvement scientifique, basé sur l'économie et les mathématiques, pour l'axiomatisation de la théorie de l'équilibre général, se basant sur une représentation du comportement rationnel du décideur. Ce mouvement aboutit à la théorie de l'utilité espérée, dite objective, développée par von Neumann et Morgenstern (1944). Cette théorie identifie notamment les critères raisonnables sous la forme d'axiomes mathématiques pour qu'une fonction d'utilité existe, représentant le comportement rationnel d'un décideur ou d'un groupe de décideurs qui cherchent à maximiser cette utilité en univers risqué. Comme proposé initialement par Pareto (1912), la fonction d'utilité collective est identifiée de façon rationnelle par l'agrégation des fonctions d'utilité individuelles. L'utilité est la valeur unique (un seul critère) des conséquences C_{ik} de la matrice \mathbf{C} (p. 50). L'optimum est la valeur espérée de ces conséquences établie en univers risqué, sur la base de probabilités objectives issues de loteries.

Cette théorie est la base du développement de la RO et des théories de la décision rationnelle, Savage (1954) la transposant en univers incertain. Son énonciation du postulat de « la chose sûre » (ou « d'indépendance ») permet d'établir que, dans ce cas, le comportement rationnel d'un décideur consiste dans la valeur espérée des conséquences, en représentant l'univers incertain par des probabilités subjectives associées aux occurrences de ses modalités (Munier 1984).

Les théories de la décision rationnelle reposent donc sur les hypothèses suivantes :

- un décideur, ou un groupe de décideurs, a pour objectif de maximiser ses gains (ou de minimiser ses pertes) établies selon une fonction de valeur monétaire ou d'utilité ;
- elle est l'unique point de vue : un seul critère de décision est considéré ;
- elle représente la structure de préférences individuelle du décideur selon un comportement rationnel dit « externe » (Tsoukiàs 2006), respectant des axiomes définissant ce comportement, dont celui d'un préordre total ;
- le comportement rationnel d'un groupe de décideurs est représenté par une fonction d'utilité collective issue de l'agrégation de celles, indépendantes, des individus ;
- les probabilités subjectives permettent de représenter l'incertitude épistémique et de décider en univers incertain (Savage 1954) ;
- la décision est établie sur la base de la valeur espérée des gains (ou des pertes).

C'est dans ce cadre théorique que se situe l'ACB, utilisée en pratique pour aider à décider entre plusieurs solutions de protection d'une zone d'enjeux.

II.1.2.4 Risque naturel et analyse coûts bénéfiques (ACB) : applications de la théorie de la décision rationnelle

Dans la section I.1.2.4, les mesures de prévention étaient notées d , en intégrant les mesures structurelles de protection d_{struct} et les mesures non structurelles $d_{\text{non struct}}$. Par la suite, toute mesure d est considérée comme une alternative A_i à analyser parmi plusieurs possibles dans \mathcal{A} .

En pratique, l'ACB est utilisée pour aider à choisir quelle est la mesure la plus efficace à mettre en œuvre. Elle repose sur le calcul de la réduction du risque $\Delta R_{\Omega}(A_i) = R_{\Omega}(0) - R_{\Omega}(A_i)$, avec $R_{\Omega}(0)$ le risque initial et $R_{\Omega}(A_i)$ le risque résiduel (Bründl 2009 ; Erdlenbruch et al. 2008). Ce risque sur l'ensemble des enjeux z_e , $e = 1, \dots, \Omega$ est évalué comme la valeur espérée des dommages tangibles (ou monétarisés) selon les équations (I.1-I.3) (p. 16-17). Cette section établit le lien entre cette application aux risques naturels et la théorie de la décision rationnelle.

• Comparaison des alternatives de protection basée sur la réduction du risque

Selon le formalisme de la matrice \mathbf{C} (p. 50), chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}$, $k = 1, \dots, K$ appartient à une classe d'aléas $S_k \in [S_{T_k}; S_{T_{k+1}}[$, dont les bornes sont les deux périodes de retour T_k et T_{k+1} , avec $T_{k+1} \geq T_k$. Par exemple, $T_1 = 20$ ans, $T_2 = 100$ ans et $T_3 = 300$ ans étaient retenues dans la figure I.12 (p. 16). La probabilité annuelle de survenance de chaque scénario, notée $P(S_k)$, est définie par l'équation (II.4).

$$P(S_k) \triangleq \frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{k+1}} \quad (\text{II.4})$$

En pratique, chaque S_k est une évaluation discrète de la magnitude M_k du phénomène torrentiel (tableau I.1, p. 9), comme le débit liquide de pointe ($Q_{L,p}$) ou le volume de lave (V_{lave}) (Bründl 2009). Pour comparer les alternatives $A_i \in \mathcal{A}$, les conséquences C_{ik} de la matrice \mathbf{C} (p. 50) sont établies pour chaque scénario de probabilité $P(S_k)$, $k = 1, \dots, K$ et chaque A_i , $i = 1, \dots, M$.

Deux types de conséquences C_{ik} peuvent être pris en compte : 1) la réduction des dommages ou 2) la réduction des dommages étant donné le coût (objet de l'ACB).

1. Pour le premier cas, les dommages sont évalués pour chaque enjeu z_e , $e = 1, \dots, \Omega$, selon l'équation (I.1) (p. 16), en situation initiale ($D_{z_e, T_k}(0)$) et en tenant compte de la mesure de protection A_i ($D_{z_e, T_k}(A_i)$). Pour chaque z_e situé à la localisation géographique X , ils dépendent de sa probabilité d'atteinte $P(X_{y_l} | M_k)$ avec une intensité de niveau y_l étant donnée la magnitude M_k , de son taux d'endommagement potentiel $V(z_e, y_l)$ et de son taux d'exposition $q(z_e, X_{y_l})$. Le système d'équations (II.5) permet de calculer la conséquence C_{ik} comme la réduction des dommages potentiels par A_i selon le scénario S_k .

$$\begin{cases} D_{z_e, T_k}(0) = P(X_{y_l} | M_k)(0) \cdot q(z_e, X_{y_l}) \cdot V(z_e, y_l) \cdot C(z_e) \\ D_{z_e, T_k}(A_i) = P(X_{y_l} | M_k)(A_i) \cdot q(z_e, X_{y_l}) \cdot V(z_e, y_l) \cdot C(z_e) \\ C_{ik} = \sum_{e=1}^{\Omega} D_{z_e, T_k}(0) - \sum_{e=1}^{\Omega} D_{z_e, T_k}(A_i) = D_{\Omega, T_k}(0) - D_{\Omega, T_k}(A_i) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Les mesures de protection $A_i \in \mathcal{A}$ sont comparées selon la réduction du risque permise.

La décision finale consiste à choisir la meilleure solution $A_{i^*} \in \mathcal{A}$ pour laquelle la réduction du risque $\Delta R_{\Omega}(A_i)$ est maximale selon le système d'équations II.6.

$$\begin{cases} \Delta R_{\Omega}(A_i) = R_{\Omega}(0) - R_{\Omega}(A_i) = \sum_{k=1}^K P(S_k) \cdot C_{ik} = \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{k+1}} \right] \cdot [D_{\Omega, T_k}(0) - D_{\Omega, T_k}(A_i)] \\ i^* \triangleq \arg \max_i [\Delta R_{\Omega}(A_i)] \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

2. Pour le second cas, un horizon temporel de projet est d'abord identifié et noté t_{projet} (en années). Un taux d'actualisation annuel q_t , $t = 1, \dots, t_{\text{projet}}$ est pris en compte. Il est fixe en Suisse ($q_t = 0,02$) (OFEV 2010) et en Autriche ($q_t = 0,03$) (BLFUW 2009b) tandis qu'il évolue en France selon l'équation (II.7) (Erdlenbruch et al. 2008). Pour chaque $A_i \in \mathcal{A}$, le bénéfice $B(A_i)$ est donné par la réduction du risque, sur la durée t_{projet} , par l'équation (II.8) (Erdlenbruch et al. 2008).

$$q_t = \begin{cases} 0,02 & \text{si } t \leq 30\text{ans} \\ \sqrt[t]{1,04^{30} \cdot 1,02^{t-30}} & \text{si } t > 30\text{ans} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$B(A_i) = \sum_{t=1}^{t_{\text{projet}}} \frac{1}{(1+q_t)^t} [\Delta R_{\Omega}(A_i)] \quad (\text{II.8})$$

Pour la même période, le coût global $C(A_i)$, indépendant des états de la nature \mathcal{S} , intègre son coût d'investissement noté $C^o(A_i)$ et son coût d'entretien annuel noté $C^t(A_i)$, $t = 1, \dots, t_{\text{projet}}$. En Suisse, un coût de réinvestissement ou de réparation est estimé si la durée de vie de la mesure est inférieure à t_{projet} , et une valeur résiduelle est donnée dans le cas inverse (Bründl 2009). Pour simplifier, on ne tient pas compte de ces derniers éléments et $C(A_i)$ est établi selon l'équation (II.9).

$$C(A_i) = C^o(A_i) + \sum_{t=1}^{t_{\text{projet}}} \frac{1}{(1+q_t)^t} C^t(A_i) \quad (\text{II.9})$$

La Valeur Actuelle Nette (VAN), notée $\text{VAN}(A_i)$, et le ratio des bénéfices sur les coûts, noté $r(A_i)$, sont alors calculés selon les équations (II.10) pour chaque mesure $A_i \in \mathcal{A}$. Si $\text{VAN}(A_i) \geq 0$ ou $r(A_i) \geq 1$, alors la mesure A_i est efficiente économiquement.

La décision finale consiste à choisir la mesure la plus efficiente $A_{i^*} \in \mathcal{A}$ pour laquelle la VAN ou le ratio des bénéfices sur les coûts sont maximaux, selon le système d'équations (II.10).

$$\begin{cases} r(A_i) = \frac{B(A_i)}{C(A_i)} \\ \text{VAN}(A_i) = B(A_i) - C(A_i) \\ i^* \triangleq \arg \max_i \text{VAN}(A_i) \text{ ou } i^* \triangleq \arg \max_i r(A_i) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

• L'ACB : application directe de la théorie de la décision rationnelle

Comme détaillé ci-dessous, les méthodes d'aide à la décision précédentes, comme l'ACB, sont une application directe de la théorie de la décision classique. La comparaison aux hypothèses décrites précédemment (p. 54) permet cette mise en évidence.

- L'objectif est de maximiser la réduction du risque ou l'efficience à réduire le risque (VAN, ratio r), selon une fonction de monétarisation des dommages (p. 53). Les méthodes basées sur les préférences déclarées (évaluation contingente) ou révélées (prix hédonistes) peuvent être utilisés (CGDD 2014). Cependant, en pratique, les outils EconoMe[®] (OFEV 2010), RiskPlan[®] (Greminger et Balmer 2011) ou autrichien (BLFUW 2009b) utilisent les méthodes basées sur les coûts.
- Le critère monétaire est l'unique point de vue de la décision.
- Une fonction de monétarisation des dommages est établie individuellement pour chaque élément exposé z_e , $e = 1, \dots, \Omega$, correspondant à une structure de préférences individuelles selon un préordre total.

- L'équation (II.5) représente l'agrégation collective des fonctions de monétarisation des dommages sur chaque enjeu individuel, en les considérant indépendantes. Cela permet d'établir ensuite la solution optimale selon le principe de compensation (Treich 2005) : une augmentation des dommages sur chaque enjeu individuel z_e est acceptable si les dommages totaux sur l'ensemble Ω des enjeux sont globalement réduits.
- Le contexte de décision associé aux phénomènes torrentiels s'apparente à un univers incertain car les événements sont représentés par des probabilités annuelles subjectives $P(S_k)$, en faisant des hypothèses sur les scénarios associés aux périodes de retour en contexte d'incertitude épistémique.
- Dans le cadre de l'ACB et la conception optimisée, la décision rationnelle est établie sur la base du calcul de la valeur espérée des dommages. Pour la décision basée sur la réduction du risque, cela dépend de l'approche du calcul du risque retenu sur la figure I.12 (p. 17).

II.1.2.5 Critiques : monocritère, préordre total, décision implicite, décision dans l'incertain

Les limites générales de la théorie de la décision rationnelle s'appliquent également à toutes les méthodes d'aide à la décision qui en utilisent les principes. Cette section ne détaille pas l'ensemble des travaux, notamment dans le domaine des sciences cognitives et de la psychologie, qui les ont mises en évidence. Tsoukiàs (2006) les synthétise en identifiant l'évolution des sciences de la décision, depuis la modélisation de la solution optimale jusqu'au développement du processus d'aide à la décision pour rechercher une solution de compromis.

• Critique des postulats de représentation du comportement rationnel des décideurs

Les premières critiques ont été apportées par les sciences cognitives. Sur la base d'expériences, elles ont mis en évidence l'incohérence entre les comportements réels observés des décideurs et les postulats de l'axiomatique de la théorie de la décision pour représenter leur comportement rationnel. De nombreux biais sont à prendre en compte comme les suivants cités en exemple.

1. D'après le théorème d'impossibilité d'Arrow (1951), il n'est pas possible d'agréger, dans les conditions réelles d'une prise de décision, les préférences individuelles de plusieurs individus représentées par une structure de préordre total selon les axiomes d'un comportement rationnel.
2. Le paradoxe d'Allais (1953) établit que, en univers incertain, l'axiome d'indépendance introduit par Savage (1954) est contredit par le comportement réel des décideurs. Ceci remet en cause le choix de la valeur espérée pour établir la décision en univers incertain.
3. Par l'expérience analysant le comportement d'un consommateur à qui on rajoute du sucre petit à petit dans son café, Luce (1956) a montré que l'hypothèse de la transitivité de I (Annexe E.1), utilisée pour représenter les structures de préférence selon un préordre total, n'est pas soutenable pour représenter le comportement réel d'un décideur. Ceci est aussi connu comme le paradoxe de Condorcet.

• Pas de solution optimale en présence de critères contradictoires

Une critique majeure réside dans l'approche monocritère, selon une échelle de valeur unique des conséquences (monétaire, utilité). Elle est valide en présence d'un seul critère prédominant ou de plusieurs critères non contradictoires, ce qui est rarement le cas. Il n'existe alors pas une seule et unique solution optimale (Tsoukiàs 2006). Pour l'application aux ouvrages de protection

contre les risques naturels, cette critique est notamment discutée par les développeurs de l'ACB : les dommages intangibles ne sont pas considérés (Bründl et al. 2009 ; Erdlenbruch et al. 2008).

Une autre critique provient du fait que la décision est limitée à une fonction « objectif » établie sur une échelle de valeur quantitative. La prise en compte de critères évalués qualitativement n'est pas possible, ou tout au moins elle manque de transparence (Schärlig 1985).

• **Du modèle théorique de la décision à l'aide à la décision**

Selon Simon (1947, 1954), le problème d'optimisation formalise le problème de décision en ne tenant pas compte de chaque contexte de décision spécifique. Les alternatives potentielles $a \in \mathcal{A}$ sont définies implicitement par les contraintes que les variables doivent satisfaire (Teghem 2013). C'est en cela que cette approche est définie comme une formalisation externe du problème (Tsoukiàs 2006). Sur la base du développement de la « rationalité limitée » et de l'observation des comportements réels des décideurs dans des organisations, Simon (1947) discute l'établissement d'une représentation du comportement rationnel du décideur indépendamment du contexte particulier de chaque décision à prendre. Il établit que, dans la réalité, un décideur ne cherche finalement pas une solution optimale mais plutôt une solution satisfaisante, se rapprochant ainsi du compromis introduit par les méthodes d'AMC (Tsoukiàs 2006).

Le processus de formulation du problème de décision est également critiqué. Le problème n'est que rarement bien défini au départ. Le processus de construction de ce problème devient alors aussi important que sa résolution. Cette construction peut être difficile et les biais dans les questions posées pour aider à formuler le problème doivent être considérés (Schärlig 1985). La crise de la RO dans les années 60 a initié le développement de nombreux travaux en ce sens (Tsoukiàs 2006).

Le théorie de la décision rationnelle aide à définir la solution optimale dans \mathcal{A} . L'ACB, qui est utilisée en pratique pour aider à choisir la solution optimale, en est une application directe.

- 1) Elle formalise chacun des éléments du problème en dehors du contexte de décision.
- 2) Un seul point de vue ($N = 1$) est considéré.
- 3) Les structures de préférences individuelles sont représentées selon un préordre total.
- 4) Elles peuvent être agrégées.
- 5) En univers incertain, l'incertitude épistémique sur \mathcal{S} est représentée par des probabilités subjectives pour établir la valeur espérée des conséquences.

Ces points font l'objet de critiques pour des problèmes de décision réels.

- 1) Tout problème de décision doit être formalisé dans son contexte.
- 2) Tous les points de vue ne sont pas pris en compte, notamment les dommages intangibles dans l'analyse de la réduction du risque.
- 3 à 5) Le comportement réel du décideur ne peut pas être représenté selon ces hypothèses.

II.1.3 Approches multicritères pour aider à décider selon plusieurs points de vue

Dans notre cas d'application, l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est un problème de décision mal défini, dans un contexte de décision multi-objectif et multi-échelle. La méthodologie d'aide à la décision peut aider à en tenir compte pour formaliser le problème.

En pratique, plusieurs critères doivent être considérés. La théorie de la décision rationnelle et l'ACB qui en découle ne le permettent pas. L'optimisation multicritère, le système expert et les méthodes d'aide multicritère à la décision sont alors explorés.

II.1.3.1 Des modèles de décision au processus d'aide à la décision

Une des critiques de la théorie de la décision rationnelle est de ne pas tenir compte du contexte de décision pour formaliser le problème. Des approches d'aide à la décision peuvent aider à cela.

• Des approches normatives aux approches constructives

Tsoukiàs (2006) synthétise les différentes approches d'aide à la décision possibles.

1. Les approches normatives, comme la théorie de la décision rationnelle, considèrent que le problème de décision est parfaitement identifié. Elles postulent un modèle de rationalité externe pour représenter le comportement du décideur.
2. Les approches descriptives considèrent également que le problème de décision est identifié. Cette approche observe le comportement du décideur, hors du contexte de décision spécifique au problème à traiter, et établit un modèle de préférence empirique.
3. Les approches prescriptives considèrent également le problème de décision connu mais la structure de préférence du décideur n'est pas celle traditionnelle. Ce modèle de préférence est découvert pour chaque contexte de décision spécifique à chaque problème en question : sa validité est donc locale.
4. Les approches constructives considèrent que le problème de décision n'est pas bien identifié. Elles visent à établir un consensus avec le décideur pour construire et formaliser le problème en représentant la situation et en proposant un modèle d'aide à la décision approprié.

Dans notre contexte d'application, le problème de décision à traiter est mal formulé (section I.3.1, p. 33). Les approches constructives seront alors privilégiées.

• Approches constructives et processus d'aide à la décision

Lorsque le problème de décision n'est pas identifié, quatre étapes principales d'un processus d'aide à la décision permettent d'aider à sa formulation (Tsoukiàs 2006).

1. La description du contexte de décision permet de préciser la situation problématique. Pour cela, différentes approches sont possibles. Les deux suivantes ont été appliquées aux études de risque (Merad 2010) et aux coupures de réseaux (routes, voies ferrées, etc.) par les phénomènes naturels de montagne (Tacnet 2012).
 - La première approche de Merad (2010) est établie selon cinq étapes. 1) Le niveau du problème de décision doit être précisé (section I.2.2.2, p. 32). 2) L'information et la connaissance disponibles doivent être spécifiées tout comme 3) l'importance des contraintes internes et externes (spatiales, temporelles et stratégiques). 4) La démarche et la culture dominante, conditionnant les préférences du décideur, doivent être connues. Finalement, 5) la criticité du contexte environnemental doit être spécifiée.
 - La deuxième approche appelée « 5WH (Who ? What ? Why ? When ? Where ? How ?) » a été introduite par Lasswell (1960) pour des problèmes de décision complexes. Dans son application, Tacnet (2012) rappelle l'enchaînement des six questions auxquelles des réponses doivent être apportées pour expliciter le contexte de décision : qui décide ? qu'est-ce qui est décidé ? pourquoi doit-on décider ? quand se réalise la décision ? où est établie la décision ? quelles sont les solutions ?

Ces approches mettent en évidence que le contexte de décision évolue dans le temps et dans l'espace. Ce contexte évolutif est caractérisé par le décideur (ou la structure de décision) à un niveau de décision donné, par la connaissance et les moyens disponibles pour traiter le problème et par les contraintes associées à cette décision.

2. La formulation du problème passe par le choix de la problématique à traiter, l'identification textuelle des alternatives, des critères, des attributs, et de l'objet de la décision.
3. La modélisation repose sur la formalisation du problème de décision : alternatives (\mathcal{A}), critères (\mathcal{G}), structure de préférences selon chaque critère ($\{I, P, R\}$), attributs (\mathcal{I}) et, éventuellement, préférences entre les critères (section II.1.3.4). Dans ce cadre, différents modèles sont possibles : modèle d'optimisation mono-critère ou multicritère (section II.1.3.2) ; modèle d'agrégation selon des règles logiques (section II.1.3.3) ; modèles d'agrégation selon les préférences entre critères (sections II.1.3.4-II.1.3.6).

La modélisation du problème de décision sous incertitude dépend du choix du formalisme pour représenter l'incertitude sur les états de la nature \mathcal{S} . Dans le cas de la théorie de la décision rationnelle, ce sont les probabilités subjectives.

4. La recommandation finale repose sur une validation du modèle d'aide à la décision développé selon une approche itérative. Cette étape est fondamentale mais reste délicate.

Contrairement à l'approche classique rationnelle, les approches constructives aident à formuler le problème de décision dans son contexte. Elles reposent sur un processus de décision aux étapes connues. Un type de modèle doit être choisi pour formaliser le problème de décision en considérant plusieurs critères.

II.1.3.2 Optimisation multicritère pour des solutions efficaces

Pour pouvoir prendre en compte plusieurs critères, l'optimisation multicritère s'inscrit dans la continuité de la théorie de la décision rationnelle. Les préférences du décideur entre les différents critères ne sont pas exprimées. Il s'agit d'une approche normative ou descriptive.

En présence de N critères $g_j : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$, N fonctions « objectif » peuvent être formalisées selon l'équation II.3 (p. 53). Une solution $a \in \mathcal{A}$ est efficace, ou optimale au sens de Pareto, si le point $g(a) = (g_1(a), \dots, g_N(a))$, qui représente l'ensemble des évaluations de a , est non dominé c'est à dire si, $\forall b \neq a \in \mathcal{A}$, $g_j(b) < g_j(a)$, $\forall j = 1, \dots, N$, et $g_j(b) \leq g_j(a)$, $j = 1, \dots, N$. Elles forment une frontière efficace sur un ensemble de solutions défini implicitement à partir des contraintes que les variables doivent respecter. Ce concept de solution efficace est une généralisation du concept de solution optimale à un problème multicritère (Teghem 2013).

Plusieurs méthodes existent (Annexe E.2). La théorie de l'utilité multi-attribut (*Multi Attribute Utility Theory* en anglais) (MAUT) de Keeney et Raiffa (1976) est critiquée pour être difficile à appliquer (Schärlig 1985) et par le théorème d'impossibilité à agréger des fonctions d'utilité individuelles d'Arrow (1951). L'optimisation hiérarchique, la programmation par objectifs ou l'optimisation combinatoire multicritère aident à traiter les problèmes successivement mais ne permettent pas de tenir compte de toutes les solutions efficaces (Teghem 2013).

L'optimisation multicritère repose sur la résolution successive de problèmes monocritère. Les solutions sont définies implicitement, la prise en compte de critères qualitatifs n'est pas explicite (Tsoukiàs 2006) et le poids de chaque fonction « objectif » est défini a priori : il ne s'agit pas d'une approche constructive recherchée pour notre contexte d'application. Par ailleurs, elle repose sur l'agrégation des fonctions « objectif », chacune représentant une structure de préférences de préordre total. Les mêmes critiques que celles sur la théorie de la décision rationnelle peuvent être formulées (synthèse en p. 58), sauf celle de la non prise en compte de plusieurs critères.

II.1.3.3 Systèmes à base de règles pour une agrégation logique

Dans les années 50, le développement de l'informatique a permis celui de l'intelligence artificielle (*Artificial Intelligence* en anglais) (IA) (McCarthy 1960). Elle aide à représenter le raisonnement humain, souvent mené sous forme logique et verbale, pour un problème et un contexte donnés (Simon 1969). Les systèmes experts, ou systèmes à base de connaissances (SBC), sont alors nés dans les années 70/80 avec le système MYCIN pour diagnostiquer les maladies du sang (Shortliffe et al. 1973). L'explication des connaissances et du raisonnement y est tracée par des règles de type « SI-ALORS ». Des SBC ont été développés pour de nombreuses applications : médecine, apprentissage, juridique, aide à la conception, à la décision, au diagnostic (Lejeune 1999).

L'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques contre les inondations en est un exemple (Serre et al. 2007). Les avis d'expert sont élicités au cours de réunions de groupes de travail. Le processus est itératif avec des étapes de validation régulières (Curt 2008). Pour ce contexte d'application, les fonctions à remplir par le système qu'est l'ouvrage sont préalablement établies. Les modes de défaillance associés sont notés μ_{MR_j} . Des fonctions techniques notées F_k sont assurées pour limiter ces défaillances. Des phénomènes physiques sont constatés et notés ϕ_k . Pour chacun, un niveau de performance μ_{MR_j} , μ_{F_k} et ϕ_k est établi. Leur évaluation dépend de celle d'indicateurs (conception, issus de mesures, observations visuelles, etc.) regroupés dans l'ensemble $\mathcal{I} = \{I_1, \dots, I_l, \dots, I_L\}$. Les indicateurs directs permettent une évaluation sans agrégation tandis que les indicateurs indirects nécessitent d'être agrégés avec d'autres.

Sur la base des travaux d'élicitation, des règles de type « MAX », « MIN », « SI-ALORS » sont établies pour agréger les évaluations des I_l , μ_{F_k} et ϕ_k jusqu'à obtenir celle de μ_{MR_j} . L'exemple de la figure II.1 est directement extrait de Curt (2008). Dans ce cas d'application, le choix a été fait d'évaluer l'ensemble des éléments sur une même échelle d'évaluation discrète [0;10].

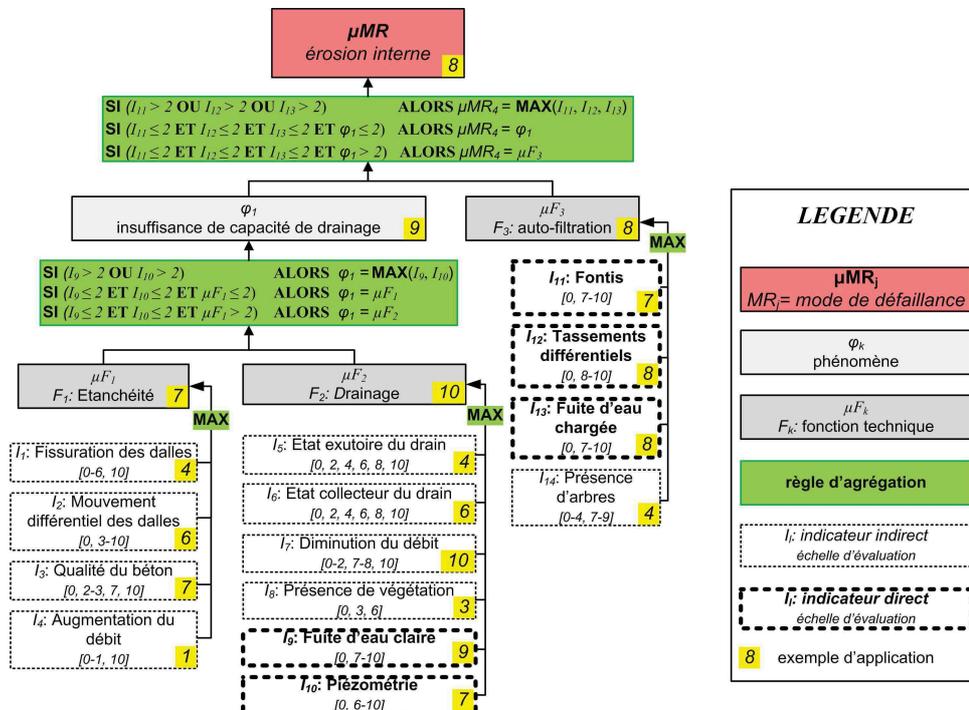


FIGURE II.1 – SBC pour agréger plusieurs indicateurs selon des règles, appliqué à l'évaluation de la performance d'un barrage hydraulique en remblai vis-à-vis de l'érosion interne (Curt 2008).

Les SBC agrègent les indicateurs sans hypothèse d'indépendance et sont facilement compréhensibles par les experts (Curt 2008). Dans ce cas d'application, la formalisation du SBC a été engagée par Peyras et al. (2004) et se poursuit encore aujourd'hui (Bambara 2016). L'évaluation de la performance d'un barrage est établie pour un mode de défaillance donné. Aucune agrégation des évaluations selon plusieurs modes de défaillance n'est proposée pour une évaluation globale de la performance d'un ouvrage (Vuillet 2012).

Des systèmes à base de règles sont développés pour aider à évaluer, de manière reproductible, la performance des ouvrages de protection contre les inondations, selon des règles logiques d'agrégation. Basés sur l'élicitation de l'expertise, leur développement est long. Développés pour agréger les évaluations des différents indicateurs, qualitatifs ou quantitatifs, ils n'ont pas pour objectif d'agréger les préférences d'un décideur. En ce sens, ces méthodes sont complémentaires des méthodes d'agrégation multicritère, présentées ensuite, qui tiennent compte des préférences entre critères : elles aident à formaliser l'attribution d'un score x_{ij} pour chaque alternative A_i selon un critère $g_j \in \mathcal{G}$ à partir des évaluations $y_l \in Y_l$ des indicateurs $I_l \in \mathcal{I}$, $l = 1, \dots, L$.

II.1.3.4 Élicitation des préférences entre critères pour l'aide multicritère à la décision (AMC)

L'aide à la décision repose sur la description du contexte, la formalisation du problème dans ce contexte, l'élicitation des préférences du décideur pour évaluer plusieurs alternatives selon un critère donné, l'élicitation de ses préférences entre des critères contradictoires et l'agrégation. Ni l'optimisation multicritère, ni les SBC ne prennent en compte les préférences du décideur entre des critères de décision contradictoires. Pour permettre cela, l'AMC a été développée sur le principe d'une approche constructive avec pour objectifs de (Teghem 2013) :

- décider selon des critères quantitatifs et qualitatifs évalués explicitement ;
- décider parmi un nombre fini d'alternatives définies de manière explicite ;
- expliciter ses préférences entre les différents critères par un vecteur de poids noté $\mathbf{w} = \{\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_N\}$, respectant $\sum_{j=1}^N \omega_j = 1$;
- intégrer ces préférences dans un processus d'agrégation.

• Méthodes d'élicitation de \mathbf{w} adaptées à chaque AMC

Toutes les méthodes d'AMC établissent d'abord le vecteur de préférence \mathbf{w} pour l'ensemble des critères (Teghem 2013). Mousseau (1992) distingue les méthodes directes par lesquelles le décideur définit intuitivement l'importance relative des critères, des méthodes indirectes qui établissent le vecteur \mathbf{w} à partir d'autres informations. Les premières estiment que \mathbf{w} était déjà connu du décideur. Les secondes construisent \mathbf{w} par le processus d'élicitation en deux étapes : 1) le questionnement pour récupérer les informations et 2) la déduction pour établir \mathbf{w} .

Pour une approche constructive, l'élicitation de \mathbf{w} s'appuie sur les méthodes indirectes. Chaque méthode d'AMC dispose alors de sa propre méthode d'élicitation de \mathbf{w} (Mousseau 1995).

• Matrice de préférence très utilisée de Saaty (1980)

À titre d'exemple, la méthode proposée par Saaty (1980) est détaillée, car utilisée dans de nombreux domaines d'application (Vaidya et Kumar 2006). Une relation de préférence est établie pour une paire d'éléments (a, b) . En phase de questionnement, le décideur fournit, pour chaque hypothèse $a \succ b$ (a est préféré à b), le niveau de préférence PL (pour *Preference Level* en anglais)

selon l'échelle verbale du tableau II.1. Une évaluation quantitative de $PL_{a \succ b}$ en est déduite dans l'intervalle $[1;9]$, avec $PL_{b \succ a} \triangleq \frac{1}{PL_{a \succ b}}$. En comparant les critères par paires, la matrice de préférence de dimensions $N \times N$, notée \mathbf{P}_g , peut être établie selon l'équation (II.11). La consistance des évaluations des préférences données dans la matrice \mathbf{P}_g est vérifiée selon une procédure établie par Saaty (1980). Elle permet d'assurer ainsi un vecteur \mathbf{w} avec des poids cohérents pour tous les critères pour $N \leq 3$.

Préférence qualitative $a \succ b$	$PL_{a \succ b}$	$PL_{b \succ a}$
(a) est aussi important que (b)	1	1
est modérément plus important que	3	1/3
est fortement plus important que	5	1/5
est très fortement plus important que	7	1/7
est extrêmement plus important que	9	1/9

TABLEAU II.1 – Evaluation du niveau de préférence entre deux éléments a et b , noté $PL_{a \succ b}$ (Saaty 1980).

$$\mathbf{P}_g \triangleq \begin{matrix} & g_1 & \dots & g_j & \dots & g_t & \dots & g_N \\ \begin{matrix} g_1 \\ \vdots \\ g_j \\ \vdots \\ g_t \\ \vdots \\ g_N \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \dots & PL_{g_1 \succ g_j} & \dots & PL_{g_1 \succ g_t} & \dots & PL_{g_1 \succ g_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ PL_{g_j \succ g_1} & \dots & 1 & \dots & PL_{g_j \succ g_t} & \dots & PL_{g_j \succ g_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ PL_{g_t \succ g_1} & \dots & PL_{g_t \succ g_j} & \dots & 1 & \dots & PL_{g_t \succ g_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ PL_{g_N \succ g_1} & \dots & PL_{g_N \succ g_j} & \dots & PL_{g_N \succ g_t} & \dots & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{II.11})$$

En phase de déduction, le vecteur \mathbf{w} est calculé à partir de \mathbf{P}_g . Saaty (1977, 1980) a d'abord proposé de calculer son vecteur propre, méthode encore la plus utilisée. Il en existe cependant d'autres, plus complexes, comme les méthodes des moindres carrés de Chu et al. (1979), des moindres carrés logarithmiques (Crawford et Williams 1985; Saaty 1984; Wang et al. 2005), des moindres valeurs absolues logarithmiques de Cook et Kress (1985) ou de la décomposition en valeurs singulières de Gass et Rapcsák (2004) (Bozóki et Lewis 2005).

• Limites de l'élicitation des préférences entre critères

Les travaux en psychologie de Miller (1994) ayant montré que l'esprit humain ne peut pas prendre en compte plus de sept éléments pour les comparer par paires, ce chiffre correspond au maximum de critères qui peut être considéré par la méthode de Saaty (1980). Cette méthode est alors critiquée comme ne donnant pas une représentation exacte des préférences d'un décideur (Linkov et al. 2006).

L'établissement de valeurs discrètes de $PL_{g_t \succ g_j}$, $j, t = 1, \dots, N$ étant discutable, Saaty et Vargas (1987) ont développé la matrice d'intervalles pour représenter l'imperfection du jugement. Un vecteur d'intervalles de poids en est extrait par une simulation de Monte Carlo. De nombreuses méthodes ont ensuite été développées pour extraire \mathbf{w} de la matrice d'intervalles mais restent complexes à mettre en œuvre en pratique (Wang et al. 2005).

Quelle que soit la méthode d'élicitation de \mathbf{w} , de nombreuses critiques portent sur la subjectivité de sa définition et sur son influence sur les résultats d'ordonnancement des alternatives (Forman 1993). La pratique consiste alors à réaliser des études de sensibilité des résultats aux variations de \mathbf{w} , en respectant la condition $\sum_{j=1}^N \omega_j = 1$ (Schärlig 1985; Yatsalo et al. 2016).

Pour aider à prendre en compte les dommages tangibles, l'élicitation vise à établir les préférences sur la réduction du risque selon les différents types de dommages. En comparaison avec l'ACB dans ce domaine, Gamper et al. (2006) s'appuient sur une méthode directe d'élicitation, ce qui est peut être critiqué (Mousseau 1992). Selon Mendoza et Martins (2006), les AMC ont été appliquées à de nombreux problèmes de gestion environnementale, comme celle de la forêt ou des risques. Cependant, les modes d'élicitation des préférences entre critères ne sont pas clairement identifiés. En pratique, l'élicitation reste difficile comme le montre le guide développé sur les AMC au Royaume-Uni (Communities and Local Government 2009) et elle n'est pas pratiquée en France dans le domaine de la gestion des risques naturels. Seules les unités d'évaluation des dommages intangibles sont identifiées sans préciser comment éliciter les préférences entre leur réduction (CGDD 2014).

L'élicitation des préférences du décideur entre les différents critères est difficile. Malgré ses limites, celle de Saaty (1980) reste intuitive et très utilisée en pratique. Une étude de sensibilité des résultats des AMC au choix de \mathbf{w} doit être réalisée.

II.1.3.5 AMC de préordre total pour un critère unique

Connaissant \mathbf{w} , l'AMC se décompose en méthodes d'agrégation totale, partielle ou interactives. Les dernières, peu appliquées (Schärlig 1985), ne seront donc pas détaillées.

Pour illustrer le principe général des premières, l'analyse multicritère hiérarchique (*Analytic Hierarchy Process* en anglais) (AHP) de Saaty (1980) et la technique pour un ordonnancement par similitude avec la solution idéale (*technique for order preference by similarity to ideal solution* en anglais) (TOPSIS) de Lai et al. (1994) sont détaillées, car utilisées dans de nombreux domaines d'application (Behzadian et al. 2012; Vaidya et Kumar 2006).

- Limites de la somme pondérée

Chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}$ est évaluée par x_{ij} pour chaque critère g_j sur l'échelle de score X_j dans la matrice \mathbf{S} (p. 60). La somme pondérée des scores $x_{ij} \in X_j$ établis pour les N critères g_j , est la méthode la plus simple pour obtenir un critère unique de synthèse pour chaque A_i . On note s_i l'évaluation finale de A_i selon un critère unique de synthèse g , donnée par l'équation (II.12). Dans ce cas, avec $A_i, A_m \in \mathcal{A}$, la situation d'incomparabilité $A_i R A_m$ n'existe pas et les relations de préférence P et d'indifférence I sont transitives ($s_i > s_m \rightarrow A_i P A_m$). Les poids ont à la fois un rôle de normalisation des évaluations x_{ij} et de représentation des préférences entre critères : la signification de \mathbf{w} n'est pas claire. La définition des scores alloués aux alternatives selon chaque critère puis normalisés présentent ce type de problème, comme montré par l'application de Tacnet (2009) aux sites sensibles d'avalanches. Malgré ces limites, cette méthode reste très utilisée (Teghem 2013).

$$s_i = \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot x_{ij} \quad (\text{II.12})$$

L'approche MAUT de Keeney et Raiffa (1976), l'AHP de Saaty (1980), ou la TOPSIS de Lai et al. (1994), entre autres, permettent d'aller au-delà de ces limites (Merad 2010).

- Méthode AHP (Saaty 1980)

Connaissant \mathbf{S} , l'AHP peut être divisée en quatre étapes selon la figure II.2 pour obtenir s_i pour chaque $A_i \in \mathcal{A}$. La cinquième étape consiste à comparer les alternatives A_i sur la base de tous les résultats s_i , $i = 1, \dots, M$.

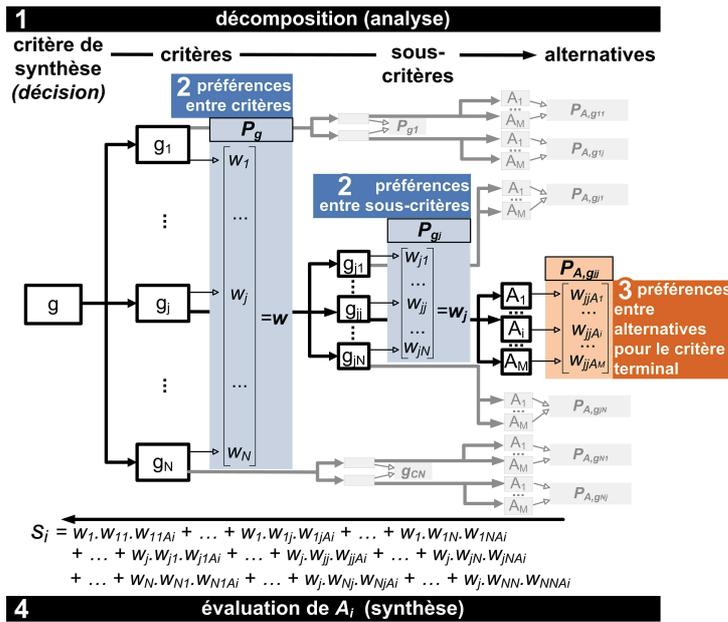


FIGURE II.2 – Étapes de la méthode originale AHP selon Saaty (1980).

◇ *AHP-1* : l'analyse du problème de décision s'appuie sur sa décomposition hiérarchique descendante en niveaux successifs de sous-critères, depuis le critère unique de synthèse jusqu'à l'évaluation des alternatives au plus bas niveau (critère terminal ou feuille).

◇ *AHP-2* : pour chaque niveau (critères et sous-critères), une matrice P_g est établie selon la méthode décrite dans la section II.1.3.4 précédente pour en extraire le vecteur w correspondant.

◇ *AHP-3* : les M alternatives $A_i \in \mathcal{A}$ sont évaluées au niveau du critère terminal. Pour chaque sous-critère g_{jj} , la méthode originale de Saaty (1980) propose une évaluation normalisée de chaque alternative A_i , notée ω_{jjA_i} avec $\sum_{i=1}^M \omega_{jjA_i} = 1$ (figure II.2). Cela correspond à l'établissement, pour des scores x_{ij} préalablement établis selon chaque g_j , des évaluations normalisées dans un vecteur $s_j \triangleq [s_{1j}, \dots, s_{ij}, \dots, s_{Mj}]^T$ de dimension M . Cela permet d'obtenir N vecteurs s_j . Il existe ainsi plusieurs techniques de normalisation.

- La méthode originale de Saaty (1980), appelée « critères-solution » (Tacnet 2009), utilise l'approche de l'étape 2 pour comparer les alternatives deux à deux. Pour une évaluation au niveau du critère terminal g_j (notation utilisé pour simplifier le propos), la matrice de préférences de dimensions $M \times M$ notée P_{A, g_j} est obtenue pour chaque niveau. Le vecteur s_j est son vecteur propre. Cette méthode n'est applicable que pour un nombre limité d'alternatives (Miller 1994).
- Pour prendre en compte un nombre de critères plus important, d'autres méthodes de type « critères-estimateur-solution » sont possibles (Tacnet 2009). Au niveau du critère terminal, les solutions sont remplacées par différentes classes dont on évalue le niveau de préférence de manière relative. Chaque alternative est analysée en terme d'appartenance binaire exclusive à chacune de ces classes.
- Pour chaque g_j , chaque score x_{ij} est normalisé par le maximum ou par la somme du vecteur $\mathbf{x}_j \triangleq [x_{1j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{Mj}]$ pour obtenir le score normalisé s_{ij} .
- Rapprochant la méthode AHP de la méthode MAUT (Keeney et Raiffa 1976), une fonction d'utilité u_j est établie pour calculer $s_{ij} = u_j(x_{ij})$.

◇ *AHP-4* : pour chaque $A_i \in \mathcal{A}$, le score de synthèse $s_i \in [0, 1]$ est calculé par une somme pondérée par l'équation (II.13). Comme pour la MAUT, d'autres formes d'agrégation peuvent être utilisées.

$$s_i = \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot s_{ij} \quad (\text{II.13})$$

◇ *AHP-5* : les M alternatives A_i sont classées dans l'ordre décroissant des valeurs de s_i . La meilleure solution A_{i^*} est définie par $i^* = \arg \max_i s_i$.

L'AHP est intuitive (Schärlig 1985). Par l'établissement des N matrices $\mathbf{P}_{\mathbf{A}, \mathbf{g}_j}$ à partir de la matrice de scores \mathbf{S} , des évaluations qualitatives ou quantitatives peuvent être prises en compte (Schärlig 1985). L'arbre hiérarchique de formalisation du problème de décision est utilisé dans le domaine de la gestion environnementale, incluant celle des risques naturels, comme le montre le guide d'application des AMC au Royaume-Uni (Communities and Local Government 2009). Dans l'esprit de l'ACB et le proposent Triantaphyllou et Baig (2005), les deux critères de base qui sont pris en compte pour comparer différentes solutions de gestion sont le coût et les bénéfices, déclinés en différents sous-critères.

• Méthode TOPSIS (Lai et al. 1994)

Cette méthode définit la meilleure solution A_{i^*} comme étant celle à la fois la plus proche d'une solution idéale A^{best} et la plus éloignée d'une solution la pire A^{worst} . Les solutions A^{best} et A^{worst} sont des références fictives. Connaissant \mathbf{w} et la matrice de scores $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$, TOPSIS se divise en cinq étapes (Annexe E.3).

Cette méthode repose sur le calcul de la distance euclidienne de dimension N de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ avec A^{best} et A^{worst} , respectivement notées $d_i^{\text{best}} \in [0, 1]$ et $d_i^{\text{worst}} \in [0, 1]$. L'équation (II.14) permet alors de calculer la proximité relative de chaque A_i avec la solution idéale A^{best} , notée $C(A_i, A^{\text{best}}) \in [0, 1]$. Finalement, les M alternatives A_i sont classées dans l'ordre décroissant des valeurs de $C(A_i, A^{\text{best}})$.

$$C(A_i, A^{\text{best}}) \triangleq \frac{d_i^{\text{worst}}}{d_i^{\text{best}} + d_i^{\text{worst}}} \quad (\text{II.14})$$

TOPSIS est principalement appliquée dans les domaines industriels. Malgré sa simplicité, son application dans les problèmes de gestion environnementale est récente et reste très limitée, sans relation directe avec des problèmes de gestion des risques naturels (Vaidya et Kumar 2006).

• Applications et limites théoriques des méthodes d'agrégation totale

Contrairement à l'AHP, TOPSIS fait l'hypothèse que le vecteur \mathbf{w} est connu par le décideur, ce qui est critiqué (Mousseau 1995). Cependant, n'importe quelle méthode d'élicitation de \mathbf{w} peut être appliquée au préalable, celle de Saaty (1980) étant la plus utilisée (Vaidya et Kumar 2006).

Ces méthodes utilisent une étape de normalisation qui est un des facteurs de phénomènes de *renversement de rang* : si un ordonnancement est établi pour un nombre M d'alternatives, l'ajout ou enlèvement d'une alternative peut le modifier (Barzilai et Golany 1994 ; Pavlicic 2001).

La normalisation formalise la structure de préférences entre les alternatives selon chaque critère g_j comme un préordre total. L'hypothèse liée de la transitivité de l'indifférence I (Vincke 1985) est critiquée pour représenter le comportement du décideur (Luce 1956).

Les méthodes d'agrégation totale sont faciles à appliquer. L'AHP est la plus utilisée pour les problèmes de décision environnementaux : l'arbre hiérarchique aide à formuler le problème. Cependant, l'élicitation des préférences entre critères reste peu explicite. Soumises au problème de renversement de rang, les critiques de la théorie de la décision rationnelle sur l'utilisation de structures de préférences individuelles de préordre total et de leur agrégation leur sont également formulées.

II.1.3.6 AMC de pseudo-ordre par surclassement

Les méthodes de surclassement ont été introduites pour tenir compte de la non transitivité de I dans la structure de préférences du décideur. Pour cela, elles reposent sur la relation de surclassement comme modélisation des préférences du décideur (Annexe E.1). Les méthodes de la série Electre, comme Electre Tri (ET), en sont un exemple.

- De nombreuses méthodes de surclassement : Electre, Prométhée, etc.

Le développement des méthodes élimination et choix traduisant la réalité (Electre) a été initié par Roy (1968). Celui de Qualiflex (Paelinck 1976, 1978) et d'Oreste (Roubens 1979, 1980) ont suivi avant que Brans et al. (1984) n'introduisent Prométhée I et II. Les méthodes Electre aident à répondre aux problématiques de décision (Merad 2010) : Electre I est spécifique au choix, P_α (Roy 1968) ; Electre Tri au tri, P_β (Schärlich 1996) ; les autres répondent au classement, P_γ , depuis Electre II (Roy et Bertier 1971), III (Roy 1977) et IV (Roy et Hugonnard 1981), à Prométhée I et II.

Ces méthodes se distinguent les unes des autres par la complexité de la structure de préférences établie. Le principe de la relation de surclassement S utilisée dans Electre III est la plus compliquée de la série. Elle a été initialement introduite par Roy (1974) pour relaxer l'hypothèse d'un préordre total de la structure de préférence traditionnelle et . Elle permet à la fois l'incomparabilité entre deux éléments a et b de \mathcal{A} à comparer mais aussi la non transitivité de l'indifférence I . Pour cela, trois seuils d'indifférence q_j , de préférence p_j et de veto v_j sont définis comme constants pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, en respectant $v_j \geq p_j \geq q_j$ (Annexe E.1).

- Exemple de la méthode Electre Tri (ET)

La figure I.24 (p. 34) met en évidence que la pratique s'appuie sur des évaluations qualitatives de l'efficacité, ce qui est assimilable à une problématique P_β . La méthode Electre Tri, la seule à traiter spécifiquement P_β , est basée sur la même structure de préférence que Electre III.

Pour réaliser le tri, le principe consiste à comparer les évaluations x_{ij} de chaque alternative A_i selon chaque critère g_j , non pas aux évaluations d'autres alternatives de \mathcal{A} mais à des valeurs définissant les bornes de classes (ou catégories) prédéfinies.

Étant donné la matrice de score \mathbf{S} et le vecteur \mathbf{w} , la méthode Electre Tri (ET) aide à affecter chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$, dans une classe prédéfinie C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$, dont les profils des limites hautes et basses sont notés b_{h-1} et b_h (Yu 1992). L'évaluation de chaque profil b_h selon chaque critère g_j est notée $x_{hj} \in X_j$, $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$, $j = 1, \dots, N$, et est représentée par un point blanc sur la figure II.3. Par convention, on note $b_0 \leq b_1 \leq \dots \leq b_{N_h}$ avec b_0 la limite la plus basse et b_{N_h} la plus haute. Chaque profil b_h est défini par l'ensemble de valeurs $\{x_{h1}, \dots, x_{hj}, \dots, x_{hN}\}$ représenté par les lignes verticales noires sur la figure II.3 (Dezert et Tacnet 2012b). L'évaluation $x_{ij} \in X_j$ de chaque A_i selon chaque g_j est représentée par un point gris, fournissant son profil d'évaluation.

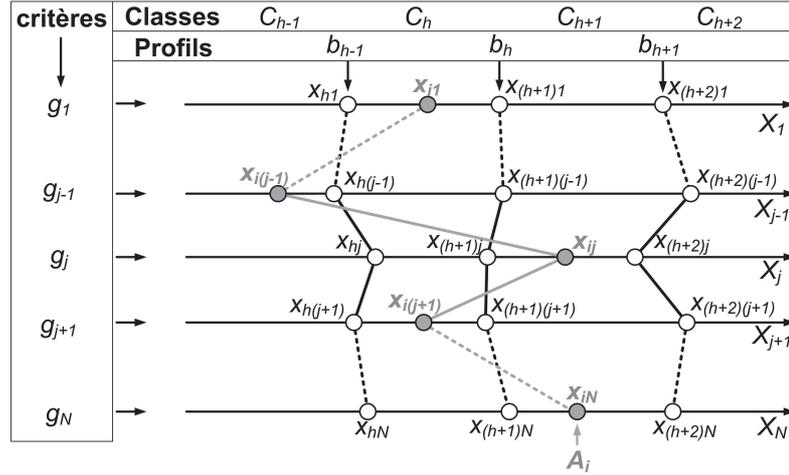


FIGURE II.3 – Principe de la méthode Electre Tri pour affecter chaque alternative A_i à une classe C_h (Dezert et Tacnet 2012b).

La méthode ET établit une relation de surclassement pour établir les préférences de chaque alternative sur les valeurs de seuils (A_i, b_h) , et celles des seuils sur les valeurs des alternatives (b_h, A_i) . Pour chaque profil b_h et chaque critère g_j , le seuil d'indifférence est noté $q_j(b_h)$, celui de préférence $p_j(b_h)$ et celui de veto $v_j(b_h)$. Pour chaque couple (A_i, b_h) (resp. (b_h, A_i)), des indices de concordance et de discordance avec l'hypothèse « A_i est au moins préférée à b_h » (resp. « b_h est au moins préférée à A_i ») sont notés :

- $c_j(A_i, b_h)$ (resp. $c_j(b_h, A_i)$) pour la concordance partielle selon le critère g_j ;
- $d_j(A_i, b_h)$ (resp. $d_j(b_h, A_i)$) pour la discordance partielle selon le critère g_j ;
- $c(A_i, b_h)$ (resp. $c(b_h, A_i)$) pour la concordance globale.

Dezert et Tacnet (2012b) décrivent la méthode ET en reprenant Yu (1992) selon quatre étapes pour une affectation finale de chaque A_i à une classe C_h ($A_i \rightarrow C_h$) (Annexe E.4).

La dernière étape de classement nécessite de choisir entre une attitude optimiste et une attitude pessimiste. Cette phase de classement est assurément la plus arbitraire. Elle a motivé la proposition de méthodes alternatives telles que Soft Electre Tri (SET) (Dezert et Tacnet 2012b).

- **Synthèse : une meilleure représentation du comportement du décideur mais une complexité accrue**

En adoptant la relation de surclassement, les méthodes d'agrégation partielle permettent une meilleure représentation du comportement du décideur que la théorie de la décision rationnelle (Vincke 1985). Plusieurs méthodes sont adaptées pour traiter un type de problématique $(P_\alpha, P_\beta, P_\gamma)$ (Merad 2010). Electre Tri (ET) est la seule méthode adaptée aux problèmes de tri dans des classes qualitatives pré-définies. Pour cela, la définition des seuils des catégories doit être explicitée.

L'élicitation des préférences du décideur s'appuie sur la définition des seuils de préférence, d'indifférence et de veto pour chaque critère g_j et chaque couple d'éléments à comparer : (A_i, b_h) pour le tri d'ET ; (A_i, A_m) , $i, m = 1, \dots, M$ pour les autres méthodes permettant le choix et le classement. Leur établissement peut s'avérer difficile mais, basé sur une co-construction avec le décideur (Tsoukiàs 2006), il est à comparer avec celui des fonctions d'utilité ou de monétarisa-

tion qui s'avèrent également complexes. Seules les méthodes basées sur la normalisation (AHP, TOPSIS) sont plus simples à ce niveau.

Selon la complexité du problème, les résultats de surclassement peuvent être difficilement interprétables et la décision finale difficile à prendre sur cette base (Schärlig 1985). ET en est un exemple avec les difficultés inhérentes au choix de l'attitude à adopter pour affecter chaque alternative à une classe (Dezert et Tacnet 2012b).

Même s'il n'y a pas d'étape de normalisation dans ces méthodes, elles sont soumises aux problèmes de renversement de rang (Wang et Triantaphyllou 2008).

Ces méthodes ont été appliquées aux problèmes de gestion environnementale (Mendoza et Martins 2006), dont la gestion des risques miniers (Merad 2010). Leur mise en œuvre n'est cependant pas favorisée par rapport aux méthodes d'agrégation totale comme l'AHP. Par exemple, Vuillet (2012) a comparé la méthode ET avec les systèmes à base de règles (p. 61) pour évaluer la performance d'une digue de protection contre les inondations. Les difficultés pratiques d'identification des différents paramètres et seuils ont été mises en évidence.

Les méthodes d'agrégation partielle permettent d'améliorer l'aide à la décision par rapport aux quatre premières critiques formulées pour la théorie de la décision rationnelle (synthèse en p. 58) :

- 1) approches constructives ;
- 2) prise en compte de plusieurs critères ;
- 3) et 4) une meilleure représentation du comportement du décideur.

Plusieurs méthodes sont adaptées aux différentes problématiques de décision. Cependant, ces méthodes sont plus complexes à appliquer que les précédentes du fait de l'élicitation de la structure de préférence, des modalités de calculs et de l'interprétation des résultats. Elles sont également soumises au problème de renversement de rang.

II.1.4 Vers un processus d'aide multicritère à la décision

Cette synthèse discute les apports potentiels et limites des sciences de la décision pour répondre aux problèmes identifiés en section I.4.1 (p. 45).

II.1.4.1 Processus d'aide à la décision pour formaliser les problèmes sous-jacents

Les problèmes de décision relatifs à l'efficacité des mesures de protection torrentielles ne sont pas explicites (p. 45). Seule une approche constructive peut alors permettre d'aider à décider dans ce contexte Tsoukiàs (2006). Elle repose sur les quatre étapes du processus de décision : 1) description du contexte, 2) formulation du problème, 3) modélisation et 4) validation.

1. Les fonctions et objectifs initiaux des mesures de protection doivent être identifiés. Or ceux-ci ont été définis dans un contexte de décision qui a évolué. Pour mieux identifier les objectifs, et en se basant sur l'approche « 5WH », une analyse historique (« when ? ») et géographique (« where ? ») peut permettre de préciser cette évolution selon celle de la réalisation des mesures de protection (« what ? ») pour protéger des enjeux contre les phénomènes torrentiels (« why ? »), des contraintes réglementaires, des connaissances et techniques disponibles (« how ? ») et de la structure de décision (« who ? »).

2. La spécification du concept d'efficacité avec ceux utilisés en pratique dépend de leur formalisme qui est à rechercher dans d'autres disciplines comme la sûreté de fonctionnement (SdF), qui analyse la fiabilité. De même, la décomposition en sous-problèmes de décision repose sur celle en différentes échelles que peut permettre une modélisation systémique.
3. Le problème de modélisation en tenant compte de l'imperfection de l'information est relatif au choix d'un modèle d'aide à la décision (AD) adapté. Il sera discuté ensuite.
4. Pour la validation, les études de sensibilité des résultats aux évolutions des paramètres du modèle d'AD sont proposées (Schärlig 1985 ; Yatsalo et al. 2016). Cependant, des éléments de référence, issus des pratiques de l'ingénierie et des retours d'expérience, doivent être fournis pour permettre d'encadrer cette phase qui reste difficile.

II.1.4.2 Systèmes à base de règles pour agréger les indicateurs

Des modèles permettant de combiner plusieurs indicateurs doivent être choisis pour aider à agréger les différents indicateurs (p. 45). Les systèmes à base de règles d'évaluation de la performance des ouvrages de protection contre les inondations ont été établis après mise en œuvre des méthodes de la sûreté de fonctionnement (SdF) (Peyras et al. 2010). L'appui de la SdF et le développement de ces systèmes à base de règles aux ouvrages de protection torrentielle doit donc être envisagé. Les indicateurs déjà existant devront être considérés (Annexe C).

La construction de tels modèles est chronophage. Seul le développement sur un mode de défaillance donné, pour un type d'ouvrage donné, a été retenu et étudié dans le cadre de cette thèse. Cela permettra de vérifier l'applicabilité de cette approche à ce contexte.

Une fois la performance de l'ouvrage selon chaque mode de défaillance évaluée, son évaluation globale reste posée (Vuillet 2012). En considérant la performance selon un mode de défaillance comme un critère, l'agrégation tenant compte des préférences entre critères est candidate. Par exemple, la méthode ET peut aider à trier les ouvrages selon des catégories de performance globale qualitatives.

II.1.4.3 AMC pour agréger selon les préférences entre plusieurs critères

L'analyse de l'efficacité étant multicritère, la théorie de la décision rationnelle et l'analyse coûts bénéfiques (ACB), monocritère, sont limitées. Des modèles permettant de combiner différents critères doivent être expérimentés (p. 45).

En pratique, les alternatives et les critères, qui peuvent être qualitatifs, sont définis explicitement. Le problème de décision qu'est l'évaluation de l'efficacité est multi-objectif, multi-échelle et multi-composante. L'absence de concepts clairs ne permet pas, à l'heure actuelle, une formulation claire de ce problème en pratique. Dans ce cadre, l'optimisation multicritère n'est pas adaptée.

Les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) sont candidates. Malgré ses limites, l'élicitation des préférences entre critères par la méthode de Saaty (1980) est retenue car la plus utilisée en pratique. Les méthodes d'agrégation totale sont intéressantes par leur simplicité et leur capacité à répondre aux différentes problématiques de décision, dont le choix et le classement. Cependant les limites théoriques de l'agrégation totale doivent être considérées et des solutions aux problèmes de renversement de rang envisagées.

Les méthodes de surclassement sont limitées en pratique par la définition des seuils pour aider à décider. Cependant, Electre Tri (ET) est intéressante. Elle est spécifique aux problèmes de tri, qui correspondent aux problèmes pratiques d'évaluation de l'efficacité selon des catégories qualitatives. L'amélioration de la méthode ET sur les problèmes de choix des seuils et d'une attitude du décideur pourrait augmenter son intérêt pratique.

II.1.4.4 Méthodes limitées pour décider avec différentes formes d'imperfection

Des modèles permettant d'aider à décider en considérant les différentes formes d'imperfection de l'information et sous incertitude épistémique doivent être considérés (p. 45). Selon le formalisme des problèmes de décision multicritères (matrice \mathbf{S} , p. 51) et dans l'incertain (matrice \mathbf{C} , p. 50), les différentes formes d'imperfection, en contexte torrentiel, affectent :

- l'évaluation $y_{il} \in Y_l$ de chaque indicateur I_l pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$;
- l'évaluation x_{ij} de chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$;
- le vecteur de poids des critères $\mathbf{w} = \{\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_N\}$;
- la structure de préférence permettant de comparer les M évaluations x_{ij} pour un même g_j ;
- la connaissance sur les états de la nature S_k , $k = 1, \dots, K$;
- l'évaluation des conséquences C_{ik} de chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque S_k , $k = 1, \dots, K$.

• Imperfection sur le vecteur \mathbf{w} traitée par une analyse de sensibilité

Les méthodes permettant de prendre en compte les imperfections du vecteur \mathbf{w} ont été définies dans la section II.1.3.4 (p. 63). Devant les difficultés pour les mettre en œuvre, l'étude de sensibilité est préférée mais ne sera pas développée dans le cadre de cette thèse.

• Imperfection sur la structure de préférence traitée par le surclassement

La structure de préordre total représente une connaissance parfaite des préférences du décideur. La relation de surclassement introduit une représentation de l'imperfection de la connaissance sur ces préférences par les seuils d'indifférence, de préférence et de veto (Schärlig 1985). Son amélioration peut consister à clarifier sa représentation des préférences et à améliorer son applicabilité.

• Aide à la décision dans l'incertain selon la théorie rationnelle : pratique mais limitée

Les états de la nature sont définis selon des informations qui prennent toutes les formes d'imperfection (section I.3.3.3, p. 44). La théorie de la décision rationnelle, utilisée en pratique (ACB, conception optimisée), représente l'état de cette connaissance par des probabilités subjectives. D'une part, elles ne permettent pas de représenter toutes les formes d'imperfection sur la connaissance de \mathcal{S} . D'autre part, cette méthode d'AD en univers incertain ne représente pas le comportement réel du décideur.

Les autres méthodes d'AD présentées dans cette section ne permettant pas de traiter ce type de problème, les méthodes d'AD basées sur d'autres formalisme de représentation de l'imperfection de l'information doivent être explorés pour aider à décider sous incertitude épistémique.

• Propagation dans le cadre probabiliste : limitée pour le contexte d'application traité

Les évaluations de chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}$ selon chaque indicateur $y_{il} \in Y_l$, $l = 1, \dots, L$, chaque critère $x_{ij} \in X_j$, $j = 1, \dots, N$ et chaque scénario C_{ik} , $k = 1, \dots, K$ sont établies à partir d'une ou plusieurs sources d'informations avec différentes formes d'imperfection (section I.3.3). Elles sont classiquement propagées en représentant l'incertitude sur chacune de ces évaluations par une distribution de probabilité continue.

En présence de données suffisantes, elle est objective. Sinon, elle est subjective. Sa définition repose sur un processus d'élicitation de la connaissance experte. De nombreuses méthodes existent pour aider cette phase en se basant sur l'identification d'une forme parmi plusieurs lois candidates (uniforme, normale, log-normale, etc.), de la tendance centrale et de la dispersion (Vuillet 2012).

Sur cette base, un échantillonnage préalable est réalisé (aléatoire, en hypercube latin, etc.). Puis, la méthode de Monte-Carlo est la méthode la plus utilisée pour propager toute l'incertitude. Elle est basée sur un échantillonnage aléatoire. Elle a été utilisée pour propager l'incertitude sur l'évaluation des indicateurs servant à établir la performance des ouvrages hydrauliques par les systèmes à base de règles (Vuillet 2012). Cette approche peut être utilisée dans tous les modèles multicritères. Cependant, elle ne se justifie que dans les cas où la complexité est liée principalement à la prise en compte de différents critères et non à la connaissance aléatoire de leurs évaluations (Stewart 2005).

Or, c'est bien cette connaissance aléatoire qui n'est pas disponible dans notre contexte d'application (p. 44). On sait que le choix des probabilités subjectives ne permet pas de propager toutes les formes d'imperfection dans les modèles d'AD. D'autres formalismes plus adaptés au contexte d'application doivent être explorés.

Synthèse de la section II.1

Dans le cadre du processus d'aide à la décision (AD), une approche historique et géographique peut aider à spécifier l'évolution du contexte de décision. L'apport de la sûreté de fonctionnement à la formulation de chaque sous-problème de décision sera discuté dans la section II.2.

La modélisation de l'agrégation des indicateurs et des critères par les systèmes à base de règles et/ou les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) sera privilégiée. Les AMC par agrégation totale seront favorisées pour choisir et classer, mais le problème de renversement de rang doit être traité. La méthode ET peut être utilisée pour les problèmes de tri, mais le choix des paramètres et seuils doit être facilité.

D'autres formalismes théoriques que les probabilités seront explorés dans la section II.3 pour prendre en compte les différentes formes d'imperfection de l'information. Leur prise en compte dans les méthodes d'AMC choisies précédemment et pour améliorer l'AD en univers incertain y sera également étudiée.

Le principe de la validation selon des études de sensibilité reste limité. L'établissement de références de comparaison sera proposé pour les compléter.

II.2 Modélisation systémique : du domaine industriel aux ouvrages de protection

Un système est un « ensemble d'éléments organisés pour remplir une mission déterminée dans un environnement défini » (Lair 2000). Chacun de ces éléments est un composant (Birnbaum 1968). La SdF étudie un système et les fonctions qu'il assure pour identifier ses défaillances potentielles, leurs conséquences et proposer des moyens de diminuer le risque associé (Pagetti 2012). Issue du monde industriel, la modélisation systémique a été appliquée aux systèmes physiques que sont les ouvrages hydrauliques de protection contre les inondations (Peyras et al. 2006 ; Serre 2005).

Pour un système donné, la SdF repose successivement sur l'analyse fonctionnelle (AF) décrite en section II.2.1, l'analyse qualitative des défaillances et celle quantitative de sa fiabilité, sa maintenabilité, sa disponibilité et de la sécurité associée (Villemeur 1988), présentées en section II.2.2. Pour chacune de ces étapes, les méthodes sont rappelées et la plus pertinente est détaillée.

II.2.1 Analyse fonctionnelle du système

Chaque ouvrage de protection est un système. Les méthodes de l'AF s'appuient sur deux étapes successives. Le système est d'abord décrit dans son environnement grâce à l'analyse fonctionnelle du besoin (ou externe) (AFE). Il est ensuite décomposé par l'analyse fonctionnelle technique (ou interne) (AFI) pour établir les fonctions techniques des différents composants.

II.2.1.1 Méthodes d'analyse fonctionnelle (AF)

Les fonctions d'un système correspondent aux actions qu'il accomplit, exprimées qualitativement en terme de finalité (AFNOR 1996). L'AF les décrit ainsi que leurs relations qui sont systématiquement caractérisées, classées et évaluées, selon deux étapes successives (AFNOR 2011) :

- l'AFE « décrit le besoin auquel devra répondre le produit sous forme de fonctions de service et contraintes » ;
- l'AFI « contribue à étudier et formaliser l'architecture du produit en identifiant les fonctions techniques des [...] composants ».

Les méthodes d'AF ont d'abord été développées pour des applications industrielles. Parmi elles, l'APTE (Application aux Techniques d'Entreprise) (de la Bretesche 2000) et la méthode RELIASEP de Pitton (1996) traitent les deux étapes de l'AF. La méthode d'analyse des fonctions d'un système (*Function Analysis System Technique* en anglais) (FAST) (Zwingelstein 1996) et la méthode structurée d'analyse et de conception (*Structured Analysis Design Technique* en anglais) (SADT) (Ross 1977 ; Ross et Schoman 1977) sont spécifiques à l'AFI.

Les ouvrages de protection contre les risques naturels sont des systèmes complexes au sens de Simon (1991), car constitués de nombreux composants, en interaction non linéaire avec les éléments du milieu extérieur (EME) au système et parcourus par des flux internes (Serre 2005). Pour réaliser l'AFE, APTE permet de représenter des EME contrairement à RELIASEP, ce qui est un avantage dans ce contexte (Ghariani et al. 2014). Pour des systèmes mécaniques comme les ouvrages de génie civil, Peyras (2003) a montré que APTE était adaptée. Elle a été appliquée avec succès à ceux de protection contre les inondations (Peyras et al. 2010 ; Serre 2005). La méthode APTE est retenue.

Félix et al. (2011) ont proposé une méthodologie d'AF intégrant plusieurs échelles de systèmes, appelées « granularités », sans s'appuyer sur une méthode spécifique. L'endiguement (granularité 1) est décomposé en sous-systèmes qui sont des tronçons homogènes de digues (granularité 2), eux-mêmes détaillés en composants (granularité 3).

II.2.1.2 Analyse fonctionnelle externe (AFE) selon APTE

Après avoir délimité physiquement le système (étape 1), comme un barrage de rétention sur la figure II.4, un diagramme « bête à cornes » aide à spécifier le besoin associé au système et à contrôler sa validité (étape 2). Une fois la position dans le cycle de vie (conception, réalisation, exploitation) définie (étape 3) et les EME déterminés (étape 4), le bloc diagramme fonctionnel (BdF) est établi (étape 5) selon la figure II.4.

Le BdF représente les interactions entre le système et les EME. Les relations de flux (deux EME en passant par le système) représentent les fonctions principales (FP) pour lesquelles le système a été conçu. Les relations de contact direct (système-EME) identifient les fonctions contraintes (FC) résultant de la réaction du système face aux contraintes imposées par les EME. Les fonctions de service que sont les FP et FC sont regroupées dans un tableau où elles respectent les formes verbales données sur la figure II.4.

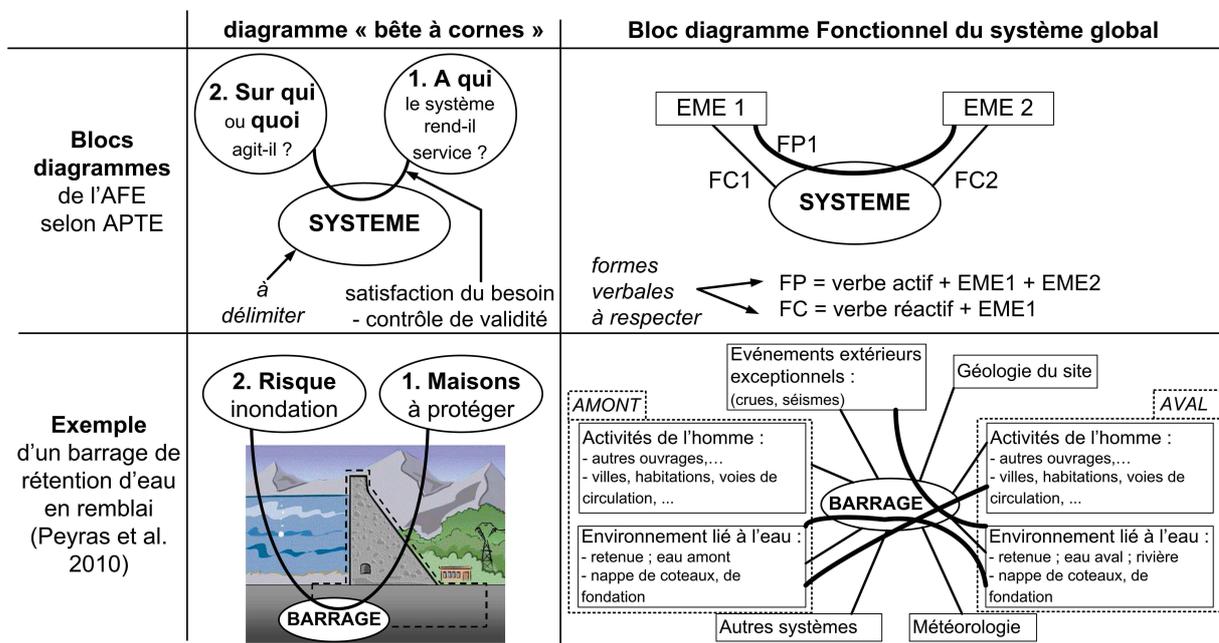


FIGURE II.4 – AFE appliquée aux barrages de rétention d'eau en remblai (Peyras et al. 2010).

II.2.1.3 Analyse fonctionnelle interne (AFI) selon APTE

Après avoir défini la granularité spatiale de l'analyse (étape 1), l'analyse structurelle liste tous les composants du système (ou du sous-système) et repère leur position physique (étape 2). Les types d'interaction entre composants, entre composants et EME, sont définis : contacts mécaniques ; transferts de flux (étape 3). Pour chaque type, un BdF représente les composants du système, les EME et les interactions entre eux, comme dans l'exemple de la figure II.5 (étape 4). Pour chaque composant, un tableau d'AF regroupe les fonctions de conception (ou techniques) (FT) extraites du BdF, comme l'exemple du tableau II.2. Le lien avec le type de flux, les FP et les FC qu'elles permettent d'accomplir peut y être détaillé.

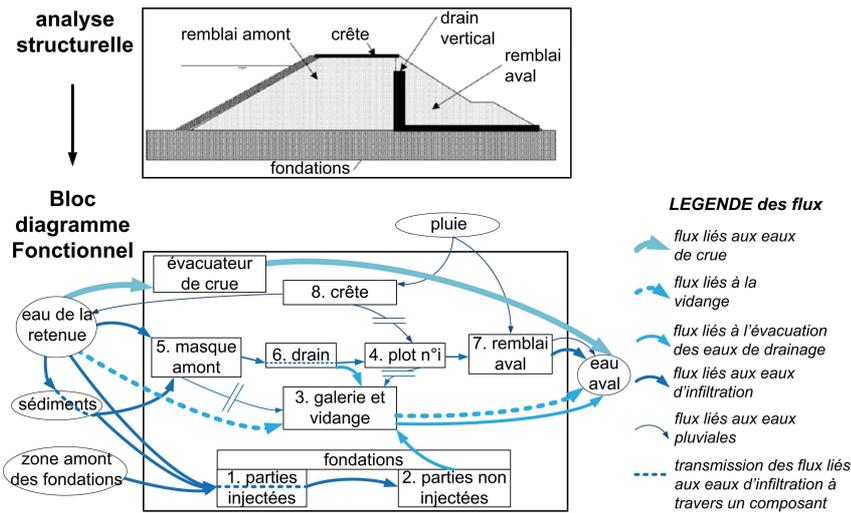


FIGURE II.5 – AFI : analyse structurale et BdF appliqués aux barrages de rétention d'eau en remblai à étanchéité interne (Peyras et al. 2010).

1. contacts mécaniques	FT1.1	résister à la poussée hydrostatique transmise par le remblai amont
	FT1.2	résister aux sous-pressions des fondations amont etc.
2. flux hydrauliques	FT2.1	limiter les infiltrations provenant du remblai amont
	FT2.2	limiter les infiltrations provenant de la fondation amont etc.

TABLEAU II.2 – Tableau d'AF appliqué au noyau parties non injectées, composant d'un ouvrage de rétention d'eau en remblai à étanchéité interne (Peyras et al. 2010).

La méthode APTE qui permet de réaliser l'AFE puis l'AFI dans un cadre méthodologique homogène a été appliquée avec succès aux ouvrages de protection contre les inondations (barrages, digues). Son application aux ouvrages de consolidation a été engagée par Ghariani et al. (2014) mais en est restée au stade préliminaire d'analyse et de faisabilité.

II.2.2 De l'analyse des défaillances à la sûreté de fonctionnement

Après avoir établi les fonctions principales, contraintes et techniques à réaliser par le système et ses composants, les méthodes de la SdF s'appuient sur 1) l'AMDE, 2) la modélisation des scénarios de défaillance puis 3) une évaluation des critères de la SdF.

II.2.2.1 Analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE)

Les méthodes d'analyse des dysfonctionnements sont nombreuses avec, par exemple, l'analyse préliminaire des dangers, l'analyse du risque et de l'exploitabilité (*hazard and operability analysis* en anglais) (HAZOP), l'analyse des risques et maîtrise des risques au point critique (*hazard analysis critical control point* en anglais) (HACCP) ou l'identification des dangers et analyse de risque (*hazard identification and risk analysis* en anglais) (HIRA) (Magne et Vasseur 2006). L'AMDE, normalisée, a été choisie pour analyser les ouvrages hydrauliques (AFNOR 2006). Elle est réalisée

pour chaque granularité : l'effet de la défaillance d'un composant est la cause d'une défaillance du système (Ghariani et al. 2014). L'AMDE se divise en deux étapes (Peyras et al. 2010).

1. L'AMDE Processus établit les modes de défaillances dont les causes sont liées aux processus de conception et/ou de réalisation du système. Pour chaque composant, l'AMDE Processus établit les différentes opérations des processus (étape 1) et, pour chacune, les modes de défaillance correspondant (étape 2). Enfin, les effets de chaque mode sont identifiés (étape 3). Ces trois éléments sont regroupés dans un tableau, comme le tableau II.3 qui est un exemple simplifié pour le voile d'étanchéité (composant) d'un barrage en remblai (système).

Conception	- études géologiques - étude géotechnique	- reconnaissances insuffisantes - étude géotechnique limitée	- étanchéité insuffisante - contournement au large
Réalisation	- réalisation des forages - réalisation des injections	- densité insuffisante - profondeur insuffisante - qualité du coulis inadaptée - pression insuffisante	- contournement en profondeur - dissolution du voile - fissuration du voile

TABLEAU II.3 – AMDE Processus appliquée au voile d'étanchéité d'un barrage en remblai (Peyras 2003).

2. L'AMDE Produit analyse les causes et les effets des défaillances du système en service. Pour chaque composant, un tableau, comme le tableau II.4, rassemble les fonctions techniques (FT) qu'il doit assurer, les modes de défaillance (comme la rupture) et de dégradation associés, les causes recherchées à partir des BdF établis pour chaque type d'interaction et l'AMDE Processus, et les effets possibles de chaque défaillance. Les symptômes (ou indicateurs) de la dégradation peuvent être identifiés pour chaque cause de défaillance (Ghariani et al. 2014).

Assurer la transition entre la recharge aval et le noyau - Filtrer les fines provenant du noyau	filtration insuffisante	- AMDE Processus - filtration insuffisante - érosion ou suffusion du noyau	- augmentation des percolations dans le noyau - augmentation de la perméabilité du noyau - écoulements dans la recharge aval
	colmatage du filtre - drainage défaillant	- AMDE Processus - filtration trop importante - érosion ou suffusion du noyau	- augmentation des sous-pressions dans le noyau

TABLEAU II.4 – AMDE Produit appliquée au drain aval d'un barrage (Peyras et al. 2010).

II.2.2.2 Modélisation des scénarios de défaillance

Une fois les modes de défaillance établis à chaque granularité, les scénarios de défaillance sont modélisés pour identifier leur enchaînement conduisant à une défaillance globale du système et permettant ainsi le changement d'échelle des composants au système. Pour cela, des méthodes de représentation par arbres sont utilisées (Zwingelstein 1996).

- La méthode de l'arbre des causes (ou de l'arbre de défaillance) décrit, par un arbre vertical, la succession des causes qui conduit à une défaillance, au départ de l'analyse.

- La méthode de l'arbre d'événement (ou de l'arbre des conséquences) décrit, par un arbre horizontal, la succession d'événements qui conduit à une défaillance depuis un événement initiateur, au départ de l'analyse.
- La méthode du nœud papillon utilise ces deux arbres en définissant la défaillance comme l'événement redouté central (ERC), au centre de la représentation graphique horizontale. L'arbre des causes aide à identifier les événements initiateurs de l'ERC tandis que l'arbre des conséquences permet d'identifier les conséquences de cet ERC.

Ces méthodes permettent de décrire avec exhaustivité les scénarios de défaillances du système, qu'on peut noter S_k . Les conséquences associées peuvent être évaluées quantitativement ou qualitativement. Simples à mettre en œuvre, elles sont intuitives (Peyras et al. 2010). Cependant, cette définition exhaustive est chronophage et repose en partie sur la formalisation de l'expertise.

II.2.2.3 Évaluation des composantes de la sûreté de fonctionnement

Une fois les scénarios de défaillance identifiés, la probabilité de défaillance est évaluée pour l'ERC. Établie à partir des probabilités des événements initiateurs, elle permet d'identifier la probabilité de chaque conséquence. Comme le détaille Mortureux (2001), la sûreté de fonctionnement (SdF) est alors évaluée par des critères issus de données statistiques (Annexe D) :

- la *fiabilité* est la probabilité de non défaillance pendant un intervalle de temps de fonctionnement, noté Δt (AFNOR 2003a) ;
- l' *importance* des composants est la part qu'ils jouent dans la fiabilité du système qu'ils composent (Birnbaum 1968) ;
- la *maintenabilité* est la probabilité que le système soit réparé pendant Δt (Mortureux 2001) ;
- la *sécurité* est l'aptitude du système à ne pas produire de conséquences critiques pour lui-même et son environnement pendant Δt (Magne et Vasseur 2006).

Comme complété par Bossé, cette approche de la SdF diffère quelque peu de la version anglo-saxonne (« dependability »). L'arrivée des opérations centrées réseaux et l'internet de objets exigerait une revisite de la science des défaillances et des pannes provoquées ou non.

L'AMDE permet une analyse qualitative des modes de défaillance d'un ouvrage. Celle des scénarios de défaillance aide à identifier les indicateurs à prendre en compte pour évaluer la performance de l'ouvrage selon chaque mode de défaillance.
L'analyse quantitative des critères de la SdF (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité) s'appuie sur des données statistiques, rarement disponibles pour le contexte d'application traité.

II.2.3 Vers une modélisation systémique multi-échelle

Les méthodes de la SdF ont été analysées pour vérifier leur appui au développement de l'explicitation du concept d'efficacité, de décomposition en sous-problèmes de décision et d'identification des indicateurs et critères à prendre en compte avant leur combinaison.

II.2.3.1 Critères de la SdF pour aider à expliciter le concept d'efficacité

Certains critères de la SdF, comme la fiabilité et la sécurité, font référence à des concepts associés à l'évaluation de l'efficacité des ouvrages (Margreth et Romang 2010 ; Tourment et al. 2014). Le développement des méthodes de la SdF aux ouvrages de protection contre les inondations permet d'évaluer leur performance, autre concept relatif à l'efficacité (Curt 2008 ; Vuillet 2012).

II.2.3.2 AF pour décomposer en sous-problèmes

L'AF a été appliquée aux ouvrages de protection contre les inondations (Peyras et al. 2010). Un test préliminairement a été réalisé par Ghariani et al. (2014) aux mesures de protection torrentielle. L'AF reste cependant à transposer à ce contexte. La prise en compte des différentes granularités est possible (Félix et al. 2011) mais est limitée aux digues, où le concept d'importance des ouvrages, utilisé en pratique (DTRTM 2007), n'est pas intégré. Le changement d'échelle pour un phénomène à propagation gravitaire rapide reste à proposer.

La modélisation systémique définit chaque système selon ses composants. Sur ce principe, chaque échelle de mesure de protection peut être considérée comme un système (ouvrage, dispositifs, bassin d'enjeu) constitué de composants : les ouvrages sont les composants d'un dispositif ; les dispositifs sont les composants d'un bassin d'enjeu. Dans ce cas, l'importance d'un composant introduite par Birnbaum (1968) peut faire référence à celle d'un ouvrage dans le dispositif.

II.2.3.3 AMDE et arbre des causes pour identifier les indicateurs

L'AMDE et l'arbre des causes ont également été appliqués aux ouvrages hydrauliques pour établir les systèmes à base de règles d'évaluation de leur performance selon chaque mode de défaillance (figure II.1, p. 61). Par contre, leur développement est long et n'est pas envisageable pour tous les types d'ouvrages et tous les modes de défaillance. La faisabilité de leur application aux différentes échelles de systèmes restent à montrer.

Le développement de ces méthodes sur un type d'ouvrage de protection torrentielle pour un mode de défaillance donné peut être envisagé pour expliciter la démarche.

II.2.3.4 Une autre aide à la décision en univers incertain

Pour un système donné, le nœud papillon identifie l'ensemble \mathcal{I} des indicateurs à prendre en compte et aide à formaliser un problème de décision selon la matrice \mathbf{C} de l'équation (II.1) (p. 50), par l'identification des scénarios de défaillance S_k , $k = 1, \dots, K$ pour l'ERC et des conséquences associées C_{ik} , $i = 1, \dots, M$.

Pour traiter ce problème, une approche probabiliste peut être utilisée pour l'analyse de risque, depuis l'incertitude sur l'évaluation des indicateurs jusqu'à celle sur les conséquences. Or, la connaissance sur les scénarios S_k est limitée dans le contexte des ouvrages torrentiels et l'évaluation des indicateurs et conséquences est soumise aux différentes formes d'imperfection de l'information (section I.3.3). Les développements identifiés dans la section II.1 (synthèse en p. 72) pour prendre en compte les différentes formes d'imperfection de l'information dans le processus d'AD concernent donc également la SdF.

Synthèse de la section II.2

La SdF peut aider à expliciter le concept d'efficacité, à décomposer le problème global en sous-problèmes par une modélisation systémique multi-échelle et à identifier les indicateurs, par une AMDE et un arbre des causes.

La définition des scénarios de défaillance et conséquences associées est envisageable mais longue. Dans le contexte torrentiel, leur analyse probabiliste est limitée. Les différentes formes d'imperfection pour chaque sous-problème d'AD identifié doivent d'abord être considérées.

II.3 Traitement et propagation de l'imperfection d'informations issues de plusieurs sources pour aider à décider

Les méthodes d'aide à la décision doivent tenir compte de l'imperfection de l'information qui affecte les évaluations des indicateurs, critères et conséquences et la connaissance des états de la nature. Pour cela, les probabilités sont généralement utilisées mais ne représentent que la composante stochastique du processus. Devant cette limite, la représentation des différentes formes d'imperfection de l'information mais aussi la combinaison de plusieurs sources selon leur niveau de fiabilité sont des axes à développer (p. 72).

La qualité de la décision dépend de l'imperfection des informations sur lesquelles elle repose. Leur représentation (section II.3.1) doit être différenciée de leur propagation par combinaisons successives (section II.3.2) puis de l'interprétation pour décider (section II.3.3) (Martin 2005; Smets et Kennes 1994). Les théories de la logique floue (Zadeh 1965, 1978) et du Raisonnement Évidentiel (ER) issu des fonctions de croyance (Shafer 1976) sont ainsi comparées.

II.3.1 Représentation des formes d'imperfection de l'information

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection doit intégrer les différentes formes d'imperfection de l'information. Hormis les probabilités utilisées classiquement pour représenter l'incertitude, la théorie des ensembles flous permet de représenter le vague du langage (Zadeh 1965), la théorie des possibilités rapporte l'imprécision et l'incertitude (Zadeh 1978), et le Raisonnement Évidentiel (ER) tient compte des différentes formes dont l'incertitude épistémique et l'ignorance.

II.3.1.1 Théorie des ensembles flous : pour le vague du langage

Soit les éléments x de l'ensemble X , la fonction d'appartenance $\mu_\theta : x \rightarrow [0, 1]$ associe chaque $x \in X$ à un ensemble flou θ avec le niveau d'appartenance $\mu_\theta(x)$. L'ensemble θ est un label linguistique comme, par exemple, « petit », « grand », « faible », « fort », etc. La fonction $\mu_\theta(x) = 1, \forall x \in X$, représente l'ignorance totale (figure II.6-a). L'appartenance certaine est donnée par la fonction μ_θ telle qu'il existe $x^* \in X$ tel que $\mu_\theta(x^*) = 1$ et $\mu_\theta(x) = 0, \forall x \neq x^* \in X$ (figure II.6-b).

Étant donnée leur simplicité, les fonctions trapézoïdales définies par l'équation (II.15) selon le quadruplet $\{a, b, c, d\}$ sont généralement utilisées pour établir μ_θ (figure II.6-c) (Dubois et Prade 1987). Les intervalles $[a, d]$ et $[b, c]$ sont son support ($supp_\theta$) et son noyau ($core_\theta$). D'autres formes sont possibles (Bilgiç et Türkşen 2000). Le complément de θ sur X est noté $\bar{\theta}$ (figure II.6-d) et défini par l'équation (II.16).

$$\mu_\theta(x) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin supp_\theta \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ 1 & \text{si } x \in core_\theta \\ \frac{x-d}{c-d} & \text{si } x \in [c, d] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\mu_{\bar{\theta}}(x) \triangleq 1 - \mu_\theta(x), x \in X \quad (\text{II.16})$$

Soit X , un ensemble Θ , parfois appelé « modèle de transposition » (Tacnet 2009), peut être défini par n fonctions $\mu_{\theta_e}(x) \in [0, 1]$, avec $e = 1, \dots, n$ (figure II.7-a). Soit deux sous-ensembles flous θ_1 et θ_2 de X , la fonction d'appartenance $\mu_{\theta_1 \cup \theta_2}$ (équation (II.17)) permet leur union (figure II.7-b) tandis que leur intersection $\mu_{\theta_1 \cap \theta_2}$ est définie par l'équation (II.18) (Zadeh 1965).

$$\mu_{\theta_1 \cup \theta_2}(x) \triangleq \max(\mu_{\theta_1}(x), \mu_{\theta_2}(x)), x \in X \quad (\text{II.17})$$

$$\mu_{\theta_1 \cap \theta_2}(x) \triangleq \min(\mu_{\theta_1}(x), \mu_{\theta_2}(x)), x \in X \quad (\text{II.18})$$

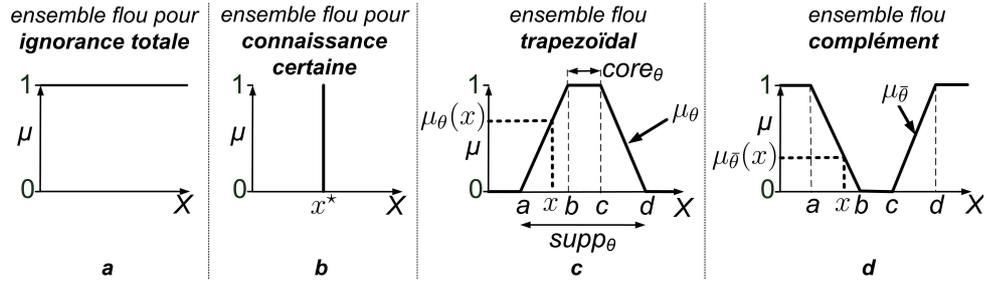


FIGURE II.6 – Ensembles flous : ignorance totale, connaissance certaine, ensemble flou trapezoïdal, complément.

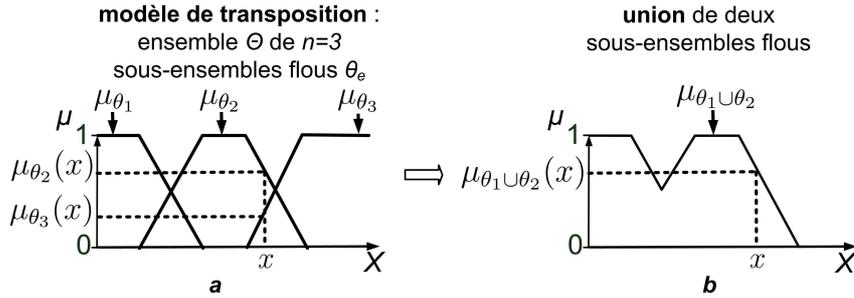


FIGURE II.7 – Modèle de transposition et union de deux sous-ensembles flous.

II.3.1.2 Théorie des possibilités : pour l'imprécision et l'incertitude

La théorie des possibilités étend la théorie des ensembles flous (Zadeh 1978). Elle combine les notions d'imprécision et d'incertitude.

- La distribution de possibilité : un sous-ensemble flou

Si on considère F comme un ensemble flou des valeurs possibles prises par $x \in X$, la distribution de possibilité π est donnée par $\mu_F(x) \triangleq \pi(x) \in [0, 1]$ (Dubois et Prade 1987). $\pi(x)$ est la possibilité que x soit la vraie valeur de X . Comme pour les ensembles flous, π peut avoir différentes formes. Par simplification, on considèrera souvent dans nos applications que π est une fonction trapézoïdale identifiée par le quadruplet $\{a, b, c, d\}$, son support $[a, d] = \text{supp}_\pi$ et son noyau $[b, c] = \text{core}_\pi$.

Soit Y un sous-ensemble de X et \bar{Y} son complément, les mesures de possibilité $\Pi(Y)$ et de nécessité $N(Y)$ sont données respectivement par les équations (II.19) et (II.20), $\forall Y, \bar{Y} \subseteq X$ (Dubois et Prade 1988; Zadeh 1978) (figure II.8-b).

$$\Pi(Y) \triangleq \sup_{x \in Y} \pi(x) \quad (\text{II.19})$$

$$N(Y) \triangleq [\inf_{x \in \bar{Y}} 1 - \pi(x)] \quad (\text{II.20})$$

La nécessité mesure la certitude sur Y : plus elle est importante, plus l'incertitude est faible. L'ignorance totale sur Y est établie par $N(Y) = 0$; la connaissance certaine l'est par $N(Y) = 1$. Y est certain si son contraire est impossible.

Soit X , la fonction d'appartenance μ_θ et la distribution de possibilité μ_F , la mesure de possibilité de θ , notée $\Pi(\theta)$, est établie par l'équation (II.21) (Zadeh 1978) (figure II.8-c).

$$\Pi(\theta) \triangleq \sup_{x \in X} \mu_{\theta \cap F}(x) \quad (\text{II.21})$$

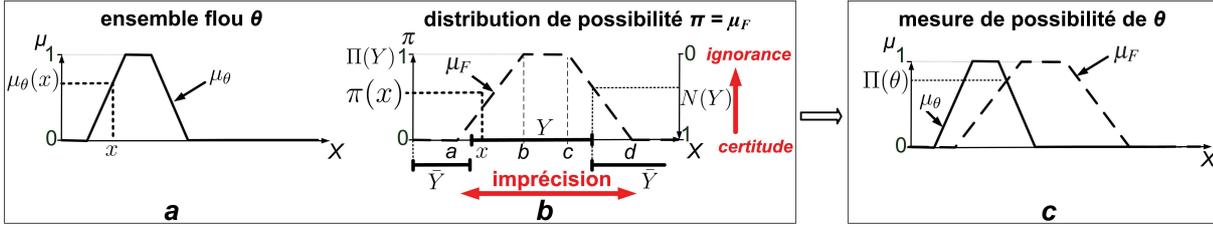


FIGURE II.8 – Distribution de possibilité et sous-ensemble flou pour une mesure de possibilité du sous-ensemble.

• Possibilité, probabilités imprécises et α -coupe

$\Pi(Y)$ et $N(Y)$ encadrent la probabilité $P(Y)$: $N(Y) \leq P(Y) \leq \Pi(Y)$ (Dubois et Prade 1988). Un ensemble \mathcal{P}_π de mesures de probabilités peut être extrait de π selon l'équation (II.22) (de Cooman et Aeyels 1999 ; Dubois et Prade 1992).

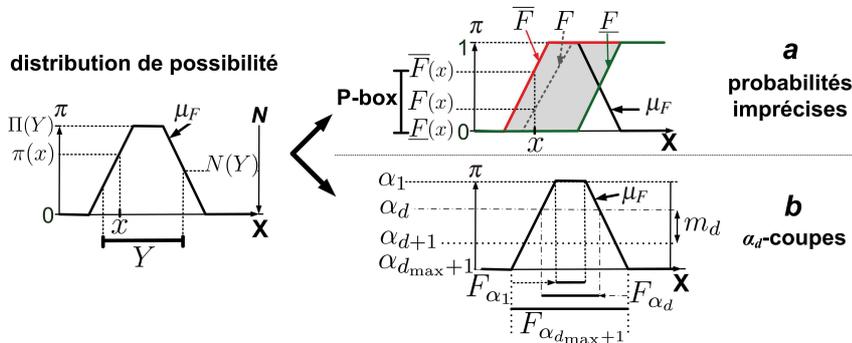
$$\mathcal{P}_\pi \triangleq \{P | \forall Y \subseteq X, N(Y) \leq P(Y) \leq \Pi(Y)\} \quad (\text{II.22})$$

Soit $x \in X$, F est la fonction de répartition où $F(x) = \int_{-\infty}^x p(x)dx$. Une famille de fonctions de répartition $F : X \rightarrow [0, 1]$ est encadrée par le couple de fonctions $(\underline{F}, \overline{F})$ avec $\underline{F} \leq \overline{F}$ extraites de $\pi : X \rightarrow [0, 1]$ (figure II.9-a). Dans ce cas, si chaque distribution de probabilité caractérise l'incertitude, la différence entre \underline{F} et \overline{F} relate l'imprécision (Baudrit 2005). L'intervalle de probabilités (*probability box* en anglais), ou P-box, est l'ensemble des mesures de probabilités selon l'équation (II.23). Les probabilités imprécises sont représentées de manière intuitive mais il y a une perte d'information par rapport à la distribution de possibilité π (Dupouy et al. 2016).

$$\mathcal{P}_{\underline{F} \leq \overline{F}} \triangleq \{P | \forall x \in X, \underline{F}(x) \leq F(x) \leq \overline{F}(x)\} \quad (\text{II.23})$$

Pour $\alpha \in [0, 1]$, l' α -coupe de π est l'intervalle défini par $F_\alpha \triangleq \{x | \mu_F(x) \geq \alpha\}$. Sous les hypothèses que F_α est obtenu par échantillonnage aléatoire des valeurs de α selon une loi uniforme, d'un ensemble fini de sous-ensembles imbriqués $\{F_{\alpha_1} =]x_{\alpha_1}^-, x_{\alpha_1}^+ [\subseteq \dots \subseteq F_{\alpha_d} =]x_{\alpha_d}^-, x_{\alpha_d}^+ [$, de l'ensemble $\{\alpha_1 > \dots > \alpha_d > \dots > \alpha_{d_{\max}}\}$ et des masses $m_d \triangleq \alpha_d - \alpha_{d+1} \in [0, 1]$ avec $\alpha_1 = 1$ et $\alpha_{d_{\max}+1} = 0$ (figure II.9-b), $\pi(x)$ peut être défini par l'équation (II.24) (Dubois et Prade 1989).

$$\pi(x) \triangleq \sum_{x \in F_{\alpha_d}} m_d \quad (\text{II.24})$$


 FIGURE II.9 – D'une distribution de possibilité π à des probabilités imprécises et des masses m_d par α -coupe.

II.3.1.3 Raisonnement Évidentiel (ER) : une extension théorique

Avant que Zadeh (1978) ne développe la théorie des possibilités, Shafer (1976) avait introduit la théorie des fonctions de croyance, aussi appelée théorie de Dempster-Shafer (DST). Le cadre de discernement (*Frame of Discernement* en anglais) (FoD) est un ensemble fini d'éléments discrets $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ (avec $n > 1$) qui regroupe les solutions possibles du problème à analyser. Selon la DST, les éléments du FoD sont supposés exhaustifs et mutuellement exclusifs. Sur la base de ces hypothèses, l'ensemble 2^Θ , appelé « power-set de Θ », regroupe les singletons de Θ et les sous-ensembles obtenus par leurs unions, y compris l'ensemble vide \emptyset . Le complément d'un sous-ensemble $A \in 2^\Theta$ est noté \bar{A} et appartient également à 2^Θ . Sa cardinalité est définie par $|A|$.

- Une fonction de masse (BBA) pour une source d'informations imparfaites

Une source d'information (ou d'évidence) est caractérisée par une fonction de masse (*Basic Belief Assignment* en anglais) (BBA) notée $m^\Theta(\cdot)$. Il s'agit d'une fonction $m^\Theta(\cdot) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ qui respecte les conditions de normalisation :

$$\begin{aligned} m^\Theta(\emptyset) &= 0 \\ \text{et} \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m^\Theta(A) &= 1, \forall A \neq \emptyset \in 2^\Theta. \end{aligned}$$

Par exemple, soit un FoD à deux éléments $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$, alors $2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2\}$. Une BBA $m^\Theta(\cdot)$ est ainsi définie telle que $m^\Theta(\emptyset) = 0$ et $m^\Theta(\theta_1) + m^\Theta(\theta_2) + m^\Theta(\theta_1 \cup \theta_2) = 1$.

La BBA est vide si $m^\Theta(\Theta) = 1$ et $m^\Theta(Y) = 0$, $\forall Y \in 2^\Theta \setminus \{\Theta\}$: elle modélise l'ignorance totale de la source puisque seule l'union de toutes les hypothèses a une masse non nulle. Un sous-ensemble $A \subseteq \Theta$ est défini comme un élément focal de $m^\Theta(\cdot)$ si $m^\Theta(A) > 0$. Une BBA est catégorique, notée m_A^Θ , si l'ensemble de la masse est affectée à un seul élément focal $A \neq \emptyset$. Plus précisément, $m_A^\Theta(A) = 1$ et $m_A^\Theta(Y) = 0$, $\forall Y \neq A$. Pour qu'une BBA soit bayésienne, il faut que tous ses éléments focaux soient des singletons de 2^Θ (autrement dit, des éléments individuels de Θ).

Connaissant la BBA $m^\Theta(\cdot)$, la crédibilité de l'hypothèse $A \in 2^\Theta$ est la somme des masses des éléments qui la soutiennent. La plausibilité de cette hypothèse est la somme des masses des éléments qui ne la contredisent pas. Les fonctions de crédibilité $\text{Bel}^\Theta(\cdot)$ et de plausibilité $\text{Pl}^\Theta(\cdot)$ sont respectivement établies à partir des équations (II.25) et (II.26).

$$\text{Bel}^\Theta(A) \triangleq \sum_{Y \subseteq A | Y \in 2^\Theta} m^\Theta(Y) \quad (\text{II.25})$$

$$\text{Pl}^\Theta(A) \triangleq \sum_{Y \cap A \neq \emptyset | Y \in 2^\Theta} m^\Theta(Y) \quad (\text{II.26})$$

- Lien entre fonctions de croyance et possibilité

Des liens ont pu être établis entre fonction de croyance et distribution de possibilité qui correspond à des ensembles consonants. Connaissant une distribution de possibilité $\pi : X \rightarrow [0, 1]$, et considérant l'ensemble X comme le FoD, une BBA $m^X(\cdot)$ peut être extraite selon le principe de l' α -coupe (figure II.9). Les éléments focaux de $m^X(\cdot)$ sont les α_d -coupes F_{α_d} avec $m^X(F_{\alpha_d}) = m_d$.

Par ailleurs, la mesure de plausibilité $\text{Pl}^{\Theta=X}(A)$ est la mesure de possibilité de A notée $\Pi(A)$, $\forall A \subseteq \Theta = X$ (Dubois et Prade 1987). En ce sens, la théorie des fonctions de croyance est considérée comme une extension des théories des possibilités et des probabilités.

• **Approximation de la probabilité subjective à partir d'une fonction de masse**

La crédibilité $\text{Bel}^\Theta(A)$ et la plausibilité $\text{Pl}^\Theta(A)$ sont généralement interprétées comme les limites basse et haute de la probabilité de A : $\text{Pl}^\Theta(A) \geq \text{P}^\Theta(A) \geq \text{Bel}^\Theta(A)$. L'intervalle $\text{BI}^\Theta(A) \triangleq [\text{Bel}^\Theta(A), \text{Pl}^\Theta(A)]$ est l'intervalle de croyance de $A \in 2^\Theta$. La différence $\text{Pl}^\Theta(A) - \text{Bel}^\Theta(A)$ permet d'évaluer l'incertitude, aussi appelée ambiguïté, sur A (Srivastava 1997).

Connaissant la BBA $m^\Theta(\cdot)$, il existe plusieurs fonctions de transformation pour approcher la fonction de probabilité subjective $\text{P}^\Theta(\cdot)$. Par exemple, la transformation pignistique de Smets (2005) permet d'établir $\text{P}^\Theta(\cdot) = \text{BetP}^\Theta(\cdot)$ en répartissant une masse affectée à un élément de 2^Θ qui la contient en fonction de la cardinalité de l'élément considéré, selon l'équation (II.27).

$$\text{BetP}^\Theta(A)_{A \in 2^\Theta} \triangleq \sum_{Y \in 2^\Theta} \frac{|Y \cap A|}{|Y|} m^\Theta(Y) \quad (\text{II.27})$$

La transformation par la DSMP, définie par l'équation (II.28), fournit $\text{P}^\Theta(\cdot) = \text{DSMP}_\epsilon^\Theta(\cdot)$, avec $\epsilon \geq 0$ un paramètre de calage. Pour obtenir le meilleur contenu de l'information probabiliste (*Probabilistic Information Content* en anglais) (PIC), ϵ doit être très faible (par exemple, $\epsilon = 10^{-6}$) (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015) (Vol. 3).

$$\text{DSMP}_\epsilon^\Theta(A) \triangleq \begin{cases} \sum_{Y \in 2^\Theta} \frac{\sum_{\substack{Z \subseteq A \cap Y \\ |Z|=1}} m^\Theta(Z) + \epsilon \cdot |A \cap Y|}{\sum_{\substack{Z \subseteq Y \\ |Z|=1}} m^\Theta(Z) + \epsilon \cdot |Y|} m^\Theta(Y) & \text{si } A \in 2^\Theta \neq \emptyset \\ 0 & \text{si } A = \emptyset \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Il existe d'autres formules comme la transformation par la plausibilité normalisée (Cobb et Shenoy 2006), ou encore celles présentées dans Dezert et Smarandache (2008).

• **Cadres théoriques du Raisonnement Évidentiel (ER)**

Dans le cadre du développement du Raisonnement Évidentiel (ER), l'hypothèse d'*exclusivité mutuelle* de la DST est considérée comme trop stricte. La théorie de Dezert-Smarandache du raisonnement plausible et paradoxal (DSMT) la relaxe (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015) (Annexe F.1). Même si ce cadre théorique entraîne une explosion calculatoire avec l'augmentation du nombre n d'éléments de Θ , il a été l'outil à la base de nombreux développements dans le ER (Bossé et al. 2007).

L'hypothèse d'*exhaustivité* de la DST, considère un monde de la connaissance fermé (« closed-world » en anglais, noté *c.w.*) où toutes les hypothèses sont connues. Elle est trop stricte si le FoD est mal défini. Deux modèles ont été développés pour la relaxer en considérant un monde ouvert (« open-world » en anglais, noté *o.w.*) (figure II.10).

1. Dans le modèle de la crédibilité transférable (*Transferable Belief Model* en anglais) (TBM), Smets et Kennes (1994) considèrent $\Theta^{o.w.} \triangleq \{\theta_1, \dots, \theta_q\}$ et $\emptyset = \bar{\Theta}^{o.w.}$. Cela entraîne $\sum_{A \in 2^\Theta} m(A) = 1$ et permet $m(\emptyset) \geq 0$. La masse des éléments inconnus est transférée sur l'ensemble vide ce qui peut être contextable d'un point de vue théorique, notamment en terme d'interprétation de la signification de l'ensemble vide.
2. Dans l'approche de Yager (1983), le monde ouvert est clos par un élément θ^c , tel que $\Theta^{c.w.} \triangleq \Theta^{o.w.} \cup \{\theta^c\}$. Sa cardinalité $|\theta^c|$ n'est pas connue. En établissant $m^{c.w.}(\theta^c) = 0$ et $m^{c.w.}(\emptyset) = 0$, cela entraîne $\text{Bel}^{c.w.}(Y) = 0$ et $m^{c.w.}(Y) = 0$ pour chaque sous-ensemble $Y \subseteq \Theta^{o.w.}$.

Par exemple, avec $n = 3$, le FoD initial, en monde ouvert, est $\Theta^{o.w.} = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ avec $2^{\Theta^{o.w.}} = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2, \theta_3, \theta_1 \cup \theta_3, \theta_2 \cup \theta_3, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3\}$ (figure II.10). On a alors $Y \in 2^{\Theta^{o.w.}}$. Selon Yager (1983), on a $2^{\Theta^{c.w.}} = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2, \theta_3, \theta_1 \cup \theta_3, \theta_2 \cup \theta_3, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3, \theta^c, \theta_1 \cup \theta^c, \theta_2 \cup \theta^c, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c, \theta_3 \cup \theta^c, \theta_1 \cup \theta_3 \cup \theta^c, \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c\}$.

La crédibilité $Bel^{c.w.}(A)$ et la masse $m^{c.w.}(A)$ de chaque $A \subseteq \Theta^{c.w.}$ sont calculées par les équations (II.29) et (II.30) (Yager 1983).

$$Bel^{c.w.}(A) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{si } A = Y \subseteq \Theta^{o.w.} \subset \Theta^{c.w.} \\ 1 - Pl^{c.w.}(\bar{A}) & \text{si } A = Y \cup \theta^c \subseteq \Theta^{c.w.} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

$$m^{c.w.}(A) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{si } A = Y \subseteq \Theta^{o.w.} \subset \Theta^{c.w.} \\ 0 & \text{si } A = \theta^c \subset \Theta^{c.w.} \\ \sum_{Z \subseteq Y} (-1)^{|Y-Z|} Bel^{c.w.}(Z \cup \theta^c) & \text{si } A = Y \cup \theta^c \subseteq \Theta^{c.w.} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Dans le modèle de la figure II.10, on a ainsi $m^{c.w.}(\theta_1) = m^{c.w.}(\theta_2) = m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2) = m^{c.w.}(\theta_3) = m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_3) = m^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta_3) = m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3) = m^{c.w.}(\theta^c) = 0$.

La BBA $m^{c.w.}(\cdot)$ est alors établie par :

- pour $|Y| = 1$:
 - $m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta^c) = Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta^c)$;
 - $m^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta^c) = Bel^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta^c)$;
 - $m^{c.w.}(\theta_3 \cup \theta^c) = Bel^{c.w.}(\theta_3 \cup \theta^c)$;
- pour $|Y| = 2$:
 - $m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c) = Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta^c)$;
 - $m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_3 \cup \theta^c) = Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_3 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_3 \cup \theta^c)$;
 - $m^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c) = Bel^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_3 \cup \theta^c)$;
- pour $|Y| = 3$: $m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c) = Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_3 \cup \theta^c) - Bel^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c) + Bel^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta^c) + Bel^{c.w.}(\theta_2 \cup \theta^c) + Bel^{c.w.}(\theta_3 \cup \theta^c)$.

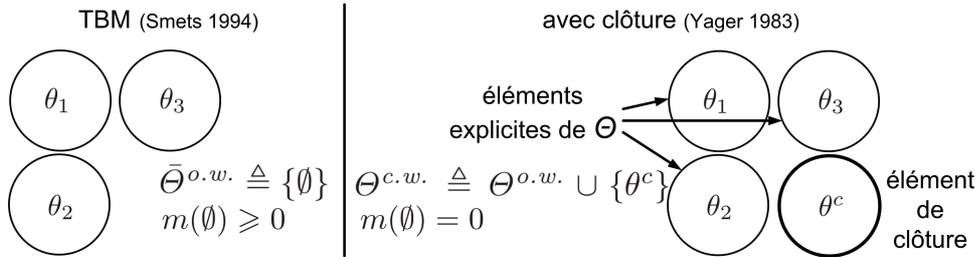


FIGURE II.10 – Comparaison de deux modèles pour relaxer l'hypothèse d'exhaustivité de la DST : la TBM (Smets et Kennes 1994) et le modèle de clôture (Yager 1983).

Les développements dans le Raisonnement Évidentiel ont étendu la DST initiale dont les hypothèses étaient considérées comme trop restrictives pour certains problèmes opérationnels et dont l'interprétation de l'ensemble vide \emptyset était discutable. En effet, étant donné le FoD Θ , la combinaison dans ce cadre de deux BBAs, issues de deux sources différentes, considérerait la masse affectée à \emptyset comme le conflit entre ces sources. Cela a rapidement été discuté par Zadeh (1979) et, depuis, la combinaison des sources a fait l'objet de nombreux développements pour traiter ce problème de conflit.

II.3.1.4 Association des formalismes

Pour évaluer la performance d'un ouvrage hydraulique, noté A_i , selon les systèmes à base de règles (figure II.1, p. 61), Curt (2008) a proposé d'évaluer chaque indicateur $I_l \in \mathcal{I}$ sur $Y_l = X = [0, 10]$, $l = 1, \dots, L$ selon une distribution de possibilité $\pi_{il} : X \rightarrow [0, 1]$. Cependant, l'évaluation directe sur une même échelle X peut être critiquée car elle dépend d'une transformation de l'évaluation de l'indicateur dans celle du résultat final, sans être élicitée.

Pour chaque alternative A_i à évaluer, Tacnet (2009) a proposé de différencier l'imperfection de la mesure $y_{il} \in Y_l$ de l'indicateur I_l (ou celle $x_{ij} \in X_j$ d'un critère g_j) de sa transformation dans un cadre d'évaluation commun qui est le FoD Θ . Il peut regrouper des évaluations quantitatives avec $\Theta = [0, 10]$ ou qualitatives avec $\Theta = [\text{nul}, \text{faible}, \text{moyen}, \text{fort}]$.

Pour cela, l'imprécision et l'incertitude de la mesure d'un critère g_j , $j = 1, \dots, N$, par une source (par exemple, un expert) s_q , $q = 1, \dots, Q$, est représentée par une distribution de possibilité $\pi_{q,ij} : X_j \rightarrow [0, 1]$. Elle peut être définie par le quadruplet $\{a, b, c, d\}$ (figure II.7, p. 80) ou par des intervalles sur X_j auxquels sont associés un degré de confiance (figure II.11). La distribution de possibilité est alors équivalente à celle obtenue après une procédure d' α_d -coupes, avec d_{\max} le nombre d'intervalles fournis par la source.

En parallèle, pour $x_j \in X_j$, un « modèle de transposition » est défini par n fonctions $\mu_{j,\theta_e}(x_j) \in [0, 1]$, avec $e = 1, \dots, n$. Sur cette base, la démarche classique de transposition de la mesure imparfaite $\pi_{q,ij}$ dans le FoD commun $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ repose sur quatre étapes, détaillées dans Tacnet et al. (2011b) et sur la figure II.11.

Considérant X_j comme le FoD, la première étape d'extraction directe de la BBA $m_{q,ij}^{X_j}(\cdot)$ à partir de $\pi_{q,ij}$ repose sur le lien entre possibilité et fonction de masse (p. 82). Sur cette base, la méthode classique transpose $m_{q,ij}^{X_j}(\cdot)$ dans une BBA bayésienne $m_{q,ij}^{\Theta}(\cdot)$ définie sur le FoD Θ pour chaque alternative A_i , chaque critère g_j et chaque source s_q .

Cette méthode de transformation géométrique est intuitive et présente l'intérêt de prendre en compte les différentes formes d'imperfection d'information. Elle différencie l'imprécision de la mesure initiale et son interprétation en appartenance à des classes quantitatives ou qualitatives.

Cependant, elle peut être critiquée selon deux points.

1. Le nombre d'intervalles d_{\max} à fournir par la source et la valeur de chaque degré de confiance α_d , $d = 1, \dots, d_{\max}$ sont choisis arbitrairement. En pratique, une source comme un expert peut avoir du mal à les exprimer.
2. L'affectation d'une masse positive uniquement sur les singletons $A \in \Theta$ repose sur l'hypothèse de sa distribution uniforme sur X_j . L'ignorance partielle ou totale que fournit l'information initiale n'est alors pas représentée.

L'amélioration de cette méthode doit :

1. considérer une distribution de possibilité continue $\pi_{q,ij}$ simplement définie par le quadruplet $\{a, b, c, d\}$ (figure II.7, p. 80), plus simple à produire en pratique ;
2. affecter une masse positive à tous les sous-ensembles $A \subseteq \Theta$.

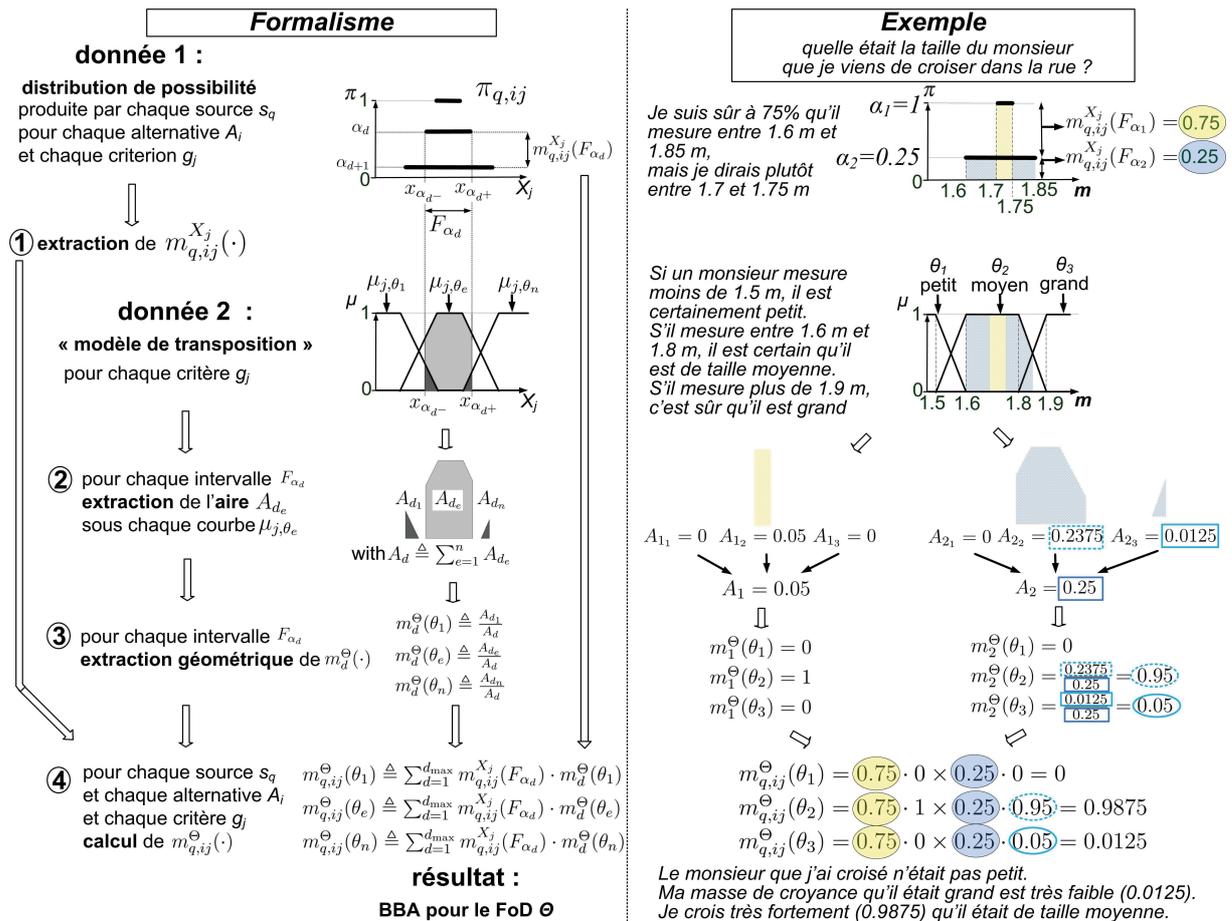


FIGURE II.11 – La méthode classique de transposition d'une distribution de possibilité $\pi_{q,i,j}$ en fonction de masse $m_{q,i,j}^\Theta(\cdot)$, selon un « modèle de transposition » (Tacnet 2009).

II.3.1.5 Préférences du décideur : du flou à une fonction de masse

La modélisation de la structure de préférences d'un décideur par une relation de surclassement s'appuie sur la théorie des ensembles flous (Schärlig 1985) (Annexe E.1). Une clarification de cette représentation doit permettre d'aider à améliorer son applicabilité (p. 70).

Dans Electre Tri (ET), pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, la structure de préférence est définie par les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$, où chaque b_h est la limite haute de la catégorie C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$. Pour affecter chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ dans chaque classe C_h , les éléments de chaque paire (A_i, b_h) sont comparés. Pour cela, Dezert et Tacnet (2012a) ont proposé de créer une BBA sur le FoD binaire $\Theta = \{c, \bar{c}\}$, avec c qui signifie que l'alternative A_i à classer dans une catégorie C_h est concordante avec l'hypothèse « A_i est au moins aussi bonne que le profil b_h » (figure II.3, p. 68).

Une BBA $m_{j,i,h}^\Theta(\cdot)$ est obtenue pour chaque A_i , chaque g_j et chaque b_h . Une BBA $m_{j,hi}^\Theta(\cdot)$ est également établie pour la paire (b_h, A_i) où c signifie la concordance avec l'hypothèse « b_h est au moins aussi bonne que le profil A_i » (Annexe F.3.2). Ces deux BBAs représentent la structure de préférences du décideur entre A_i et b_h .

D'autres cadres théoriques que les probabilités permettent de tenir compte de l'imprécision comme les ensembles flous, les possibilités ou les probabilités imprécises. La DST étend ces différents cadres théoriques : elle permet de représenter les différentes formes d'imperfection de l'information, sur la base de la définition du FoD Θ . Le Raisonnement Évidentiel étend la DST en permettant de relaxer les hypothèses d'exhaustivité et d'exclusivité mutuelle des éléments de Θ .

La méthode de transformation de Tacnet (2009) permet de représenter l'évaluation d'un critère ou d'un indicateur par une BBA à partir de leur évaluation imprécise et de sous-ensembles flous (« modèle de transposition »). Elle devrait être améliorée.

II.3.2 Combinaison de plusieurs sources d'informations

Pour aider à la décision, les évaluations des indicateurs ou critères doivent être combinées comme les informations issues de plusieurs sources hétérogènes et pouvant être inégalement fiables. Alors que le principe d'extension de Zadeh (1965) permet d'agréger des évaluations établies selon des distributions de possibilité (Curt 2008), un des intérêts majeurs du Raisonnement Évidentiel est de proposer un cadre de combinaison des informations issues de plusieurs sources, considérées comme plus ou moins fiables ou plus ou moins importantes. Les distances entre fonctions de masses (BBAs) peuvent faciliter la combinaison ou aider à identifier la fiabilité des sources.

II.3.2.1 Fiabilité et/ou importance des sources d'information

Tacnet (2009) a identifié que la fiabilité d'une source doit être différenciée de son importance.

La *fiabilité* correspond à la capacité objective de la source à fournir la réponse correcte à un problème de décision donné (Smarandache et al. 2010). Pour chaque source s_q , $q = 1, \dots, Q$, elle est représentée par un coefficient d'affaiblissement (ou de fiabilité) $\alpha_q \in [0, 1]$ (Martin et al. 2008). Soit la BBA $m_q^\Theta(X)$ initialement fournie par la source s_q , la méthode de Shafer (1976), établie par l'équation (II.31), est généralement utilisée pour fournir une BBA affaiblie selon la fiabilité de la source, notée $m_{\alpha_q}^\Theta(A)$. Dans cette méthode, la masse de chaque élément focal est d'abord affaiblie puis la masse restante est transférée sur l'ignorance totale Θ .

$$m_{\alpha_q}^\Theta(A) \triangleq \begin{cases} \alpha_q \cdot m_q^\Theta(A) & \text{si } A \in 2^\Theta \neq \Theta \\ \alpha_q \cdot m_q^\Theta(A) + (1 - \alpha_q) & \text{si } A = \Theta \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

L' *importance* représente le poids subjectif affecté à une source par le décideur (Smarandache et al. 2010). Dans un problème multicritère, chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, peut être considéré comme une source fournissant $m_j^\Theta(\cdot)$ (Beynon 2002, 2005). Selon l'approche initiée par Tacnet (2009) et formalisée par Smarandache et al. (2010), chaque poids ω_j est le coefficient d'affaiblissement par l'importance qui permet d'établir la BBA affaiblie $m_{\omega_j}^\Theta(\cdot)$, selon l'équation (II.32). Ici, la masse restante est transférée sur l'ensemble vide ($m(\emptyset) > 0$). Elle ne représente ni la masse affectée à une information conflictuelle (Shafer 1976), ni celle affectée à un élément inconnu (Smets et Kennes 1994), mais celle relative à l'importance de la source (Smarandache et al. 2010).

$$m_{\omega_j}^\Theta(A) \triangleq \begin{cases} \omega_j \cdot m_j^\Theta(A) & \text{si } A \in 2^\Theta \neq \emptyset \\ \omega_j \cdot m_j^\Theta(A) + (1 - \omega_j) & \text{si } A = \emptyset \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

II.3.2.2 Distances entre deux fonctions de masse

La distance, ou dissimilarité, peut être mesurée entre deux ensembles flous (Bloch 1999) ou distributions de possibilités (Jenhani et al. 2008). De même, la distance entre deux BBAs $m_1^\Theta(\cdot)$ and $m_2^\Theta(\cdot)$, notée $d(m_1^\Theta, m_2^\Theta)$, est utile dans les problèmes de classification ou rangement mais aussi pour évaluer le coefficient de fiabilité d'une source (Jousselme et Maupin 2012).

Parmi les différents types, les distances métriques réelles reposent sur une interprétation géométrique du Raisonnement Évidentiel ce qui les rend plus accessibles (Cuzzolin 2008 ; Jousselme et al. 2001). Soit trois BBAs x, y, z définies sur 2^Θ , une distance métrique réelle $d(x, y)$ doit satisfaire les propriétés de non-négativité ($d(x, y) \geq 0$), de non-dégénérescence ($d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$), de symétrie ($d(x, y) = d(y, x)$) et d'inégalité triangulaire ($d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z)$) (Han et al. 2014). La distance de Jousselme et al. (2001) est une distance métrique réelle. Cependant, la distance euclidienne basée sur l'intervalle de croyance BI^Θ , notée $d_{BI}(m_1^\Theta, m_2^\Theta)$ et donnée par l'équation (II.33), produit de meilleurs résultats dans un certain nombre de cas (Han et al. 2014). Elle s'appuie sur la distance de Wasserstein $d_W([a_1, b_1], [a_2, b_2])$ de l'équation (II.34) (Irpino et Verde 2008) avec $[a_1, b_1] \triangleq BI_1^\Theta(X) \triangleq [Bel_1^\Theta(X), Pl_1^\Theta(X)]$ et $[a_2, b_2] \triangleq BI_2^\Theta(X) \triangleq [Bel_2^\Theta(X), Pl_2^\Theta(X)]$ pour $X \subseteq \Theta$.

$$d_{BI}(m_1^\Theta, m_2^\Theta) \triangleq \sqrt{\frac{1}{2^{|\Theta|-1}} \cdot \sum_{A \in 2^\Theta} d_W^2(BI_1^\Theta(A), BI_2^\Theta(A))} \quad (\text{II.33})$$

$$d_W([a_1, b_1], [a_2, b_2]) \triangleq \sqrt{\left[\frac{a_1 + b_1}{2} - \frac{a_2 + b_2}{2}\right]^2 + \frac{1}{3} \left[\frac{b_1 - a_1}{2} - \frac{b_2 - a_2}{2}\right]^2} \quad (\text{II.34})$$

II.3.2.3 Fusion de plusieurs sources d'information

Selon Bloch (2003), « la fusion d'information consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision ». Les trois niveaux de fusion proposés par Dasarathy (1997) sont généralement repris (Martin 2005) :

- à bas niveau, la fusion est celle des données issues directement de capteurs : par exemple, sur un ouvrage, la largeur d'une fissure donnée par un fissuromètre ;
- à moyen niveau, elle concerne les caractéristiques déterminées à partir des données : par exemple, les caractéristiques de résistance de la partie de l'ouvrage fissurée ;
- à haut niveau, elle est relative à celle des décisions (formulation d'hypothèses par un expert) : par exemple, le niveau d'efficacité de l'ouvrage.

La combinaison des BBAs $m_1^\Theta(\cdot)$ et $m_2^\Theta(\cdot)$ produites par deux sources, éventuellement affaiblies, par une règle de fusion, notée \oplus , permet d'obtenir une BBA fusionnée avec $m_\oplus^\Theta(A)$, $A \subseteq \Theta$. La règle initiale de Dempster (DS), conjonctive, utilise le conflit $K_{12} = m_{DS}^\Theta(\emptyset)$ pour obtenir $m_{DS}^\Theta(A)$ selon une étape de normalisation par $1 - K_{12}$ (Shafer 1976). De nombreux débats ont affecté la communauté scientifique sur ce sujet. Zadeh (1979) a d'abord démontré une mauvaise gestion d'un conflit important entre sources par cette règle DS . Des défaillances de la règle DS ont été identifiées pour combiner deux sources d'information, même avec un conflit peu élevé (Tchamova et Dezert 2012).

Depuis les années 90, de nombreuses règles de fusion ont été proposées pour combiner, de manière plus ou moins efficace, plusieurs BBAs. Parmi elles, les règles de redistribution proportionnelle du conflit (*Proportional Conflict Redistribution* en anglais) (PCR) ont été développées dans la DSmT (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015) (Vol. 3) pour pallier les inconvénients de la règle DS (Dezert et Tchamova 2014). Leur principe général consiste à 1) appliquer

une règle de fusion conjonctive, 2) calculer les niveaux de conflit partiels et totaux entre les masses des éléments focaux, puis 3) à redistribuer ces derniers proportionnellement, en tenant compte des contraintes d'intégrité du FoD. La règle de fusion PCR n°6 (PCR6) de Martin et Osswald (2006) est plus consistante que les autres règles avec des expériences aléatoires binaires menées pour extraire une probabilité objective (Smarandache et Dezert 2013). Pour la combinaison de deux BBAs, la règle PCR6 coïncide avec la règle PCR5, et elle correspond à l'équation (II.35) suivante.

$$m_{PCR6}^{\ominus}(A) \triangleq \sum_{\substack{X_1, X_2 \in 2^{\ominus} \\ X_1 \cap X_2 = A}} m_1^{\ominus}(X_1) \cdot m_2^{\ominus}(X_2) + \sum_{\substack{Y \in 2^{\ominus} \setminus \{A\} \\ A \cap Y = \emptyset}} \left[\frac{m_1^{\ominus}(A)^2 \cdot m_2^{\ominus}(Y)}{m_1^{\ominus}(A) + m_2^{\ominus}(Y)} + \frac{m_2^{\ominus}(A)^2 \cdot m_1^{\ominus}(Y)}{m_2^{\ominus}(A) + m_1^{\ominus}(Y)} \right] \quad (\text{II.35})$$

La fusion par la règle PCR6 de N BBAs $m_j^{\ominus}(\cdot)$, affaiblies par l'importance ω_j selon l'équation (II.32) (p. 87), fournit la BBA fusionnée $m_{PCR6}^{\ominus}(\cdot)$ avec $m_{PCR6}^{\ominus}(\emptyset) > 0$. Dans ce cas, la règle de fusion PCR6 normalisée, notée PCR6 $_{\emptyset}$, a été développée comme une extension de la règle PCR6 pour produire la BBA $m_{PCR6_{\emptyset}}^{\ominus}(\cdot)$ avec $m_{PCR6_{\emptyset}}^{\ominus}(\emptyset) = 0$ (Smarandache et al. 2010).

Les règles de fusion PCR6 et PCR6 $_{\emptyset}$ sont alors considérées comme les plus performantes (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015) (Vol. 3). Ces règles étant non associatives, leur implémentation et utilisation restent plus difficiles qu'avec la règle de Dempster-Shafer.

II.3.2.4 Fusion et agrégation multicritère

Étant donné le contexte d'application, les systèmes à base de règles et les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) ont été retenus pour agréger plusieurs indicateurs et plusieurs critères. L'imperfection de l'évaluation de ces derniers restait cependant à propager (p. 72).

• Propagation de l'imperfection de l'évaluation dans les systèmes à base de règles

Les distributions de possibilité ont été propagées dans les systèmes à base de règles comme celui de la figure II.1 (p. 61) (Curt 2008). Pour un ouvrage A_i , chaque indicateur $I_l \in \mathcal{I}$, $l = 1, \dots, L$ est évalué par une distribution de possibilité $\pi_{il} : X \rightarrow [0, 1]$. Les règles d'agrégation sont des fonctions sur lesquelles le principe d'extension de Zadeh (1965) est appliqué. Finalement, une distribution de possibilité $\pi_i : X \rightarrow [0, 1]$ est obtenue pour chaque A_i .

Chaque I_l , $l = 1, \dots, L$ est évalué par Q sources s_q différentes selon $\pi_{q,il} : X \rightarrow [0, 1]$. Curt (2008) a proposé d'extraire une BBA $m_{q,il}^X(\cdot)$ de chaque $\pi_{q,il}$ à partir du principe des α -coupes (figure II.9, p. 81). Leur fusion par la règle de Dempster-Shafer permet d'obtenir la BBA $m_{il}^X(\cdot)$. Une distribution de possibilité $\pi_{il} : X \rightarrow [0, 1]$ est ensuite reformée à partir de $m_{il}^X(\cdot)$ pour chaque I_l , $l = 1, \dots, L$. La propagation dans le système à base de règles est alors possible.

Pour chaque indicateur, une BBA est identifiée après fusion des BBAs fournies par plusieurs sources. Des méthodes de propagation des BBAs dans les systèmes à base de règles ont été développées, comme l'approche RIMER (*Belief Rule-Base Inference Methodology Using the Evidential Reasoning Approach* en anglais) de Yang et al. (2006). Elle repose sur une inférence mathématique qui nécessite de définir des règles de fusion multiples à chaque étape d'agrégation ce qui rend la méthode complexe et consommatrice en temps de calcul.

Au contraire de la propagation des distributions de possibilité dans les systèmes à base de règles, les méthodes de type RIMER n'ont jamais été appliquées au domaine des risques naturels.

• Fusion d'information et AMC d'agrégation totale

Les approches basées sur une représentation par une distribution de possibilité de l'imperfection de l'évaluation des alternatives A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$ sont courantes. Cependant, elles reposent le plus souvent sur la seule prise en compte de l'imprécision et non de l'incertitude épistémique (Tacnet 2009).

Ce dernier a également établi une synthèse des travaux ayant utilisé la théorie des fonctions de croyance (DST) dans les méthodes AMC, notamment celles d'agrégation totale. Pour l'analyse multicritère hiérarchique (AHP), les premiers travaux de Beynon (2002, 2005) ne faisaient pas la différence entre importance et fiabilité de ces sources. Ceci a été formalisé ensuite par Smarandache et al. (2010) selon les équations (II.31-II.32) (p. 87).

Sur la base de ces travaux, la combinaison des évaluations imparfaites de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$, selon les différents critères g_j , $j = 1, \dots, N$ et par différentes sources s_q , $q = 1, \dots, Q$ a été formalisée par Dezert et al. (2010) selon deux étapes de fusion successives :

- 1) pour un critère, fusion des BBAs produites par plusieurs sources ;
- 2) fusion des BBAs produites pour les différents critères, assimilés à des sources d'information.

◇ *Fusion 1* - Étant donné le FoD $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$, chaque s_q fournit, pour chaque A_i et chaque g_j , une BBA $m_{q,ij}^\Theta(\cdot)$. Si le coefficient de fiabilité α_q de s_q est connu, il est utilisé pour obtenir la BBA $m_{\alpha_q,ij}^\Theta(\cdot)$ en appliquant l'équation II.31 (p. 87).

Pour chaque A_i et chaque g_j , les Q BBAs $m_{\alpha_q,ij}^\Theta(\cdot)$ sont combinées par une règle de fusion, préférentiellement PCR6, pour obtenir la BBA $m_{ij}^\Theta(\cdot)$.

Cela représente l'évaluation imparfaite de chaque score x_{ij} dans la matrice de score \mathbf{S} de dimensions $M \times N$ (p. 51). La matrice de BBAs correspondante \mathbf{M}^Θ est définie par l'équation (II.36).

$$\mathbf{M}^\Theta \triangleq \begin{matrix} & \begin{matrix} g_1, \omega_1 & \dots & g_j, \omega_j & \dots & g_N, \omega_N \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_M \end{matrix} & \begin{pmatrix} m_{11}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{1j}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{1N}^\Theta(\cdot) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{i1}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{ij}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{iN}^\Theta(\cdot) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{M1}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{Mj}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{MN}^\Theta(\cdot) \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{II.36})$$

◇ *Fusion 2* - Pour chaque A_i (c'est à dire chaque ligne de la matrice \mathbf{M}^Θ), une règle de fusion permettant de tenir compte de l'importance ω_j de chaque critère g_j , comme PCR6 $_\theta$, est appliquée pour combiner les N BBAs $m_{ij}^\Theta(\cdot)$. La BBA $m_i^\Theta(\cdot)$ est finalement obtenue pour chaque A_i .

Les règles de fusion, parmi lesquelles PCR6 est retenue comme la plus performante, permettent de combiner plusieurs BBAs définies sur un même FoD Θ , en tenant compte de la fiabilité des sources, ce que ne permet pas le principe d'extension de Zadeh (1965).

Le principe d'extension est appliqué au systèmes de base de règles. Des approches de propagation dans le Raisonnement Évidentiel existent également pour ce type de modèles. Cependant, les temps de calcul associés ne favorisent pas leur application.

La fusion d'information permet de prendre en compte la fiabilité des sources et l'importance des critères pour obtenir une BBA finale sur Θ . Cependant, la multiplication des sources, des critères et des alternatives peut aboutir à des temps de calcul très importants.

II.3.3 Aider à décider dans un contexte d'information imparfaite

La propagation de l'imperfection de l'information conduit à une information finale imparfaite, représentée par une BBA dans le Raisonnement Évidentiel (ER). Le décideur doit alors être accompagné pour décider sur cette base. Pour cela, des règles de décision sont disponibles.

L'aide à la décision (AD) vise à trancher parmi plusieurs alternatives pour choisir la meilleure (P_α), les trier (P_β) ou les classer (P_γ). Plusieurs critères peuvent être pris en compte et la connaissance sur les états de la nature est à considérer (p. 52). Cependant, les méthodes classiques d'aide multicritère à la décision (AMC) et d'AD dans l'incertain sont limitées (p. 72) par :

- 1) l'absence de prise en compte des différentes sources et formes d'imperfection de l'information ;
- 2) le choix d'un seuil et d'une attitude du décideur pour Electre Tri (ET), spécifique au tri ;
- 3) le phénomène de renversement de rang (défini en p. 66) pour les AMC de classement ;
- 4) la représentation de la connaissance sur les états de la nature par des probabilités subjectives.

Pour aller au-delà de ces limites, des méthodes d'AMC et d'AD en univers incertain ont été développées en se basant sur le ER. Leurs principes et apports spécifiques sont mis en évidence. Les détails calculatoires sont également disponibles (Annexe F).

II.3.3.1 Règles pour décider selon l'information obtenue après combinaison

La propagation des évaluations des indicateurs par des distributions de possibilité dans un système à base de règles conduit à une évaluation finale représentée par une distribution de possibilités. Pour décider la valeur d'évaluation à retenir, une méthode de défuzzification est appliquée (Talon et al. 2010).

Dans le Raisonnement Évidentiel (ER), la représentation de l'information finale est une BBA $m^\Theta(\cdot)$ établie pour un FoD $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$. Le choix d'un élément $\hat{\theta} \in \Theta$ ou d'un sous-ensemble $\hat{A} \subseteq \Theta$ est l'objet de la décision. En général, cela consiste à choisir $\hat{\theta} = \theta_{e^*}$, $e = 1, \dots, n$ avec $e^* \triangleq \arg \max_e C(\theta_e)$, dans laquelle $C(\theta_e)$ est un critère de décision (Dezert et al. 2016a).

Parmi plusieurs critères de décision possibles $C(\theta_e)$, le plus utilisé se réfère à la crédibilité selon l'équation (II.37). Ce critère est le plus spécifique mais il correspond à une attitude pessimiste du décideur. Au contraire, la plausibilité, selon l'équation (II.38), traduit une attitude optimiste. Entre ces deux extrêmes, les attitudes de compromis sont représentées par les décisions basées sur l'analyse du maximum de probabilité selon l'équation (II.39). Pour cela, la BBA $m(\cdot)$ est préalablement transformée en probabilité subjective $P(\cdot)$ en utilisant une des formules de transformation préalablement citées comme la transformation pignistique (Smets et Kennes 1994) (équation (II.27), p. 83), la DSMP $_\epsilon$ (équation (II.28), p. 83), la plausibilité normalisée (Cobb et Shenoy 2006), etc.

$$\hat{\theta} \triangleq \theta_{e^*} \triangleq \arg \max_e \text{Bel}^\Theta(\theta_e) \quad (\text{II.37})$$

$$\hat{\theta} \triangleq \theta_{e^*} \triangleq \arg \max_e \text{Pl}^\Theta(\theta_e) \quad (\text{II.38})$$

$$\hat{\theta} \triangleq \theta_{e^*} \triangleq \arg \max_e P^\Theta(\theta_e) \quad (\text{II.39})$$

II.3.3.2 Méthodes avancées d'AMC en Raisonnement Évidentiel

L'utilisation d'une des règles de décision est l'étape finale du processus d'aide à la décision (AD), après combinaison des différentes informations représentées par une BBA. Des méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) basées sur le Raisonnement Évidentiel (ER) améliorent les méthodes classiques en représentant les informations disponibles par des BBAs, en les combinant par une des règles de fusion et en utilisant une des règles de décision sur la BBA finale.

Le ER pour une AMC (*Evidential Reasoning for Multi Criteria Decision Analysis* en anglais) (ER-MCDA) (Tacnet et al. 2011b) développe l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) en tenant compte de l'évaluation imparfaite de chaque critère, produite à partir de plusieurs sources.

La méthode Soft Electre Tri (SET) (Dezert et Tacnet 2012b) améliore Electre Tri (ET) en l'affranchissant des choix des seuils nécessaires au surclassement et d'une attitude du décideur.

Quatre méthodes TOPSIS basées sur les fonctions de croyance (*Belief function-based TOPSIS* en anglais) (BF-TOPSIS) (Dezert et al. 2016c), notées BF-TOPSIS1 à BF-TOPSIS4, sont de plus en plus robustes au renversement de rang, moyennant une complexité calculatoire plus importante.

- ER-MCDA : tri tenant compte de l'évaluation imparfaite des critères

Pour un problème multicritère classique (M alternatives A_i à comparer selon N critères g_j), la méthodologie ER-MCDA s'appuie sur les développements présentés pour 1) représenter l'imperfection de l'évaluation produite par une source par une BBA obtenue par transformation d'une distribution de possibilité dans un « modèle de transposition » (p. 85) et 2) fusionner en deux étapes successives les BBAs issues de plusieurs sources inégalement fiables puis celles obtenues pour les critères d'importance différente (p. 89-90) (Tacnet et al. 2011b).

Cette méthodologie d'aide multicritère à la décision (AMC) aide à évaluer chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon un label d'évaluation choisi dans le cadre de discernement (FoD) $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$. Ces labels peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. Elle est divisée en six étapes synthétisées ci-dessous (détails en Annexe F.2).

1) Le problème de décision multicritère est formalisé selon une approche constructive. L'arbre hiérarchique de l'AHP est utilisé pour le modéliser. La démarche d'élicitation associée permet d'établir le vecteur de poids $\mathbf{w} = \{\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_N\}$ de Saaty (1980).

2) et 3) Ensuite un « modèle de transposition », assimilé à une structure de préférences floue du décideur (Tacnet 2009), est considéré comme accessible pour chaque critère. Chaque source d'information s_q , $q = 1, \dots, Q$, fournit une distribution de possibilité pour évaluer chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$. La méthode de transposition de Tacnet (2009) permet d'obtenir une BBA bayésienne $m_{q,ij}^\Theta(\cdot)$ représentant l'évaluation imparfaite, par chaque source s_q , de chaque alternative A_i selon chaque critère g_j .

4) et 5) Les deux étapes de combinaison successives permettent d'obtenir une BBA finale pour chaque A_i , notée $m_i^\Theta(\cdot)$, en tenant compte du coefficient de fiabilité α_q de chaque source s_q et du coefficient d'important ω_j associé à chaque critère g_j . Cette BBA finale est du type de celles représentées sur la figure II.12. En effet, l'affaiblissement de la BBA bayésienne $m_{q,ij}^\Theta$ par le coefficient de fiabilité α_q de la source s_q selon l'équation II.31 (p. 87), avant la première étape de fusion, conduit à affecter une masse non nulle à l'ensemble Θ si $\alpha_q < 1$.

6) La dernière étape consiste à évaluer chaque A_i en choisissant le label $\hat{\theta}(A_i)$ dans Θ selon la connaissance disponible représentée par $m_i^\Theta(\cdot)$ et une des différentes règles de décision.

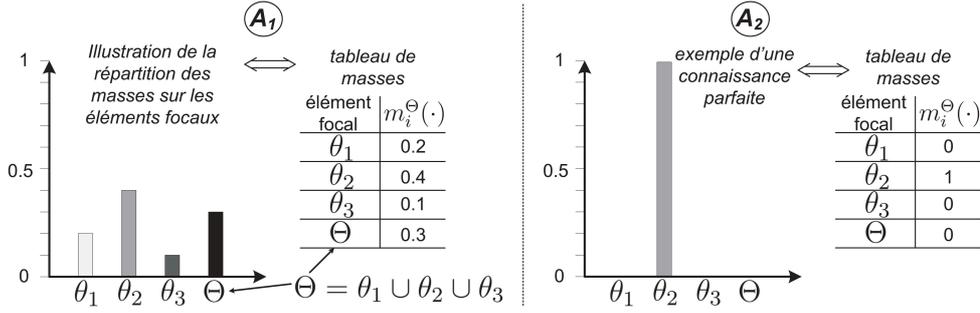


FIGURE II.12 – Exemple de deux BBAs finales $m_1^\Theta(\cdot)$ et $m_2^\Theta(\cdot)$ obtenues selon la méthode ER-MCDA, pour deux alternatives A_1 et A_2 et un FoD $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$.

Les *apports* principaux de ER-MCDA sont (Dezert et al. 2010) :

- de dissocier la représentation de l'évaluation imparfaite de chaque critère selon une unité spécifique de son traitement postérieur pour une décision dans un FoD commun ;
- de considérer les sources multiples et inégalement fiables d'évaluation de chaque critère ;
- de considérer l'importance des critères dans le processus d'évaluation.

Les *limites* suivantes peuvent être constatées.

- Pour chaque A_i , les éléments focaux de la BBA finale $m_i^\Theta(\cdot)$ (figure II.12) sur laquelle repose la décision finale ne représentent pas l'ignorance partielle pourtant possible. Seule la connaissance précise et l'ignorance totale sont représentées.
- Chaque A_i est évaluée en choisissant un élément $\hat{\theta}(A_i) \in \Theta$, $e = 1, \dots, n$. Le même $\hat{\theta}$ peut être choisi pour plusieurs alternatives : par exemple, sur la figure II.12, $\hat{\theta}(A_1) = \hat{\theta}(A_2) = \theta_2$. Même si elle s'appuie sur l'AHP, ER-MCDA ne permet pas de classer les alternatives de \mathcal{A} pour choisir la meilleure A_{i^*} , mais répond à un problème de tri.
- La décision finale repose sur le choix d'une règle de décision pour une attitude du décideur donnée. La qualité de cette décision n'est pas analysée. Par exemple, sur la figure II.12, si la décision est la même, la qualité de celle prise pour A_2 est meilleure que celle pour A_1 .

• Soft Electre Tri (SET) : amélioration d'Electre Tri (ET) pour trier

La méthode SET (Dezert et Tacnet 2012b) est une extension de la méthode Electre Tri (ET) (Yu 1992) pour aider au tri multicritère (figure II.3, p. 68). Elle se divise en cinq étapes synthétisées ci-dessous (détails en Annexe F.3).

1) Le problème de décision est formalisé en identifiant les alternatives $A_i \in \mathcal{A}$, les critères $g_j \in \mathcal{G}$, le vecteur des coefficients d'importance \mathbf{w} correspondant et les classes C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$ d'affectation potentielles pour le tri. Chaque classe est bornée par une limite basse b_{h-1} et une limite haute b_h . Comme pour ET, les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$ modélisent les préférences du décideur par une relation de surclassement pour chaque critère g_j (Annexe E.1).

L'évaluation x_{ij} de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$ est précise. La matrice \mathbf{S} (p. 51) est donc disponible.

2) Pour chaque critère g_j , les indices locaux de concordance $c_j(A_i, b_h)$ (resp. $c_j(b_h, A_i)$), de discordance $d_j(A_i, b_h)$ (resp. $d_j(b_h, A_i)$) et d'incertitude $u_j(A_i, b_h)$ (resp. $u_j(b_h, A_i)$) sur l'hypothèse « A_i est au moins aussi bonne que le profil b_h » (resp. « b_h est au moins aussi bonne que le profil A_i »).

sont établis. Chacun des indices est une masse affectée à un élément focal pour le FoD $\Theta = \{c, \bar{c}\}$ où c est la cohérence avec l'hypothèse formulée. Pour chaque hypothèse, les trois indices établissent la fonction de masse $m_{j,ih}^\Theta(\cdot)$ (resp. $m_{j,hi}^\Theta(\cdot)$).

3) Par combinaison selon la règle de fusion PCR6 $_{\emptyset}$, les indices globaux de concordance $c(A_i, b_h)$ et $c(b_h, A_i)$, de discordance $d(A_i, b_h)$ et $d(b_h, A_i)$ et d'incertitude $u(A_i, b_h)$ et $u(b_h, A_i)$ sont calculés pour chaque alternative A_i et chaque limite b_h .

4) Sur cette base, la probabilité que A_i surclasse b_h , notée P_{ih} est établie. Réciproquement, la probabilité que b_h surclasse A_i est établie par $P_{hi} = 1 - P_{ih}$.

5) Finalement, les séquences $Se_o(A_i)$, $o = 1, \dots, o_{\text{tot}}$ de surclassement de chaque A_i par rapport à toutes les bornes b_h , $h = 0, \dots, h_{\text{tot}}$ sont établies de manière logique. La probabilité de chacune est calculée et notée $P(Se_o(A_i))$. La probabilité $P(A_i \rightarrow C_h)$ d'affecter chaque A_i à chaque classe C_h en est déduite ainsi que la probabilité de ne pas faire de choix cohérent, notée $\delta_i \triangleq P(A_i \rightarrow \emptyset)$.

Les *améliorations* apportées à la méthode SET sont les suivantes.

- Un niveau de confiance est associé à l'affectation de chaque A_i dans chaque classe C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$, définie par ses limites basse (b_{h-1}) et haute (b_h).
- Elle élimine les problèmes liés aux choix d'un seuil de coupe λ et d'une attitude du décideur (Annexe E.4, étapes 3 et 4 de ET).

Des *limites* à la méthode SET peuvent être constatées.

- Comme Electre Tri (ET), cette méthode ne tient pas compte de l'imperfection de l'évaluation des critères pouvant provenir de plusieurs sources.
- Le nombre de combinaisons de BBAs à réaliser se multiplie avec le nombre d'alternatives à classer, le nombre de critères à prendre en compte et le nombre de classes d'affectation possibles. Cela peut conduire à une explosion combinatoire.

• BF-TOPSIS : nouvelles AMC plus robustes au renversement de rang

Étant donné un problème multicritère classique formalisé par la matrice de score \mathbf{S} (p. 51), les méthodes d'AMC par agrégation totale aident à classer, selon un préordre total, l'ensemble des alternatives A_i , $i = 1, \dots, M$ selon les critères g_j , $j = 1, \dots, N$. Cependant, ces méthodes sont soumises au problème de renversement de rang (défini en p. 66). Une des causes connues est l'étape de normalisation de ces méthodes d'AMC (Shin et al. 2013 ; Wang et Luo 2009).

La méthode d'estimation du vecteur d'ordonnancement (*estimator ranking vector* en anglais) (ERV) a été proposée par Yin et al. (2013) pour s'affranchir de l'étape de normalisation définie comme à l'origine de ce problème, mais elle reste soumise au problème de renversement de rang. Les quatre méthodes BF-TOPSIS ont été développées par Dezert et al. (2016c) en s'inspirant de l'ERV et de TOPSIS (Annexe E.3) pour éliminer l'étape de normalisation. Pour cela, elles s'appuient sur la comparaison de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ avec deux solutions de référence « la meilleure » et « la pire ». Les quatre méthodes BF-TOPSIS reposent sur une étape préalable commune puis sur des étapes qui leur sont propre (détails en Annexe F.4).

1. L' *étape commune* consiste à transformer la matrice de score initiale \mathcal{S} en une matrice de BBAs $\mathbf{M}^A = [m_{ij}^A(\cdot)]$, dont le FoD est l'ensemble \mathcal{A} . La BBA $m_{ij}^A(\cdot)$ est établie pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ et chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$. Elle représente l'imperfection de la connaissance sur la place de chaque A_i dans l'ordonnancement selon chaque g_j .

2. Les *quatre méthodes BF-TOPSIS1 à 4* se différencient ensuite par la technique de traitement de la matrice \mathbf{M}^A . Comme pour la méthode classique TOPSIS (p. 66), leur résultat final est le calcul de la proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}}) \in [0, 1]$ de chaque alternative A_i avec la solution idéalement la meilleure A^{best} . Le classement des alternatives de \mathcal{A} se fait dans l'ordre décroissant de la valeur de $C(A_i, A^{\text{best}})$. La meilleure alternative A_{i^*} est celle pour laquelle la proximité relative est la plus importante.

L' *amélioration* principale apportée est une meilleure robustesse au phénomène de renversement de rang, pour des problèmes de classement, que les AMC classiques pour un préordre total (AHP, MAUT, etc.). Ceci a été vérifié sur des cas d'exemples théoriques issus de la littérature. Dans leur développement, Dezert et al. (2016c) ont montré que ces méthodes étaient de plus en plus robustes depuis BF-TOPSIS1 à BF-TOPSIS4.

Leur *limite* majeure est la complexité calculatoire qui augmente depuis BF-TOPSIS1 à BF-TOPSIS4, c'est à dire avec leur robustesse au phénomène de renversement de rang. Par ailleurs, ces méthodes très récentes n'ont jamais été appliquées à un cas d'application concret.

II.3.3.3 Aide à la décision dans l'incertain basée sur le Raisonnement Évidentiel

L'ordonnancement selon une moyenne pondérée (*Ordered Weighted Averaging* en anglais) (OWA) a été proposé par Yager (2008) pour aider à décider en environnement incertain pour un problème de décision formalisé par la matrice \mathbf{C} (p. 59). Cette méthode s'appuie sur le Raisonnement Évidentiel (ER) pour représenter la connaissance sur les états de la nature. La méthode OWA prudente selon le ER (*Cautious OWA with Evidential Reasoning* en anglais) (COWA-ER) a ensuite été proposée par Tacnet et Dezert (2011). Elle associe de manière prudente les principes de l'OWA avec les règles de fusion, notamment la PCR6 (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015). La méthode de COWA-ER floue (*Fuzzy COWA-ER* en anglais) (FCOWA-ER) de Han et al. (2012) est une version modifiée de COWA-ER qui utilise les ensembles flous, améliore les performances de COWA-ER et réduit le temps de calcul. Dans cette section, les basiques de OWA sont d'abord rappelées puis les principes de COWA-ER et FCOWA-ER sont introduits.

- **OWA : décider selon une attitude du décideur**

Étant donnée la matrice $\mathbf{C} = [C_{ik}]$, $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, K$ (p. 59), le problème de décision est de choisir $A_{i^*} \in \mathcal{A}$ pour maximiser les gains (ou minimiser les pertes). Pour l'explication de la méthode qui suit, seuls les gains sont considérés. Pour rappel, le problème de décision en univers risqué est résolu en comparant les M valeurs espérées $E[C_i]$.

Pour un problème de décision sous ignorance, Yager (2008) utilise l'opérateur OWA défini par l'équation (II.40) pour moyenniser les valeurs ordonnées des gains. Cela consiste à choisir un ensemble normalisé de facteurs de pondération $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_K]$, avec $w_k \in [0, 1]$ et $\sum_k w_k = 1$. La valeur OWA notée V est calculée pour un ensemble de valeurs C_1, C_2, \dots, C_K .

$$V \triangleq \text{OWA}(C_1, C_2, \dots, C_K) = \sum_k w_k \cdot b_k \tag{II.40}$$

avec b_k la $k^{\text{ième}}$ plus grande valeur de l'ensemble C_1, C_2, \dots, C_K .

En théorie, un vecteur de pondération $\mathbf{W}_i = [w_{i1}, \dots, w_{ik}, \dots, w_{iK}]$ est établi pour chaque A_i , $i = 1, \dots, M$. Sa valeur OWA est donnée par $V_i \triangleq \text{OWA}(C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{iK}) = \sum_k w_{ik} \cdot b_{ik}$, avec b_{ik} la $k^{\text{ième}}$ plus grande valeur de l'ensemble $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{iK}$. La meilleure alternative A_{i^*} correspond à $i^* \triangleq \arg \max_i \{V_i\}$. Le choix de \mathbf{W}_i dépend de l'attitude du décideur. Une infinité d'attitudes sont possibles entre les deux extrêmes (pessimiste et optimiste). Yager propose de calculer, par un programme mathématique adapté, le meilleur vecteur \mathbf{W}_i qui correspond au choix, a priori, d'un index $\alpha \in [0, 1]$, et produisant le résultat avec la plus grande entropie.

- Le vecteur $\mathbf{W}_i^{\text{pes}} = [w_{i1}^{\text{pes}} = 0, \dots, w_{ik}^{\text{pes}} = 0, \dots, w_{iK}^{\text{pes}} = 1]$ représente une attitude pessimiste : le plus petit gain est affecté à A_i . Le plus important des plus petits gains est choisi, ce qui correspond à une stratégie du « max-min », avec $i^* = \arg \max_i (\min_k C_{ik})$.
- Le vecteur $\mathbf{W}_i^{\text{opt}} = [w_{i1}^{\text{opt}} = 1, \dots, w_{ik}^{\text{opt}} = 0, \dots, w_{iK}^{\text{opt}} = 0]$ représente une attitude optimiste : le gain le plus important est affecté à A_i . Le plus grand des plus important gains est choisi pour une stratégie du « max-max », avec $i^* = \arg \max_i (\max_k C_{ik})$.
- Soit α , le vecteur $\mathbf{W}_i^{\text{hur}} = [w_{i1}^{\text{hur}}, \dots, w_{ik}^{\text{hur}}, \dots, w_{iK}^{\text{hur}}]$, avec $w_{ik}^{\text{hur}} = \alpha w_{ik}^{\text{opt}} + (1 - \alpha) w_{ik}^{\text{pes}}$, $k = 1, \dots, K$, représente l'attitude de Hurwicz selon une moyenne pondérée entre les attitudes pessimiste et optimiste. Choisir $\alpha = 1$ correspond à une attitude optimiste.

Sous incertitude épistémique, si on considère l'ensemble des états de la nature \mathcal{S} comme le FoD, Yager représente la connaissance par une BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot) : 2^{\mathcal{S}} \rightarrow [0, 1]$. Selon la définition de $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$, chaque problème de décision (p. 59) peut être représenté par ce formalisme. Une BBA catégorique $m^{\mathcal{S}}(S_k) = 1$ correspond à une décision en environnement certain. Soit les états de la nature $s \in \mathcal{S}$, une BBA bayésienne ($m^{\mathcal{S}}(s) > 0$) représente une décision dans le risque. Une BBA vide ($m^{\mathcal{S}}(S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_K) = 1$) correspond à une décision sous ignorance totale.

La BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$ est établie selon les éléments focaux $X_r \in 2^{\mathcal{S}}$, $r = 1, \dots, s$. Pour chaque A_i , en ne considérant que les états de la nature $S_k \in X_r$, on a $M_{ir} \triangleq \{C_{ik} | S_k \in X_r\}$. Pour chaque A_i , s matrices $\mathbf{M}_r = [M_{ir}]$, $r = 1, \dots, s$ sont établies. Chacune formalise un problème de décision à résoudre en environnement incertain. La valeur correspondante $V_{ir} = \text{OWA}(\mathbf{M}_{ir})$ est alors calculée selon une attitude du décideur choisie a priori. Pour chaque A_i , l'équation (II.41) permet d'établir ainsi la valeur espérée généralisée des gains C_i . La meilleure alternative A_{i^*} est définie par $i^* \triangleq \arg \max_i \{C_i\}$.

$$C_i = \sum_{r=1}^s m^{\mathcal{S}}(X_r) V_{ir} \quad (\text{II.41})$$

Le principe de cette méthode est simple. Cependant, sa mise en œuvre nécessite un temps de calcul important notamment si une attitude particulière doit être calculée et que le FoD \mathcal{S} est de grande dimension.

• COWA-ER : décider selon l'imprécision de la valeur espérée

L'approche OWA de Yager (2008) est basée sur la définition d'une attitude mesurée par un niveau d'optimisme $\alpha \in [0, 1]$ pour obtenir le vecteur \mathbf{W}_i . Si elle n'est pas connue, la définition de cette attitude est un problème pratique. Une première réponse rationnelle a été proposée par la méthode COWA-ER (Tacnet et Dezert 2011). Pour chaque A_i , seuls les résultats des deux attitudes extrêmes (OWA pessimiste et optimiste) sont retenus de manière conjointe. Le calcul de \mathbf{W}_i n'est plus nécessaire. La décision en univers incertain se base alors sur les M évaluations imprécises (ou intervalles) des valeurs espérées des gains, regroupées dans le vecteur $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ de dimension M (équation (II.42)).

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}] \triangleq \begin{bmatrix} [C_1^{\min}, C_1^{\max}] \\ [C_2^{\min}, C_2^{\max}] \\ \vdots \\ [C_M^{\min}, C_M^{\max}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Sur cette base, COWA-ER se divise en quatre étapes.

- 1) Toutes les valeurs de $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ sont normalisées par la valeur maximale de la matrice.
- 2) Soit l'ensemble $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_i, \dots, A_M\}$ le FoD de la décision, l'évaluation imprécise normalisée de chaque A_i est convertie dans une BBA élémentaire $m_i^A(\cdot)$, $i = 1, \dots, M$.
- 3) Les M BBAs sont ensuite combinées, selon la règle de fusion PCR6 par exemple.
- 4) Les M alternatives A_i sont finalement comparées en choisissant une règle de décision adaptée.

Cependant, COWA-ER présente *deux limites* majeures. La première est que le temps de calcul nécessaire pour réaliser toutes les étapes de fusion augmente significativement avec le nombre M d'alternatives. La seconde est que les BBAs sont établies de manière jointe par la méthode de normalisation. De fait, les sources d'informations sont corrélées entraînant des problèmes pour leur combinaison (Han et al. 2012).

• FCOWA-ER : amélioration technique de COWA-ER

FCOWA-ER a alors été développée par Han et al. (2012) pour pallier aux deux inconvénients précédents, également selon quatre étapes (détails en Annexe F.5).

- 1) Pour chaque colonne, les valeurs de $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ sont normalisées par la valeur maximale de la colonne. La matrice normalisée obtenue est notée $\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}]$.
- 2) Deux BBAs $m_{\text{Pess}}^A(\cdot)$ et $m_{\text{Opti}}^A(\cdot)$ sont obtenues à partir d'une approche par α -coupes, pour chacune des deux colonnes de la matrice normalisée $\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}]$. Ce sont des supports consonants (emboîtés).
- 3) Les deux BBAs sont combinées selon la règle de fusion PCR6.
- 4) Pour retenir la meilleure alternative $A_{i^*} \in \mathcal{A}$, une règle de décision doit alors être choisie parmi les équations (II.37-II.39) (p. 91) selon l'attitude du décideur à représenter.

Les *améliorations* de cette approche sont de représenter la connaissance sur les états de la nature \mathcal{S} par une BBA et non des probabilités subjectives, en s'appuyant sur l'OWA de Yager (2008). La construction des deux BBAs est indépendante ce qui permet de les combiner. Une seule étape de fusion est alors nécessaire, ce qui réduit notablement la complexité calculatoire par rapport à COWA-ER.

Sa *limite* est qu'elle n'a pas été appliquée au domaine des risques naturels.

Pour répondre aux limites des méthodes classiques d'aide à la décision (p. 72), des méthodes d'aide multicritère à la décision et d'aide à la décision (AD) dans l'incertain ont été développées dans le cadre du Raisonnement Évidentiel. Pour des problèmes d'évaluation (choix de $\hat{\theta}(A_i)$) selon plusieurs critères, ER-MCDA prend en compte l'imperfection de l'évaluation des critères. SET simplifie la décision de tri (P_β) dans ET. Les méthodes BF-TOPSIS permettent une meilleure robustesse au renversement de rang pour classer (P_γ) et choisir (P_α). La méthode FCOWA-ER améliore OWA pour l'AD en univers incertain, selon des problématiques P_γ et P_α .

II.3.4 Vers l'adaptation et l'amélioration des méthodes avancées d'aide à la décision

Les formalismes de la logique floue et du Raisonnement Évidentiel ont été étudiés pour vérifier leur capacité à représenter les différentes formes d'imperfection, à combiner différentes sources d'informations inégalement fiables, à être intégrés dans des modèles pour aider à décider selon plusieurs critères et en univers incertain.

II.3.4.1 Association des formalismes pour représenter l'imperfection

À partir d'une distribution de possibilité $\pi : X \rightarrow [0, 1]$, l'extraction d'une BBA $m^X(\cdot)$ sur le FoD X par α -coupes est possible (figure II.9, p. 82). Comme l'a proposé Curt (2008), plusieurs sources d'évaluation des indicateurs d'un système à base de règles peuvent alors être combinées. Cependant, la propagation d'une BBA dans un système à base de règles étant complexe, une transformation inverse permet d'appliquer ensuite le principe d'extension de Zadeh (1965).

Malgré cette complexité, la propagation des BBAs obtenues pour chaque indicateur est possible dans un système à base de règles. Par ailleurs, les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel améliorent les AMC et l'aide à la décision dans l'incertain. De fait, le choix de représenter l'imperfection de l'évaluation initiale sur X par une distribution de possibilité puis de la transformer en BBA est retenu.

Cependant, la méthode basée sur l' α -coupe conduit à une BBA sur le FoD X qui peut être de dimension importante ($n = 10$ dans le domaine des ouvrages hydrauliques), complexifiant ensuite les calculs de fusion. La pratique experte, d'évaluation qualitative, diminue la dimension du FoD $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ avec $n = 3$ en Autriche ou $n = 4$ à 5 en France (p. 37).

Dans ce but, sur la base de la connaissance d'un « modèle de transposition » établi selon n ensembles flous $\mu_{\theta_e} : X \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$, une BBA $m^\Theta(\cdot)$ peut être extraite à partir d'une distribution de possibilité (Tacnet 2009). Malgré tout, la méthode de transposition actuelle, utilisée dans ER-MCDA, doit être améliorée pour pouvoir obtenir une BBA non bayésienne. Au même titre que pour la définition des fonctions d'utilité, ou des seuils de préférence, d'indifférence et de veto, une méthode d'aide à la construction du « modèle de transposition », représentant les préférences du décideur sur l'évaluation dans Θ , doit être proposée (Tacnet 2009).

II.3.4.2 Limites des méthodes en Raisonnement Évidentiel

- Les *règles de décision* à partir d'une BBA (p. 91), sont basées sur sa transformation dans une fonction ($\text{Bel}(\cdot)$, $\text{Pl}(\cdot)$, $\text{P}(\cdot)$) qui transforme l'information disponible. De fait, elles ne permettent pas de caractériser la qualité de la décision. Une amélioration en ce sens doit être proposée.

- L' *adaptation* des méthodes d'aide à la décision (AD) basées sur le Raisonnement Évidentiel reste à mener pour évaluer l'efficacité des mesures de protection torrentielle.

1. Selon le FoD $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$, ER-MCDA représente l'imperfection de l'évaluation x_{ij} , de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque critère g_j , par la matrice de BBAs $\mathbf{M}^\Theta = [m_{ij}^\Theta(\cdot)]$. Appliquée initialement pour évaluer la sensibilité des sites soumis aux avalanches de neige (Tacnet 2009), elle a été améliorée depuis dans la prise en compte de l'importance des critères (Tacnet et al. 2011b).

- La méthode Soft Electre Tri (SET) améliore la méthode Electre Tri (ET) classique pour répondre à des problèmes multicritères de tri selon $\mathbf{S} = [x_{ij}]$ (p. 60) (figure II.13). Au même titre que ET, elle répond au problème expert de tri dans des classes qualitatives. Son intérêt réside dans la représentation de la préférence du décideur par une BBA (étape SET-2), permettant une affectation finale probabilisée. Limitée à une matrice de scores précis, elle n'a jamais été appliquée à des problèmes de décision réels.
- Les méthodes BF-TOPSIS permettent d'améliorer les méthodes d'AMC classiques en étant plus robustes aux problèmes de renversement de rang pour choisir la meilleure alternative $A_{i^*} \in \mathcal{A}$, pour un problème multicritère formalisé selon $\mathbf{S} = [x_{ij}]$. Ces nouvelles méthodes n'ont cependant jamais été appliquées à des problèmes réels.

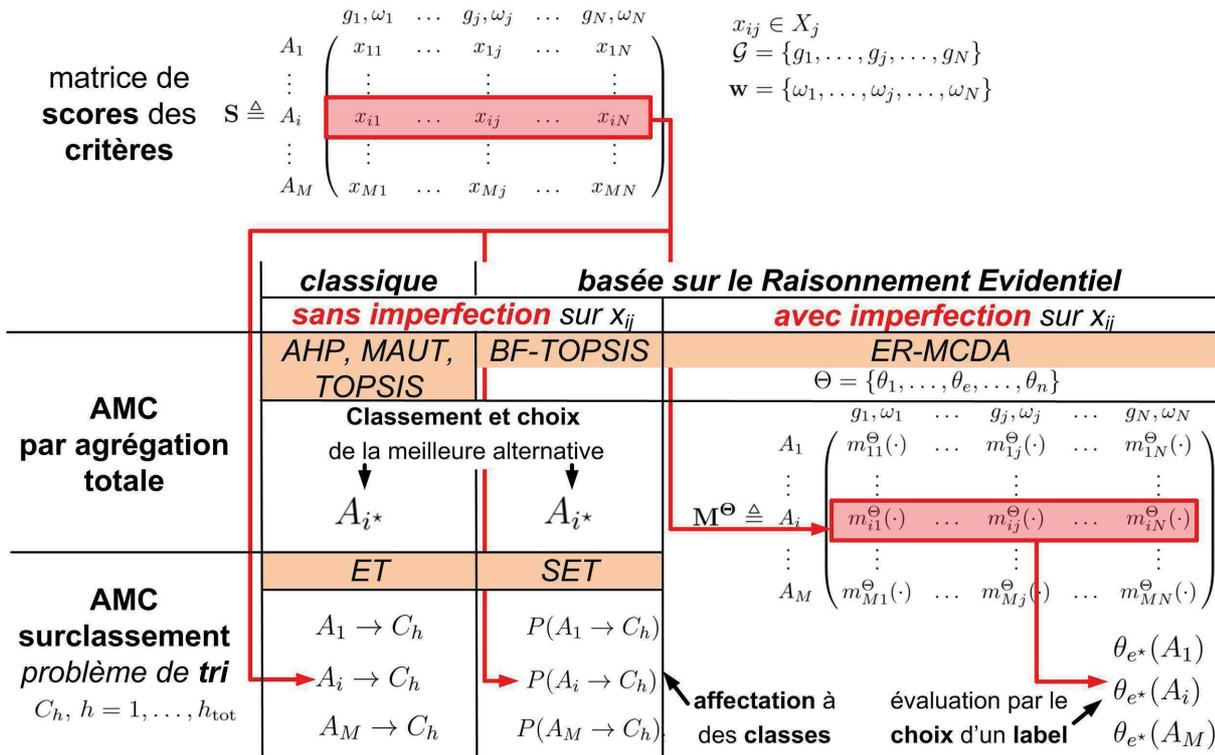


FIGURE II.13 – Comparaison du principe général des méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) classiques et basées sur le Raisonnement Évidentiel (ER).

- La méthode FCOWA-ER est la plus avancée pour aider à décider dans l'incertain, selon le formalisme de la matrice \mathbf{C} (p. 59). Son principe général est comparé avec celui de la théorie de la décision classique dans la figure II.14. La connaissance sur les états de la nature $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$ est représentée par une BBA $m^S(\cdot)$, permettant de traiter toutes les formes d'imperfection relatives à cette connaissance. Étant donnée la connaissance limitée des états de la nature liés aux phénomènes torrentiels, cette méthode est candidate. Cependant, elle n'a jamais été appliquée dans le domaine des risques naturels.

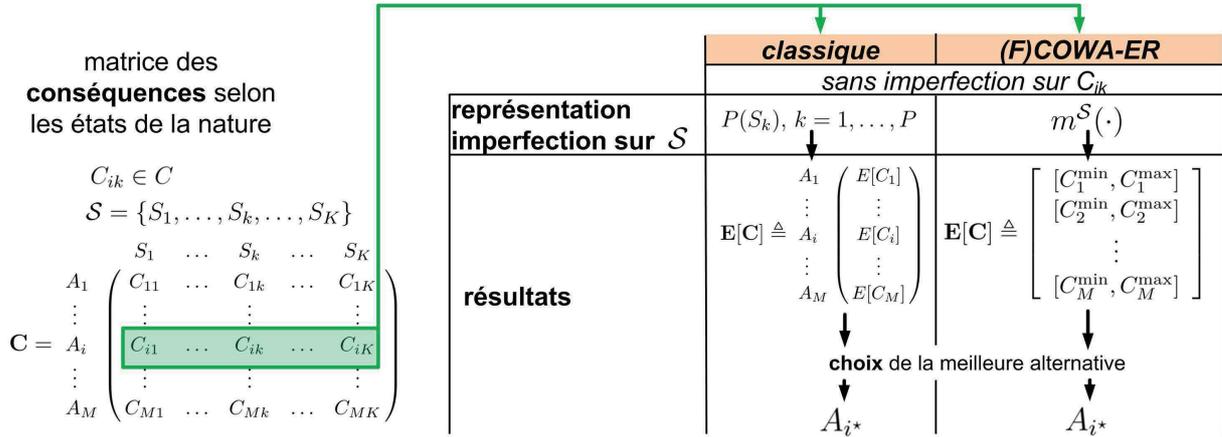


FIGURE II.14 – Comparaison des méthodes d'aide à la décision dans l'incertain : classique et (F)COWA-ER.

- L'association des méthodes est à envisager. La méthode ER-MCDA permet d'évaluer chaque A_i , $i = 1, \dots, M$, en choisissant un élément $\hat{\theta}(A_i) \in \Theta$, $e = 1, \dots, n$. Dans ce cas, le même θ_{e^*} peut être choisi pour plusieurs alternatives de \mathcal{A} . Au même titre que les méthodes ET ou SET répondant à la problématique de tri, ER-MCDA ne permet pas de classer toutes les alternatives de \mathcal{A} pour choisir la meilleure A_{i^*} .

Les méthodes BF-TOPSIS seraient les plus performantes pour aider à atteindre cet objectif, mais nécessitent d'adopter une approche constructive pour formuler le problème en amont. Par ailleurs, elles aident à décider, comme SET, selon une matrice de scores précis \mathbf{S} . De même, FCOWA-ER aide à décider pour une matrice \mathbf{C} de conséquences évaluées précisément.

Synthèse de la section II.3

Les distributions de possibilité sont adaptées pour propager les évaluations imprécises et incertaines des indicateurs dans les systèmes à base de règles. Cependant, elles ne répondent pas aux problèmes de combinaison de sources inégalement fiables, de celle de critères inégalement importants selon les AMC ni d'aide à décider en univers incertain.

Des méthodes ont été développées dans le Raisonnement Évidentiel pour cela. Cependant, elles sont d'un abord complexe et n'ont pas été appliquées à des problèmes de décision réels.

Des développements doivent améliorer la méthode de transposition, l'évaluation de la qualité d'une décision à partir d'une BBA, le classement des alternatives selon les problèmes d'AMC ou d'aide à la décision dans l'incertain selon des évaluations initiales imparfaites.

II.4 Hypothèses de recherche et méthodologie

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection torrentielle est multi-échelle et multi-composante. Ce concept d'efficacité n'est pas clairement défini en pratique : les problèmes de décision qui y sont liés sont finalement assez mal explicités. L'évaluation repose sur celle de plusieurs indicateurs et critères. Les informations fournies peuvent être entachées d'imperfection et fournies par plusieurs sources. L'environnement des phénomènes torrentiels implique une connaissance sur les états de la nature limitée et une évaluation en environnement incertain.

Cette section analyse si les méthodes d'aide à la décision classique ou celles basées sur le Raisonnement Évidentiel et les méthodes de la sûreté de fonctionnement peuvent aider à évaluer l'efficacité étant donné ces différents problèmes.

II.4.1 Processus intégré d'aide à la décision basée sur le Raisonnement Évidentiel

Les problèmes de décision étant mal formulés, seule une approche constructive (Tsoukiàs 2006) basée sur un processus d'aide à la décision peut aider à décider dans ce contexte (p. 59). La démarche envisagée consiste alors à décrire le contexte de décision, formuler les problèmes d'évaluation de l'efficacité selon les différentes échelles de mesures et composantes, les modéliser en tenant compte de l'imperfection de l'information puis à valider ces évaluations.

II.4.1.1 Description historique et décomposition systémique

La première étape du processus d'aide à la décision est de décrire le contexte de décision. Cela renvoie au problème identifié de définition des objectifs et fonctions des mesures. La méthode « 5WH » permet cette description mais pour une décision à un moment donné (Tacnet 2012). Dans le cadre de cette thèse, les contextes de décision précédents ont conditionné les objectifs donnés aux mesures dont l'efficacité est à évaluer aujourd'hui. La méthode doit donc être développée pour permettre une description qui intègre l'évolution dans le temps.

Les concepts de fiabilité ou de sécurité utilisés dans la sûreté de fonctionnement (SdF) (p.77) correspondent en partie à ceux associés en pratique à l'efficacité. Cependant les autres « concepts métiers » doivent leur être associés de manière explicite.

La modélisation systémique est appliquée aux ouvrages de protection contre les inondations mais reste à adapter à ceux contre les risques torrentiels. La décomposition multi-échelle doit tenir compte de l'importance des composants définie par Birnbaum (1968).

La réalisation successive d'une analyse fonctionnelle (AF) par la méthode APTE et d'une analyse des modes de défaillance (AMDE) aide à identifier les indicateurs et à construire des systèmes à base de règles (Curt 2008 ; Vuillet 2012). Par contre, les méthodes de définition des scénarios de défaillance comme le nœud papillon préparent une analyse de risque selon une approche probabiliste (Peyras et al. 2010 ; Tourment et al. 2014). Devant les limites d'application au contexte torrentiel de ce cadre, ces méthodes ne sont pas retenues.

Le développement de ces méthodes est long car basé sur de nombreux groupes de travail pour éliciter l'expertise (Curt 2008). Au vu du nombre important de problèmes identifiés dans le cadre de cette thèse (p. 45), seule la vérification de leur applicabilité peut être envisagée pour un type d'ouvrages selon un mode de défaillance donné, mais en développant une analyse multi-échelle.

II.4.1.2 Agrégation multicritère : adaptable à l'évaluation de l'efficacité ?

L'évaluation de l'efficacité repose sur trois composantes : structurale, fonctionnelle et socio-économique (figure I.29, p. 46). Les deux premières sont des composantes techniques. Les modèles d'aide multicritère à la décision peuvent-ils être adaptés pour aider ces différentes évaluations ?

- **Évaluation technique : des systèmes à base de règles insuffisant**

Pour un système à évaluer A_i , $i = 1, \dots, M$, les systèmes à base de règles sont retenus pour agréger les évaluations $y_{il} \in Y_l$ des indicateurs $I_l \in \mathcal{I}$, $l = 1, \dots, L$ (p. 70). Ils sont appliqués pour évaluer la performance d'un ouvrage selon chaque mode de défaillance : rupture par érosion interne, par affouillement, par surverse, par glissement aval. L'évaluation globale tenant compte de celles de plusieurs modes de défaillances n'est par contre pas proposée (Vuillet 2012).

Les AMC basées sur l'élicitation des préférences entre les critères g_j , $j = 1, \dots, N$ par le vecteur $\mathbf{w} = \{\omega_1, \dots, \omega_N\}$ aident à décider pour des problèmes formalisés par la matrice $\mathbf{S} = [x_{ij}]$. Pour chaque A_i , l'évaluation x_{ij} dépend de celles des attributs (ou indicateurs) y_{il} , $l = 1, \dots, L$ (p. 51).

L'évaluation de la performance globale d'un système dépend de la combinaison de celles selon plusieurs modes de défaillance. Soit des règles d'agrégation logique sont proposées, soit chaque performance individuelle est considérée comme un critère g_j dont il faut établir le poids ω_j .

- **Aide multicritère à la décision (AMC) pour l'évaluation économique**

La composante socio-économique de l'efficacité est liée à la réduction du risque, l'efficience intégrant le coût. La théorie de la décision rationnelle se limite à un problème monocritère économique. Si d'autres critères liés aux dommages intangibles sont identifiés (CGDD 2014), la modélisation multicritère (AMC) du problème doit être envisagée.

Le choix de l'AMC dépend de la problématique de décision. Si le problème est l'évaluation de l'efficacité de chaque alternative A_i à réduire le risque selon des classes qualitatives (P_β), les méthodes Electre Tri (ET), Soft Electre Tri (SET) ou ER-MCDA sont candidates. Si le problème est le classement (P_γ) ou le choix (P_α) de toutes les $A_i \in \mathcal{A}$, les méthodes d'agrégation totale seront privilégiées (AHP, TOPSIS, BF-TOPSIS).

Dans tous les cas, une méthode d'élicitation du poids \mathbf{w} doit être mise en œuvre dans le cadre d'une approche constructive. Celle de Saaty (1980) a été retenue malgré ses limites (p. 70) car elle peut être facilement appréhendée en pratique.

II.4.1.3 Aider à décider en contexte d'information imparfaite : le Raisonnement Évidentiel peut-il s'adapter ?

Le cadre théorique du Raisonnement Évidentiel est retenu car il étend ceux des probabilités et de la logique floue. Il permet de tenir des différentes formes d'imperfection de l'information et de combiner celles fournies par plusieurs sources. Son adaptation au domaine des risques naturels et l'amélioration des méthodes associées doivent être proposées.

- **Des méthodes de construction des BBAs et de décision à améliorer**

La construction des BBAs peut s'appuyer sur la définition préalable d'une distribution de possibilités et d'ensembles flous du « modèle de transposition ». Celui-ci doit cependant être amélioré pour tenir compte de toute l'information disponible (section II.3.4.1, p. 98).

La fusion d'information permet de prendre en compte des sources inégalement fiables et combiner des critères d'importance différentes dans les AMC. La règle de fusion PCR6 est retenue pour l'ensemble des calculs de cette thèse car la plus performante (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015) (Vol. 3). Ce cadre permet d'aider à décider même si le processus de décision actuel doit être amélioré pour évaluer la qualité de la décision prise (section II.3.4.2, p. 98).

• **Des méthodes théoriques existantes restant à adapter et associer**

Ces méthodes se limitent à certains aspects de la propagation de l'imperfection de l'information. ER-MCDA prend en compte l'imperfection de la mesure et de la préférence mais ne permet pas de classer. SET permet de trier en tenant compte du vague de la préférence. BF-TOPSIS classe les alternatives par rapport à des solutions idéales fictives, mais elles se basent sur des scores précis des critères, tout comme FCOWA-ER. L'association de ces différentes méthodes doit être proposée.

Dans un cadre probabiliste, l'aide multicritère à la décision dans l'incertain passe par le calcul de la valeur espérée de l'évaluation d'une alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon un critère g_j , $j = 1, \dots, N$, étant donnés les états de la nature $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$. Cette valeur espérée est ensuite considérée comme le score x_{ij} de l'alternative selon un critère donné, dans la matrice de formalisation du problème multicritère $\mathbf{S} = [x_{ij}]$. Cette approche a été proposée pour évaluer l'efficacité socio-économique des mesures de protection (CGDD 2014). Pour chaque alternative, le risque est calculé comme la valeur espérée des dommages pour une unité X_j d'évaluation donnée (nombre d'habitations, nombre de sites dangereux pour l'environnement, etc.).

Une autre approche pourrait consister à évaluer chaque critère g_j selon chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}$ et à réaliser une AMC d'agrégation totale pour obtenir une évaluation de la conséquence selon chacun de ces scénarios dans la matrice $\mathbf{C} = [C_{ik}]$. Les méthodes d'aide à la décision en univers incertain, selon la connaissance sur \mathcal{S} , pourraient ensuite être appliquées. Ces deux approches doivent être envisagées.

II.4.1.4 Une validation nécessaire : vers l'établissement d'une référence

Des études de sensibilité aux paramètres des modèles d'aide à la décision sont généralement proposées comme processus de validation (section II.1.4.4, p. 25). Pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$, la combinaison des systèmes à base de règles et des méthodes d'AD basées sur le ER doit permettre d'intégrer l'imperfection de l'évaluation des indicateurs ($y_{il} \in Y_l$, $l = 1, \dots, L$), des critères ($x_{ij} \in X_j$, $j = 1, \dots, N$), des états de la nature (S_k , $k = 1, \dots, K$) et des conséquences ($C_{ik} \in C$).

Selon le détail déjà établi (p. 25), les paramètres restant à analyser sont alors ceux de la modélisation de la structure de préférences du décideur : $\mathbf{w} = \{\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_N\}$ pour celles entre critères, $u(x_{ij}) : X_j \rightarrow [0, 1]$ pour l'utilité, $p_j(b_h) \in X_j$, $q_j(b_h) \in X_j$ et $v_j(b_h) \in X_j$ pour le surclassement, $\mu_{\theta_e} : X_j \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$ pour le « modèle de transposition ». Dans une approche constructive, ce modèle est établi pour chaque problème spécifique (Tsoukiàs 2006). L'analyse de la sensibilité à la subjectivité du décideur est alors discutable comme processus de validation d'une décision dépendant de sa définition : elle n'est pas retenue.

Une référence extérieure, comme des essais en laboratoire, peut servir de validation (Bambara 2016). Les modalités de conception des mesures de protection sont connues (p. 22) et constituent donc une référence. Elles reposent sur des hypothèses dont la connaissance est imparfaite. L'aide à la construction des modèles de préférence, s'appuyant sur la connaissance disponible, doit être développée comme processus de validation.

II.4.1.5 Intégration multi-temporelle et multi-échelle

La décomposition en sous-problèmes de décision concerne les différentes composantes de l'efficacité et échelles de mesures de protection. Leurs résolutions indépendantes par des modèles adaptées d'aide à la décision tenant compte de l'imperfection de l'information doivent être intégrées dans un problème de décision global également à formaliser. Dans ce cadre, la résolution des problèmes indépendants peut se faire de manière successive. Une telle méthodologie reste à développer.

II.4.2 Définition des hypothèses de recherche

L'analyse du contexte de l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection a mis en évidence les problèmes à traiter (p. 45). Ils sont illustrés sur la figure II.15 et synthétisés dans les deux premières colonnes du tableau II.5. Les objectifs et fonctions des ouvrages (micro-échelle) et dispositifs (mésos-échelle) doivent être établis. Leur effet à réduire l'aléa conditionne cette définition à l'échelle du bassin d'enjeux (macro-échelle). Des défaillances au micro-échelle peuvent avoir des conséquences à la méso-échelle puis à la macro-échelle. La question de l'efficacité structurale et fonctionnelle des mesures est alors posée. L'évaluation doit alors être intégrée à l'échelle du bassin d'enjeux pour évaluer leur efficacité et leur efficacité socio-économique à réduire les risques.

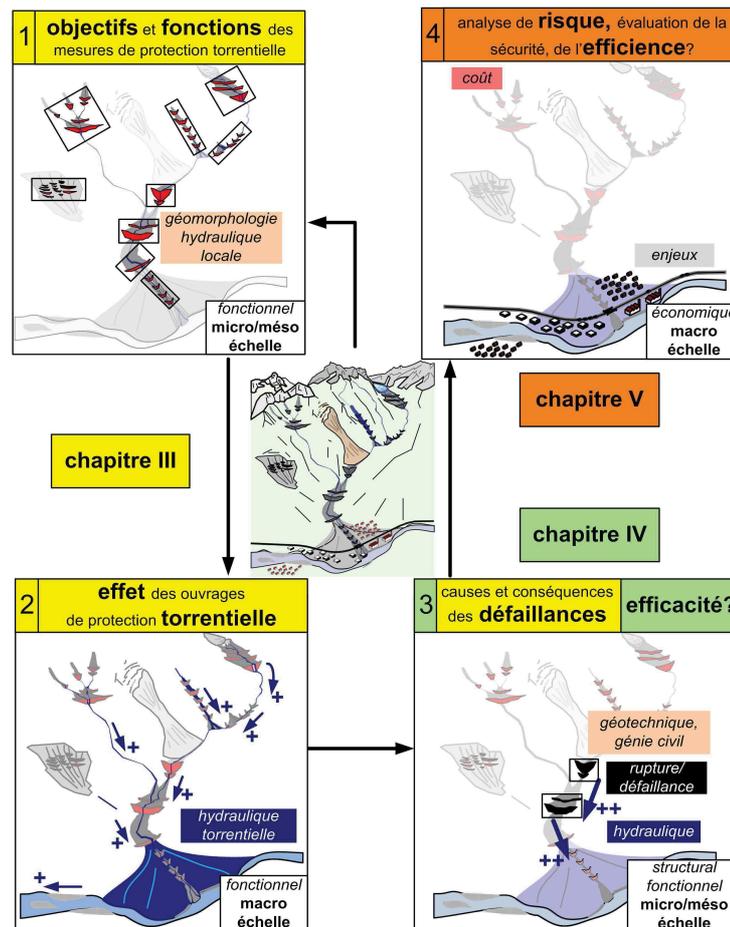


FIGURE II.15 – De la formalisation de sous-problèmes décomposés à leur traitement par des modèles AMC et d'AD dans l'incertain, adapté de Piton et al. (2016).

Pour répondre à cette problématique multi-échelle et multi-composante dans un contexte d'imperfection de l'information, les méthodes listées dans le tableau II.5 ont été retenues.

Problèmes (p. 45)		Hypothèses	
N ^o	Intitulé	N ^o	Méthodes retenues
1.a)	concept d'efficacité	2.	SdF et « concepts métiers »
1.b)	objectifs et fonctions	1.	approche historique basée sur « 5WH »
1.c)	formalisation multi-composante et multi-échelle	3.	SdF
1.d)	identification des indicateurs et combinaison	3.	modélisation systémique
	identification des critères et combinaison	4.	SdF (AF, AMDE, arbre des causes)
2.a)	combinaison des sources	5.	systèmes à base de règles
	représentation de l'imperfection	4.	SdF (AF, AMDE, arbre des causes)
2.b)	représentation de l'imperfection	5.	méthodes AMC
2.c)	propagation et qualité de la décision	6.	méthodes AMC basées sur le ER
	décision dans l'incertain	7.	méthode de transposition
3.a)	validation	6.	méthodes AMC basées sur le ER
3.b)	intégration	8.	décision dans le ER
		9.	FCOWA-ER
		10.	une référence
		11.	association des méthodes d'AD dans le ER
		12.	méthodologie d'AD multi-temporelle et multi-échelle

TABLEAU II.5 – Tableau de correspondance entre problèmes (p. 45), hypothèses et méthodes retenues.

Cependant, ces méthodes présentent des limites et leur développement pour évaluer l'efficacité des mesures de protection torrentielle repose sur les hypothèses suivantes :

1. La description de l'évolution du contexte de décision par une approche historique peut permettre de préciser les objectifs et fonctions donnés aux mesures de protection existantes.
2. Une approche systémique et le formalisme de la SdF peuvent aider à clarifier le concept d'efficacité et préciser les composantes à évaluer.
3. La modélisation systémique peut aider à décomposer le problème en « sous-problèmes » de décision selon chaque échelle de mesure de protection.
4. Les méthodes de la SdF peuvent aider à identifier les indicateurs et critères à prendre en compte pour chaque « sous-problème » de décision.
5. Les systèmes à base de règles aident à évaluer un critère à partir de plusieurs indicateurs tandis que les AMC aident à décider selon plusieurs critères et les préférences du décideur.
6. Les AMC basées sur le ER (ER-MCDA, SET, BF-TOPSIS) peuvent être adaptées aux différents « sous-problèmes » de décision.
7. La méthode de transposition d'une distribution de possibilité $\pi : X \rightarrow [0, 1]$ à une BBA sur le FoD Θ peut être améliorée pour mieux représenter la connaissance disponible.
8. La qualité d'une décision peut être évaluée.
9. La méthode FCOWA-ER peut être déployée aux « sous-problèmes » de décision.
10. Une référence peut être établie et calculée, en tenant compte de l'imperfection de l'information, permettant une validation par comparaison.
11. Les méthodes d'AMC basées sur le Raisonnement Évidentiel peuvent être associées entre elles ainsi qu'avec les méthodes d'aide à la décision dans l'incertain.
12. Les « sous-problèmes » de décision peuvent être intégrés dans un cadre méthodologique global, multi-temporel et multi-échelle.

II.4.3 Méthodologie : décrire, décomposer, formuler, modéliser, valider, intégrer

Sur la base des hypothèses précédentes, un cadre méthodologique global est proposé dans cette thèse (figure II.16).

1. Etape 1 (chapitre III) - Le concept d'efficacité est d'abord explicité. Une approche systémique est proposée pour décomposer le problème en sous-problèmes selon les différentes composantes de l'efficacité et échelles de mesures de protection. L'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance seront ainsi utilisées pour aider à extraire les indicateurs et critères d'efficacité à l'échelle de chaque système.
2. Etape 2 (chapitre III) - La description de l'évolution du contexte de décision doit aider à identifier celle des objectifs et fonctions donnés aux mesures de protection. La formulation sera établie pour chaque « sous-problème » de décision identifié pour chaque échelle et composante.
3. Etape 3 (chapitre IV) - La modélisation de chaque sous-problème de décision doit être proposée à partir du formalisme de l'aide à la décision et d'une représentation de l'imperfection dans le ER. Les AMC basées sur le Raisonnement Évidentiel aideront à traiter les problèmes multicritères et FCOWA-ER les problèmes d'aide à la décision dans l'incertain. L'amélioration de ces méthodes et leur association seront envisagées
4. Etape 4 (chapitres V) - Les évaluations de l'efficacité selon les différents « sous-problèmes » identifiés devront être intégrées à l'échelle du bassin d'enjeux pour permettre une aide à la décision globale tenant compte de l'efficacité à protéger les enjeux.

Cette méthodologie a un caractère pluridisciplinaire marqué. Dans un souci de cohérence de la présentation, il a été décidé de ne pas lister successivement les développements réalisés dans des disciplines diverses, pour ensuite proposer une série d'applications. Chaque développement générique est directement appliqué dans les chapitres III et IV, puis le chapitre V est consacré à l'intégration des problèmes à l'échelle du bassin d'enjeux.

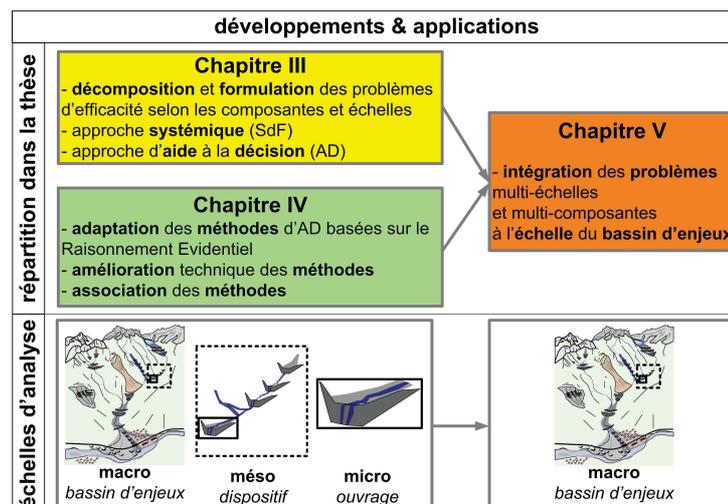


FIGURE II.16 – Synthèse des développements menés du chapitre III au chapitre V.

Formulation systémique multi-échelle : contextes et problèmes de décision

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection a été définie comme un problème de décision multi-échelle (ouvrage, dispositif et bassin d'enjeux). Deux hypothèses sont formulées (figure II.16) : 1) une approche systémique peut aider à formaliser la décomposition selon les différentes échelles ; 2) une approche d'aide à la décision permet de considérer que des « sous-problèmes » de décision peuvent être formulés pour chacune de ces échelles.

L'évaluation de l'efficacité est relative aux objectifs fixés à chaque échelle (figure II.15). En pratique, elle repose sur des indicateurs issus d'analyses de pathologies (Annexe C). Pour formaliser ces indicateurs et critères, la section III.1 propose une approche systémique multi-échelle, basée sur les méthodes de la sûreté de fonctionnement (SdF).

La confrontation avec l'objectif est essentielle pour évaluer l'efficacité mais cet objectif peut évoluer dans le temps. Le concept d'efficacité étant une notion relative, il est nécessaire d'analyser cette évolution. La section III.2 propose cette description pour aider la formulation des sous-problèmes de décision à chaque échelle.

III.1 Identification systémique des composants et échelles d'évaluation de l'efficacité

Le concept d'efficacité étant ambigu, il est d'abord formalisé selon une approche conceptuelle (section III.1.1). Son évaluation étant multi-échelle, l'analyse structurelle est adaptée pour décrire les composants et systèmes selon les différentes échelles de mesures de protection (section III.1.2). L'efficacité d'un système est relative à l'objectif fixé pour la fonction qu'il doit assurer. Les méthodes de la SdF sont adaptées au contexte multi-échelle pour identifier les fonctions et modes de défaillance associés (section III.1.3). Finalement, l'analyse des modes de défaillance permet d'extraire les indicateurs d'évaluation de la performance d'un système (section III.1.4).

III.1.1 Schéma conceptuel de l'efficacité des systèmes de protection

Le concept central est l'efficacité des systèmes de protection. Un schéma conceptuel correspondant est établi sur la figure III.1. Il identifie les concepts, établit les interrelations et précise les sources d'information. Pour cela, cinq types de concepts sont différenciés :

- concepts métiers : les définitions sont issues de la BD-RTM, des guides autrichiens et suisse (tableau I.5, p. 33) et d'échanges organisés avec les praticiens comme ceux des services

Restauration et conservation des Terrains en Montagne (RTM) ;

- concepts normés : les définitions sont issues de normes et réglementations existantes (AFNOR 1996, 2001, 2003a, 2005c, 2011) ;
- concepts scientifiques : les définitions sont issues de publications scientifiques sur la sûreté et la performance des ouvrages ;
- concepts normés-scientifiques : les définitions des normes et scientifiques se complètent (Curt 2008 ; Lair 2000 ; Tacnet et al. 2011a ; Villemeur 1988 ; Vuillet 2012) ;
- concepts de lien : ils font le lien entre les concepts d'intérêt précédents.

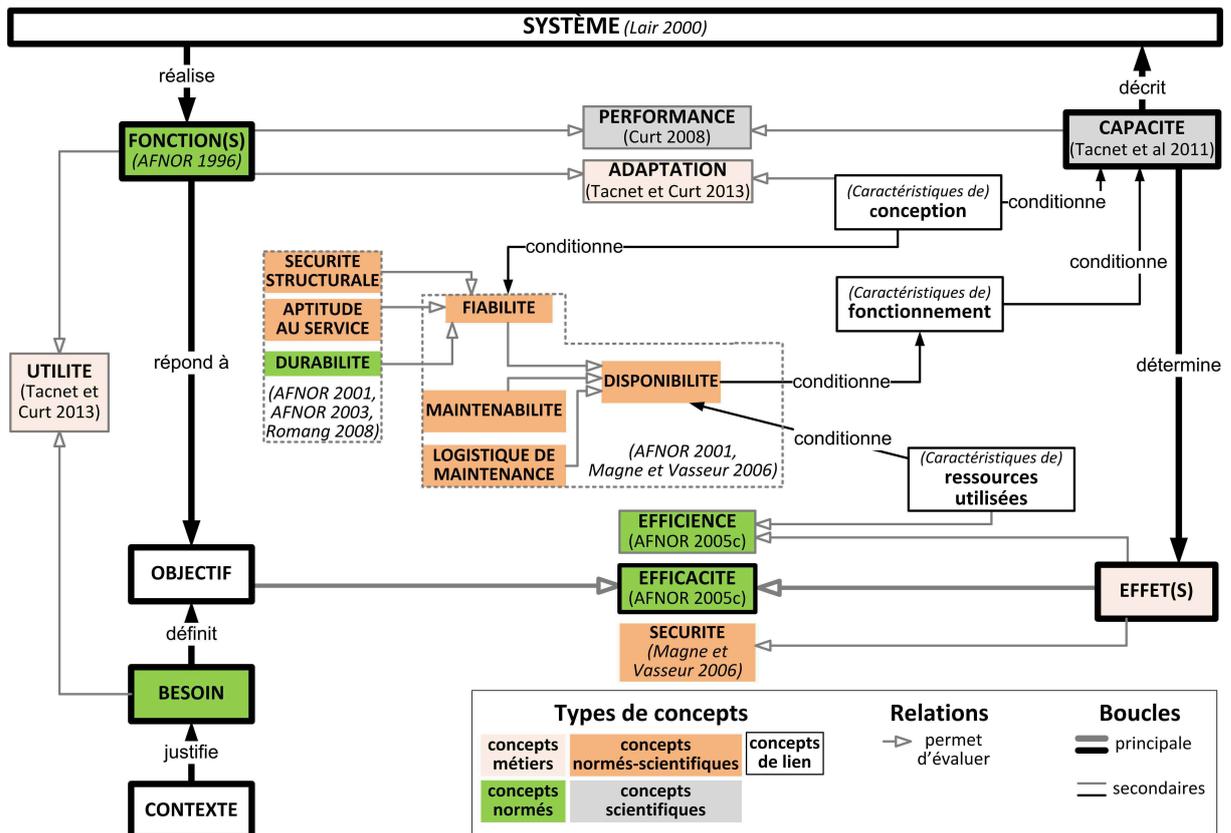


FIGURE III.1 – Le schéma conceptuel de l'efficacité.

Les définitions retenues, adaptées des références citées, sont établies ci-dessous.

- Le système est un ensemble d'éléments organisés pour remplir une mission déterminée dans un environnement défini (Lair 2000).
- La fonction est l'action du système ou de l'un de ses composants (AFNOR 2011) exprimée exclusivement en terme de finalité (AFNOR 1996).
- La capacité correspond aux caractéristiques techniques mesurables associées à une fonction (Tacnet et al. 2011a).
- La performance est l'état d'un système à réaliser chacune des fonctions pour lesquelles il a été conçu (Curt 2008).
- L'adaptation est l'adéquation des choix de conception du composant (ou du système) au contexte d'implantation physique ou socio-économique (Tacnet et Curt 2013).
- Le besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par le décideur (AFNOR 2014a).
- L'objectif est le but, la cible à atteindre (dictionnaire Larousse 2016).
- L'effet est le résultat, la conséquence de l'action du système (dictionnaire Larousse 2016).

- L'efficacité est le niveau d'obtention des résultats escomptés (AFNOR 2005c).
- La sécurité est l'aptitude du système à éviter de produire des événements critiques pour lui-même ou pour son environnement dans des conditions et pour une durée de fonctionnement données (Magne et Vasseur 2006). Ce concept correspond à celui de dangerosité utilisé en pratique : un ouvrage dangereux a une très faible sécurité et inversement.
- L'utilité est l'aptitude du système à satisfaire un besoin ou à créer les conditions favorables à cette satisfaction (contribution à une fonction) (Tacnet et Curt 2013).
- L'efficacité est le rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées (AFNOR 2005c).
- La disponibilité est l'aptitude du système à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné (AFNOR 2001).
- La fiabilité est l'aptitude du système à accomplir une fonction requise dans des conditions données durant un intervalle de temps donné (AFNOR 2001).
- La maintenabilité est, dans des conditions d'utilisation données et de maintenance prescrites, l'aptitude du système à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise (AFNOR 2001) et relativement à une durée de fonctionnement donnée (Magne et Vasseur 2006).
- La logistique de maintenance correspond aux ressources, services et moyens de gestion nécessaires à l'exécution de la maintenance, ce qui peut inclure le personnel, les équipements d'essai, etc. (AFNOR 2001).
- La sécurité structurale est la capacité d'un système, soumis à des actions supposées, à garantir une résistance aux états-limites ultimes (AFNOR 2003a ; Romang 2008).
- L'aptitude au service est la capacité d'un système à fonctionner selon les exigences d'utilisation définies, pendant la durée d'utilisation prévue (Romang 2008) et à garantir une résistance aux états-limites de service (AFNOR 2003a).
- La durabilité est l'aptitude du système à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'usage et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint (AFNOR 2001).

Selon l'AFNOR (2001), la sûreté de fonctionnement (SdF) est la propriété qui permet de placer une confiance justifiée dans les services attendus d'un système, décrite par la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenance et logistique de maintenance. L'analyse de la sécurité y est généralement associée (Magne et Vasseur 2006). Cependant, les premiers font référence à la capacité à accomplir une fonction pendant une durée alors que le dernier dépend de l'analyse des effets si la capacité est dépassée ou s'il y a défaillance. En ce sens, la figure III.1 sépare ces termes qui, regroupés, permettent d'étudier la sûreté d'un système en fonctionnement.

Selon la figure III.1, l'efficacité dépend des objectifs et des effets. Les objectifs sont un résultat attendu quantifié établi à partir de l'expression du besoin. Les effets dépendent de la capacité du système qui est une mesure des fonctions à réaliser.

Cinq boucles conceptuelles secondaires sont identifiées :

- celle de l'utilité relie les objectifs aux fonctions du système ;
- celle de la performance relie les fonctions et la capacité du système ;
- celle de l'adaptation relie les fonctions aux caractéristiques de conception du système ;
- celle de l'efficacité relie la capacité et les effets induits aux ressources nécessaires ;
- celle de la sécurité est liée aux effets et aux conséquences associées.

Nous établissons que, pour chaque *fonction* considérée, l'analyse de l' *efficacité* repose sur la confrontation entre la *capacité* technique d'un *système* et l' *objectif* qui lui est assigné. Évaluer l'efficacité nécessite donc d'identifier le système, sa fonction, l'objectif fixé et sa capacité.

III.1.2 Analyse structurelle multi-échelle : définition des systèmes

Trois niveaux d'échelles de mesures de protection torrentielle sont à considérer :

- micro : l'ouvrage est la plus grande échelle de système considérée ;
- méso : le dispositif est l'échelle intermédiaire ;
- macro : le bassin d'enjeux est la plus petite échelle.

Une même approche est proposée pour chacune de ces échelles : l'analyse structurelle permet de délimiter le système et d'identifier ses composants.

Les dispositifs et ouvrages de protection torrentielle ont des fonctions différentes (p. 14). En forêts domaniales RTM, la fonction de consolidation et stabilisation des torrents (figure I.16, p. 22) est la plus répandue (Annexe A). Elle a été retenue comme cas d'illustration.

III.1.2.1 Analyse structurelle du système « ouvrage » : micro-échelle

En stabilité externe, le dimensionnement structural d'un ouvrage de consolidation/stabilisation est celui d'un ouvrage de soutènement. En stabilité interne, le calcul des ouvrages en béton armé prend en compte le ferrailage dans le béton (figure I.17, p. 24). L'analyse structurelle des ouvrages se limite ici aux composants permettant d'assurer la stabilité externe.

Le système « ouvrage de consolidation/stabilisation » est délimité sur la figure III.2. Au contraire des barrages hydrauliques (figure II.4, p. 74), seuls les éléments de la structure en génie civil en font partie. Le sol de fondation est un des éléments du milieu extérieur (EME).

L'analyse structurelle de l'ouvrage (figure III.3) le décompose en trois parties (sous-cuvette, ailes rive droite et rive gauche). Pour chacune, six composants sont identifiés sur la coupe en travers. L'ouvrage considéré est le plus classique. Selon les cas, d'autres composants peuvent être ajoutés comme une bêche d'ancrage en amont de la semelle (pour limiter le glissement) ou une bêche parafouille à son aval (pour limiter l'affouillement) (Deymier et al. 1995).

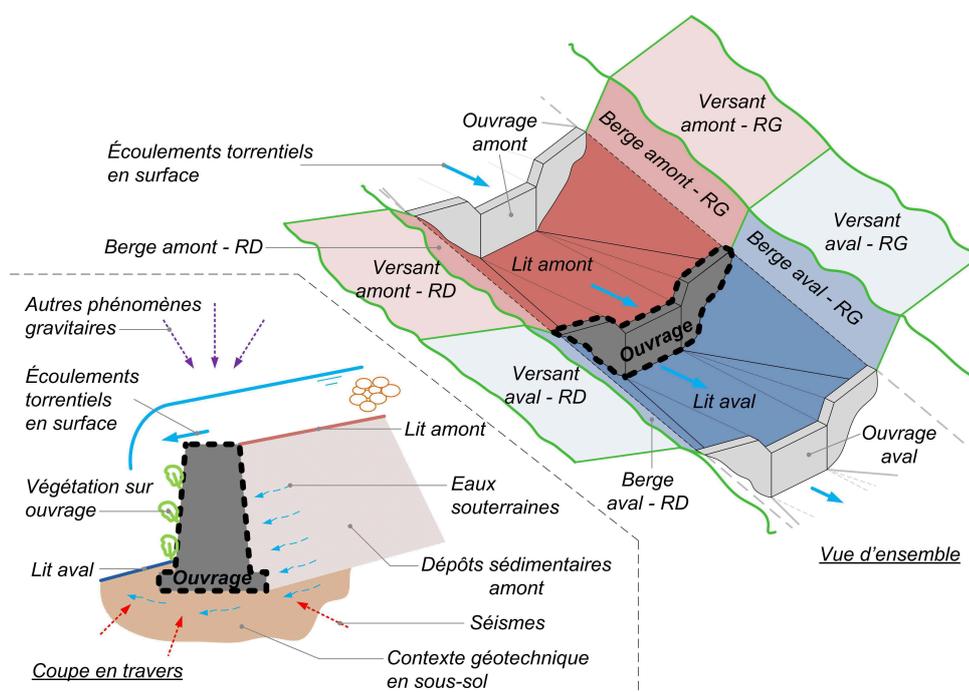


FIGURE III.2 – Définition du système à micro-échelle : l'ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle.

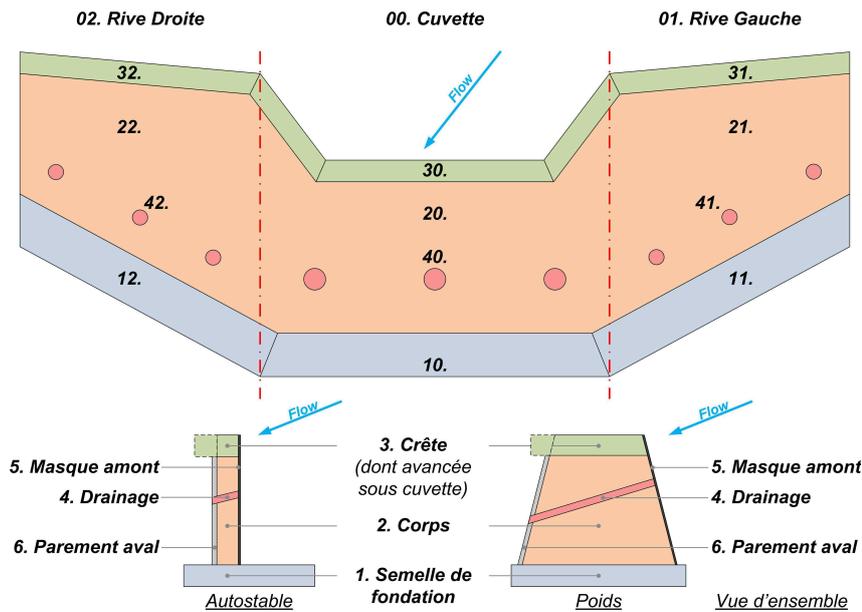


FIGURE III.3 – Analyse structurale à micro-échelle : ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle.

III.1.2.2 Analyse structurale du système « dispositif » : méso-échelle

Un dispositif regroupe des ouvrages pour un objectif commun (DTRTM 2007). Les ouvrages sont des composants du système « dispositif » avec une importance qui est plus ou moins grande.

- Analyse structurale d'un dispositif de consolidation/stabilisation

Le dispositif de consolidation/stabilisation est un système délimité selon la figure III.4. L'ouvrage de base est la limite aval ; le dernier ouvrage en amont est celle amont. Les éléments naturels, comme le lit initial en absence de dispositif de stabilisation, sont des EME.

Chaque ouvrage et chaque lit constitué artificiellement en amont sont des composants du système (figure III.5).

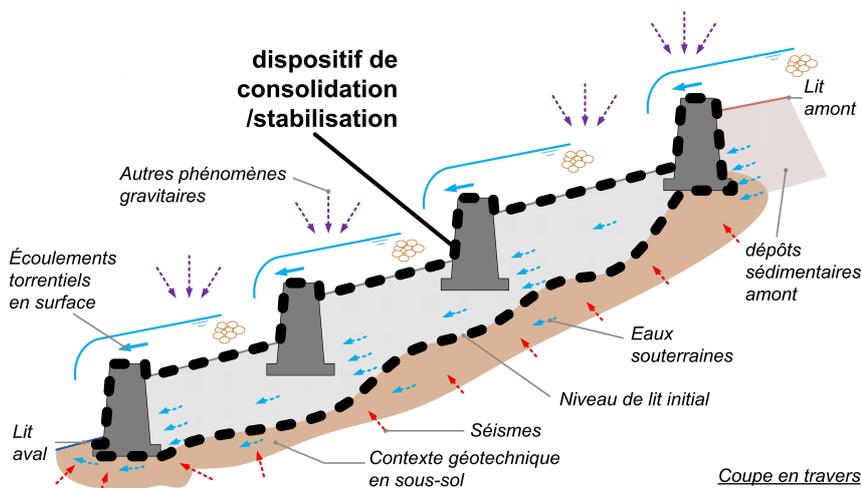


FIGURE III.4 – Définition du système à méso-échelle : dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle.

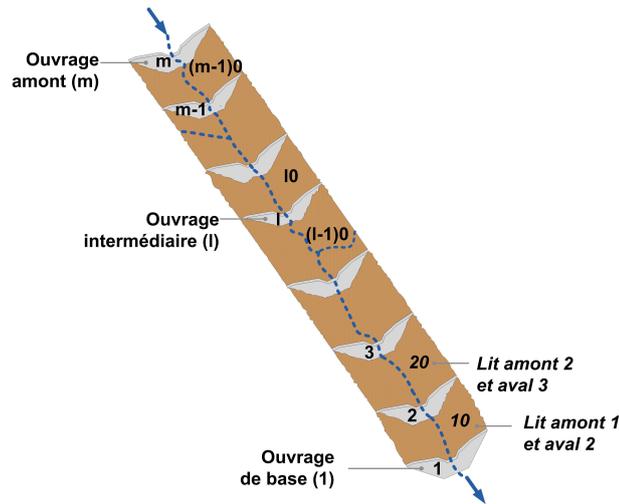


FIGURE III.5 – Analyse structurelle à méso-échelle : l'ouvrage est un composant du dispositif de stabilisation.

- **Importance de l'ouvrage : spécifique à chaque mode de défaillance du dispositif**

Le dispositif de consolidation/stabilisation est un système constitué de composants en série. Chaque tronçon de lit dépend de chaque ouvrage. Ce dernier, en tant que composant, a un niveau d'importance spécifique. Pour l'évaluer selon la définition de Birnbaum (1968), la part de la fiabilité de l'ouvrage sur celle du dispositif doit être établie.

La fiabilité est établie pour un mode de défaillance donné. La défaillance d'un ouvrage va avoir un ou plusieurs effets qui peuvent être la cause de la défaillance du dispositif. En pratique, trois niveaux qualitatifs sont établis : « prédominant », « nécessaire », « secondaire » (figure I.24, p. 34).

L'analyse de l'importance doit être réalisée selon la fonction du dispositif.

- Si la fonction est de stabiliser le profil en long, un mode de défaillance du dispositif est la rupture régressive (de l'aval vers l'amont) de tous les ouvrages. Une des causes est la défaillance par rupture d'un des ouvrages les plus en aval. À l'inverse, la rupture des ouvrages amont ne va entraîner qu'une défaillance limitée du dispositif. Dans ce cas, l'importance des ouvrages décroît de l'aval vers l'amont.
- Si la fonction est de stabiliser le profil en travers en limitant la divagation latérale vers une berge en glissement, un mode de défaillance est le contournement généralisé du dispositif. La cause peut être la défaillance d'un ou plusieurs ouvrages amont à sa fonction de recentrage des écoulements. À l'inverse, cette même défaillance des ouvrages aval n'a pas d'effet pour ce mode de défaillance. Dans ce cas, l'importance des ouvrages décroît de l'amont vers l'aval.

III.1.2.3 Analyse structurelle du système « bassin d'enjeux » : macro-échelle

Les dispositifs de protection présents dans un bassin d'enjeux ont pour fonction d'agir sur le phénomène naturel. Ils sont alors des composants du système « bassin d'enjeux ». Ils n'ont pas le même niveau d'importance selon l'action qu'ils permettent sur le phénomène naturel.

- **Décomposition du système : unités de production et de transfert des matériaux**

Toutes les parties du bassin versant participant au processus physique (bassin d'alimentation, chenal d'écoulement et cône de déjection) délimitent le système « bassin d'enjeux ». Les enjeux à protéger et la rivière principale sont des EME à ce système.

Les dispositifs de consolidation/stabilisation situés en zone d'accumulation et dans le chenal d'écoulement agissent sur la probabilité de non dépassement $P(\bar{M}_k)$ d'un niveau de magnitude du phénomène M_k (p. 13), en amont du cône de déjection. Le système est limité à ces deux entités : le cône de déjection est considéré comme un EME (figure III.6).

Le bassin versant est découpé en unités géomorphologiques homogènes. Chaque zone source (figure I.2, p. 7) est une unité. On distingue les unités géomorphologiques équipées d'un dispositif et celles qui ne le sont pas. De même, le chenal d'écoulement se décompose en tronçons équipés de dispositifs et en tronçons non équipés (Kriner 2013).

L'analyse structurelle du bassin d'enjeux le décompose ainsi en unités géomorphologiques et tronçons de cours d'eau principal homogènes, traités ou non traités par un dispositif (figure III.6). Une numérotation d'aval en amont est proposée, avec une principale de 1 à 9 pour les composants en série du cours d'eau principal, poursuivie par une de 0 à 9 pour les composants parallèles.

Nous proposons une schématisation du système par des composants en série ou en parallèle sur la figure III.6. Par exemple, les composants 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 13 et 23 sont équipés de dispositifs.

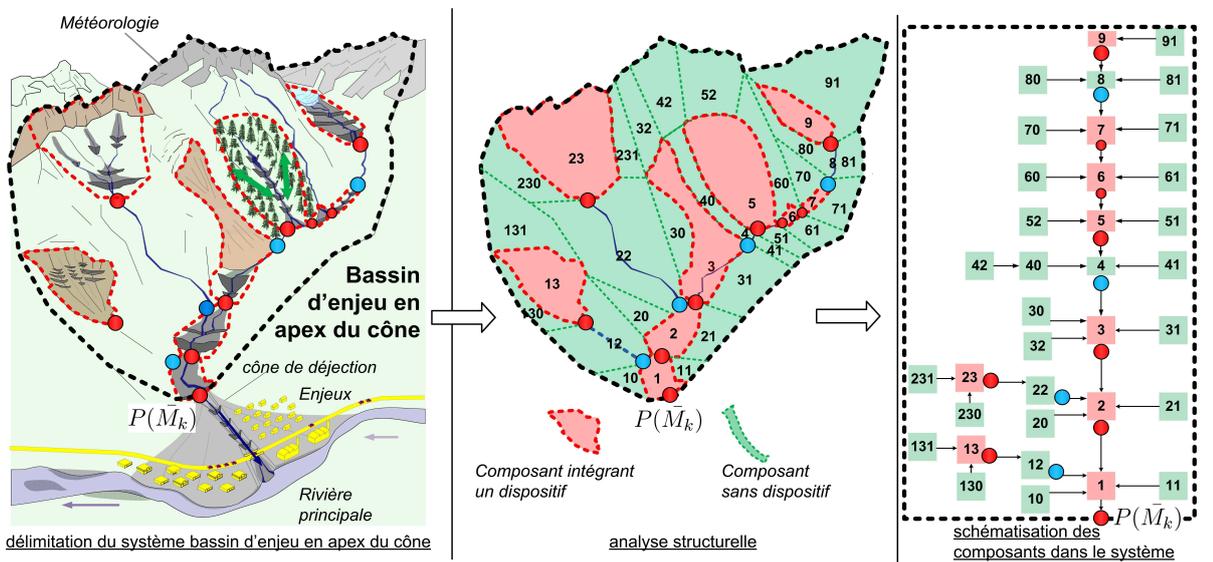


FIGURE III.6 – Analyse structurelle à macro-échelle : bassin d'enjeux équipé de dispositifs de protection.

• Importance du dispositif et aléa résiduel dans le bassin d'enjeux

À l'échelle du système « bassin d'enjeux », la fonction des mesures de protection notées d est de réduire l'aléa depuis un aléa initial noté $P_0(\bar{M}_k)$ à un aléa résiduel noté $P_d(\bar{M}_k)$. Ce dernier est l'objectif à atteindre.

En l'absence de dispositifs de protection, la fonction est limitée à maintenir l'aléa à $P_0(\bar{M}_k)$. La genèse ou la reprise d'activité d'une zone source dans le bassin d'alimentation est une cause de défaillance.

En présence de dispositifs, la fonction est donnée par $P_d(\bar{M}_k)$. Un niveau plus élevé est une défaillance. Plusieurs causes peuvent être identifiées : 1) la défaillance d'un dispositif à la fonction qui lui est attribuée ; 2) un dispositif non défaillant mais un objectif correspondant à la fonction insuffisant ; 3) présence, reprise d'activité ou genèse d'une zone source dans le bassin d'alimentation. Chacune de ces causes est la défaillance d'un composant du système : 1) défaillance du dispositif entraînant la défaillance du composant auquel il appartient ; 2) défaillance du composant avec dispositif ; 3) défaillance du composant sans dispositif.

L'importance du composant peut être définie selon la définition de Birnbaum (1968). Elle est liée à l'augmentation de $P_d(\bar{M}_k)$. Par exemple, si une défaillance selon la cause 1) n'augmente que très peu $P_d(\bar{M}_k)$, l'importance du dispositif est faible. L'importance du composant augmente si sa défaillance selon la cause 3) entraîne l'augmentation de $P_d(\bar{M}_k)$.

L'évaluation de l'importance des composants d'un bassin d'enjeux dépend donc de l'effet de leur défaillance sur le scénario M_k à l'aval. Son analyse dépend de phénomènes physiques complexes de propagation dans le bassin versant nécessitant une analyse de bassin versant pluridisciplinaire.

Si plusieurs scénarios sont considérés ($k = 1, \dots, K$), l'importance de chaque composant peut varier : des composants correspondant à des sources chroniques (par exemple, le 13 de la figure III.6) vont avoir une importance élevée pour des scénarios dont la probabilité est élevée. Inversement, des composants correspondant à des sources ponctuelles (par exemple, le glissement du composant 3) vont prendre le pas pour des scénarios dont la probabilité est faible.

Nous nous appuyons sur l'analyse structurelle pour décrire les systèmes à chaque échelle (micro, méso et macro). Le système « ouvrage » est un composant plus ou moins important du système « dispositif » qui est lui même un composant d'importance donnée du système « bassin d'enjeux ».

III.1.3 Analyse fonctionnelle multi-échelle : identification des fonctions pour chaque système et ses composants

Les méthodes de la sûreté de fonctionnement (SdF) aident à formaliser l'évaluation de la performance, ou efficacité, des mesures de protection selon chaque mode de défaillance. L'analyse fonctionnelle (AF) vise à établir les fonctions du système et de ses composants. L'AF externe (AFE) est suivie de l'AF interne (AFI). La méthode APTE a été retenue (section II.2.1, p. 73).

L'AFE permet d'identifier les fonctions à réaliser par le système et les modes de défaillance associés en établissant un bloc diagramme fonctionnel (BdF) pour le système global et un tableau des fonctions de service. L'AFI aide à définir les fonctions techniques (FT) à réaliser par chaque composant du système analysé.

Dans cette section, nous adaptions l'AF au contexte multi-échelle et l'appliquons à l'ouvrage (micro-échelle) et au dispositif de stabilisation torrentielle (méso-échelle).

III.1.3.1 Fonctions des dispositifs : identification historique

Depuis plus de 150 ans, la politique de Restauration et de conservation des Terrains en Montagne (RTM) a favorisé la mise en œuvre de nombreuses mesures de protection torrentielle en forêts domaniales RTM (Annexe A). Cependant, leurs fonctions ne sont pas clairement établies en pratique. Une analyse historique et technique des fonctions données aux dispositifs de protection torrentielle a été menée dans un travail commun avec une autre thèse (Piton et al. 2016).

Une liste synthétique des fonctions techniques assurées par la forêt et les structures de protection torrentielle a été établie sur la base des travaux de synthèse existant (Hübl et al. 2005 ; Ladier et al. 2012 ; Piton et Recking 2016a ; Suda et Rudolf-Miklau 2010 ; Tacnet et Degoutte 2013). Les fonctions potentielles des ouvrages de « consolidation/stabilisation », extraites du travail détaillé dans Piton et al. (2016), sont différenciées sur la figure III.7 et au deuxième point de cette liste.

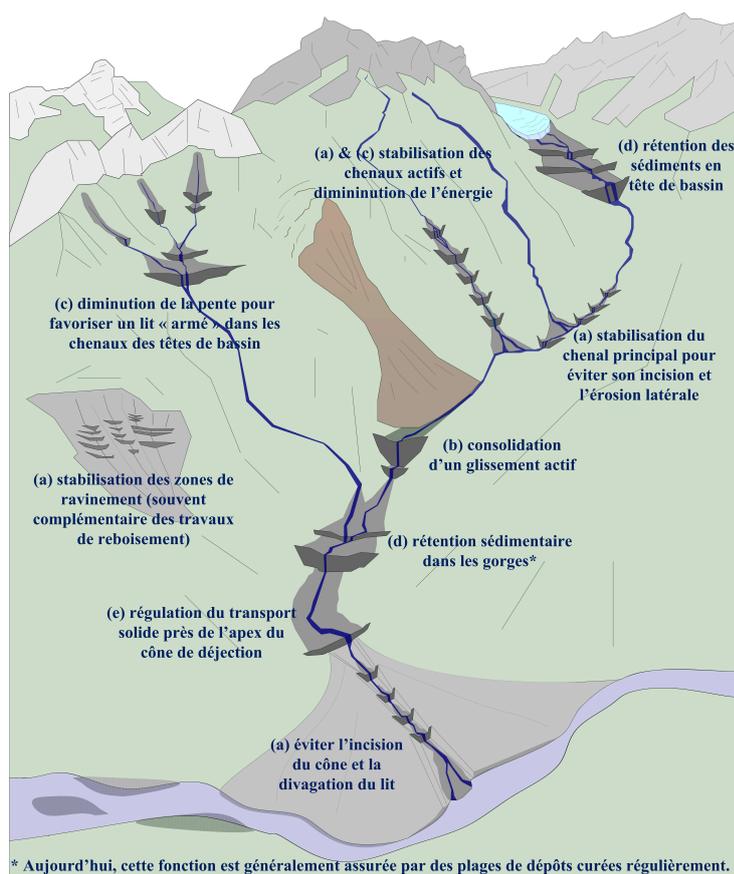


FIGURE III.7 – Fonctions détaillées des ouvrages de consolidation/stabilisation (Piton et al. 2016).

1. la forêt de protection :
 - maintenir les sédiments au niveau des zones sources ;
 - réduire le débit de pointe de crue liquide ;
 - stopper la propagation des blocs lors de leur chute ;
 - stabiliser le manteau neigeux dans les zones de départ des couloirs d'avalanche ;
2. les barrages et seuils « fermés » :
 - stabiliser le profil en long et/ou des berges (*ST*) ;
 - consolider les versants et glissement latéraux (*CL*) ;
 - consolider les moraines et pieds de falaises amont (*CA*) ;
 - réduire la pente du lit et l'énergie associée (*RP*) ;
 - retenir les sédiments de manière permanente (*RE*) ;
 - réguler le transport solide (*RG*).
3. les barrages « ouverts » :
 - stocker temporairement les sédiments ;
 - trier les matériaux solides et bois flottants dans l'écoulement ;
 - réduire le débit de pointe solide (ou de lave) ;
 - réduire (ou « casser ») l'énergie d'une lave torrentielle ;
4. les digues : maintenir l'écoulement dans un chenal établi, sans débordement ;
5. les protections de berges : maintenir l'écoulement dans un chenal établi, sans érosion latérale.

III.1.3.2 Analyse fonctionnelle externe (AFE) multi-échelle

L'analyse fonctionnelle externe (AFE) a été appliquée, selon la méthode APTE, aux ouvrages et dispositifs de consolidation/stabilisation torrentielle pour les six fonctions détaillées dans le 2. de la liste de la page précédente (détails en Annexe G).

- AFE d'un dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle : méso-échelle

Pour chacune des six fonctions potentielles, comme par exemple la fonction *ST*, le système « dispositif » est d'abord délimité selon la figure III.4 (p. 111). Une vue d'ensemble est donnée en Annexe G. Le bloc diagramme fonctionnel (BdF), aussi appelé « diagramme pieuvre », est ensuite établi sur la figure III.8 et le tableau III.1 des fonctions service est extrait.

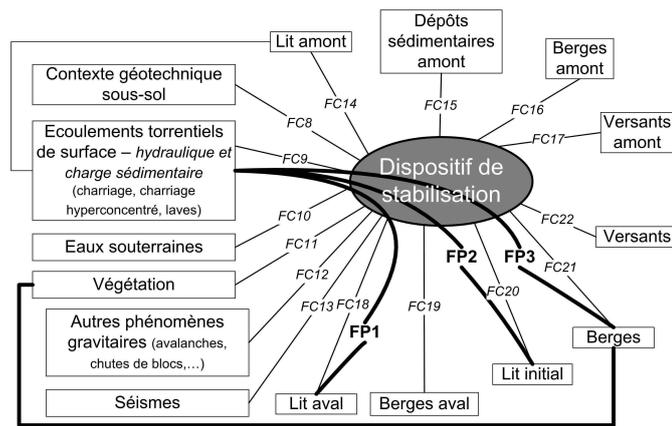


FIGURE III.8 – Diagramme pieuvre d'un dispositif de protection torrentielle à fonction de stabilisation (*ST*).

Fonctions de service	N°	Définition
Fonctions principales (FP)	FP1	faire transiter les écoulements torrentiels vers le lit à l'aval du dispositif
	FP2	gérer les écoulements torrentiels pour stabiliser le profil en long du lit initial
	FP3	orienter les écoulements torrentiels pour limiter les érosions latérales de berge et permettre l'implantation et/ou le maintien de la végétation
Fonctions contraintes (FC)	FC8	résister au contexte géotechnique en sous-sol
	FC9	résister aux écoulements torrentiels de surface
	FC10	tenir compte des eaux souterraines
	FC11	résister à la végétation
	FC12	résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)
	FC13	résister aux séismes
	FC14	assurer un lit amont stable
	FC15	résister aux charges exercées par les dépôts sédimentaires amont
	FC16	a) résister aux charges exercées b) s'ancrer dans les berges amont
	FC17	résister aux charges exercées par les versants amont
	FC18	s'ancrer sur le lit aval
	FC19	orienter l'écoulement en tenant compte de la stabilité des berges aval
	FC20	a) assurer un lit stable b) résister aux charges exercées par le lit créé
	FC21	a) résister aux charges exercées par les berges latérales b) s'ancrer dans les berges latérales c) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges latérales
FC22	a) résister aux charges exercées par les versants latéraux b) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des versants latéraux	

TABLE III.1 – Fonctions de service d'un dispositif de protection torrentielle à fonction de stabilisation.

Trois fonctions principales (FP) sont définies pour la fonction *ST*. En appliquant cette démarche aux six fonctions détaillées précédemment (Annexe G), sept fonctions principales (FP) sont extraites dans le tableau III.2. Toutes les fonctions contraintes (FC) de la fonction *ST* (tableau III.1) concernent les six fonctions de *ST*, *CL*, *CA*, *RP*, *RE* et *RG*.

N°	Définition	Fonctions dispositif
FP1	faire transiter les écoulements torrentiels vers le lit à l'aval du dispositif	<i>ST, CL, CA</i> <i>RP, RE</i>
FP2	gérer les écoulements torrentiels pour stabiliser le profil en long du lit initial	<i>ST, RP</i>
FP3	orienter les écoulements torrentiels pour limiter les érosions latérales de berge et permettre l'implantation et/ou le maintien de la végétation	<i>ST, CL</i>
FP4	adapter le niveau de stabilisation de pied de versant au contexte géotechnique	<i>CL</i>
FP5	modifier les écoulements torrentiels pour stabiliser le lit amont et limiter l'érosion régressive	<i>CA</i>
FP6	modifier les écoulements torrentiels en stockant les matériaux à l'amont des ouvrages	<i>RE</i>
FP7	modifier les écoulements torrentiels en modulant le transport solide dans l'écoulement torrentiel transféré vers le lit aval	<i>RG</i>

TABLE III.2 – Ensemble des fonctions principales des dispositifs de consolidation/stabilisation.

• AFE d'un ouvrage de stabilisation torrentielle : micro-échelle

Cette application s'appuie sur les travaux préliminaires réalisés par Ghariani et al. (2014). Quelle que soit la fonction du dispositif, le système « ouvrage de consolidation/stabilisation » est celui de la figure III.2 (p. 110). Les éléments du milieu extérieur (EME) qui y figurent sont repris dans le bloc diagramme fonctionnel (BdF) de la figure III.9. Les FP et fonctions contraintes (FC) sont listées dans le tableau III.3.

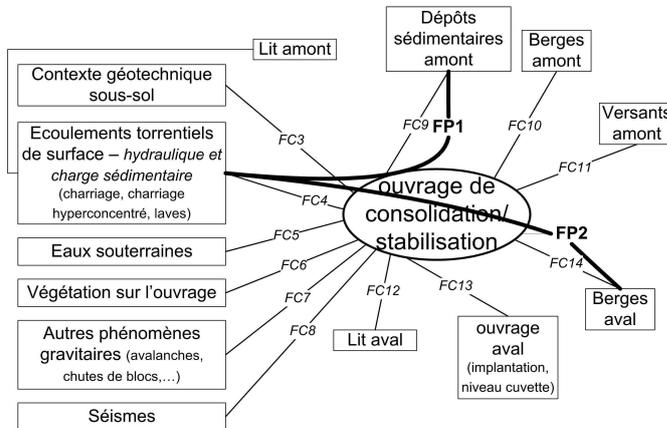


FIGURE III.9 – Diagramme pieuvre d'un ouvrage de consolidation/stabilisation (Ghariani et al. 2014).

III.1.3.3 Analyse fonctionnelle interne (AFI) multi-échelle

La composition des dispositifs de consolidation/stabilisation, quelle que soit la fonction à réaliser parmi les six candidates, est la même : des ouvrages et tronçons amont à chaque ouvrage, en série. Sur cette base, une analyse fonctionnelle interne analyse fonctionnelle technique (ou interne) (AFI) commune à tous les dispositifs de consolidation/stabilisation torrentielle a été réalisée suivie par celle d'un ouvrage (détails en Annexe G).

Fonctions de service	N°	Définition
Fonctions principales (FP)	FP1	modifier les écoulements torrentiels pour dépôt sédimentaire amont
	FP2	faire transiter les écoulements torrentiels provenant du lit amont, sans impacter les berges latérales aval
Fonctions contraintes (FC)	FC3	résister au contexte géotechnique en sous-sol
	FC4	résister aux écoulements torrentiels de surface
	FC5	tenir compte des eaux souterraines
	FC6	résister à la végétation sur l'ouvrage
	FC7	résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)
	FC8	résister aux séismes
	FC9	résister aux charges exercées par les dépôts sédimentaires amont
	FC10	a) résister aux charges exercées par les berges amont (au niveau de l'ouvrage) b) s'ancrer dans les berges amont (au niveau de l'ouvrage)
	FC11	résister aux charges dues au versant amont
	FC12	se fonder sur le lit aval
	FC13	tenir compte du positionnement de l'ouvrage aval en orientation et en fondation
	FC14	s'appuyer sur les berges aval

TABLE III.3 – Fonctions de service d'un ouvrage de consolidation/stabilisation.

Pour cela, sept types d'interactions ont été considérés : contacts mécaniques avec transfert de charges 1) géotechniques, 2) hydrauliques, 3) dus à d'autres phénomènes naturels que ceux torrentiels, 4) contacts mécaniques avec la végétation ; transfert de flux 5) hydrauliques de surface, 6) hydrauliques souterrains, 7) sédimentaires. Pour chacune, un bloc diagramme fonctionnel (BdF) est établi. Il relie chaque composant du système aux éléments du milieu extérieur (EME).

- Analyse fonctionnelle interne (AFI) d'un dispositif : méso-échelle

Le BdF est d'abord établi pour chaque type d'interaction, comme pour la 5 sur la figure III.10, les six autres étant disponibles par ailleurs (Annexe G).

Chaque ouvrage est un composant du dispositif. L'analyse fonctionnelle du besoin (ou externe) (AFE) réalisée à l'échelle du système « ouvrage » a établi les fonctions contraintes (FC) et principales (FP) qu'il doit réaliser, correspondant à une fonction technique (FT) du composant « ouvrage » dans le système « dispositif ». Le tableau d'analyse fonctionnelle (AF) complet listant les fonctions de conception (ou techniques) (FT) réalisées par chaque composant du dispositif est également disponible (Annexe G). Le tableau III.4 en est un extrait pour un composant « ouvrage intermédiaire », et les trois interactions 5, 6 et 7.

N° comp.	Fonctions techniques (FT)		N° inter.	Equiv.	
	N°	Définition		FP / FC selon échelle ouv.	FP / FC selon échelle dispositif
2	FT5-6.1	faire transiter les écoulements de surface provenant du lit amont vers le lit aval de l'ouvrage	5,6	FP2	FP1
	FT5-6.2	orienter les écoulements de surface du lit amont vers la cuvette de l'ouvrage aval, sans impacter les berges aval	5,6	FP2 FC13	FP3
	FT5-6.3	faire transiter les écoulements d'eaux souterraines provenant du lit amont de l'ouvrage (dépôts sédimentaires) vers le lit créé à l'aval de l'ouvrage	5,6	FC5	FC10
	FT7.1	modifier les écoulement torrentiels provenant du lit amont de l'ouvrage pour dépôt sédimentaire au-dessus du lit initial	7	FP1	FP2 / FP4 / FP6 / FP7
	FT7.2	faire transiter vers le lit aval une partie de la charge sédimentaire présente dans les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage	7	FP1	FP1 / FP7

TABLE III.4 – Extrait du tableau d'AF d'un dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle, pour le composant qu'est le deuxième ouvrage du dispositif (numérotation depuis l'aval) et les interactions 5 à 7.

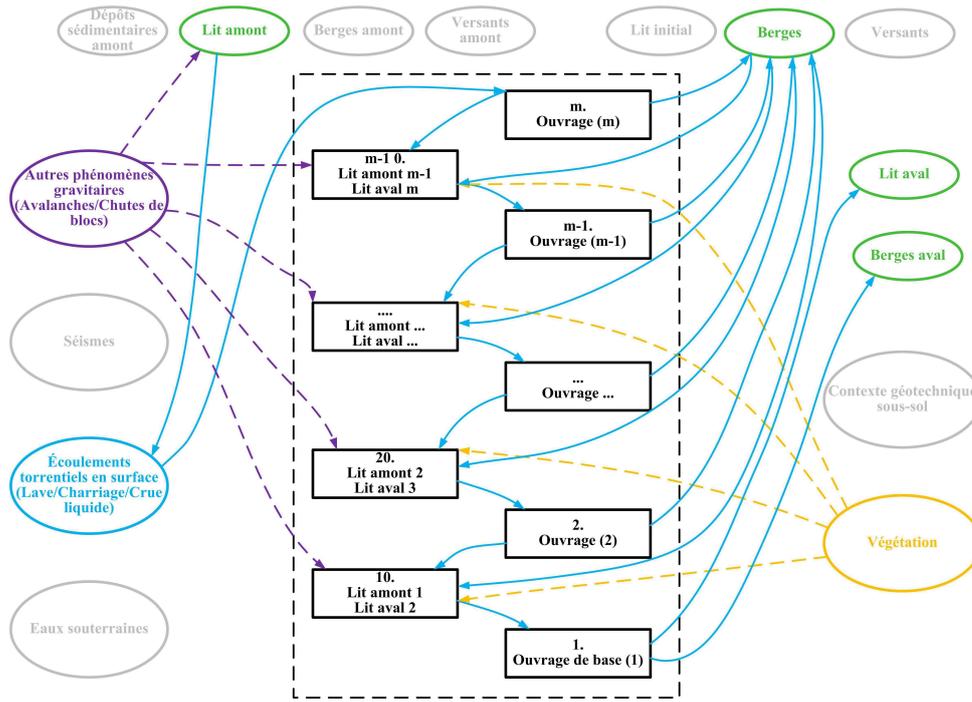


FIGURE III.10 – BdF d’un dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle pour l’interaction 5.

• Analyse fonctionnelle interne (AFI) d’un ouvrage : micro-échelle

La figure III.11 présente le BdF commun aux interactions 5 et 6. Les cinq autres sont disponibles par ailleurs (Annexe G).

Pour chaque composant, l’analyse des interactions qui le concernent permet d’identifier les FT qu’il doit accomplir et de les lister dans le tableau d’analyse fonctionnelle (AF). Par exemple, les FT du composant « 10 - fondation sous cuvette » sont listées dans le tableau III.5. Le tableau complet regroupant les FT des 14 composants d’un ouvrage identifiés sur la figure III.3 (p. 111) est disponible (Annexe G).

Composant N°	Nom	Fonctions techniques (FT)		Equiv.	
		N°	Définition	N° interaction	FP FC
10	Fondation sous cuvette	FT1.1	résister en stabilité externe en tenant compte du contexte géotechnique en sous-sol	1	FC3
		FT1.2	s’appuyer sur le niveau topographique du lit aval	1	FC12
		FT2.1	résister aux charges du corps central sous cuvette surchargé des écoulements torrentiels	2	FC4
		FT2.2	résister aux sollicitations par les fondations sous les ailes surchargées des écoulements torrentiels	2	FC4
		FT3.1	résister aux sollicitations mécaniques de la végétation	4	FC6
		FT4.1	résister aux séismes	3	FC8
		FT4.2	résister aux transferts de charges sismiques par le corps central sous cuvette	3	FC8
		FT4.3	résister aux transferts de charges sismiques par les fondations sous les ailes	3	FC8
		FT4.4	résister aux charges du corps central sous cuvette surchargé par d’autres phénomènes	3	FC7
		FT4.5	résister aux sollicitations par les fondations sous les ailes surchargées des écoulements dus à d’autres phénomènes	3	FC7

TABLE III.5 – FT des composants 10 et 30 d’un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle.

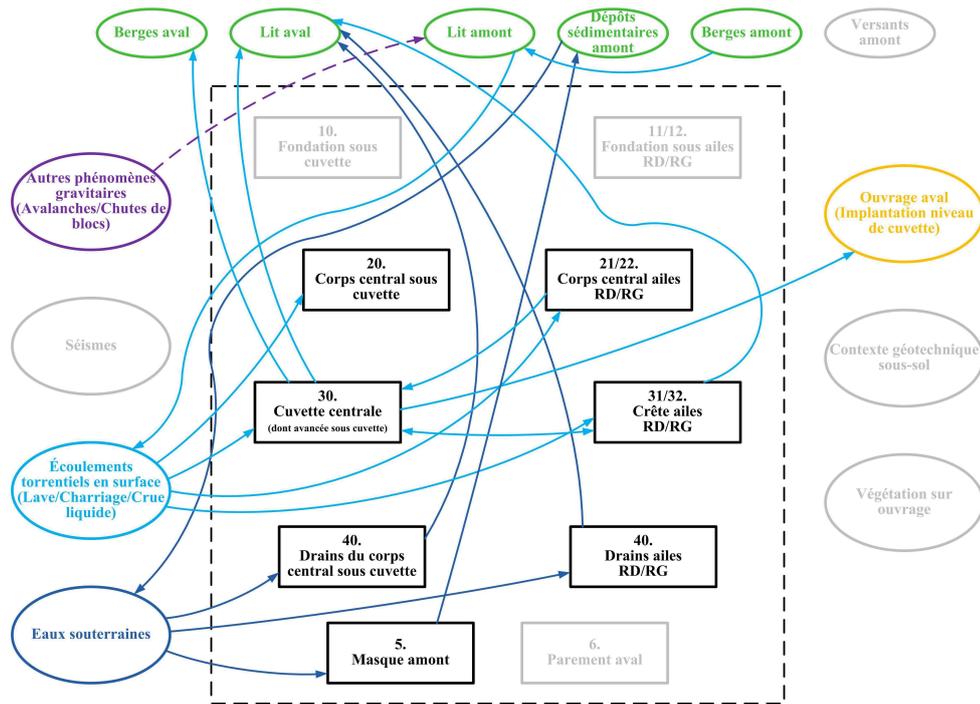


FIGURE III.11 – Bdf d'un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle pour les interactions 5 et 6.

Nous nous appuyons sur l'analyse fonctionnelle pour établir les fonctions d'un système et ses composants à chaque échelle. Les fonctions de service du système « ouvrage » (micro-échelle) sont ses fonctions techniques en tant que composant du système « dispositif » (mésos-échelle).

III.1.4 Analyse des modes de défaillance (AMDE) : identification des indicateurs et critères d'efficacité

Plusieurs modes de défaillance peuvent affecter un système selon les défaillances aux fonctions définies précédemment. Dans le domaine des ouvrages hydrauliques, l'analyse des modes de défaillance (AMDE) aide à identifier les indicateurs de performance du système « ouvrage » vis-à-vis de chacun de ces modes de défaillance. Les systèmes à base de règles, ou à base de connaissances (SBC), formalisent l'agrégation de ces indicateurs. La performance selon chaque mode peut être considérée comme un critère d'évaluation de l'efficacité globale du système.

Cette section adapte cette méthodologie détaillée (AMDE et SBC) au contexte des ouvrages torrentiels. Une démarche complémentaire moins chronophage est proposée, comme première approche, pour extraire des critères simplifiés d'efficacité de chaque système.

III.1.4.1 Démarche multi-échelle à deux niveaux de complexité

Une première phase commune consiste à extraire les modes de défaillance, pour chaque échelle de système, à partir des résultats de l'analyse fonctionnelle.

Sur cette base, une première approche, cohérente avec la pratique, consiste à extraire des critères simplifiés d'évaluation de la performance vis-à-vis de chacun de ces modes.

La seconde approche aide à identifier les indicateurs à prendre en compte pour évaluer chacun de ces critères, de manière exhaustive en s'appuyant sur l'AMDE.

• Approche 1 simplifiée : extraction de critères à partir des modes de défaillance

Connaissant les modes de défaillance, la méthode simplifiée est proposée dans cette thèse pour définir, à ce stade, des critères facilement accessibles, représentant chaque mode de défaillance. Ils s'appuient notamment sur les éléments déjà disponibles en pratique (Annexe D). Ils doivent permettre une analyse rapide et globale de l'efficacité du système tout en étant formalisés pour une évaluation reproductible. Ils sont alors détaillés par un numéro, un nom, une unité d'évaluation, une description et des exemples (Curt 2008), ce qui est une amélioration par rapport à la pratique actuelle. Cette étape est réalisée pour chacune des échelles de système.

• Approche 2 formalisée (Curt 2008) : AMDE et système à base de règles pour une évaluation détaillée de chaque critère

Comme proposé par Curt (2008), la démarche d'évaluation de chaque critère (ou performance selon un mode de défaillance) repose sur cinq étapes : 1) AFE; 2) AFI; 3) AMDE pour chaque composant du système; 4) pour chaque mode de défaillance, extraction des indicateurs de performance; 5) et construction d'un système à base de règles (SBC).

Selon la figure III.12, cette démarche peut être reproduite pour chaque échelle de mesures de consolidation/stabilisation torrentielle.

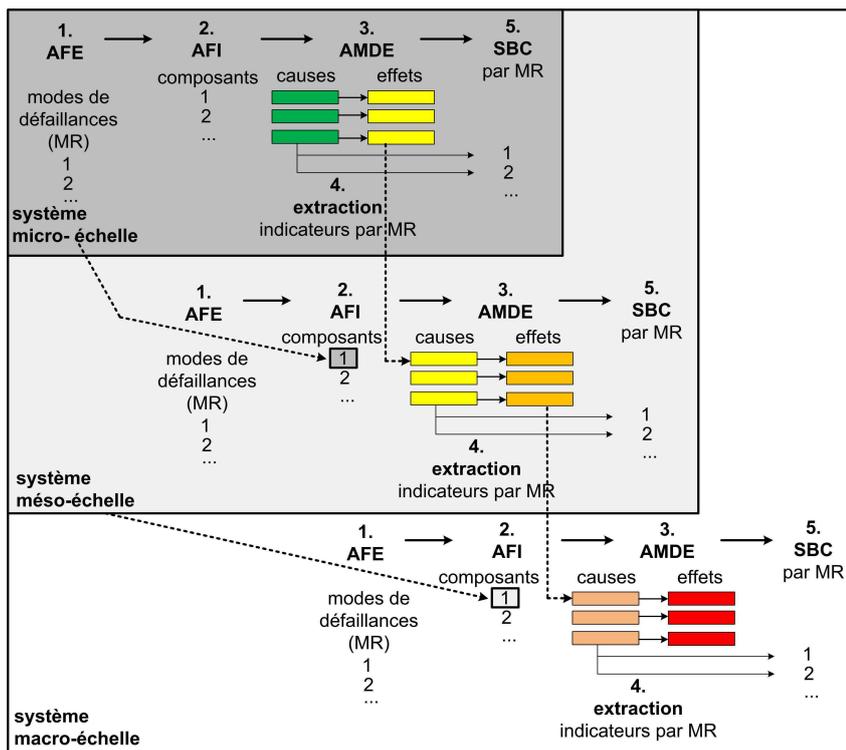


FIGURE III.12 – AMDE et SBC multi-échelle pour extraire des indicateurs et évaluer les critères que sont la performance selon chaque mode de défaillance.

L'AF et l'AMDE sont réalisées depuis la micro-échelle vers la macro-échelle. Les modes de défaillance, les causes et les effets sont identifiés pour le système à micro-échelle. Il est un composant du système à méso-échelle : les effets de ses défaillances sont des causes de la défaillance à cette échelle et ainsi de suite. À chaque échelle, un SBC est établi pour évaluer la performance du système selon chaque mode de défaillance.

III.1.4.2 Approche 1 : extraction multi-échelle de critères d'efficacité

Nous avons appliqué l'approche simplifiée proposée dans cette thèse aux ouvrages (micro-échelle) et dispositifs (macro-échelle) de consolidation/stabilisation torrentielle

- Critères simplifiés d'efficacité d'un ouvrage de stabilisation torrentielle

La plupart des fonctions contraintes à réaliser par un ouvrage sont relatives à des fonctions de résistance structurale. Dans le tableau III.6, les modes de défaillance par rupture structurale sont différenciés des autres modes de défaillance fonctionnelle.

rupture structurale	défaillances fonctionnelles
1. par poussée latérale	1. par contournement latéral
2. par glissement	2. par mauvaise orientation
3. par affouillement latéral	vers l'aval
4. par poussée axiale	3. par maintien du niveau
5. par tassement	du lit amont trop bas
6. par affouillement de pied	
7. par séisme	

TABLE III.6 – Les modes de défaillance d'un ouvrage de consolidation/stabilisation.

Sur cette base, les critères d'évaluation de l'efficacité structurale d'un ouvrage de stabilisation sont extraits. En pratique, le mode de défaillance au séisme n'est pas pris en compte. L'évaluation de l'efficacité structurale dépend de critères d'évaluation de la performance selon les six autres modes de défaillance. Comme proposé par Tacnet et Curt (2013) et repris par Carladous et al. (2016d), la performance selon chaque mode de défaillance au moment de l'inspection (t_i) peut être évaluée à partir de critères de stabilité externe et interne. Ils peuvent être observés, comme réalisé généralement en pratique, ou issus de l'analyse des documents de conception et de construction.

La figure III.13 détaille les six critères observés, correspondant à la performance en stabilité externe selon les six modes de défaillance. Le même type de formalisation peut être proposé pour la performance en stabilité interne.

Les critères d'évaluation de l'efficacité fonctionnelle peuvent également être identifiés. La figure III.14 présente les trois critères simplifiés retenus. Ainsi, l'échelle d'évaluation des trois critères est définie comme suit :

1. Contournement latéral : part de l'écoulement ($X_3 = [0\%; 100\%]$), pour un scénario donné, qui contourne l'ouvrage. Plus la part est importante, moins l'ouvrage est efficace. Il peut être dû à un mauvais dimensionnement de la section hydraulique de la cuvette, à une réduction de la section hydraulique par un obstacle ou à une insuffisance de l'ancrage des ailes.
2. Mauvaise orientation : angle de déviation ($X_4 = [0^\circ; 100^\circ]$) entre l'orientation objectif de l'ouvrage (vers le centre de la cuvette de l'ouvrage aval) et l'orientation réelle. Plus l'angle est important, moins l'ouvrage est efficace.
3. Maintien du niveau du lit amont : différence de hauteur ($X_2 = [0m; 10m]$) entre le niveau de crête de la cuvette objectif et le niveau de crête réel. Plus la mesure est élevée, moins l'ouvrage est efficace. Notons que, à l'inverse, il peut y avoir des cas de défaillance par une hauteur de crête trop haute à l'origine de contournements latéraux en apex des cônes de déjection. Ce cas ne sera pas considéré par la suite.

Mode de rupture	critères g_j	échelle d'évaluation	description	exemple
1. par poussée latérale	g_1 angle de rotation autour de l'axe vertical	degrés (°)	<i>poussée latérale</i> <i>sens d'écoulement</i> <i>Vue de dessus</i>	
2. par glissement	g_2 glissement / translation	mètres (m)	<i>sens d'écoulement</i> <i>Vue de dessus</i>	
3. par affouillement latéral	g_3 érosion du support latéral par contournement	mètres (m)	<i>sens d'écoulement</i> <i>Vue de dessus</i>	
4. par poussée axiale	g_4 angle de rotation autour de l'axe horizontal	degrés (°)	<i>sens d'écoulement</i> <i>Vue latérale</i>	
5. par tassement	g_5 tassement	mètres (m)	<i>sens d'écoulement</i> <i>Vue latérale</i>	
6. par affouillement de pied	g_6 érosion du support par affouillement de pied	mètres (m)	<i>sens d'écoulement</i> <i>Vue latérale</i>	

FIGURE III.13 – Critères simplifiés d'évaluation par observation de chaque mode de rupture structurale d'un ouvrage de consolidation/stabilisation en stabilité externe.



FIGURE III.14 – Critères simplifiés d'évaluation de l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage de consolidation/stabilisation (Carladous et al. 2016e).

• Critères d'efficacité d'un dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle

Selon l'importance de l'ouvrage, sa rupture structurale peut être la cause de la défaillance du dispositif (p. 112). Pour toutes les fonctions, les ouvrages les plus importants sont ceux de l'aval. Cependant, pour les fonctions de *ST* et de *CL*, les ouvrages situés en amont des zones d'érosion latérale ou de glissement consolidé ont également une importance élevée.

Le maintien du niveau du lit trop bas par une mauvaise implantation générale des ouvrages sur le profil en long du torrent peut être un mode de défaillance aux fonctions *CL*, *CA* et *RP*. La défaillance par contournement latéral et la mauvaise orientation d'un ou plusieurs ouvrages peuvent être la cause d'un contournement généralisé du dispositif ou d'affouillements latéraux.

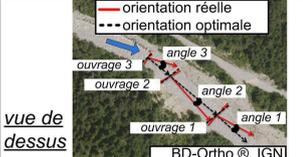
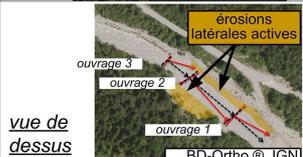
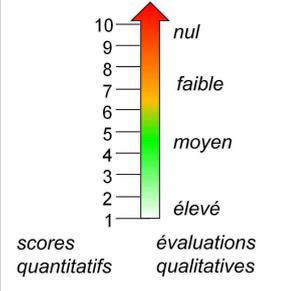
Mode de défaillance fonctionnelle	critères g_j	échelle d'évaluation	description	exemple
1. par affouillement/ contournement latéral des ouvrages	g_1 dimensions des cuvettes	taux (%) $X_1=[0\%, 100\%]$	Taux entre : - capacité hydraulique Q_{cap} de la plus petite cuvette parmi les ouvrages du dispositif; - évaluation du débit Q_k d'un scénario S_k	
	g_2 orientation des ouvrages	angle de déviation (°) $X_2=[0^\circ, 90^\circ]$	angles de déviation moyen pour tous les ouvrages.	
	g_7 érosion latérale active	taux (%) $X_7=[0\%, 100\%]$	Taux entre : - le volume mobilisé par les érosions latérales actives; - objectif de volume à stabiliser latéralement.	
2. par une altimétrie trop basse du lit	g_3 implantation longitudinale des ouvrages	mètres (m)	différence de hauteur moyenne entre: - le niveau de crête réel; - le niveau de crête optimal.	
3. par rupture des ouvrages	g_4 efficacité structurale des ouvrages les plus importants	niveau de stabilité $X_4=[1; 10]$	Transformation quantitative depuis une évaluation qualitative et inversement	
	g_5 efficacité structurale des autres ouvrages			
	g_6 érosion longitudinale active	taux (%) $X_6=[0\%, 100\%]$	Taux entre : - la longueur avec une incision longitudinale active ; - la longueur objectif de stabilisation longitudinale.	

FIGURE III.15 – Critères simplifiés d'évaluation de l'efficacité fonctionnelle d'un dispositif de consolidation/stabilisation (Carladous et al. 2016d).

Les critères simplifiés de la figure III.15 permettent d'évaluer l'efficacité fonctionnelle d'un dispositif selon chaque mode de défaillance. Leurs mesures comparent la capacité actuelle avec des objectifs donnés. L'importance des ouvrages est considérée pour la rupture. Ils sont regroupés selon l'évaluation par classes utilisée en pratique. Selon la fonction à traiter parmi les six potentielles, ces critères ont plus ou moins d'importance. Par exemple, le critère d'implantation longitudinale des ouvrages est plus important pour un dispositif de *CL* que pour un dispositif de *ST*. Ces critères sont établis et formalisés de manière générale. Selon les cas, d'autres critères peuvent être nécessaires et certains enlevés car ne correspondant pas à des objectifs donnés.

III.1.4.3 Approche 2 : identification exhaustive des indicateurs et évaluation détaillée de chaque critère

Une AMDE Processus puis une AMDE Produit (section II.2.2.1, p. 76) sont réalisées sur la fondation sous cuvette d'un ouvrage de stabilisation pour se focaliser sur l'analyse du mode de rupture structurale par affouillement, très présent en pratique (figure I.18, p. 26).

• AMDE d'un ouvrage de stabilisation torrentielle

Pour le système « ouvrage », le tableau III.5 identifie 10 fonctions techniques (FT) à réaliser par le composant « 10-Fondation sous cuvette ». Le Tableau III.7 est obtenu par une AMDE Processus de ce composant. Le Tableau III.8 est le résultat d'une AMDE Produit.

En pratique, l'affouillement peut être anticipé dès la conception de l'ouvrage. Cependant, le dimensionnement permettant à la fondation d'assurer ses FT de résistance aux sollicitations mécaniques en l'absence d'appui au sol (réalisation d'ancrages, une fondation de type poutre ancrée sur les berges, etc.) n'est pas toujours possible dans les conditions du site. Un composant anti-affouillement peut être ajouté. Sa fonction technique est d'éviter que l'affouillement du lit aval n'atteigne la fondation. Sa défaillance est à l'origine de l'atteinte de la fondation par l'affouillement du lit aval. L'AMDE Processus identifie les causes de défaillance liées au dimensionnement insuffisant du composant. L'AMDE Produit met en évidence celles liées à un mauvais état de ce composant.

Processus	Opérations	Modes de défaillance	Effets
Conception	- étude géotechnique	- étude limitée	- résistance en stabilité externe insuffisante
	- étude géologique du lit aval, des conditions hydrauliques - implantation ouvrage aval	- études limitées - pas assez haut	- affouillement du lit aval
	- dimensionnement de la fondation avec affouillement (ancrages latéraux, poutre) - type de structure adaptée à résister avec un affouillement	- dimensionnement insuffisant - type de structure non adapté	- rupture de l'ouvrage
Réalisation	- réalisation de la fondation en béton armé - réalisation des ancres et des injections - réalisation de la poutre en béton	- ferrailage insuffisant - qualité du béton insuffisante - densité insuffisantes - qualité du béton insuffisante - appui latéral insuffisant - qualité du béton insuffisante	- rupture de l'ouvrage

TABLE III.7 – AMDE Processus de la fondation sous cuvette d'un ouvrage de consolidation/stabilisation.

Fonctions Techniques	Modes de défaillance	Causes	Effets
S'appuyer sur le niveau topographique du lit aval (FT1.2)	rupture par affouillement de pied	- AMDE Processus - affouillement du lit aval - un affouillement permanent ou sur de longues durées	- affouillement atteignant la fondation
Résister structurellement aux contacts mécaniques (FT2.1, 2.2, 3.1, 4.1 à 4.5)		- AMDE Processus - rupture par prise en compte insuffisante de l'affouillement - taux d'affouillement critique - mouvement général de l'ouvrage - fissuration de l'ouvrage	- rupture de l'ouvrage

TABLE III.8 – AMDE Produit de la fondation sous cuvette d'un ouvrage de consolidation/stabilisation.

• Application d'un système à base de règles à un ouvrage de stabilisation

Les indicateurs du tableau de l'AMDE Processus sont ceux de conception-construction. Ceux du tableau de l'AMDE Produit sont des indicateurs durant la vie de l'ouvrage (Curt 2008). Pour l'exemple du mode de rupture par affouillement de pied d'un ouvrage de stabilisation, la figure III.16 synthétise les étapes ayant conduit à l'extraction des 14 indicateurs à partir des causes des Tableaux III.7 et III.8 mais aussi des causes de défaillance d'un composant anti-affouillement, ajouté dès la conception de l'ouvrage.

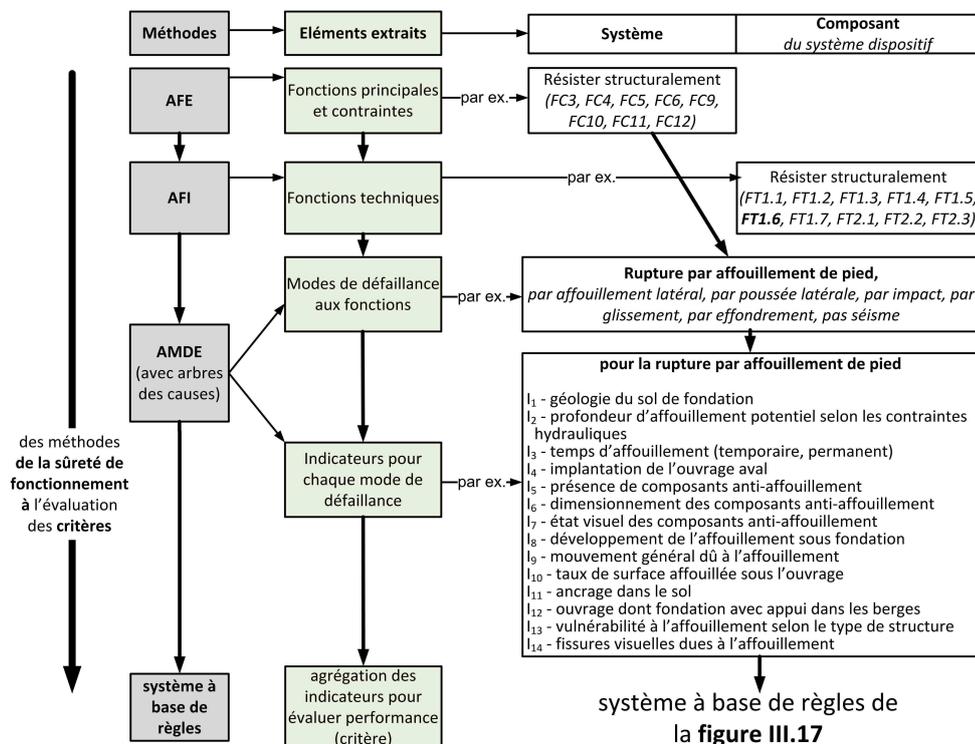


FIGURE III.16 – De l'AF aux indicateurs de performance d'un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle selon un mode de défaillance : synthèse de la démarche appliquée au mode de rupture par affouillement.

Sur la base de l'ensemble $\mathcal{I} = \{I_1, \dots, I_{14}\}$ des indicateurs listés sur la figure III.16, un système à base de règles est proposé sur la figure III.17 pour les agréger et évaluer la performance d'un ouvrage de consolidation/stabilisation selon le mode de rupture par affouillement de pied, à mettre en correspondance avec la figure II.1 (p. 61).

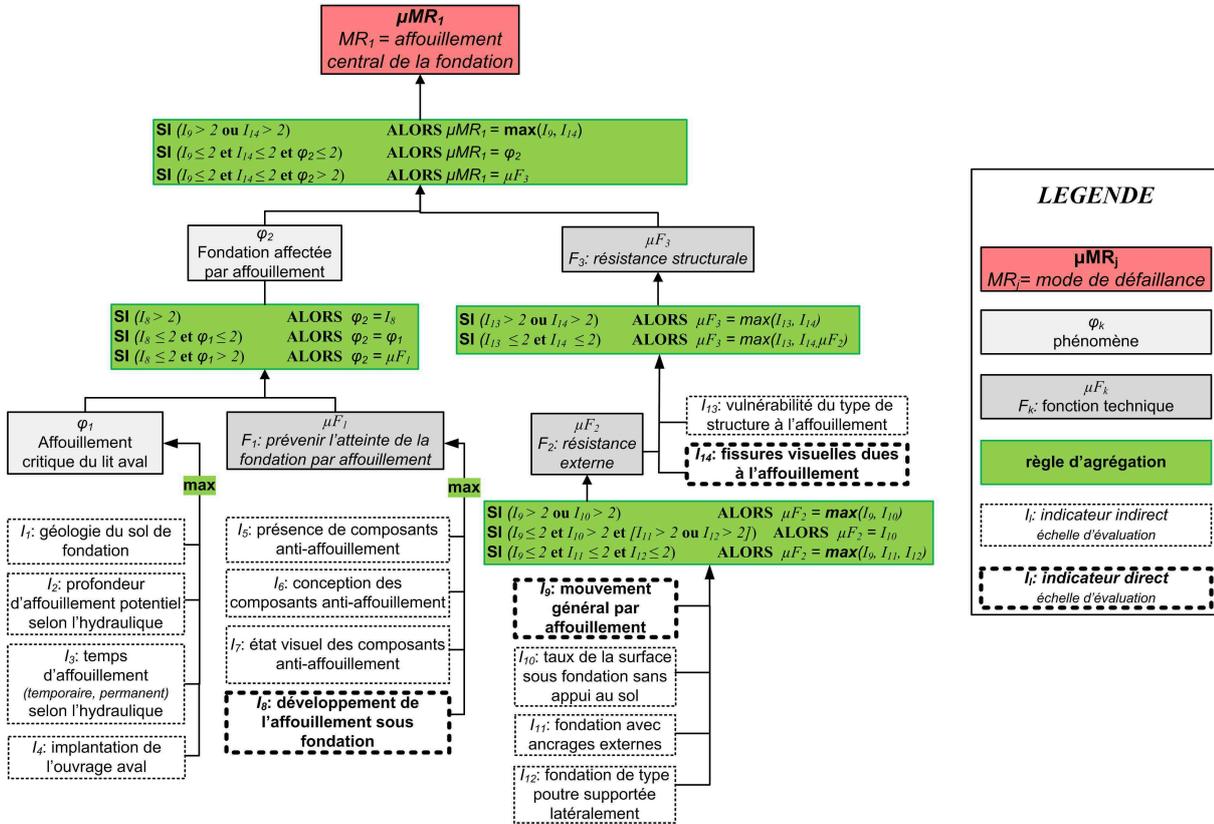


FIGURE III.17 – Système à base de règles pour évaluer la performance d'un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle selon le mode de rupture par affouillement (Carladous et al. 2016c).

Selon le principe d'évaluation établi par Curt et al. (2010), chaque indicateur I_l est évalué par y_l sur une échelle quantitative $Y_l = [0; 10]$. Dans ce système, plus la note est basse, plus la performance de l'ouvrage est élevée. Par exemple, le problème peut être d'évaluer la performance de deux ouvrages de l'ensemble $\mathcal{A} = \{A_1, A_2\}$. Pour chacun, l'expert réalise toutes les évaluations y_l , $l = 1, \dots, 14$. Les deux ensembles d'évaluations sont :

$$- Y(A_1) = \{5, 0, 0, 10, 0, 0, 7, 0, 7, 7, 7, 0, 0, 0\}$$

$$- Y(A_2) = \{0, 5, 7, 0, 0, 2, 7, 0, 2, 2, 0, 0, 0, 3\}$$

. En appliquant le système de la figure III.17, les résultats obtenus sont $\mu MR(A_1) = 7$ et $\mu MR(A_2) = 3$. Pour A_1 , l'évaluation d'un mouvement général par affouillement marqué ($y_9 = 7$) conditionne directement son évaluation comme un ouvrage dont la performance est basse. Pour A_2 , les fissures visuelles dues à l'affouillement sont visibles mais restent limitées ($y_{14} = 3$). Elles conditionnent l'évaluation de la performance de A_2 comme acceptable.

III.1.4.4 Comparaison des deux approches d'identification des critères

Les méthodes de la SdF ont été développées au contexte multi-échelle des mesures de protection de consolidation/stabilisation torrentielle. L'application de l'AF sur les ouvrages et dispositifs permettent de détailler les fonctions à réaliser par chacun des systèmes et d'établir le lien entre les deux échelles. L'analyse des modes de défaillance (AMDE) a ensuite été développée à la fondation d'un ouvrage de consolidation/stabilisation pour proposer un système à base de règles d'évaluation de sa performance selon ce mode de défaillances. Un exemple simplifié montre l'applicabilité de cette méthode.

L'avantage du développement de ces modèles est l'exhaustivité des indicateurs pris en compte pour évaluer la performance selon chaque mode de défaillance. Par contre, leur application à un contexte où le temps d'analyse est réduit n'apparaît que difficile à l'heure actuelle.

Les pratiques basées sur l'observation directe d'indicateurs pour évaluer la performance des ouvrages ont alors été prises en compte. Des critères d'évaluation simplifiés sont proposés pour évaluer directement la performance selon chaque mode de défaillance. Ainsi, ils aident l'évaluation de l'efficacité structurale et fonctionnelle d'un ouvrage. S'ils sont déjà utilisés en pratique, leur formalisation est proposée de manière nouvelle. De même, des critères sont proposés pour évaluer l'efficacité fonctionnelle d'un dispositif. L'efficacité des ouvrages y est intégrée de manière globale et moyennée, en tenant compte de leur classes d'importance. Les critères proposés peuvent être adaptés en fonction des situations particulières et des fonctions à réaliser par les dispositifs.

Synthèse de la section III.1

Dans cette section, nous avons adapté les méthodes de la sûreté de fonctionnement (AF et AMDE) au contexte multi-échelle (micro, méso, macro) des mesures de protection torrentielle. Elles permettent d'extraire des indicateurs détaillés d'évaluation de la performance du système. L'association d'un système à base de règles permet de formaliser leur agrégation pour évaluer cette performance selon un mode de défaillances donné.

Cependant, le développement de l'ensemble de cette méthodologie est chronophage. Pour des raisons opérationnelles, des critères simplifiés d'évaluation de l'efficacité structurale et fonctionnelle d'un ouvrage et de l'efficacité fonctionnelle d'un dispositif ont été définis après avoir identifié les modes de défaillance.

Cette méthodologie a permis de formaliser les critères d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection selon leurs différentes échelles. Ce problème d'évaluation peut alors être appréhendé comme un problème de décision décomposé en « sous-problème » à chaque échelle. Le processus d'aide à la décision est alors convoqué.

III.2 Description évolutive et multi-échelle des problèmes de décision

Quelle que soit l'échelle du système, l'évaluation de son efficacité est relative à un objectif fixé. Cependant, ce dernier peut évoluer dans le temps. L'efficacité devient donc une notion relative. L'approche proposée considère l'analyse de l'efficacité comme un processus de décision qui doit tenir compte de cet aspect évolutif et multi-échelle. Ce processus repose sur une première étape de description du contexte et une deuxième étape de formulation du problème de décision.

Dans ce cadre, la section III.2.1 adapte la méthode « 5WH » (Lasswell 1960) pour décrire l'évolution d'un contexte de décision dans le temps et dans l'espace. Cette démarche vise à aider à formuler les objectifs donnés aux mesures de protection, à un instant donné dans un lieu donné.

La section III.2.2 s'appuie sur la décomposition selon les différentes échelles de système et l'identification des objectifs pour formuler les « sous-problèmes » de décision relatifs à l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection torrentielle.

III.2.1 Description du contexte évolutif : identification des objectifs

Brugnot et Cassayre (2002) ont proposé une synthèse chronologique de l'évolution du contexte d'implantation des mesures de protection torrentielle en France : la période de tests (1860-1882), l'« Âge d'Or » de la RTM (1882-1914), le temps de l'entretien (1914-1940), le déclin (1940-1980) et le temps de la refondation (depuis 1980). Cependant, elle ne clarifie pas l'évolution des objectifs donnés aux mesures de protection à la fois dans le temps et dans l'espace.

Pour permettre cette identification, la méthode « 5WH » est d'abord adaptée pour une analyse évolutive générique d'un contexte de décision dans le temps et dans l'espace. Elle est ensuite appliquée, à l'échelle nationale, des massifs et des départements, pour décrire l'évolution de mise en œuvre des mesures de protection contre les risques torrentiels en zones de montagne.

III.2.1.1 Déploiement multi-échelle et multi-temporel de la méthode « 5WH »

La méthode « 5WH » a été retenue (tableau II.5, p. 105) pour décrire un contexte de décision selon six questions : « who ? » (qui ?), « what ? » (quoi ?), « why ? » (pourquoi ?), « when ? » (quand ?), « where ? » (où ?), « how ? » (comment ?). L'ambition de son adaptation est de pouvoir identifier les objectifs relatifs à une mesure de protection, qui ont constitué la décision à un instant donné et ont été définis dans un contexte donné.

Connaissant l'objet à évaluer (« what ? »), sa localisation (« where ? ») et la période de réalisation (« when ? »), la méthode doit permettre d'accéder aux autres éléments de contexte, à savoir le décideur (« who ? »), les objectifs donnés (« why ? »), les contraintes réglementaires, financières et les connaissances techniques et scientifiques ayant conduit à ces choix (« how ? »).

Pour cela, l'application de la méthode « 5WH » est multipliée selon le principe la figure III.18. Parmi les six variables de la méthode, celle décrivant l'objet de la décision (W) est fixée, comme une mesure de protection torrentielle identifiée. Les deux autres variables de temps (W) et d'espace (W) sont des variables d'entrée : on suppose connues la localisation de la mesure et la période où elle a été construite. Les unités de temps de ces deux variables sont à choisir pour chaque problème. Les mesures de protection torrentielles ayant été implantées depuis le XIX^{ème} siècle, l'unité de temps est pluri-annuelle depuis cette période à aujourd'hui. L'unité d'espace est une échelle de territoires, correspondant à des entités homogènes de gestion. Pour des problèmes en

montagne, le territoire national peut être découpé en massifs, puis en départements (figure I.1, p. 6), puis en bassins versants et finalement en bassins d'enjeux. La figure III.18 illustre l'exemple d'une analyse à l'échelle des massifs.

Sur cette base, la construction du modèle doit permettre d'établir les trois variables de sortie : objectifs (W), décideurs (W), contraintes et connaissances techniques (H). Pour cela, une analyse doit être faite sur un nombre maximum de variables d'entrée pour construire les points discrets sur la figure III.18. L'extrapolation permet la vision globale de l'évolution dans le temps et dans l'espace, pour un objet donné. Une fois ce modèle construit, correspondant aux trois plans de la figure III.18, il est possible, pour quelqu'un d'extérieur à la construction de ce modèle, d'extraire, pour un élément d'une échelle donnée et une certaine période, les autres éléments de contexte dont la compréhension des objectifs.

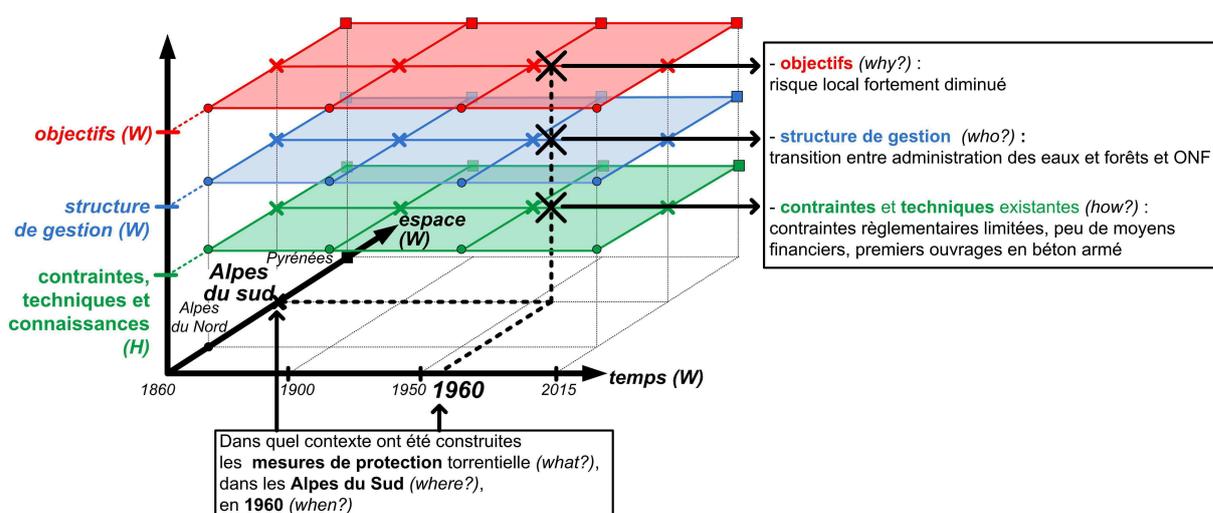


FIGURE III.18 – La méthode « 5WH » développée pour une analyse multi-temporelle et multi-spatiale.

III.2.1.2 Spécification des objectifs et fonctions de protection torrentielle

La construction du modèle « 5WH » multi-temporel et multi-spatial (figure III.18) a été appliquée aux mesures de protection torrentielle en montagne (« what ? »). Pour une période s'étendant de 1860 à aujourd'hui (« when ? »), l'évolution des contextes de décision a été étudiée à l'échelle nationale et à celle des massifs (« where ? »).

- Une analyse thématique détaillée des archives

Une analyse thématique des archives a été menée, en collaboration avec une autre thèse (Piton 2016). Elle a permis de récolter les éléments concernant les trois variables nécessaires à la construction du modèle : les connaissances techniques (« how ? »), les objectifs (« why ? »), la structure de gestion (« who ? »).

Les documents analysés sont répertoriés dans le tableau III.9. En parallèle, l'analyse statistique des éléments extraits de la BD-RTM permet de comparer la répartition spatiale des ouvrages de protection selon leur type pour la période actuelle.

Dimension du contexte	Documents analysés	
	Type	Références bibliographiques
Connaissances scientifiques et techniques	documents récents	Poncet (1968), Meunier (1991), Poncet (1995), Deymier et al. (1995), Tacnet et Degoutte (2013)
	archives anciennes	Fabre (1797), Surell (1841), Gras (1848, 1850, 1857), Breton (1867), Demontzey (1882, 1894), Thiéry (1891), Costa de Bastelica (1874), Kuss (1900a,b), Mougín (1900, 1914, 1919), Bernard (1927)
Objectifs	synthèses récentes	Fourchy (1966), de Crécy (1983), Kalaora et Savoye (1986), Fesquet (1997), Brugnot et Cassayre (2002), Liébault et al. (2010)
	textes réglementaires	Empereur Napoléon III (1860, 1864), MAD (1882), MA (1913, 1933), JORF (1961), ME (1974), MA et ME (1978), MI et MA (1979), JORF (1982, 1985, 1987, 1995, 2001), MATE et METL (2002), MAAF (2012, 2015), JORF (2015a)
	bilans des actions	École Forestière (1911a,b,c), Mougín (1931), Messines du Sourbier (1964), extraction de la BD-RTM (17/04/2014)
Structure de gestion	textes réglementaires	MA (1966), MA (1971), MA (1980), MA (1984) MA (1972, 1976, 1981, 1986, 1988, 1989, 2000, 2001, 2012)
	documents	Messines du Sourbier (1970), Sonnier (1991)
	internes	ONF (2007), ONF (2013)

TABLE III.9 – Documents analysés pour décrire l'évolution du contexte de décision relatif aux mesures de protection torrentielle en montagne.

Les éléments principaux extraits de cette analyse sont synthétisés ci-dessous, le détail étant disponible par ailleurs (Annexe B).

• Fonctions et objectifs locaux à l'échelle des ouvrages (micro) et dispositifs (méso)

L'analyse des archives techniques a identifié l'évolution des fonctions données aux mesures de protection torrentielle (Piton et al. 2016), en intégrant la forêt et les structures de génie civil (p. 115). Ces objectifs locaux, donnés aux dispositifs, étaient adaptés aux contraintes techniques.

Les ouvrages, d'abord rustiques, ont ensuite été de type poids construits en bois, pierres sèches, puis en maçonnerie selon les éléments locaux disponibles et la taille des ouvrages. La normalisation n'est apparue que dans les années 90. Le béton étant apparu dans les années 50, les modalités de construction et les types d'ouvrage ont évolué de l'actif vers le passif, du poids vers l'autostable. Selon les massifs, les types d'ouvrages privilégiés ont été différents, notamment en fonction de leur rôle d'appui au développement du couvert forestier mais aussi, éventuellement, selon des pratiques spécifiques locales.

• Objectifs globaux : macro-échelle

La politique de protection des zones de montagne contre les phénomènes torrentiels, dite de Restauration et de conservation des Terrains en Montagne (RTM) s'est d'abord basée sur la Loi du 28/07/1860 sur le « reboisement des montagnes » (Empereur Napoléon III 1860) complétée par la Loi du 08/06/1864 sur leur « gazonnement » (Empereur Napoléon III 1864). Leur objectif était la revégétalisation extensive suite au constat d'un déboisement massif par Fabre (1797) puis Surell (1841), ayant provoqué selon eux un départ de matériaux important vers le fond des vallées. Avec des objectifs trop importants (Kalaora et Savoye 1986), ces deux lois ont été abrogées par la Loi du 04/04/1882 relative à la « restauration et à la conservation des terrains en montagne » (MAD 1882). L'analyse de l'évolution de l'application de ces lois RTM a permis d'identifier trois objectifs initiaux (École Forestière 1911b).

1. À une échelle régionale, la consolidation des sols et la régulation du régime des eaux devaient permettre de réduire le risque d'inondation dans les rivières principales, en limitant les dépôts de sédiments provenant des versants et en réduisant le débit de pointe liquide des crues. Cet objectif se basait sur un reboisement extensif des versants pouvant nécessiter des ouvrages rustiques, parfois plus importants, dans les ravines et torrents.
2. À l'échelle locale du bassin d'enjeux, la restauration des terrains avait pour objectif de réduire le risque torrentiel en contrôlant les phénomènes dans les zones où ils affectaient les populations, les réseaux de communication et les terres agricoles. Ils avaient donc pour objectif de réduire le risque à l'échelle du bassin d'enjeux. Ils étaient basés sur des travaux actifs de génie biologique avec des reboisements localisés et de génie civil.
3. À une échelle globale, l'objectif d'aménagement du territoire était de maintenir la population rurale en montagne en conservant les sols utilisés pour l'agriculture et l'élevage et en promouvant l'amélioration des pratiques pastorales moins impactante sur les sols érosifs.

La déclinaison de ces objectifs sur le territoire a évolué avec le risque à gérer dans les zones de montagne (Annexe B). Les moyens pour les atteindre étaient le reboisement et les mesures de correction, nombre d'entre elles ayant été réalisées pour permettre le reboisement.

Initialement la protection était le seul moyen de prévention. Elle a ensuite été intégrée dans une politique de prévention plus large (figure III.19). Les objectifs des structures de protection se sont alors recentrés sur la seule réduction du risque au niveau local, en agissant sur les phénomènes. Les objectifs d'entretien des ouvrages doivent finalement évoluer pour prendre en compte d'autres dimensions comme l'environnement ou la sécurité des personnes.

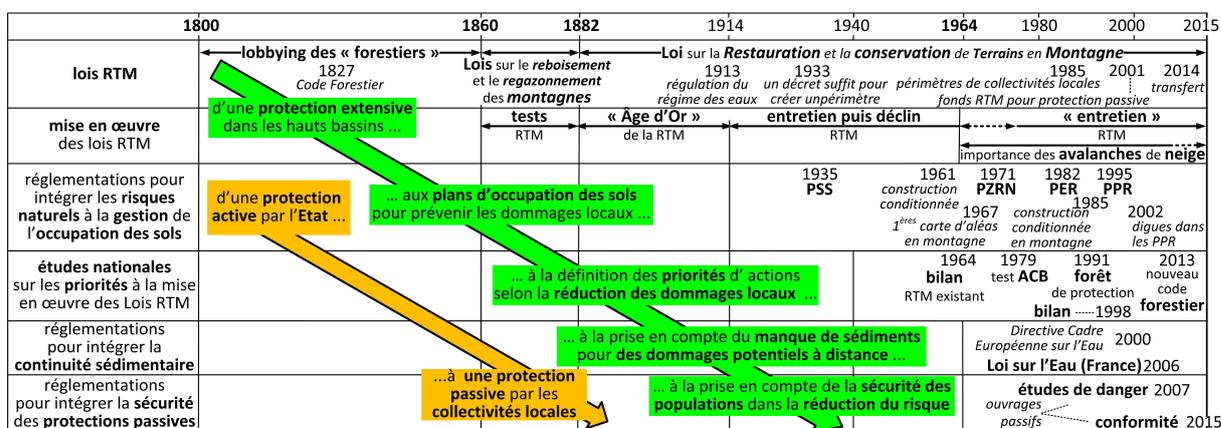


FIGURE III.19 – Évolution de la prévention contre les risques torrentiels depuis le XIX^{ème} siècle (Carladous et al. 2016a).

• Évolution de la structure de gestion des risques torrentiels

Selon l'analyse de l'évolution de la structure de gestion des mesures de protection torrentielle (Annexe B), la décision qui concernait l'ensemble des actions RTM a été partitionnée. À l'échelle d'un bassin d'enjeux, la figure III.19 met en évidence l'implication progressive et de plus en plus importante des collectivités locales dans la décision. De fait, la structure de décision actuelle pour décider des moyens à mettre en œuvre pour protéger des mêmes enjeux est plus complexe et n'est pas toujours définie.

Dans cette thèse, nous proposons une méthode d'analyse pour construire un modèle de description multi-temporelle et multi-échelle du contexte de décision. Deux listes de fonctions (micro-échelle et méso-échelle) et d'objectifs (macro-échelle) potentiels donnés aux mesures de protection torrentielle ont été établies. Avec le modèle descriptif, elles facilitent la définition de l'objectif et la fonction d'une mesure de protection torrentielle au moment de sa construction.

III.2.2 De la capacité à l'efficacité des systèmes

Une fois l'objectif d'un système établi pour une fonction donnée, l'évaluation de son efficacité dépend de la confrontation de cet objectif avec sa capacité technique et son effet.

Une fois la capacité et l'effet établis, d'autres concepts liés à l'efficacité peuvent être évalués aux différentes échelles de système (micro, méso, macro) : utilité, adaptation, performance, sécurité, efficacité (p. 108). Une évaluation décomposée selon les différentes échelles et concepts peut être proposée.

Finalement, cette décomposition aide à formuler les différents « sous-problèmes » de décision pour les différentes échelles de systèmes.

III.2.2.1 Capacité et effet des systèmes de protection torrentielle

L'évaluation de la capacité fonctionnelle (intégrant celle structurale) et de l'effet du système est nécessaire pour permettre celle de son efficacité. Une échelle d'évaluation doit être proposée, comme dans le tableau III.10 par exemple.

- De la capacité à l'effet du système

La *capacité* du système dépend des caractéristiques de conception et de la disponibilité d'un système en fonctionnement (figure III.1, p. 108). Les premières sont connues à partir des dossiers d'exécution du système, qui peuvent manquer. La seconde est évaluée à partir d'indicateurs de fiabilité, de maintenabilité et de logistique de maintenance.

On distingue la capacité structurale et la capacité fonctionnelle d'un système. La première est donnée par le niveau de charges maximum acceptable pour que le système soit stable aux états limites ultimes (ELU). L'effet de la capacité structurale va conditionner la capacité fonctionnelle, évaluée par la mesure de la caractéristique décrivant la fonction à réaliser. Par exemple, pour la fonction de rétention temporaire, la capacité fonctionnelle est le volume pouvant être retenu lors d'un événement.

Les *effets* du système, liés à des processus physiques ou mécaniques, dépendent de sa capacité. Par exemple, celle d'un dispositif à retenir un volume de matériaux a un effet de réduction du débit solide dans un écoulement avec charriage ou du débit de lave torrentielle.

La défaillance du système se traduit par une réduction de sa capacité. Le dépassement de cette dernière peut alors être favorisé. L'analyse de l'effet de ce dépassement permet d'analyser la sécurité du système.

Par ailleurs, la capacité est la mesure d'une fonction. Un système peut être conçu pour une fonction objectif. Cependant, il peut avoir d'autres fonctions, même non souhaitées, dont il faut évaluer l'effet. Par exemple, la réduction de l'aléa en apex du cône de déjection est la fonction objectif des dispositifs de protection présents dans le système « bassin d'enjeux ». Cependant, les effets comme ceux à l'échelle de la rivière principale (incision, faune, etc.) doivent être analysés pour évaluer la sécurité (figure III.19, page précédente).

III.2 : DESCRIPTION ÉVOLUTIVE ET MULTI-ÉCHELLE DES PROBLÈMES

Type	échelles				locale/régionale capacité
	fonction	capacité	dispositif paramètres	effets	
forêt de protection	maintenir les sédiments sur les versants	volume retenu de sédiments potentiellement mobilisables	volume d'érosion potentielle traité, (profondeur, surface couverte, données	réduction de la production régulière de sédiments depuis les versants traités	réduction du débit solide, aux échelles locales et régionales
	réduire le débit liquide	volume d'eau absorbé	fréquence et intensité de pluie, sol couvert (type,surface)	réduction du débit liquide provenant du versant traité	réduction du débit liquide de pointe, principalement à l'échelle régionale
	stopper les blocs pendant leur propagation	volume de blocs maintenu sur les pentes	volumes unitaires des blocs, densité, surface active	réduction du volume de blocs apportés en zone d'écoulement	réduction du débit solide ou de lave, à une échelle locale
	stabiliser le manteau neigeux en zone de départ de couloir d'avalanche	volume retenu de neige potentiellement mobilisable	zone de départ (hauteur de neige, pente, surface), connexion avec le torrent	réduction du volume de matériaux transportés par une avalanche jusqu'à la zone d'écoulement	réduction du débit solide ou du débit de lave, à une échelle locale
barrages et seuils « fermés »	stabiliser les profils en long et en travers du torrent	volume stabilisé de sédiments potentiellement mobilisable par incision, érosion	géologie, profondeur et longueur d'incision potentielle	réduction de la production de sédiments, stabilisation de la forêt	réduction du débit solide, aux échelles locales et régionales
	consolider les versants latéraux et amont	volume stabilisé de matériaux potentiellement apportés par glissements, etc.	géologie, topographie, géotechnique, hydrogéologie	réduction du volume de départ de matériaux erratiques	réduction du débit de pointe solide ou de lave, à une échelle locale
	diminuer la pente du cours d'eau	volume unitaire réduit de matériaux potentiellement transportés	hydrologie, apports de matériaux, capacité de transport	réduction des volumes unitaires maximum parmi les matériaux transportés	réduction du volume des blocs transportés, à une échelle locale
	retenir durablement les sédiments	volume retenu de sédiments en amont de la structure	topographie, apports de matériaux	réduction du volume de matériaux transportés	réduction du débit de pointe solide ou de lave, à une échelle locale
	moduler le transport solide	part moyenne du volume de sédiments transitant d'amont en aval	apports de matériaux, longueur entre ouvrages, type de transport	augmentation de la fréquence, réduction du volume de matériaux transportés	réduction de la fréquence des événements de forte intensité
barrages « ouverts »	retenir les sédiments lors d'un événement	volume retenu de sédiments lors d'un événement	apports de matériaux	réduction du débit solide ou de lave, à l'échelle locale	
	trier les matériaux transportés	volume unitaire retenu de blocs ou de flottants	type, taille des matériaux (blocs, bois)	réduction du volume des blocs et bois flottants transportés, à l'échelle locale	
	écrêter les débits de crue	débit (liquide, solide, lave) réduit	type de phénomène torrentiel	réduction du débit liquide, ou solide, ou de lave, à l'échelle locale	
	« casser » l'énergie de l'écoulement	nombre de gros blocs retenus du front de lave	taille des blocs transportés, nombre de bouffées	réduction du nombre et de la taille des blocs transportés, à l'échelle locale	
digues	maintenir l'écoulement dans un chenal	hydrogramme (liquide, solide, lave) contenu	type de phénomènes, dépôts de matériaux, hauteur d'écoulement	réduction de la fréquence d'atteinte, à l'échelle locale	
protection de berges	éviter l'érosion, la divagation latérale	profondeur et longueur de berges protégées	type de phénomènes, géologie, hauteur d'écoulement	réduction de la fréquence et de l'intensité des affouillements latéraux, à l'échelle locale	

TABLE III.10 – Évaluer la capacité et l'effet des dispositifs de protection torrentielle (Carladous et al. 2016a).

• **Évaluation de la capacité et de l'effet à chaque échelle de système**

Les échelles d'évaluation de la capacité et de l'effet d'un dispositif sont établies dans le tableau III.10. De la même manière, des échelles du même type peuvent être établies à l'échelle des ouvrages. L'évaluation de la capacité du dispositif à agir sur l'aléa à l'échelle du bassin d'enjeux, qui dépend de son effet, est également proposée dans le tableau III.10.

Pour les mesures de protection active, l'effet dû à la capacité du système « dispositif » est considéré directement à son aval et aux échelles locales (en apex du cône de déjection) ou régionales (celle de la rivière principale). Ceci est imposé par la définition des objectifs généraux mais aussi par l'évaluation de la sécurité.

Si l'effet aux échelles locales et régionales dépend de processus physiques complexes, l'effet local est directement dépendant de la capacité du dispositif. Or la capacité, selon les éléments du tableau III.10, est plus facilement mesurable par des paramètres topographiques et géologiques. La définition d'un objectif dans l'unité de la capacité plutôt que dans celle de l'effet peut aider à faciliter l'évaluation de l'efficacité qui est alors similaire à celle de la performance.

De fait, il est proposé d'évaluer l'efficacité de chaque système de protection torrentielle en comparant un objectif de capacité à atteindre avec celle réelle du système. On pourra alors aussi parler d'évaluation de la performance du système. De même, l'efficience peut être évaluée en comparant les résultats attendus en terme de capacité avec les ressources nécessaires. Par contre, la sécurité, elle, ne peut être évaluée qu'en considérant les conséquences et donc les effets.

III.2.2.2 Évaluation séquentielle selon les concepts et échelles de système

Les différentes échelles de systèmes (micro, méso, macro) ont été identifiées : ouvrage, dispositif, bassin d'enjeux. Le schéma conceptuel (figure III.1, p. 136) a identifié les concepts relatifs à l'évaluation de l'efficacité. Les fonctions, objectifs associés et moyens d'évaluation de la capacité et de l'effet ont été précisés pour les différentes échelles de systèmes de protection.

Sur cette base, une démarche d'évaluation, décomposée et séquentielle, est établie sur la figure III.20. Elle est à mettre en relation avec la figure I.30 (p. 48).

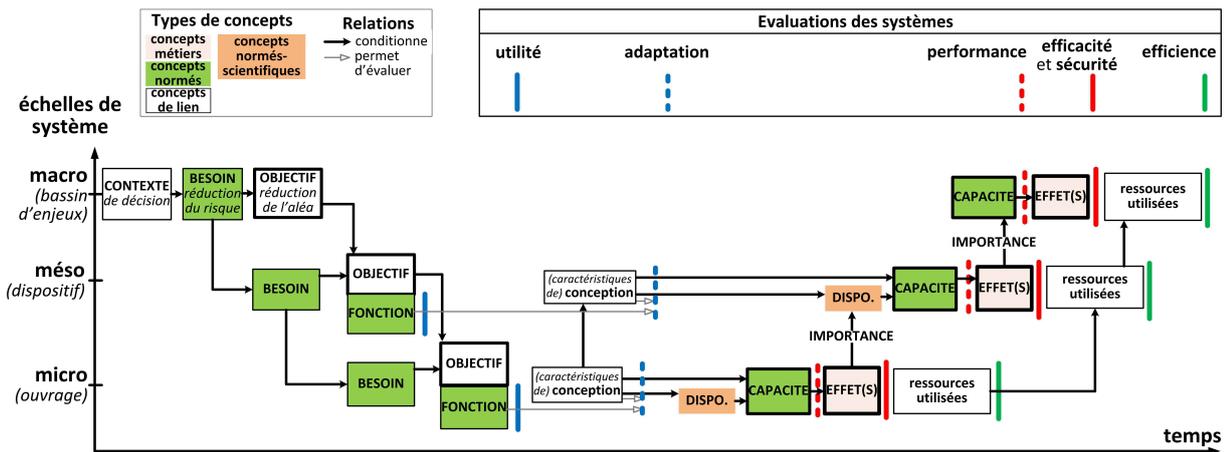


FIGURE III.20 – La définition des objectifs et fonctions puis l'évaluation de la capacité et des effets permettent une évaluation séquentielle, multi-échelle et multi-dimensionnelle de l'efficacité.

• **Des besoins dans le bassin d'enjeux (macro) aux fonctions des ouvrages (micro)**

Comme en conception, les besoins, objectifs et fonctions sont définis de la macro-échelle à la micro-échelle. Le besoin de réduction du risque au niveau des enjeux conditionne celui donné aux dispositifs et ouvrages dans le bassin versant. Pour chaque échelle de système, les fonctions réalisées par les mesures de protection en place sont identifiées.

Comparer la fonction réalisée avec le besoin identifié permet de vérifier l'utilité du système pour chaque échelle. Si un système existe mais qu'aucun besoin n'est associé, il est inutile. Il en est de même si un besoin est identifié mais que la fonction réalisée ne permet pas d'y répondre.

À l'échelle du bassin d'enjeux, le besoin est quantifié par un objectif de protection, c'est à dire de réduction de l'aléa. Il conditionne les objectifs donnés à chaque dispositif et à chaque ouvrage.

• **De la capacité des ouvrages (micro) à l'efficience dans le bassin d'enjeux (macro)**

Les caractéristiques de conception d'un ouvrage conditionnent celles du dispositif et de la protection des enjeux. Leur connaissance permet de vérifier l'adaptation du système.

Les indicateurs de la sûreté de fonctionnement (SdF) (Annexe D) permettent d'évaluer la disponibilité d'un ouvrage qui conditionne sa capacité. Celle-ci conditionne l'effet de l'ouvrage qui, comparé avec l'objectif, permet d'évaluer son efficacité. De même, sa sécurité peut être évaluée selon les effets prenant en compte le dépassement de la capacité.

Les effets de l'ouvrage en fonctionnement conditionnent la disponibilité du dispositif. Les effets de ses défaillances permettent d'évaluer son importance dans le dispositif. La capacité du dispositif puis ses effets sont évalués pour évaluer la performance, l'efficacité et la sécurité du dispositif.

Les effets de chaque dispositif conditionnent la capacité du système « bassin d'enjeux » à ne pas dépasser la probabilité $P_d(\bar{M}_k)$ (figure III.6, p. 113). Leur importance mais aussi leur performance sont évaluées sur cette base. La capacité du bassin d'enjeux établie, les effets sont comparés aux objectifs fixés pour évaluer l'efficacité. Leur analyse permet également l'évaluation de la sécurité.

Finalement, la maintenance ou la construction des ouvrages nécessitent des ressources. Celles utilisées à l'échelle de l'ouvrage (micro) conditionnent celles nécessaires à l'échelle du bassin d'enjeux (macro). L'efficience peut alors être évaluée à chaque échelle de système.

• **Évaluation dans le temps et maintenance**

L'analyse séquentielle (figure III.20) est générique pour une évaluation à un moment donné. Cette analyse doit être reconduite dès que l'objectif évolue.

À objectifs et fonctions fixes, l'utilité et l'adaptation de chaque système peuvent être évaluées une seule fois. Par contre, la capacité évolue dans le temps (figure I.19, p. 27). Son évaluation et celle des concepts qui en découlent doivent alors être reproduites à intervalles réguliers.

Les actions de maintenance ont un effet sur la capacité et donc sur l'évaluation des concepts qui en dépendent, dont l'efficacité. Chaque action de maintenance peut alors être évaluée selon l'effet qu'elle a sur l'évaluation de chacun de ces concepts.

Synthèse de la section III.2

Une approche historique aide à décrire l'évolution du contexte de décision et à identifier les objectifs et fonctions des mesures de protection. L'évaluation de leur capacité conditionne celle de leur effet aux différentes échelles. Une analyse séquentielle identifie les éléments (composantes, échelles de systèmes) sur lesquels portent les décisions intermédiaires qui peuvent être formulées.

III.3 Synthèse : décomposition puis formulation des problèmes d'évaluation

Pour répondre à l'objectif d'aider à formuler le problème d'évaluation de l'efficacité multi-échelle (micro, méso, macro) et multi-composantes des mesures de protection torrentielle, nous avons développé une méthodologie qui s'est appuyée, de manière nouvelle, sur une double approche systémique et d'aide à la décision.

III.3.1 Méthodologie de décomposition du problème initial

Pour une fonction donnée, l'efficacité dépend de l'objectif fixé et de sa capacité. La méthodologie suivante a alors été développée et appliquée :

1. *décomposition systémique* :

- (a) décomposition conceptuelle de l'efficacité d'un système pour extraire ses composantes ;
- (b) analyse structurelle pour une décomposition des systèmes selon les échelles :
 - i. le système « ouvrage » (micro) est un composant du système « dispositif » (méso) ;
 - ii. le système « dispositif » est un composant du système « bassin d'enjeux » (macro) ;
- (c) analyse fonctionnelle aux différentes échelles de systèmes :
 - i. les fonctions de service du système à « ouvrage » (micro) sont ses fonctions techniques en tant que composant du système « dispositif » (méso) ;
 - ii. l'importance de l'ouvrage dépend de l'effet de ses défaillances ;
- (d) extraction des critères d'évaluation de l'efficacité :
 - i. selon une approche simplifiée, les critères sont identifiés pour chaque mode de défaillance (les éléments issus de cette approche sont retenus pour la suite) ;
 - ii. selon une approche détaillée mais chronophage (analyse des modes de défaillance et systèmes à base de règles), tous les indicateurs sont extraits puis agrégés pour évaluer chaque critère qu'est la performance selon chaque mode de défaillance ;

2. *processus d'aide à la décision* :

- (a) description de l'évolution du contexte de décision pour identifier les objectifs :
 - i. à macro-échelle, les objectifs liés à la politique d'aménagement du territoire en montagne sont identifiés ;
 - ii. à micro-échelle et méso-échelle, les fonctions données aux ouvrages et dispositifs de protection torrentielle sont identifiées ;
- (b) analyse séquentielle d'évaluation multi-échelle et multi-composante :
 - i. les modalités d'évaluation de la capacité et de l'effet des mesures de protection aux différentes échelles sont précisées ;
 - ii. la séquence des objets conceptuels sur lesquels portent les décisions intermédiaires, selon les différentes échelles, est établie.

III.3.2 Formulation des « sous-problèmes » d'évaluation de l'efficacité

La décomposition séquentielle et multi-échelle des problèmes de décision a mis en évidence une série d'objets de décision (figure III.20). Nous appréhendons alors l'analyse multi-échelle du

niveau d'efficacité comme une série de processus de décision pour lesquels les problèmes doivent être formulés.

1. Quelle est l'utilité du système ? Ce problème dépend de l'expression des besoins et de la définition des fonctions attendues du système.
 - À l'échelle du bassin d'enjeux, c'est généralement, aujourd'hui, la réduction de l'aléa (fonction) pour réduire le risque (besoin).
 - À l'échelle du dispositif, c'est la réalisation d'une ou plusieurs des fonctions pour agir sur le phénomène pour réduire l'aléa (besoin).
 - À l'échelle de l'ouvrage, c'est la réalisation d'une ou plusieurs fonctions pour permettre au dispositif de réaliser la (ou les) sienne(s) (besoin).
2. Quelle est l'adaptation du système ? Ce problème dépend des caractéristiques de conception et de la définition des fonctions attendues du système.
3. Quelle est l'importance du système ?
 - À l'échelle du bassin d'enjeux, l'importance de chaque unité géomorphologique, avec ou sans dispositif, est relative à leur part dans l'atteinte d'un niveau d'aléa résiduel. Avec un dispositif, la participation du composant est réduite, renvoyant à l'utilité du dispositif pour réduire l'aléa.
 - À l'échelle du dispositif, l'importance de l'ouvrage est relative à la part prise par sa défaillance dans celle du dispositif, pour un mode de défaillance donné.
4. Quelle est l'efficacité (ou la performance) du système à t_i (et après) ? Ce problème dépend de la définition de l'objectif à atteindre dans l'unité de la capacité à évaluer à t_i (et de manière prospective). L'évaluation de la capacité dépend des caractéristiques de conception et de la disponibilité à t_i (et de manière prospective).
5. Quelle est la sécurité du système à t_i (et après) ? Ce problème dépend de l'évaluation des effets dus au dépassement de la capacité à t_i (et de manière prospective).
6. Quelle est l'efficacité du système à t_i (et après) ? Ce problème dépend de l'évaluation des effets dus à la capacité à t_i (et de manière prospective) et des ressources nécessaires.

Les actions de maintenance d'un ouvrage sont réalisées pour modifier sa capacité, et par là-même celle du dispositif et du système de protection du bassin d'enjeux. Les actions de maintenance peuvent alors être comparées, à chaque échelle de système, selon leur modification de la capacité, de l'efficacité, de la sécurité et de l'efficacité.

Pour chaque échelle de système, avec ou sans action de maintenance, et chaque concept à évaluer, la problématique peut être celle du tri (P_β) ou du classement pour choix (P_γ , P_α). Sans détailler tous les problèmes de décision qui en découlent, on a par exemples :

1. À quelle classe d'utilité appartiennent les systèmes de protection « bassin d'enjeux » ? (P_β)
2. À quelle classe d'adaptation appartiennent les dispositifs de protection ? (P_β)
3. Quel est le classement des dispositifs dans un bassin d'enjeux selon leur importance ? (P_γ)
4. Quels sont les ouvrages les plus efficaces ? Si des classes sont préféfinies, la problématique est le tri (P_β). Sans classes, la problématique est le classement (P_γ).
5. Quelle est l'action qui augmente le plus l'efficacité d'un dispositif à t_i , à long terme ? (P_α)
6. Quelle est l'action la plus efficiente dans un bassin d'enjeux ? (P_α)

Par la suite, il est fait l'hypothèse que l'ensemble de ces « sous-problèmes » de décision peuvent être traités indépendamment.

CHAPITRE IV

Aide à la décision pour l'évaluation multicritère de l'efficacité en contexte d'information imparfaite

L'approche systémique a permis de décomposer le problème d'évaluation de l'efficacité selon les différentes échelles de mesures de protection (ouvrage, dispositif, bassin d'enjeux). Les problèmes de décision associés ont été formulés. Leur analyse dépend de celle de plusieurs critères dont l'évaluation est imparfaite et réalisée en environnement incertain. Les méthodes d'aide à la décision (AD) basées sur le Raisonnement Évidentiel (ER) ont été retenues pour ce contexte. Elles présentent cependant des limites pour représenter l'imperfection de l'évaluation, définir la qualité de la décision et la valider. Par ailleurs, elles sont spécifiques à l'aide multicritère à la décision pour le tri (ER-MCDA, Soft Electre Tri), pour le classement (BF-TOPSIS) ou pour l'AD dans l'incertain (FCOWA-ER).

Comme décrit sur la figure IV.1, la section IV.1 de ce chapitre vérifie d'abord la possibilité d'adapter les méthodes d'AD basées sur le ER au contexte de l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection torrentielle. Pour cela, des cas simplifiés représentent les problèmes d'évaluation aux échelles des ouvrages (micro) et dispositifs de protection (mésa). Les améliorations techniques de la section IV.2 visent à dépasser les limites affichées (représentation, qualité, validation). Finalement, la section IV.3 développe l'association technique des méthodes d'AD basées sur le ER pour aider à décider en propageant l'imperfection de l'information dans l'ensemble du processus d'AD, pour chaque problème spécifique.

Le chapitre V sera ensuite consacré à l'intégration multi-échelle des problèmes de décision pour aider l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection à l'échelle du bassin d'enjeux.

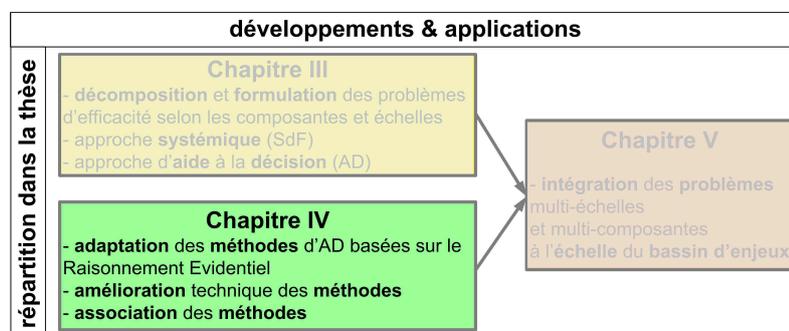


FIGURE IV.1 – Le chapitre IV dans les développements de la thèse.

IV.1 Adaptation des méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel

Les méthodes d'aide à la décision (AD) basées sur le Raisonnement Évidentiel (ER) améliorent les méthodes classiques d'AD en étant plus robustes au renversement de rang (BF-TOPSIS), en s'affranchissant du choix de seuils et d'une attitude du décideur (Soft Electre Tri), en tenant compte de l'imperfection de l'évaluation des critères (ER-MCDA) ou en tenant compte des différentes formes d'imperfection qui peuvent affecter la connaissance sur les états de la nature (FCOWA-ER). L'hypothèse est qu'elles peuvent modéliser les problèmes individuels formulés à chaque échelle de système (ouvrage, dispositif, bassin d'enjeux). Cette section vise à confirmer cette hypothèse en testant ces méthodes sur des cas d'application simplifiés aux échelles des ouvrages et dispositifs de protection torrentielle (figure IV.2). L'échelle du bassin d'enjeux est celle de l'intégration des problèmes individuels : elle sera traitée dans le chapitre V.

La section IV.1.1 pose d'abord le formalisme des méthodes sur les problèmes définis. Les méthodes sont ensuite appliquées sur différents cas dans les sections IV.1.2 à IV.1.4. Le détail de leur mise en œuvre est fourni en Annexe F avec, pour chacune, un exemple d'application simple et détaillé. De fait, dans cette section, seules les données d'entrées et les résultats obtenus seront mis en évidence. Finalement, la section IV.1.5 analyse les résultats et l'applicabilité de ces méthodes.

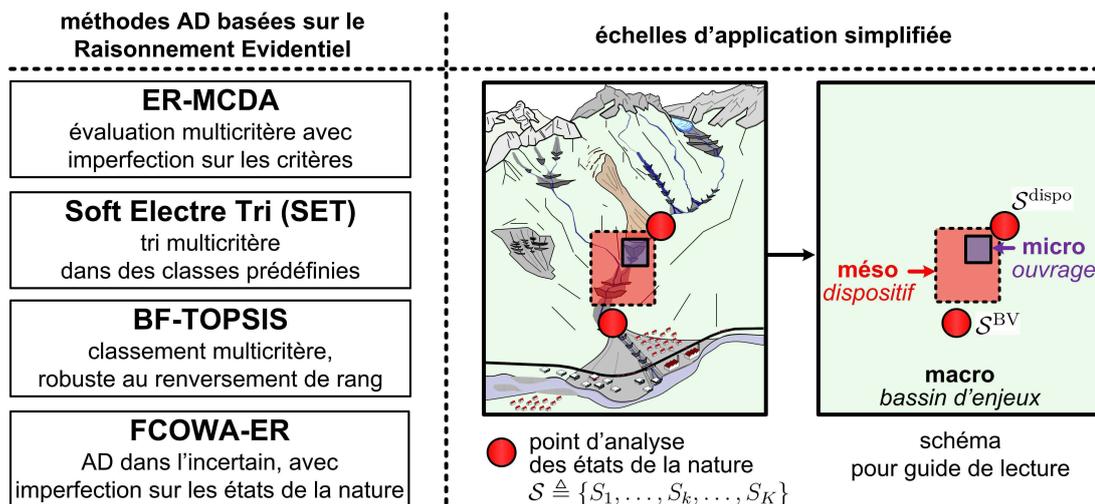


FIGURE IV.2 – Adaptation des méthodes d'AD basées sur le ER aux échelles de protection torrentielle.

IV.1.1 Nouveau formalisme pour l'évaluation multidimensionnelle de l'efficacité

Plusieurs méthodes d'AD sont mobilisées pour répondre au problème posé. Leur utilisation coordonnée pour aider la décision aux différentes échelles nécessite de formaliser les notations pour les mettre en œuvre dans le cadre d'un approche intégrée totalement nouvelle. Jusqu'alors, ces méthodes n'avait pas été confrontées à des cas réels et au contexte multi-échelle.

IV.1.1.1 Description formelle des problèmes d'aide à la décision

Le formalisme proposé doit décrire les problèmes selon les différentes échelles d'analyse, tenir compte de plusieurs critères de décision et représenter l'imperfection de l'information.

• Formalisation de chaque problème d'aide multicritère à la décision (AMC)

1. L'ensemble $\mathcal{A} \triangleq \{A_1, \dots, A_i, \dots, A_M\}$ des alternatives à évaluer ou à comparer correspond soit au système à évaluer, soit aux actions proposées qui en découlent. Ainsi, \mathcal{A} peut correspondre à plusieurs ensembles notés \mathcal{A}^m , $m = 1, \dots, 6$, avec :
 - \mathcal{A}^1 : l'ensemble des ouvrages d'un même dispositif;
 - \mathcal{A}^2 : l'ensemble des dispositifs présents dans un bassin d'enjeu;
 - \mathcal{A}^3 : plusieurs bassins d'enjeu;
 - \mathcal{A}^4 : les actions potentielles sur un ouvrage donné;
 - \mathcal{A}^5 : les actions potentielles sur un dispositif donné;
 - \mathcal{A}^6 : les actions potentielles dans un bassin d'enjeu.
2. La problématique de décision doit être définie :
 - P_γ - classement : toutes les alternatives de \mathcal{A}^m doivent être classées;
 - P_α - choix : la meilleure alternative $A_{i^*} \in \mathcal{A}^m$ doit être choisie;
 - P_α - évaluation : pour un ensemble d'évaluations possibles $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$, un choix $\hat{\theta}(A_i)$ est fait pour chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}^m$;
 - P_β - tri : chaque $A_i \in \mathcal{A}^m$ doit être affectée à une classe C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$ ($A_i \rightarrow C_h$), définie par une borne inférieure b_{h-1} et une borne supérieure b_h .
3. Pour des problèmes de tri (P_β), la structure de préférence de surclassement pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$ et chaque borne b_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$, est donnée par les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$. L'évaluation $x_{hj} \in X_j$ de chaque b_h selon chaque g_j est également nécessaire.
4. Chaque critère de décision est un élément d'évaluation de la conséquence dans un problème multicritère. La conséquence finale est l'objet sur lequel porte la question de décision comme, par exemple, le niveau d'efficacité.
5. L'ensemble $\mathcal{G} \triangleq \{g_1, \dots, g_j, \dots, g_N\}$ des critères de décision est spécifique à chaque problème. Par exemples :
 - l'efficacité structurale d'un ouvrage (\mathcal{A}^1 ou \mathcal{A}^4) est évaluée selon six critères simplifiés (figure III.13, p. 123);
 - l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage (\mathcal{A}^1 ou \mathcal{A}^4) est évaluée selon trois critères simplifiés (figure III.14, p. 123);
 - l'efficacité fonctionnelle d'un dispositif (\mathcal{A}^2 ou \mathcal{A}^5) est évaluée selon sept critères simplifiés (figure III.15, p. 124);
 - l'efficacité d'un bassin d'enjeu (\mathcal{A}^3 ou \mathcal{A}^6) est évaluée selon les critères de coûts (investissement et maintenance) et de réduction des dommages tangibles et intangibles.
6. Pour chaque g_j , l'échelle X_j de score/de mesure de g_j doit être précisée comme sur les figures III.13 et III.15. En présence de mesures précises des alternatives $A_i \in \mathcal{A}^m$, $i = 1, \dots, M$, $m = 1, \dots, 6$, selon les critères $g_j \in \mathcal{G}$, $j = 1, \dots, N$, la matrice de scores $\mathbf{S} = [x_{ij}]$ (p. 51) est établie, avec $x_{ij} \in X_j$.
7. Le vecteur des coefficients d'importance $\mathbf{w} \triangleq \{\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_N\}$ entre les différents critères est établi selon la méthode de Saaty (1980) (p. 62). Une matrice de préférences \mathbf{P}_g entre critères est d'abord définie pour extraire ensuite son vecteur propre. Le nombre de critères pouvant être pris en compte est donc limité à sept.
8. Pour chaque g_j , l'ensemble des indicateurs $\mathcal{I} \triangleq \{I_1, \dots, I_l, \dots, I_L\}$ peut être identifié. Cela a été proposé pour le critère « affouillement » d'efficacité structurale d'un ouvrage (figure III.16, p. 126). Ce niveau de détail n'a pas été réalisé pour chacun des critères d'évaluation de l'efficacité et ne sera donc pas utilisé par la suite. L'échelle d'évaluation Y_l de chaque I_l , $l = 1, \dots, L$ ne sera donc pas spécifiée.

• Formalisation de l'aide à la décision dans un contexte d'information imparfaite

Pour aider à décider avec le Raisonnement Évidentiel, le formalisme suivant est adopté.

1. Le cadre de discernement (FoD) dépend de la problématique de décision. Il doit d'abord être précisé.
 - P_α - évaluation : le FoD est $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$;
 - P_γ - classement et P_α - choix : le FoD est l'ensemble des alternatives \mathcal{A}^m ;
 - P_β - tri : le FoD est $\Theta = \{c, \bar{c}\}$ où c signifie que l'alternative A_i à affecter à une classe C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$ est concordante avec l'hypothèse « A_i est au moins aussi bonne que le profil b_h ».
2. L'ensemble des sources d'information $\{s_1, \dots, s_q, \dots, s_Q\}$ doit être spécifié.
3. Des méthodes d'aide à l'établissement des coefficients de fiabilité des sources $\{\alpha_1, \dots, \alpha_q, \dots, \alpha_Q\}$ (Martin et al. 2008). Cependant, elles ne seront pas détaillées ici, les coefficients étant considérés comme connus de manière empirique.
4. Pour combiner les sources, la règle de fusion utilisée sera la PCR6 (p. 89). Son extension PCR6 $_\emptyset$ permettra de combiner des sources d'importance inégale.
5. Malgré leurs limites, une des règles de décision est choisie pour représenter la décision selon l'attitude du décideur sur la base des connaissances données par une BBA (p. 91).
6. L'ensemble $\mathcal{S} \triangleq \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$ des états de la nature correspond aux expressions des phénomènes naturels selon un (ou des) critère(s) de magnitude ou d'intensité (tableau I.1, p. 9). Pour l'aide à la décision (AD) dans l'incertain, la connaissance sur \mathcal{S} est représentée par une BBA notée $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$. Étant donnée la propagation gravitaire des phénomènes, \mathcal{S} doit être établi à chaque échelle de système sur lequel porte la décision avec (figure IV.2) :
 - $\mathcal{S}^{\text{dispo}}$: établi en amont de chaque dispositif ;
 - \mathcal{S}^{BV} : établi en sortie du système bassin d'enjeu.
7. En présence d'une évaluation précise des conséquences de chaque $A_i \in \mathcal{A}^m$ pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}$, $k = 1, \dots, K$, la matrice $\mathbf{C} = [C_{ik}]$ (p. 50) est donnée.
8. Pour un problème multicritère, une mesure imprécise et/ou incertaine de chaque score $x_{ij} \in X_j$, $i = 1, \dots, M$ et $j = 1, \dots, N$ est représentée par une distribution de possibilité $\pi_{ij} : X_j \rightarrow [0, 1]$. Si plusieurs sources d'information s_q , $q = 1, \dots, Q$, comme des experts, fournissent cette mesure, chacune est représentée par $\pi_{q,ij} : X_j \rightarrow [0, 1]$.
9. Dans le cadre de l'approche ER-MCDA, un « modèle de transposition » établi par les fonctions d'appartenance $\mu_{\theta_e} : X_j \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$ représente la structure de préférence sur X_j pour des évaluations finales selon des labels. Chaque élément θ_e , $e = 1, \dots, n$ est un label quantitatif ou qualitatif. Pour évaluer la performance des ouvrages hydrauliques, onze labels quantitatifs sont proposés (de 0 à 10). En Autriche, trois labels $\{U, K, H\}$ (p. 37) sont utilisés, comme en Suisse pour évaluer la fiabilité {élevée, limitée, faible} (figure I.25, p. 35). En France, même si les termes de l'échelle ont été discutés, quatre labels permettent d'évaluer l'efficacité des dispositifs de protection contre les phénomènes naturels en montagne (figure I.24, p. 34). Pour être cohérent avec la pratique actuelle en France, quatre labels d'évaluation qualitatifs sont retenus : {élevée, moyenne, faible, nulle}.

IV.1.1.2 Données d'entrée spécifiques à chaque méthode

Quatre méthodologies ont été retenues (ER-MCDA, SET, BF-TOPSIS et FCOWA-ER) pour aider à évaluer l'efficacité des mesures de protection à différentes échelles. Chacune d'entre elles nécessite des données d'entrée spécifiques dont le formalisme est rappelé ci-dessous.

La méthode ER-MCDA permet une évaluation multicritère de chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}^m$ selon des labels θ_e , $e = 1, \dots, n$. Elle se base sur une évaluation imparfaite d'indicateurs provenant de sources inégalement fiables. Elle prend ainsi en compte des évaluations imprécises de chaque A_i , $i = 1, \dots, M$, selon chaque critère $g_j = j, \dots, N$ provenant de plusieurs sources s_q , $q = 1, \dots, Q$.

Avec les ensembles \mathcal{A}^m , \mathcal{G} , $\{s_1, \dots, s_q, \dots, s_Q\}$ et la matrice de préférence \mathbf{P}_g pour établir \mathbf{w} , les autres données d'entrée sont :

- le FoD regroupant les labels $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$;
- le « modèle de transposition » $\mu_{\theta_e} : X_j \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$;
- les coefficients de fiabilité de chaque source $\{\alpha_1, \dots, \alpha_q, \dots, \alpha_Q\}$;
- les distributions de possibilité $\pi_{q,ij} : X_j \rightarrow [0, 1]$ de mesure de chaque A_i , selon chaque g_j , fournies par chaque s_q .

La méthode SET permet d'effectuer le tri multicritère des alternatives entre différentes catégories qui peuvent correspondre aux niveaux d'efficacité. Elle sera appliquée pour des problèmes P_β d'affectation de chaque $A_i \in \mathcal{A}^m$ dans des classes C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$.

Avec \mathcal{A}^m , \mathcal{G} , \mathbf{P}_g et les classes C_h , les autres données d'entrée sont :

- la matrice de scores précis $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$;
- les évaluations $x_{hj} \in X_j$, $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$, $j = 1, \dots, N$;
- les seuils $p_j(b_h)$, $q_j(b_h)$ et $v_j(b_h)$, $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$, $j = 1, \dots, N$.

Les méthodes BF-TOPSIS permettent le classement multicritère des alternatives $A_i \in \mathcal{A}^m$ (problème P_γ) pour choisir la meilleure A_{i^*} (problème P_α).

Avec \mathcal{A}^m , \mathcal{G} et \mathbf{P}_g , l'autre donnée d'entrée est :

- la matrice de scores précis $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$.

La méthode FCOWA-ER aide à classer les alternatives $A_i \in \mathcal{A}^m$ (P_γ) puis à choisir la meilleure A_{i^*} (P_α) selon un problème d'aide à la décision dans l'incertain. Les conséquences de chaque alternative dépendent des états de la nature.

Avec \mathcal{A}^m , les autres données d'entrée sont :

- la matrice de conséquences précises $\mathbf{C} = [C_{ik}]$, $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, K$;
- la BBA $m^S(\cdot)$.

IV.1.2 Échelle ouvrage : évaluation qualitative par ER-MCDA

L'évaluation de l'efficacité d'un ouvrage repose sur celle de sa performance selon différents modes de défaillance qui correspondent à la rupture structurale ou à la défaillance fonctionnelle (tableau III.6, p. 122). Deux évaluations sont réalisées selon la composante structurale (exemple 1) puis fonctionnelle (exemple 2). Quelle que soit la composante analysée, l'évaluation dépend de plusieurs critères. En pratique, elle est établie qualitativement par un label choisi dans {élevée, moyenne, faible, nulle}. Le problème de décision consiste donc à choisir le label d'efficacité pour chaque ouvrage et chaque composante. La méthode ER-MCDA est appliquée pour aider cette évaluation (figure IV.3).

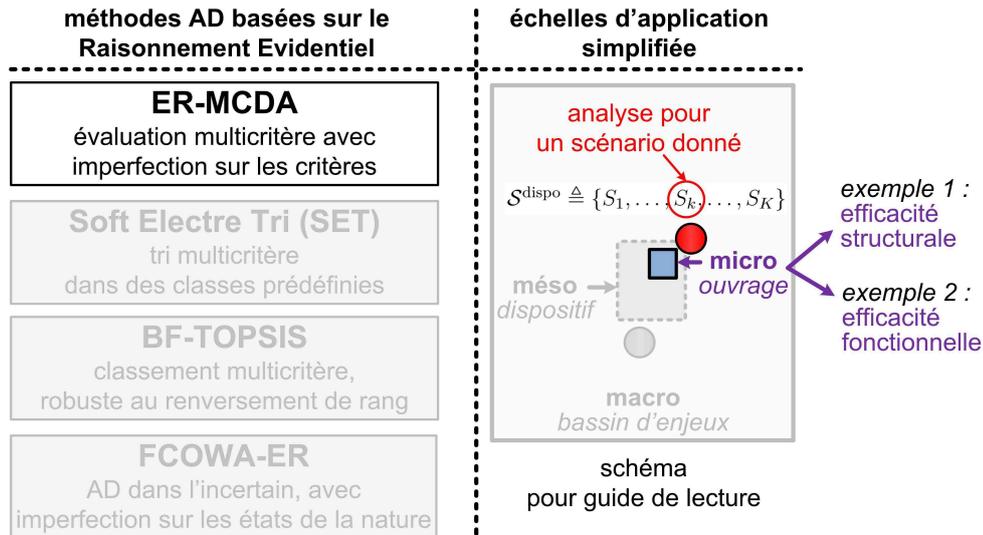


FIGURE IV.3 – Exemples 1 et 2 : ER-MCDA à l'échelle de l'ouvrage (micro) pour un scénario donné.

IV.1.2.1 Efficacité structurale (exemple 1)

L'ensemble des alternatives est \mathcal{A}^1 . Il regroupe les ouvrages A_i , $i = 1, \dots, M$ d'un même dispositif de consolidation/stabilisation. L'évaluation de chaque A_i étant indépendante pour un même modèle, un seul ouvrage A_i sera traité dans cet exemple. Les six étapes de la méthodologie ER-MCDA ont été appliquées selon le principe de l'exemple détaillé (Annexe F.2).

• Données - Formalisation du problème

Le FoD regroupe les labels d'évaluation dans $\Theta = \{\theta_1 = \text{élevée}, \theta_2 = \text{moyenne}, \theta_3 = \text{faible}, \theta_4 = \text{nulle}\}$, avec $n = 4$ éléments supposés exhaustifs et mutuellement exclusifs. La *DST* classique (Shafer 1976) est le cadre théorique utilisé. Pour ce problème multicritère, l'évaluation de l'efficacité structurale est la conséquence, pour un scénario S_k de magnitude donnée, comme le débit de pointe d'une lave torrentielle.

Un arbre hiérarchique est proposé dans la figure IV.4, construit en descendant depuis l'évaluation globale de l'efficacité structurale à la définition des critères et sous-critères. D'après Tacnet et Curt (2013), l'évaluation de l'efficacité globale dépend de celle à l'instant de l'inspection t_i et d'une prospective. Pour chacune, les critères de stabilité externe et interne, observés et après construction, aident cette évaluation. La figure III.13 (p. 123) formalise les six critères d'évaluation de l'efficacité structurale observée en stabilité externe. Pour une présentation épurée, le traitement détaillé qui suit sera limité à ce niveau 3 du problème global.

L'ensemble \mathcal{G} est donc constitué de $N = 6$ critères g_j , avec une échelle d'évaluation X_j :

- g_1 = angle de rotation autour de l'axe vertical ; $X_1 = [0^\circ; 90^\circ]$;
- g_2 = glissement / translation ; $X_2 = [0\text{m}; 10\text{m}]$;
- g_3 = érosion de l'ancrage latéral par contournement ; $X_3 = [0\text{m}; 10\text{m}]$;
- g_4 = angle de rotation autour de l'axe horizontal ; $X_4 = [0^\circ; 90^\circ]$;
- g_5 = tassement ; $X_5 = [0\text{m}; 10\text{m}]$;
- g_6 = érosion de la fondation par affouillement de pied ; $X_6 = [0\text{m}; 10\text{m}]$.

L'équation (IV.1) est la matrice de préférences \mathbf{P}_g entre ces six critères. Elle est fournie par un expert, ou un groupe d'experts, selon l'équation (II.11) (p. 63). Le vecteur des coefficients d'importance $\mathbf{w} = [0.1, 0.1, 0.3, 0.1, 0.1, 0.3]$ est calculé comme son vecteur propre (Saaty 1980).

$$\mathbf{P}_g \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 \\ \begin{matrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 3 & 1 & 3 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 & 3 & 3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (IV.1)$$

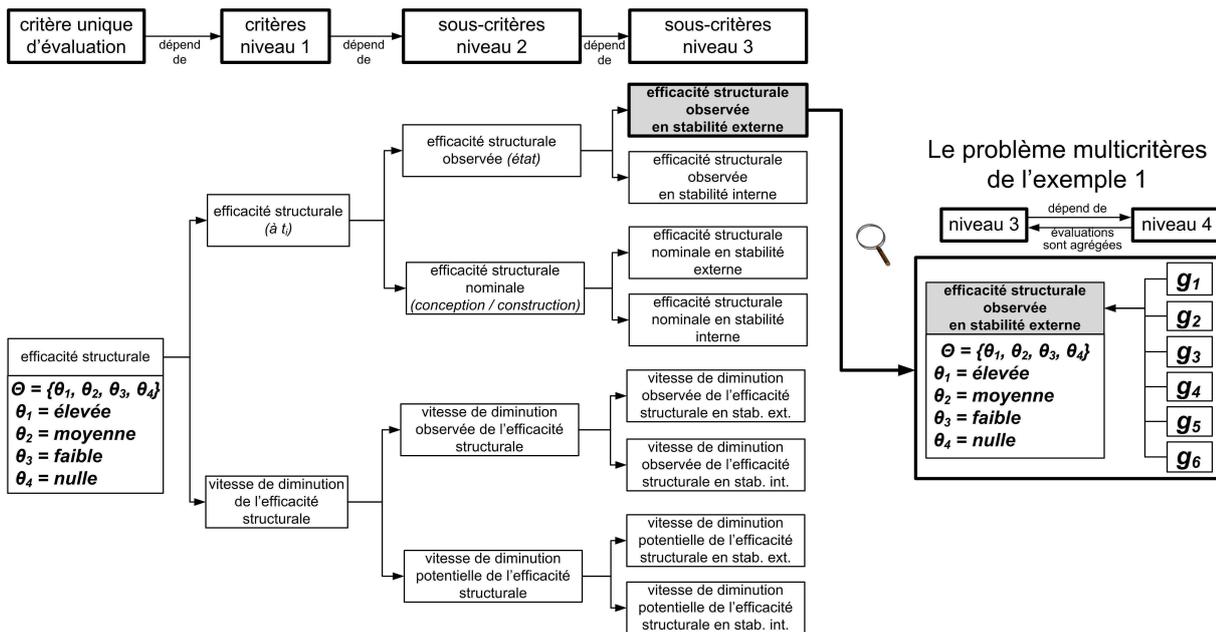


FIGURE IV.4 – Exemple 1 : formalisation du problème par l'arbre hiérarchique de l'AHP.

Pour chaque g_j , $j = 1, \dots, N$, un « modèle de transposition » est établi sur la figure IV.5 par $n = 4$ sous-ensembles flous $\mu_{j,\theta_e} : X_j \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$.

Deux spécialistes s_1 et s_2 sont considérés comme les sources d'évaluation de chaque critère. s_1 est un agent généraliste pour le suivi des ouvrages RTM, mais est nouveau, impliquant une expertise encore limitée et un coefficient de fiabilité réduit à $\alpha_1 = 0.7$. s_2 est un spécialiste en hydraulique alors que l'évaluation concerne des aspects structuraux de génie civil : sa fiabilité est encore plus réduite avec $\alpha_2 = 0.5$.

Pour l'ouvrage A_i , les $Q = 2$ experts s_1 and s_2 fournissent leurs mesures des $N = 6$ critères selon des distributions de possibilité $\pi_{q,ij}$ (figure IV.6). Pour l'application de la méthode de transposition classique (Tacnet 2009), des intervalles avec un niveau de confiance sont directement fournis. Les deux évaluations sont les mêmes pour g_1 et g_2 . Par contre, il y a conflit pour les critères g_4 et g_5 : il n'y aucune intersection entre les deux distributions de possibilité $\pi_{1,i4}$ et $\pi_{2,i4}$, ou entre $\pi_{1,i5}$ et $\pi_{2,i5}$.

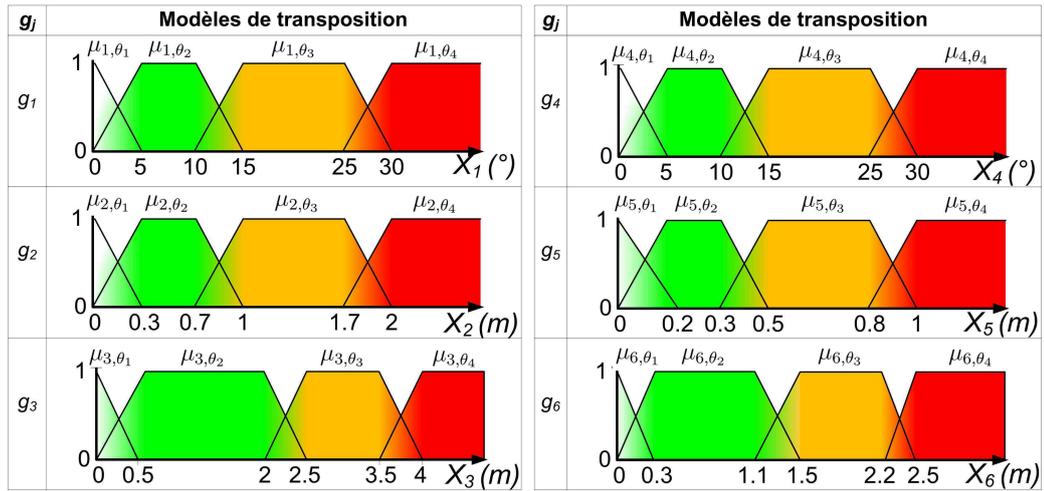


FIGURE IV.5 – Exemple 1 : définition des modèles de transposition pour chaque critère g_j .

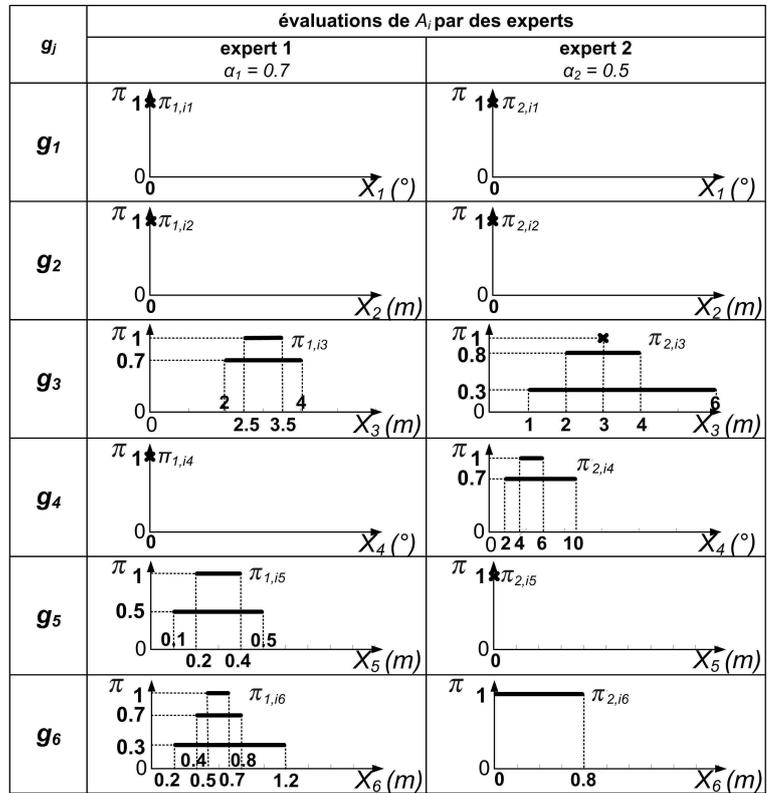


FIGURE IV.6 – Exemple 1 : évaluations imprécises de l'ouvrage A_i par deux experts s_1 et s_2 produisant les distributions de possibilité $\pi_{1,ij}$ et $\pi_{2,ij}$ pour $N = 6$ critères.

• Résultats

La réalisation successive des étapes de transposition, de deux combinaisons successives des BBAs selon les règles PCR6 et PCR6 $_{\theta}$, en tenant compte de la fiabilité des sources et de l'importance des critères, permet d'obtenir la BBA $m_{PCR6_{\theta},i}^{\ominus}(\cdot)$ (Annexe F.2). L'étape de normalisation finale fournit la BBA $m_i^{\ominus}(\cdot)$ du tableau IV.1 selon laquelle se prend la décision.

éléments focaux	$m_{PCR6,0,i}^{\ominus}(\cdot)$	$m_i^{\ominus}(\cdot)$
\emptyset	0.966	0
θ_1	0.006	0.161
θ_2	0.016	0.459
θ_3	0.011	0.336
θ_4	0.000	0.005
Θ	0.001	0.039

TABLE IV.1 – Exemple 1 : BBA finale $m_i^{\ominus}(\cdot)$ obtenue après application des étapes de ER-MCDA.

Selon l'analyse de la BBA $m_i^{\ominus}(\cdot)$, l'ouvrage A_i est évalué comme d'efficacité moyenne, pour l'efficacité structurale observée à l'instant t_i . La masse maximale est affectée à l'hypothèse $\theta_2 =$ moyenne avec $m^{\ominus}(\theta_2) = 0.459$. Cependant, la masse affectée au label $\theta_3 =$ faible est proche de celle de $\hat{\theta}(A_i) = \theta_2$, avec $m^{\ominus}(\theta_3) = 0.336$. De façon plus réaliste, l'efficacité structurale observée à l'instant t_i de l'ouvrage A_i est plus entre faible et moyenne, mais n'est ni élevée, ni nulle.

IV.1.2.2 Efficacité fonctionnelle (exemple 2)

L'ensemble des alternatives est \mathcal{A}^1 , regroupant les $M = 3$ ouvrages A_i , $i = 1, \dots, 3$ d'un dispositif de consolidation/stabilisation. A_1 est l'ouvrage de base aval et A_3 celui le plus en amont.

De même que pour l'exemple 1, le FoD est $\Theta = \{\theta_1 = \text{élevée}, \theta_2 = \text{moyenne}, \theta_3 = \text{faible}, \theta_4 = \text{nulle}\}$, avec la *DST* comme cadre théorique du Raisonnement Évidentiel. L'évaluation de l'efficacité fonctionnelle est la conséquence à évaluer, pour un scénario S_k de magnitude donnée.

• Données - Formalisation du problème

L'arbre hiérarchique est limité à un niveau avec $N = 3$ critères $g_j \in \mathcal{G}$ (figure III.14, p. 169). Le détail des échelles d'évaluation X_j correspondantes est donné sur la figure III.15 (p. 124) :

- $g_1 =$ le recentrage des écoulements est évalué par le taux du débit pouvant transiter par la cuvette Q_{cap} sur le débit à faire transiter pour S_k (débit de lave Q_k) : $X_1 = [0\%; 100\%]$;
- $g_2 =$ l'orientation des écoulements vers l'aval est évalué par l'angle de déviation de l'ouvrage par rapport à l'orientation optimale vers l'aval : $X_2 = [0^\circ; 90^\circ]$;
- $g_3 =$ le maintien du niveau du lit amont est évalué par la hauteur séparant le niveau souhaité du niveau réel de la cuvette de l'ouvrage : $X_3 = [0\text{m}; 10\text{m}]$.

L'importance de chaque ouvrage est évaluée selon l'effet de sa défaillance à une fonction donnée (ici, le critère), sur celle du dispositif auquel il appartient (p. 112). Pour la fonction de recentrage des écoulements (g_1), les ouvrages sont aussi importants les uns que les autres. Pour la fonction d'orientation des écoulements (g_2), l'importance des ouvrages décroît de l'amont vers l'aval. À l'inverse, pour la fonction du maintien du niveau du lit amont (g_3), l'importance des ouvrages décroît de l'aval vers l'amont.

En conséquence, le vecteur des poids des critères ω_j , $j = 1, \dots, N$ n'est pas le même pour chaque ouvrage A_i , $i = 1, \dots, M$. Pour A_1 , l'objectif principal est de maintenir le niveau du lit amont, puis de recentrer l'écoulement et enfin d'orienter les écoulements vers l'aval. Pour A_2 , l'objectif principal reste de maintenir le niveau du lit amont, puis de recentrer l'écoulement et de l'orienter vers l'ouvrage aval. Pour A_3 , l'objectif principal est d'orienter l'écoulement vers l'aval avant de recentrer les écoulements et de maintenir le niveau du lit amont.

Sur cette base, les vecteurs de poids \mathbf{w}_i pour chaque A_i sont proposés : $\mathbf{w}_1 = \{0.3, 0.2, 0.5\}$; $\mathbf{w}_2 = \{0.3, 0.3, 0.4\}$ et $\mathbf{w}_3 = \{0.3, 0.4, 0.3\}$. La consistance doit être vérifiée selon deux aspects :

pour un même g_j , l'évolution de ω_j selon les ouvrages A_i , $i = 1, \dots, M$; pour un même ouvrage A_i , l'importance relative ω_j , $j = 1, \dots, N$ des fonctions à réaliser. C'est le cas en comparant les $M = 3$ vecteurs \mathbf{w}_i précédents.

Cette démarche est proposée comme une adaptation de l'aide à la décision classique où un seul \mathbf{w} est établi à partir d'une matrice \mathbf{P}_g de comparaison des critères, sans intégrer la notion d'importance entre alternatives pour un même critère. Cependant, un développement doit permettre d'aider à vérifier la consistance des M vecteurs d'importance établis, ce qui n'est pas le cas dans cet exemple.

Deux spécialistes s_1 et s_2 sont considérés comme les sources d'évaluation de chaque critère et sont définies comme fiables ($\alpha_1 = \alpha_2 = 1$). Chaque source s_q , $q = 1, 2$ évalue chaque alternative A_i , $i = 1, 2, 3$ selon chaque critère g_j , $j = 1, 2, 3$ par une distribution de possibilité $\pi_{q,ij}$. Les BBAs $m_{q,ij}^\ominus(\cdot)$ du tableau IV.2 sont obtenues après transposition de chacune de ces évaluations sur un modèle défini au préalable. Ces évaluations, non fournies, reposent sur le même principe que pour l'exemple 1. Par exemple, l'expert s_1 considère la cuvette de A_1 correctement dimensionnée ($m_{1,11}^\ominus(\theta_1) = 0,8$), d'orientation très mauvaise ($m_{1,12}^\ominus(\theta_4) = 0,8$) et de niveau de cuvette très peu éloigné de l'optimal ($m_{1,13}^\ominus(\theta_1) = 0,9$).

A_i	θ_e	g_1		g_2		g_3	
		expert 1	expert 2	expert 1	expert 2	expert 1	expert 2
		$m_{1,i1}^\ominus(\cdot)$	$m_{2,i1}^\ominus(\cdot)$	$m_{1,i2}^\ominus(\cdot)$	$m_{2,i2}^\ominus(\cdot)$	$m_{1,i3}^\ominus(\cdot)$	$m_{2,i3}^\ominus(\cdot)$
A_1	θ_1	0.8	0.2	0	0	0.9	0.2
	θ_2	0.1	0.5	0	0.2	0.1	0.7
	θ_3	0.1	0.3	0.2	0.6	0	0.1
	θ_4	0	0	0.8	0.2	0	0
A_2	θ_1	0	0.1	0	0	0	0
	θ_2	0	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2
	θ_3	0.3	0.6	0.3	0.6	0.8	0.3
	θ_4	0.7	0	0.6	0.2	0	0.5
A_3	θ_1	0.5	0.8	0.8	0.7	0	0.3
	θ_2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	0.5
	θ_3	0.2	0.1	0	0	0.7	0.2
	θ_4	0	0	0	0	0	0

TABLE IV.2 – Exemple 2 : BBAs $m_{q,ij}^\ominus(\cdot)$ d'évaluation de chaque alternative A_i fournies par chaque source s_q , selon chaque critère g_j .

• Résultats

Pour chaque ouvrage A_i et chaque critère g_j , les BBAs fournies par les sources sont d'abord combinées par la règle de fusion PCR6. Puis, les BBAs obtenues sont affaiblies par le poids ω_j extrait du vecteur \mathbf{w}_i spécifique à chaque A_i . Les BBAs ainsi affaiblies sont combinées selon la règle de fusion PCR6 $_\emptyset$ pour obtenir la BBA $m_{PCR6_\emptyset,i}^\ominus(\cdot)$ dans le tableau IV.3. L'étape finale de normalisation fournit la BBA $m_i^\ominus(\cdot)$ dans ce même tableau, en page suivante.

Pour chaque ouvrage A_i , $i = 1, 2, 3$, le label $\hat{\theta}(A_i)$ est choisi avec la masse affectée la plus importante. Ainsi, les ouvrages A_1 et A_3 sont d'efficacité fonctionnelle élevée ($\hat{\theta}(A_1) = \hat{\theta}(A_3) = \theta_1$) et A_2 est d'efficacité fonctionnelle faible ($\hat{\theta}(A_2) = \theta_3$).

A_i	éléments focaux	$m_{PCR\theta_0,i}^\ominus(\cdot)$	$m_i^\ominus(\cdot)$
A_1	\emptyset	0.841	0
	θ_1	0.103	0.648
	θ_2	0.033	0.209
	θ_3	0.008	0.050
	θ_4	0.015	0.093
A_2	\emptyset	0.852	0
	θ_1	0.000	0.000
	θ_2	0.005	0.034
	θ_3	0.099	0.667
	θ_4	0.044	0.299
A_3	\emptyset	0.821	0
	θ_1	0.138	0.771
	θ_2	0.018	0.102
	θ_3	0.023	0.127
	θ_4	0	0

TABLE IV.3 – Exemple 2 : BBAs finales $m_i^\ominus(\cdot)$ pour chaque ouvrage A_i , $i = 1, 2, 3$, obtenues après application des étapes de ER-MCDA.

IV.1.3 Échelle dispositif : tri multicritère par Soft Electre Tri selon l'efficacité fonctionnelle (exemple 3)

L'évaluation de l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage de consolidation/stabilisation est multicritère. Comme précédemment, on peut considérer qu'il s'agit d'un problème P_α de choix d'un label dans l'ensemble des évaluations {élevée, moyenne, faible, nulle}. Cependant, il est également possible d'appréhender ce problème comme celui d'un tri P_β dans des classes prédéfinies.

Il a alors été choisi d'appliquer la méthode Soft Electre Tri (Carladous et al. 2016d), comme illustré sur la figure IV.7. Les détails de calcul intermédiaires ne sont pas fournis. Ils ont été réalisés selon le même principe que sur l'exemple simplifié détaillé (Annexe F.3)

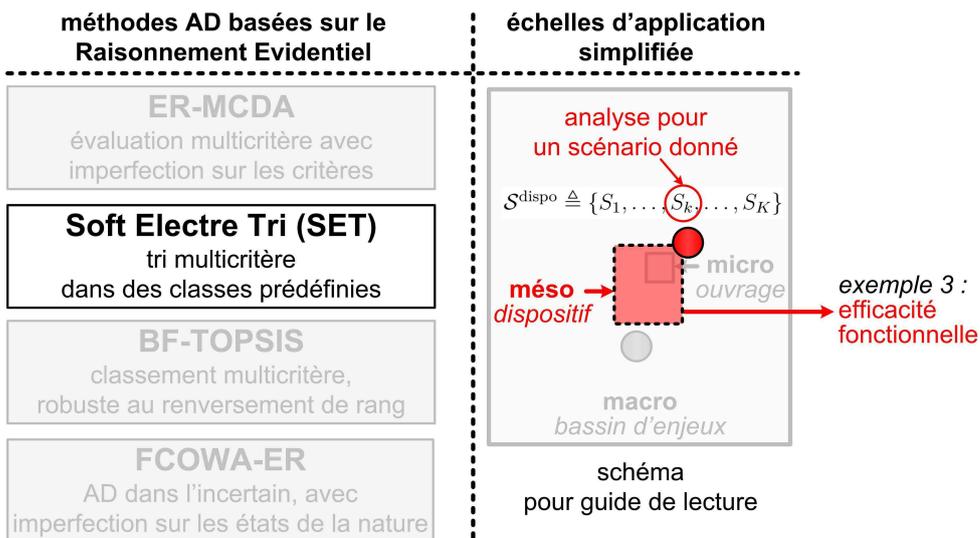


FIGURE IV.7 – Exemple 3 : Soft Electre Tri à l'échelle du dispositif (mésos) pour un scénario donné.

• Données - Formalisation du problème

L'ensemble des alternatives \mathcal{A}^2 regroupe les dispositifs de consolidation/stabilisation A_i , $i = 1, \dots, M$, plus spécifiquement à fonction de stabilisation. Dans ce cas, trois dispositifs différents, A_1 , A_2 et A_3 sont considérés, chacun regroupant 28, 25, et 3 ouvrages (figure IV.8).

Le problème P_β retenu consiste à affecter chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ à une classe d'évaluation C_h , $h = 1, \dots, h_{\max}$, avec $h_{\max} = 4$. Dans un ordre inversé par rapport aux exemples 1 et 2, elles sont : $C_1 =$ nulle; $C_2 =$ faible; $C_3 =$ moyenne; $C_4 =$ élevée.

L'évaluation de l'efficacité fonctionnelle de chaque dispositif est la conséquence pour chaque A_i , $i = 1, \dots, M$. Comme précédemment, elle est évaluée pour un scénario S_k de magnitude donnée.

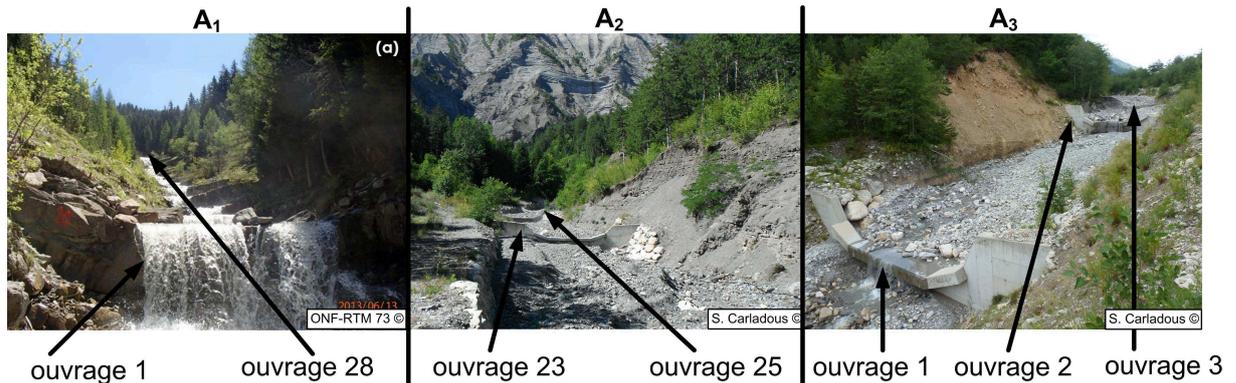


FIGURE IV.8 – SET-données d'entrée (exemple 3) : $M = 3$ alternatives à affecter à des classes d'efficacité.

Sept critères g_j sont retenus pour évaluer l'efficacité fonctionnelle d'un dispositif de consolidation/stabilisation. Les échelles respectives X_j , $j = 1, \dots, N$ sont détaillées sur la figure III.15 (p. 124). Pour chacune, le sens de préférence par rapport à la décision finale doit être précisé : une préférence croissante (\nearrow) pour un critère g_j signifie que plus le score $x_{ij} \in X_j$ est élevé, plus l'alternative A_i est efficace, selon g_j ; une préférence décroissante (\searrow) signifie que plus $x_{ij} \in X_j$ est élevée, moins A_i est efficace selon g_j .

- g_1 - La dimension de la cuvette (\nearrow) est évaluée en comparant, pour chaque ouvrage, la capacité hydraulique de transfert avec le débit du scénario S_k . Le plus petit rapport, parmi ceux de tous les ouvrages, est retenu comme évaluation dans $X_1 = [0\%; 100\%]$.
- g_2 - L'orientation (\searrow) dépend de l'angle de déviation de chaque ouvrage. La moyenne de l'ensemble des angles de déviation est retenue pour l'évaluation dans $X_2 = [0^\circ; 90^\circ]$.
- g_3 - L'implantation longitudinale des ouvrages (\searrow) dépend de la différence, pour chaque ouvrage entre le niveau réel de crête de la cuvette et un niveau optimal. La moyenne de ces hauteurs de différence est retenue pour l'évaluation dans $X_3 = [0\text{m}; 10\text{m}]$.
- g_4 and g_5 - L'efficacité structurale (\searrow) des ouvrages peut être évaluée selon des labels qualitatifs (ex. 1) ou quantitatifs, de 1 (efficacité élevée pour S_k) à 10 (efficacité nulle pour S_k) (Curt et al. 2010). Comme montré sur la figure III.15 (p. 124), une correspondance entre ces échelles peut être établie. Les résultats obtenus selon l'exemple 1 peuvent ainsi être utilisés pour évaluer ce critère. Les ouvrages sont répartis en deux groupes : les plus importants et les moins importants, pour la fonction de stabilisation du dispositif (p. 112). La moyenne des notes d'efficacité structurale des ouvrages du premier groupe permettent d'évaluer g_4 et celle des notes du second groupe est utilisée pour évaluer g_5 . Ainsi, l'échelle d'évaluation est $X_4 = X_5 = [1; 10]$.

- g_6 - L'érosion active longitudinale (\searrow) est évaluée comme le taux entre la longueur active d'érosion, sans rupture des ouvrages, et la longueur de profil en long du lit à stabiliser, avec $X_6 = [0\%; 100\%]$.
- g_7 - L'érosion active latérale (\searrow) est évaluée comme le volume actif mobilisé par des érosions latérales, pour S_k et sans rupture des ouvrages, et le volume à stabiliser, avec $X_7 = [0\%; 100\%]$.

L'équation (IV.2) est la matrice de préférences \mathbf{P}_g entre ces $N = 7$ critères. Son vecteur propre fournit le vecteur de coefficients d'importance $\mathbf{w} = [0.1, 0.2, 0.1, 0.15, 0.05, 0.2, 0.2]$.

$$\mathbf{P}_g \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & g_7 \\ \begin{matrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1 & 2/3 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 2 & 3/2 & 4 & 1 & 1 \\ 1 & 1/2 & 1 & 2/3 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 3/2 & 2/3 & 3/2 & 1 & 4 & 2/3 & 2/3 \\ 1/2 & 1/4 & 1/2 & 1/4 & 1 & 1/4 & 1/4 \\ 2 & 1 & 2 & 3/2 & 4 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 3/2 & 4 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{IV.2})$$

La mesure de chaque dispositif A_i , $i = 1, 2, 3$ selon chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 7$ est fournie avec précision dans la matrice $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, $x_{ij} \in X_j$ de l'équation (IV.3).

$$\mathbf{S} \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & g_7 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 80 & 0 & 1 & 9 & 7 & 30 & 10 \\ 100 & 10 & 0.5 & 1 & 3 & 0 & 20 \\ 100 & 20 & 0 & 7 & 9 & 0 & 50 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{IV.3})$$

Pour prendre en compte la préférence décroissante des critères g_2 à g_7 , leurs scores initiaux sont multipliés par -1, fournissant la matrice de scores \mathbf{S}^{pref} de l'équation (IV.4).

$$\mathbf{S}^{\text{pref}} \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & g_7 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 80 & 0 & -1 & -9 & -7 & -30 & -10 \\ 100 & -10 & -0.5 & -1 & -3 & 0 & -20 \\ 100 & -20 & 0 & -7 & -9 & 0 & -50 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{IV.4})$$

Quatre classes d'affectation C_h sont considérées. De fait, cinq profils b_h doivent être décrits (b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , and b_4). Pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 7$, les scores x_{hj} des profils b_h , $h = 0, \dots, 4$ sont fournis dans le tableau IV.4. Comme pour les scores des alternatives, le sens de préférence de chaque critère g_j y est directement pris en compte.

Pour chaque g_j , $j = 1, \dots, 7$, les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$ sont considérés comme identiques pour tous les profils b_h . Ils sont alors notés p_j , q_j et v_j et respectent la condition $v_j \geq p_j \geq q_j \geq 0$. Il sont regroupés avec les poids ω_j , $j = 1, \dots, 7$ dans le tableau IV.5.

critères	Profils de décision				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
g_1	0	25	50	90	100
g_2	-90	-25	-10	-5	0
g_3	-10	-3	-1.5	0	5
g_4	-10	-8	-5	-2	-1
g_5	-10	-8	-5	-2	-1
g_6	-100	-80	-50	-10	0
g_7	-100	-80	-50	-10	0

TABLE IV.4 – Exemple 3 - données d'entrée : scores x_{hj} des 5 profils de décision b_h selon les 7 critères g_j , pour quatre classes d'affectation.

critères	importance	seuils		
		indifférence	préférence	veto
g_j	ω_j	q_j	p_j	v_j
g_1	0.1	10	20	40
g_2	0.2	5	10	30
g_3	0.1	0.5	1	2
g_4	0.15	1	3	5
g_5	0.05	1	3	5
g_6	0.2	10	20	40
g_7	0.2	10	20	40

TABLE IV.5 – Exemple 3 - données d'entrée : coefficients d'importance et seuils d'indifférence, de préférence, et de veto selon les 7 critères.

• Résultats

La réalisation des quatre étapes de calcul de la méthode SET (principe en Annexe F.3) permettent d'obtenir, dans le tableau IV.6, l'affectation probabilisée de chaque dispositif A_i , $i = 1, 2, 3$, à chaque classe C_h ($P(A_i \rightarrow C_h)$) et à l'ensemble vide \emptyset ($\delta_i = P(A_i \rightarrow \emptyset)$).

A_i	classes C_h				
	C_1	C_2	C_3	C_4	\emptyset
A_1	0	0.040	0.958	0.002	$\delta_1 = 0$
A_2	0	0	0.605	0.395	$\delta_2 = 0$
A_3	0	0.114	0.884	0.002	$\delta_3 = 0$

TABLE IV.6 – Exemple 3 : affectations probabilisées [$P(A_i \rightarrow C_h)$] de chaque dispositif A_i , $i = 1, 2, 3$ à chaque classe d'efficacité fonctionnelle C_h , $h = 1, \dots, 4$.

Il est très probable que les dispositifs A_1 et A_3 soient d'une efficacité fonctionnelle moyenne avec $P(A_1 \rightarrow C_3) = 0.958$ et $P(A_3 \rightarrow C_3) = 0.884$. Le dispositif A_2 est plus probablement d'une efficacité moyenne qu'élevée, avec $P(A_2 \rightarrow C_3) = 0.605 > P(A_2 \rightarrow C_4) = 0.395$.

Il est certain que les dispositifs A_1 et A_2 ne sont pas d'une efficacité fonctionnelle faible, alors que cela est très peu probable pour le dispositif A_3 , avec $P(A_3 \rightarrow C_2) = 0.114$.

Dans tous les cas, l'efficacité de ces trois dispositifs n'est certainement pas nulle.

IV.1.4 Échelle dispositif : classement des actions par FCOWA-ER selon leur efficacité en univers incertain (exemple 4)

Les trois premiers exemples ont montré que ER-MCDA et SET peuvent aider à évaluer l'efficacité des ouvrages et dispositifs de protection torrentielle, pour un scénario $S_k \in \mathcal{S}$ donné. L'évaluation se fait sur des labels, ou des classes, qualitatives ($\{\text{élevée, moyenne, faible, nulle}\}$) ou quantitatives ($[0;10]$ ou $[1;10]$). Des transformations de l'une à l'autre sont possibles. Ce nouvel exemple d'application à un sous-problème de décision réel montre comment FCOWA-ER peut aider à comparer différentes actions sur un dispositif selon leur niveau d'efficacité, en tenant compte de la connaissance imparfaite sur l'ensemble des états de la nature S (figure IV.9).

Un dispositif de consolidation/stabilisation est inspecté. D'après les archives, ses ouvrages ont été dimensionnés selon une magnitude M_{projet} , correspondant à un scénario $S_{k=3}$. L'analyse de terrain montre que l'efficacité fonctionnelle selon leur orientation est faible tout comme leur efficacité structurale moyenne. Sur la base de cette analyse, le problème est d'établir quelle est la meilleure action A_{i^*} parmi les cinq actions potentielles envisagées ($M = 5$) :

- A_1 : aucune action ;
- A_2 : réparation des ouvrages les plus importants (ceux situés à l'aval) ;
- A_3 : réparation de tous les ouvrages du dispositif ;
- A_4 : réparation des ouvrages et réhabilitation pour une meilleure orientation vers l'aval ;
- A_5 : réhabilitation complète des ouvrages avec une nouvelle conception selon le scénario S_6 .

Le problème porte donc sur un ensemble $\mathcal{A}^5 = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ qui est le FoD final de la décision à prendre. Il intervient dans un contexte où la connaissance sur les états de la nature $\mathcal{S}^{\text{dispo}}$ est imparfaite. Un ensemble de scénarios $S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}}$, $k = 1, \dots, K$ est donc considéré (figure IV.9).

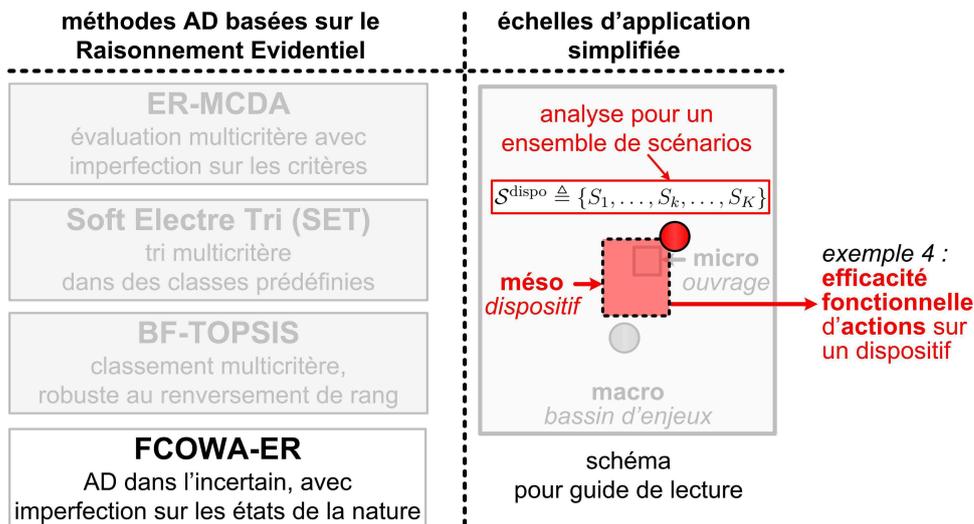


FIGURE IV.9 – Exemple 4 : FCOWA-ER à l'échelle du dispositif (mésop).

• Données - Formalisation du problème

Considérant que les scénarios individuels $S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}}$, $k = 1, \dots, K$ sont exhaustifs et mutuellement exclusifs, le cadre théorique de la théorie de Dempster-Shafer (DST) est retenu. L'analyse de bassin versant en amont du dispositif établit $K = 7$ scénarios potentiels, dont les critères de magnitude sont extraits du tableau I.1 (p. 9) :

- S_1 : crue liquide avec un débit inférieur à un certain niveau ($Q_{L,p} < Q_{L,p,\text{seuil}}$);
- S_2 : crue liquide avec un débit supérieur à ce niveau ($Q_{L,p} \geq Q_{L,p,\text{seuil}}$);
- S_3 : crue avec charriage avec un débit inférieur à un certain niveau ($Q_{s,p} < Q_{s,p,\text{seuil}}$);
- S_4 : crue avec charriage avec un débit supérieur à ce niveau ($Q_s \geq Q_{s,p,\text{seuil}}$);
- S_5 : lave torrentielle avec un débit qui reste inférieur à un premier seuil ($Q_{\text{lave},p} < Q_{\text{lave},p,\text{seuil1}}$);
- S_6 : lave torrentielle avec un débit intermédiaire ($Q_{\text{lave},p,\text{seuil1}} \leq Q_{\text{lave},p} < Q_{\text{lave},p,\text{seuil2}}$);
- S_7 : lave torrentielle avec un débit qui est supérieur au deuxième seuil ($Q_{\text{lave},p} \geq Q_{\text{lave},p,\text{seuil2}}$).

La note d'efficacité fonctionnelle du dispositif obtenue est la conséquence pour chaque A_i , $i = 1, \dots, 5$. Pour pouvoir appliquer FCOWA-ER, elle doit être établie selon une évaluation quantitative. Chaque conséquence C_{ik} , $i = 1, \dots, 5$, $k = 1, \dots, 7$, est évaluée sur l'échelle [1; 10]. Par contre, à l'inverse de celle de Curt et al. (2010), la note de 1 correspond à une efficacité fonctionnelle nulle tandis qu'une note de 10 correspond à une efficacité fonctionnelle très élevée. Plus précisément, pour comparer avec les évaluations qualitatives de l'exemple 3, la transformation est la suivante : « élevée » = [1, 2.5], « moyenne » = [2.5, 5.5], « faible » = [5.5, 8.5], « nulle » = [8.5, 10].

Sur cette base, et après avoir évalué chaque action selon l'approche multicritère de l'exemple 3 et réalisé la transformation quantitative, la matrice de conséquences $\mathbf{C} = [C_{ik}]$, de dimensions 5×7 est donnée par l'équation (33). Par exemple, la conséquence de l'alternative A_2 étant donné le scénario S_4 est notée à 3.

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 5 & 3 & 4 & 2 & 3 & 1 & 1 \\ 7 & 4 & 6 & \mathbf{3} & 4 & 2 & 1 \\ 8 & 5 & 7 & 4 & 5 & 3 & 1 \\ 10 & 7 & 10 & 6 & 7 & 5 & 2 \\ 10 & 9 & 10 & 9 & 10 & 10 & 4 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{IV.5})$$

Selon une analyse fictive des scénarios de l'ensemble $\mathcal{S}^{\text{dispo}}$ auxquels le dispositif est exposé, l'expert considère $r = 4$ éléments focaux $X_s \in 2^{\mathcal{S}^{\text{dispo}}}$: $X_1 = S_1 \cup S_3 \cup S_5$, $X_2 = S_2 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_6$, $X_3 = S_7$, $X_4 = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_6 \cup S_7 = \mathcal{S}^{\text{dispo}}$.

X_1 et X_2 représentent une ignorance partielle, et X_4 l'ignorance totale. Cela correspond par exemple au fait que l'expert ne peut pas faire la différence entre les scénarios S_1 , S_3 et S_5 (X_1). Il affecte alors une masse de croyance (BBA) $m^{\mathcal{S}^{\text{dispo}}}(\cdot)$ à ces groupes : $m^{\mathcal{S}^{\text{dispo}}}(X_1) = 0.6$, $m^{\mathcal{S}^{\text{dispo}}}(X_2) = 0.2$, $m^{\mathcal{S}^{\text{dispo}}}(X_3) = 0.01$ et $m^{\mathcal{S}^{\text{dispo}}}(X_4) = 0.19$.

• Résultats

Étant données la matrice \mathbf{C} et la BBA $m^{\mathcal{S}^{\text{dispo}}}(\cdot)$, l'approche OWA de Yager (2008) pour aider à décider dans l'incertain est appliquée pour les deux attitudes extrêmes, pessimiste et optimiste (détails d'application en Annexe F.5). La matrice $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ des évaluations imprécises des valeurs espérées des conséquences est ainsi établie (Tacnet et Dezert 2011).

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} [2.19; 4.55] \\ [2.99; 6.33] \\ [3.79; 7.32] \\ [5.58; 9.30] \\ [8.56; 9.90] \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

L'application des trois premières étapes de la méthode FCOWA-ER sur cette matrice permet d'obtenir la BBA finale $m^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$ dans le tableau IV.7.

éléments focaux	$m^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$
A_5	0.390
$A_4 \cup A_5$	0.285
$A_3 \cup A_4 \cup A_5$	0.103
$A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5$	0.105
$A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5$	0.117

TABLE IV.7 – Exemple 4 : BBA $m^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$ obtenue après application des trois premières étapes de FCOWA-ER.

L'application de la quatrième étape de FCOWA-ER sur la BBA $m^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$ permet d'obtenir le tableau 26. Celui-ci montre les valeurs approximatives obtenues pour $\text{Bel}^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$, $\text{BetP}^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$, $\text{DSmP}_{\epsilon=10^{-6}}^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$ et $\text{Pl}^{\mathcal{A}^5}(\cdot)$. Pour chacune des règles, la décision finale consiste à choisir l'alternative avec la valeur maximale.

A_i	$\text{Bel}^{\mathcal{A}^5}(A_i)$	$\text{BetP}^{\mathcal{A}^5}(A_i)$	$\text{DSmP}_{\epsilon=10^{-6}}^{\mathcal{A}^5}(A_i)$	$\text{Pl}^{\mathcal{A}^5}(A_i)$
A_1	0	0.023	0	0.117
A_2	0	0.050	0	0.222
A_3	0	0.084	0	0.326
A_4	0	0.227	0	0.611
A_5	0.389	0.616	1	1

TABLE IV.8 – Exemple 4 : crédibilité, BetP, $\text{DSmP}_{\epsilon=10^{-6}}$, et plausibilité du niveau d'efficacité fonctionnelle que chaque action A_i , $i = 1, \dots, 5$ permet au dispositif d'atteindre.

Dans cet exemple, quelle que soit la règle de décision choisie, l'action $A_{i^*} = A_5$ est celle qui permettrait la meilleure efficacité fonctionnelle du dispositif. D'un point de vue pratique, ce résultat est une évidence. En effet, parmi les cinq actions potentielles, A_5 correspond aux travaux les plus importants pour répondre aux objectifs donnés par un scénario plus rare que les autres. Par contre, il s'agit d'une aide à la décision pour un problème posé sous le seul angle de l'efficacité fonctionnelle atteinte. Le coût est généralement un critère contradictoire qui doit être intégré à l'analyse.

IV.1.5 Analyse de l'adaptabilité des méthodes avancées pour évaluer l'efficacité

Cette section a développé l'adaptation des méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel aux problèmes d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection torrentielle. La démarche est divisée en trois étapes :

1. identification de la problématique et des données disponibles pour choisir la méthode ;
2. formalisation du problème d'aide multicritère à la décision dans l'incertain ;
3. résolution du problème en appliquant la méthode choisie.

Les problèmes potentiels avaient été formulés dans la section III.3.2 (p. 138). Cette démarche a permis de traiter l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection aux échelles des ouvrages et dispositifs (figure IV.10). Les méthodes d'aide à la décision avancées utilisées y sont précisées.

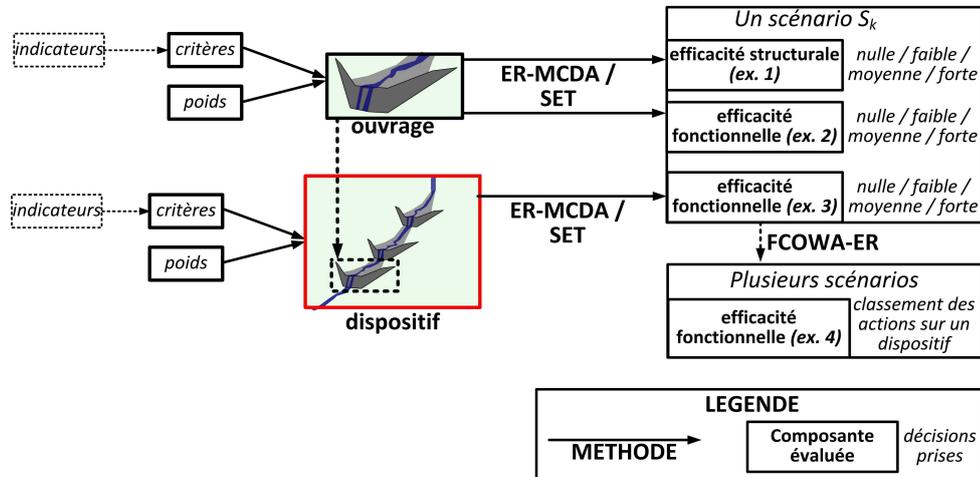


FIGURE IV.10 – Synthèse des méthodes appliquées aux sous-problèmes d'évaluation de l'efficacité.

• Méthodes ER-MCDA ou SET pour l'évaluation

Ces deux méthodes sont appliquées pour résoudre les mêmes types de problèmes. Des labels, ou des classes, sont prédéfinis. L'objectif est d'affecter chaque alternative (un système ou une action sur un système) à un des labels ou une des classes. Pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, le « modèle de transposition » utilisé dans ER-MCDA et la structure de préférence de SET (définition des profils b_h et des seuils) sont comparables.

Cependant, ER-MCDA présente deux avantages qui permettent de la privilégier :

- l'imprécision de l'évaluation de chaque critère, issue de plusieurs sources, est considérée ;
- une fois les données d'entrée fournies, le calcul est simplifié.

Des développements restent à mener pour améliorer la méthode ER-MCDA. 1) Une nouvelle méthode de transposition pour obtenir une BBA représentant l'ignorance partielle ou totale de la connaissance sera développée en section IV.2.2. 2) Une méthode de validation basée sur l'appui à la construction du « modèle de transposition » sera proposée en section IV.2.1. Un autre enjeu est la formalisation de l'évaluation du coefficient de fiabilité de chaque source.

• FCOWA-ER pour tenir compte des différents scénarios

Les méthodes ER-MCDA et SET permettent une évaluation pour un scénario S_k donné (exemples 1 à 3). Dans leur continuité, l'exemple 4 intègre les différents scénarios en appliquant FCOWA-ER. Le passage d'une évaluation qualitative par ER-MCDA ou SET à une évaluation quantitative nécessaire à l'application de FCOWA-ER restera à formaliser à l'issue de cette thèse.

La limite principale à l'application de cette approche réside dans la représentation de la connaissance sur les états de la nature \mathcal{S} . Le cadre probabiliste ne représente pas toute la connaissance disponible. Pour FCOWA-ER, la définition de la BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$ permet de décider sur la base d'une représentation intégrant les différentes formes d'imperfection sur la connaissance de \mathcal{S} . Cependant, elle a été établie de manière empirique dans l'exemple traité. Les modalités techniques de l'établissement de cette fonction de masse à partir des connaissances disponibles restent à établir.

- En pratique, l'application des AMC avancées dépend de l'identification des préférences entre critères

Les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) sont basées sur la représentation des préférences du décideur entre les différents critères de décision. Leur identification et celle du vecteur de poids \mathbf{w} sont deux éléments essentiels de la formalisation de chaque problème (figure IV.10).

1) Pour l'identification des critères, la démarche de l'AHP selon l'arbre hiérarchique est l'approche constructive la plus simple, applicable à chaque sous-problème. L'échelle d'évaluation de la conséquence est précisée pour chacun d'eux.

2) L'élicitation du vecteur \mathbf{w} est à comparer à celle des règles logiques des systèmes experts.

Pour l'efficacité structurale d'un ouvrage (exemple 1), le vecteur \mathbf{w} intègre l'importance de chaque mode de rupture. Une matrice \mathbf{P}_g (p. 63) a été proposée pour un ouvrage de consolidation/stabilisation, en considérant le glissement et l'affouillement comme les critères les plus importants, ce qui restera à valider, en pratique, à l'issue de cette thèse.

Pour l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage (exemple 2), le vecteur \mathbf{w} représente l'importance de chaque mode de défaillance fonctionnelle. Son établissement est ambigu car la situation de l'ouvrage dans le dispositif conditionne l'importance relative de chaque mode de défaillance. La proposition formulée est hors du cadre théorique des méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) classiques. Elle restera à améliorer, à l'issue de cette thèse, pour prendre en compte ces deux niveaux d'importance.

Pour l'efficacité fonctionnelle d'un dispositif (exemple 3), le vecteur \mathbf{w} représente l'importance de chaque mode de défaillance fonctionnelle pour une fonction du dispositif donnée. La comparaison de dispositifs aux fonctions différentes reposerait sur des vecteurs \mathbf{w} différents, hors du cadre théorique des méthodes d'AMC.

Pour comparer plusieurs actions potentielles sur un dispositif (exemple 4), le vecteur \mathbf{w} représente l'importance de chaque mode de défaillance pour un même dispositif. Dans ce cas, il est unique et le cadre théorique des méthodes d'AMC est respecté.

Synthèse de la section IV.1

Les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel ont été adaptées, de manière nouvelle, aux problèmes d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection torrentielle. Des applications sont proposées aux échelles des ouvrages et dispositifs.

Les méthodes ER-MCDA et SET permettent l'évaluation qualitative pour un même scénario. Les modèles de structure de préférence entre critères et d'évaluation des alternatives pour un même critère sont à valider avec les décideurs réels.

La méthode FCOWA-ER permet de décider en tenant compte de plusieurs scénarios. La méthode de définition de la fonction de masse sur les états de la nature et la formalisation de la transformation intermédiaire quantitative des résultats issus d'AMC préalables resteront à développer à l'issue de cette thèse pour faciliter l'application.

IV.2 Améliorations techniques pour aider à décider selon la connaissance disponible

Les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel s'appuient sur :

1. la représentation par une masse de croyance (BBA) de l'imperfection de l'information produite par une source ;
2. la combinaison des BBAs issues de plusieurs sources selon des règles de fusion ;
3. la décision sur la base de la BBA finale obtenue après combinaison.

Les améliorations techniques proposées dans cette section concernent les points 1 et 3.

La méthodologie ER-MCDA initialement développée par Tacnet (2009) a été retenue. Elle s'appuie sur un « modèle de transposition » qui permet d'évaluer un critère en transformant sa mesure dans le cadre de discernement (FoD) commun sur lequel s'effectue la décision. Cependant, cette évaluation n'est pas validée (p. 103). La section IV.2.1 propose de s'appuyer sur l'établissement d'une référence pour aider cette validation.

Une fois le « modèle de transposition » défini pour chaque critère, une méthode de transposition permet d'établir la BBA à partir de l'évaluation imprécise fournie par chaque source (p. 85). La méthode existante ne tient pas compte de l'ensemble de l'information disponible. La section IV.2.2 présente une nouvelle méthode de transposition qui a été développée pour améliorer ce point.

L'étape finale de décision s'appuie sur des règles représentant l'attitude du décideur (p. 91). La section IV.2.3 présente le développement d'une nouvelle approche de décision menée par l'ONERA et auquel cette thèse a contribué.

IV.2.1 Aide à la validation de l'évaluation selon une référence

L'évaluation des indicateurs et critères sont les sources d'information initiales pour aider à décider selon les différents problèmes de décision. S'ils sont identifiés et connus, leur évaluation est directement réalisée dans une échelle qualitative reposant sur des labels (p. 37). Cependant, aucune méthode n'aide à valider les évaluations proposées. Cette section propose de considérer les règles et normes de conception disponibles comme la référence. Cependant, elle varie selon les paramètres de conception utilisés. Un « modèle de transposition » correspondant est alors construit pour permettre l'évaluation selon des labels, en tenant compte de cette imperfection initiale. Cette nouvelle méthodologie est appliquée à l'évaluation du taux d'affouillement de la fondation d'un ouvrage (p. 26) qui est un indicateur d'évaluation de sa stabilité structurale.

IV.2.1.1 Dégradation de l'évaluation par rapport à une référence

La démarche de conception des dispositifs et ouvrages de protection est connue (p. 22). Elle s'appuie sur des guides techniques et des normes existantes. Des objectifs de conception sont établis au préalable. Le respect des règles permet de répondre à ces objectifs. Il s'agit alors d'une référence à l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection, relative à l'atteinte de ces objectifs. Les indicateurs et critères d'efficacité aident à évaluer le niveau de dégradation par rapport à l'atteinte de ces objectifs.

La démarche proposée vise à tracer l'établissement du « modèle de transposition » de chaque indicateur en s'appuyant sur les règles de conception existantes. Elle repose sur quatre étapes. Les étapes 1 à 3 établissent la relation entre l'évaluation de l'indicateur et le niveau d'atteinte de la référence. L'étape 4 développe l'établissement des « modèles de transposition ».

• **Étape 1 - les normes et règles de conception comme référence**

Pour une alternative A_i , la conséquence selon laquelle la décision est prise est évaluée sur une échelle notée C : la stabilité structurale (conséquence) d'un ouvrage (alternative) en est un exemple. La conception d'une mesure de protection selon les règles et normes existantes permet d'identifier le niveau de conséquence attendu, ce qui en fait la référence par rapport à laquelle la conséquence est évaluée.

La conception des mesures de protection repose sur des modèles physiques (et numériques) dont les règles fixent les paramètres à prendre en compte. Leur définition peut varier selon le contexte de décision. Par exemple, les coefficients partiels des actions utilisés pour dimensionner les ouvrages de stabilisation torrentielle ne sont pas les mêmes dans les Eurocodes ou dans la pratique autrichienne (tableau I.4, p. 24).

Ainsi, pour un problème de décision donné, les règles de conception sont une référence dont les paramètres doivent être précisés. Elle varie alors avec la modification de ces paramètres.

• **Étape 2 - dégradation progressive de l'efficacité et changement de référentiel**

L'évaluation de l'efficacité d'une mesure de protection dépend de celle de critères, eux-mêmes évalués à partir d'indicateurs (Annexe C). L'évaluation des indicateurs représentent le niveau de dégradation par rapport à la référence. Le processus physique de dégradation peut être modélisé physiquement ou numériquement. Pour simplifier, on considère un seul indicateur dont l'évaluation est établie sur une échelle notée Y . Le modèle de dégradation est alors une fonction de transformation de l'évaluation de l'indicateur dans celle de la conséquence analysée ($Y \rightarrow C$).

Par exemple, le dimensionnement d'un ouvrage de stabilisation selon les Eurocodes assure sa stabilité structurale qui est la conséquence analysée (figure I.19, p. 27). Le taux d'affouillement de sa fondation est un des indicateurs de dégradation de cette stabilité (p. 26). Par enlèvement du sol sous la fondation (critère), la capacité portante est réduite (processus physique) ce qui favorise la diminution de la stabilité de l'ouvrage (conséquence).

• **Étape 3 - étude de sensibilité aux paramètres de conception**

L'étape 2 s'appuie sur un modèle physique (et/ou numérique) pour évaluer la conséquence en fonction de l'évolution de l'indicateur de dégradation. La conséquence qui en tient compte est établie à partir de la référence qu'est le modèle de conception. Sa variation selon les paramètres utilisés doit être considérée dans le processus de validation. Pour cela, l'étape 3 analyse la sensibilité de l'évolution des conséquences aux paramètres de conception utilisés.

• **Étape 4 - établissement du « modèle de transposition »**

Les trois premières étapes établissent la relation entre l'évaluation de l'indicateur et celle de la conséquence analysée, selon une référence qui sont les règles de conception. L'effet de l'imperfection de ces règles est analysé. Sur cette base, l'étape 4 transforme l'évaluation des conséquences dans C dans une échelle d'évaluation finale définie par des labels. Cette échelle est le FoD $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ dans lequel est prise la décision. L'objectif est ici de tracer le raisonnement expert qui s'appuie sur ce type d'évaluation.

Cette étape 4 est divisée en quatre étapes successives, notées étapes 4a à 4d, pour établir le « modèle de transposition » qui relie chaque label θ_e , $e = 1, \dots, n$ à l'évaluation de l'indicateur dans Y . Elles sont détaillées sur la figure IV.14 (p. 165) à partir du cas d'application traité.

◇ *Étape 4a* - établissement de l'enveloppe des résultats de dégradation

L'étape 2 établit les courbes de relation entre évaluations de l'indicateur et des conséquences ($Y \rightarrow C$). L'étape 3 permet d'établir plusieurs courbes selon les paramètres de conception considérés. Les cas le plus défavorable (pessimiste) et le plus favorable (optimiste) sont extraits. Ils encadrent un ensemble de courbes intermédiaires.

◇ *Étape 4b* - définition du FoD et des relations floues selon l'évaluation des conséquences

La décision s'appuie sur l'évaluation des conséquences qui, en pratique, est établie selon des labels qualitatifs notés θ_e , $e = 1, \dots, n$. Le cadre de discernement (FoD) correspondant $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ doit d'abord être précisé. L'appartenance des évaluations dans C à chacun des labels θ_e , $e = 1, \dots, n$ est ensuite définie par chaque fonction $\mu_{\theta_e} : C \rightarrow \theta_e$, $e = 1, \dots, n$.

◇ *Étape 4c* - établissement de plusieurs « modèles de transposition »

L'étape 4a a produit plusieurs fonctions permettant la transformation $X \rightarrow C$. L'étape 4b a défini la relation $C \rightarrow \theta_e$, $e = 1, \dots, n$. Un « modèle de transposition » $\mu_{\theta_e} : X \rightarrow \theta_e$, $e = 1, \dots, n$ est alors établi pour chaque fonction de transformation $X \rightarrow C$. Les deux « modèles de transposition » pessimiste et optimiste encadrent les autres « modèles de transposition » correspondant aux cas intermédiaires.

◇ *Étape 4d* - fusion des « modèles de transposition »

Cette étape est une proposition prospective de développement qui n'a pas été appliquée. Une évaluation selon chacun des « modèles de transposition » peut être considérée comme une source d'information. Un processus de fusion de ces évaluations sera envisagé, en perspectives de cette thèse (chapitre VI).

IV.2.1.2 Évaluation de l'affouillement d'un ouvrage de stabilisation

L'affouillement de pied est un indicateur de la stabilité externe d'un ouvrage de stabilisation torrentielle (p. 26). La méthode de validation est appliquée à ce cas d'exemple.

Le dimensionnement réglementaire permettant d'évaluer le taux de stabilité externe d'un ouvrage est d'abord rappelé (étape 1). L'effet du taux d'affouillement de la fondation sur ce taux de stabilité est évalué (étape 2). La sensibilité de l'évolution de ce taux aux paramètres de dimensionnement utilisés dans les normes est analysée (étape 3). Finalement, les « modèles de transposition » sont établis. Ils représentent la relation entre le taux d'affouillement et les labels d'évaluation de la stabilité externe de l'ouvrage (étape 4).

• Étape 1 - dimensionnement semi-probabiliste selon les Eurocodes

Le principe de dimensionnement d'un ouvrage de stabilisation torrentielle a déjà été présenté (p. 23). Un outil a été développé par Di Ciocco (2015) sous Matlab[®]. Il permet de dimensionner un ouvrage selon un modèle 2D en justifiant la stabilité interne et externe de différentes sections. L'effet de l'affouillement d'un ouvrage s'évalue sur son niveau de stabilité structurale externe. Seul le dimensionnement selon la stabilité externe sera donc présenté ensuite.

◇ *Dimensions de l'ouvrage*

Pour cet exemple d'application, l'ouvrage est autostable en béton armé de masse volumique $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$, de hauteur totale H et de profondeur de semelle B . La paroi à l'amont de l'ou-

vrage est considérée comme en béton coffré tandis que les fondations ont été coulées sur place. Cinq sections, notées j et d'un mètre de large, sont analysées pour un ouvrage de onze mètres de largeur totale ($L=11$ m) (figure IV.11).

◇ Hypothèses géotechniques

Le sol sous l'ouvrage est caractérisé par sa pression limite nette équivalente ($q_{net} = 2$ MPa), sa cohésion à « court terme » ($C_{u,k} = 30$ kPa) et son angle de frottement critique ($\phi_{crit} = 30^\circ$) impliquant l'angle de friction entre le sol et la fondation ($\delta_{a,k} = 30^\circ$ pour un béton de fondation coulé sur site). Les matériaux de l'atterrissement sont caractérisés par leurs poids volumiques humide ($\gamma_h = 18$ kN/m³) et saturé ($\gamma_{sat} = 21$ kN/m³) et l'angle de frottement interne à « long terme » ($\phi_{soil} = 30^\circ$) impliquant l'angle de friction entre le sol et la paroi amont ($\delta = 20^\circ$ pour un béton coffré).

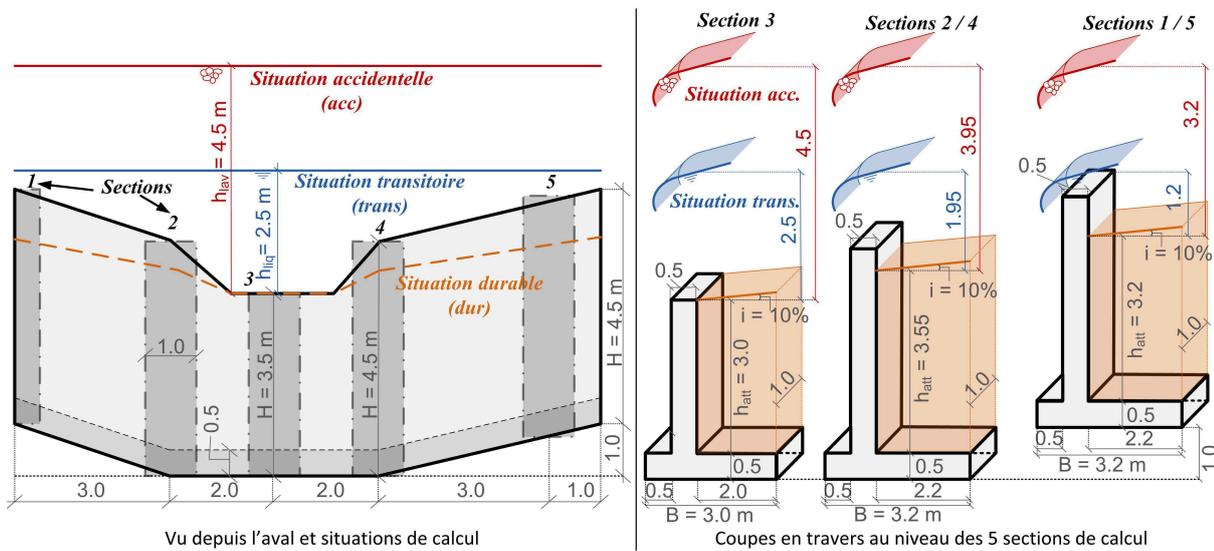


FIGURE IV.11 – Ouvrage autostable et situations considérées (dimensions notées en m.).

◇ Actions considérées

Dans cet exemple, les actions permanentes G sont le poids de la structure et d'un atterrissement non déjaugé humide (situation durable, *dur*). Les actions pseudo-permanentes G' sont celles d'un atterrissement déjaugé, les sous-pressions en fondation n'étant pas considérées en présence de drainage sous fondation (situation accidentelle, *acc*). Les actions variables Q et les actions accidentelles FA sont liées au passage d'une crue liquide (situation transitoire, *trans*) et d'une lave torrentielle (*acc*). Le tableau IV.9 considère les résultantes des charges verticales (V_d) et horizontales (H_d). Le tableau IV.10 présente le calcul des résultantes des moments stabilisants (M_{stb}) et déstabilisants (M_{dstb}) (Deymier et al. 1995 ; Di Ciocco 2015).

Pour les actions permanentes dues à l'atterrissement, sa hauteur (h_{att}) et sa pente longitudinale (i) amont sont fixées. Pour une durée d'utilisation de 100 ans, une hauteur de crue de période de retour $T = 50$ ans est considérée en *trans*. L'atteinte de ce niveau de crue est hautement probable car est de 87 % en 100 ans. Elle est de $h_{liq} = 2,5$ m avec une masse volumique $\gamma_{eau} = 10$ kN/m³. En *acc*, une lave torrentielle avec $h_{lav} = 4,5$ m, $\gamma_{lav} = 20$ kN/m³ et un coefficient dynamique de choc $n_{lav} = 5$ est prise en compte (figure IV.11).

EL	Sit.	V _d		H _d
		V _{d,min}	V _{d,max}	
ELU	dur	γ _{G,inf} · (G1+G21+G22extV)	γ _{G,sup} ·(G1+G21+G22extV)	γ _{G,sup} ·G22extH
	trans		γ _{G,sup} ·(G1+G21+G22extV) +γ _{Q,sup} ·(Q11V+Q12+Q13V)	γ _{G,sup} ·G22extH +γ _{Q,sup} ·(Q11H+Q13H)
	acc	G1+G'31+ FA11V+FA12+FA13V	G1+G'31+ FA11V+FA12+FA13V	G'32+ FA11H+FA13H
ELS	dur	G1+G21+G22extV		G22extH
	trans	G1+G21+G22extV+Q11V+Q12+Q13V G1+G21+G22extV+Q11V+Q12+Q13V		G22extH+ Q11H+Q13H

TABLE IV.9 – Combinaisons d’actions pour établir la résultante des charges verticales et horizontales selon les états-limites et les situations.

EL	Sit.	M _{stb}	M _{dstb}
ELU	dur	γ _{G,inf} · (MG1+MG21+MG22extV)	γ _{G,sup} ·MG22extH
	trans		+γ _{Q,sup} ·(MQ11H+MQ13H)
	acc	MG1+MG'31+MFA11V +MFA12+MFA13V	MG1+MG'32+ MFA11H+MFA13H
ELS	dur	MG1+MG21+MG22extV	MG22extH
	trans	MG1+MG21+MG22extV +MQ11V+MQ12+MQ13	MG22extH+ MQ11H+MQ13H

TABLE IV.10 – Combinaisons d’actions pour établir la résultante des moments stabilisants et déstabilisants selon les états-limites et les situations.

◇ Coefficients partiels de combinaison

L’accompagnement par les actions variables n’est pas pris en compte : ψ₀ = ψ₁ = ψ₂ = 1. Les coefficients partiels des actions pour leurs combinaisons sont donnés dans le tableau I.4 (p. 24). Il compare ceux de l’Eurocode et ceux utilisés en Autriche qui sont moins conservateurs.

◇ Taux de stabilité externe pour chaque section d’ouvrage

Le principe du dimensionnement selon le modèle 2D consiste à calculer les taux de stabilité τ_j, pour chaque section j, pour les six critères de stabilité externe (AFNOR 2005b, 2014b) : ELU de charges transmises au sol (ULS-bea) ; ELS de mobilisation de la capacité portante (portance) (SLS-bea) ; ELU de glissement (ULS-sli) ; ELU de renversement (ULS-ecc) et ELS de décompression du sol par limite d’excentrement (SLS-ecc) ; stabilité d’ensemble. Cette dernière n’est pas impactée par l’affouillement local, sujet de l’application, et ne sera donc pas analysée par la suite.

Pour chaque critère et section j, τ_j est établi dans le tableau IV.11 selon l’excentrement e, calculé à partir de l’équation (IV.7). Il permet d’évaluer la stabilité au niveau de la section j : si τ_j ≤ 1, la section j est stable ; si τ_j > 1, elle est instable.

Critères de stabilité	V _d	q _{ref,j}	τ _j	γ _{R,v} ou γ _{R,h}	γ _{R,d,v} ou γ _{R,d,h}
ULS-bea	V _{d,max}	$\frac{V_d}{B-2e}$	$\frac{\gamma_{R,d,v} \cdot \gamma_{R,v}}{q_{net}} \cdot q_{ref,j}$	γ _{R,v} = $\begin{cases} 1,2 & (3) \\ 1,4 & (4) \end{cases}$	γ _{R,d,v} = 1
SLS-bea	V _d				
ULS-sli	V _{d,min}	$\frac{H_d}{B-2e}$	$\begin{cases} \max\{\frac{\gamma_{R,d,h} \cdot \gamma_{R,h}}{C_{u,k}} \cdot q_{ref,j}; \frac{H_d}{0.4 \cdot V_d}\} & (1) \\ \frac{H_d}{V_d} \frac{\gamma_{R,d,h} \cdot \gamma_{R,h}}{\tan(\delta_{a,k})} & (2) \end{cases}$	γ _{R,h} = 0, 9	γ _{R,d,h} = 1, 1
ULS-ecc	V _{d,max}		$\frac{30e}{14B}$		
SLS-ecc	V _d		$\frac{6e}{B}$ selon (MELT 1993)		

TABLE IV.11 – Éléments de calcul du taux de stabilité τ_j, pour chaque section j, selon les cinq critères de stabilité externe retenus (légende : 1 : si non drainé ; 2 : si drainé ; 3 : si dur ou trans ; 4 : si acc).

◇ Hypothèses de calcul du taux de stabilité de l'ensemble de l'ouvrage

Selon le tableau IV.11, la contrainte transmise au sol $q_{ref,j}$ est établie au niveau de chaque section j pour calculer le taux de stabilité τ_j . Pour évaluer la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage, la contrainte transmise au sol de fondation q_{ref} doit être évaluée. Des hypothèses simplificatrices sont formulées (figure IV.12) dans le cadre du dimensionnement selon le modèle 2D.

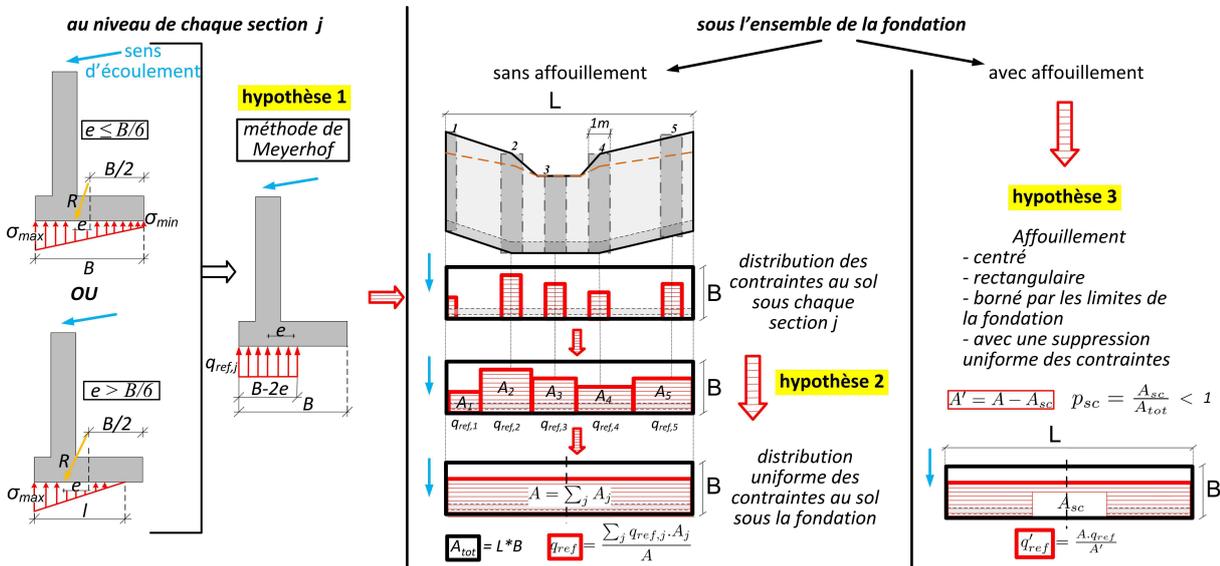


FIGURE IV.12 – Hypothèses simplificatrices d'une distribution uniforme de l'affouillement et des contraintes au sol sous la fondation.

La semelle étant rectangulaire, le modèle de Meyerhof est retenu au niveau de chaque section j (hypothèse 1). La contrainte transmise au sol q_{ref} est considérée uniforme pour toute la semelle de l'ouvrage (hypothèse 2). Soit A_{tot} la surface totale de semelle sous l'ouvrage, A_j la surface de semelle comprimée au niveau de la section j et $A = \sum_j A_j$ la surface totale de semelle comprimée, q_{ref} est alors calculée à partir de $q_{ref,j}$ selon l'équation (IV.8). τ évalue alors la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage pour chaque critère de stabilité selon les équations (IV.9-IV.12) : si $\tau \leq 1$, la stabilité est vérifiée pour le critère considéré.

$$e = \frac{M_{stb} - M_{dstb}}{V_d} - \frac{B}{2} \quad (IV.7)$$

$$q_{ref} = \frac{\sum_j q_{ref,j} \cdot A_j}{A} \quad (IV.8)$$

$$\tau_{ULS,SLS-bea} = \frac{\gamma_{R,d,v} \cdot \gamma_{R,v}}{q_{net}} \cdot q_{ref} \quad (IV.9)$$

$$\tau_{ULS-sli} = \frac{\gamma_{R,d,h} \cdot \gamma_{R,h}}{C_{u,k}} \cdot q_{ref} \text{ si non drainé} \quad (IV.10)$$

$$\tau_{ULS-ecc} = \frac{A}{0,1 \cdot A_{tot}} \text{ (MELT 1993)} \quad (IV.11)$$

$$\tau_{SLS-ecc} = \frac{A}{0,75 \cdot A_{tot}} \text{ (MELT 1993)} \quad (IV.12)$$

• Étape 2 - quantification de l'impact de l'affouillement sur les taux de stabilité externe de l'ouvrage

La surface d'affouillement (A_{sc}) est la partie de semelle sans appui. Nous considérons A_{sc} évaluée imparfaitement selon trois hypothèses (regroupées sous le terme d'hypothèse 3 dans la figure IV.12) : l'affouillement est rectangulaire et symétrique par rapport à l'axe central de l'ouvrage et $A_{sc} < A_{tot}$.

La surface de semelle comprimée est $A' = A - A_{sc}$. La contrainte transmise au sol avec affouillement (q'_{ref}) est calculée selon le principe fondamental de la statique : $q'_{ref} = \frac{A \cdot q_{ref}}{A'}$. Les taux de stabilité externe sont établis en remplaçant q_{ref} par q'_{ref} dans les équations (IV.9-IV.12), pour les trois situations étudiées. Leur évolution est calculée selon le taux d'affouillement $p_{sc} = \frac{A_{sc}}{A_{tot}}$ (figure IV.13a).

Dans cet exemple, il y a drainage sous fondation : l'affouillement n'a pas d'impact sur $\tau_{ULS-Sli}$ qui n'est pas présenté sur la figure IV.13 (tableau IV.11, équation (IV.10)). Dans cet exemple, le critère critique est $\tau_{ULS-Bea}$ en situations *trans* et *acc*, le taux τ correspondant étant le plus élevé pour un même taux d'affouillement p_{sc} . En situation *dur*, le critère critique est $\tau_{SLS-Ecc}$.

Le code de Di Ciocco (2015) sous Matlab[®] a été développé pour prendre en compte cette évolution. Il aide à calculer les taux de stabilité τ de l'ouvrage selon son taux d'affouillement p_{sc} .

• Étape 3 - étude paramétrique de la dégradation de la stabilité

La stabilité de l'ouvrage augmente quand le taux τ diminue. Pour chaque situation, un ouvrage réel affouilli selon un taux d'affouillement p_{sc} doit être évalué par rapport à un ouvrage correctement dimensionné selon les coefficients réglementaires γ_G et γ_Q de l'Eurocode (AFNOR 2003a) (figure IV.13a). Ces derniers sont ensuite réduits selon la règle utilisée en Autriche et en ne les prenant pas en compte (égaux à un) sur la figure IV.13b. Finalement, l'imprécision de l'évaluation des cas de charge h_{liq} et h_{lav} considérés est prise en compte dans la figure IV.13c.

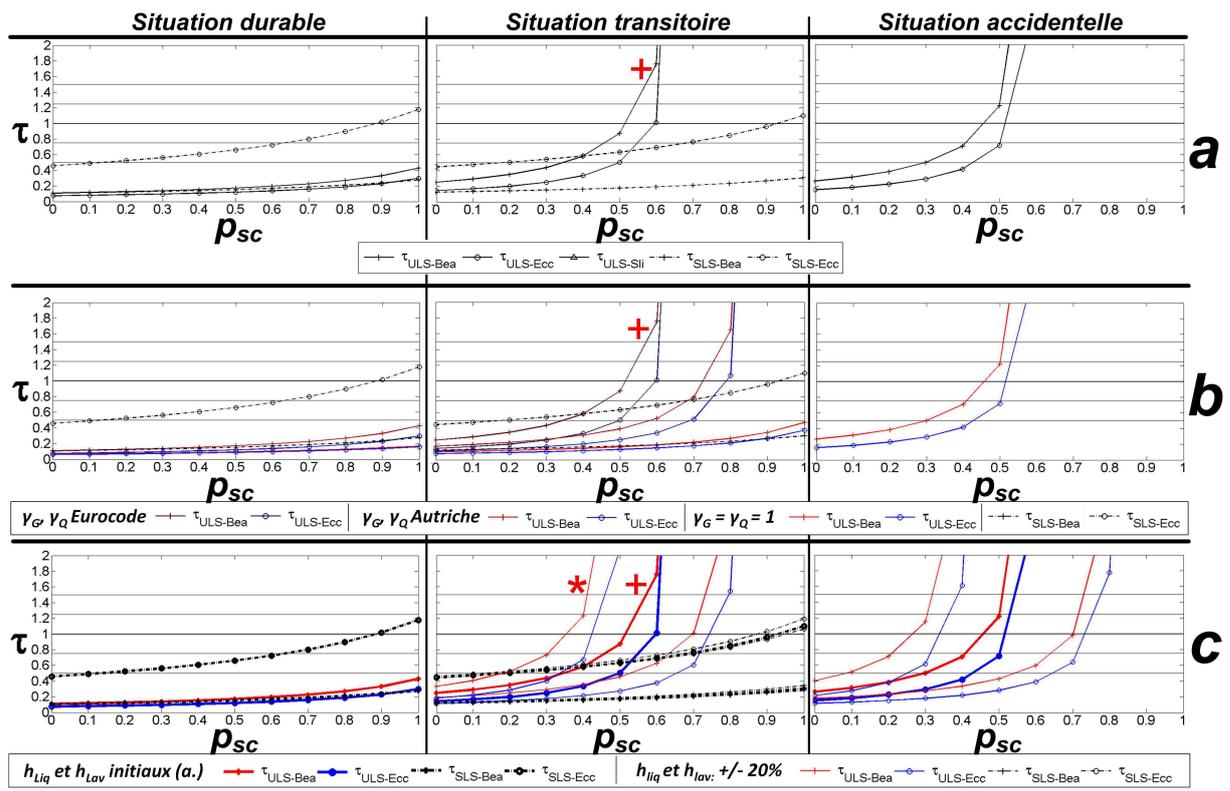


FIGURE IV.13 – Etude paramétrique de la stabilité (τ) de l'ouvrage en fonction de son taux d'affouillement (p_{sc}) pour les trois situations de calcul :

a) avec γ_G et γ_Q de l'Eurocode ; b) en les diminuant progressivement (norme autrichienne, non pris en compte) ; c) avec une évaluation imprécise [+ et -20%] de h_{liq} et h_{lav} , avec γ_G , γ_Q de a).

En tenant compte des coefficients partiels γ_G et γ_Q de l'Eurocode (AFNOR 2003a), l'affouillement est de plus en plus préjudiciable de la situation durable à l'accidentelle (figure IV.13a). Plus on réduit les coefficients γ_G et γ_Q , moins l'affouillement est préjudiciable à la stabilité de l'ouvrage à l'ELU en situation *trans* (figure IV.13b). L'imprécision de l'évaluation de h_{liq} et h_{lav} impacte l'influence de l'affouillement sur la stabilité de l'ouvrage en situations *trans* et *acc* (figures IV.13c et IV.13a). Une autre figure réalisée avec la même imprécision montrerait un impact similaire sur les courbes de la figure IV.13b pour les γ_G et γ_Q autrichiens.

La seule évaluation binaire de la stabilité d'un ouvrage où celui-ci est correctement dimensionné ne permet donc pas d'établir la stabilité réelle d'un ouvrage affouillé. A contrario, plusieurs catégories peuvent être extraites avec a minima : ouvrage stable/instable selon un dimensionnement réglementaire ou selon un dimensionnement avec des hypothèses optimistes ou pessimistes. Pour aller au-delà, l'établissement du « modèle de transposition » est proposé ici.

• Étape 4 - évaluation floue de la stabilité selon l'affouillement

L'établissement du « modèle de transposition » de la stabilité d'un ouvrage réel selon son taux d'affouillement p_{sc} est exploratoire. Les seuils sont établis à partir des calculs de stabilité (figure IV.13). La figure IV.14 détaille les quatre étapes d'établissement du « modèle de transposition », pour la situation *trans*. Elles sont reproductibles pour chaque situation de calcul.

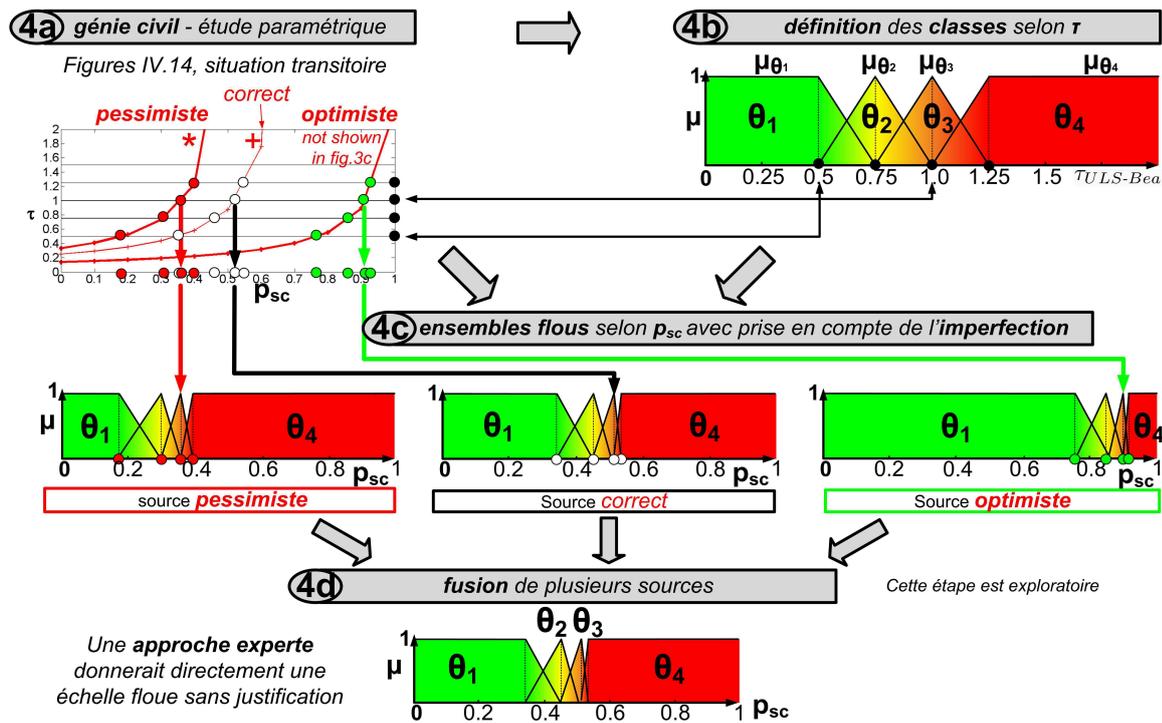


FIGURE IV.14 – Établissement d’une échelle d’évaluation floue de la stabilité d’un ouvrage selon son taux d’affouillement en situation transitoire (θ_1 = très stable, θ_2 = stable, θ_3 = moyennement stable, θ_4 = instable).

◇ Étape 4a - L’enveloppe des résultats de stabilité en fonction de p_{sc} est directement établie à partir des résultats de la figure IV.13. L’approche pessimiste considère les coefficients partiels (γ_G et γ_Q) de l’Eurocode et les valeurs maximales des cas de charge (h_{liq} et h_{lav}). L’approche optimiste considère les coefficients autrichiens et des valeurs minimales des cas de charge. L’approche intermédiaire est proposée comme celle du calcul selon le dimensionnement initial, dit « correct ».

◇ *Étape 4b* - La stabilité structurale de l'ouvrage est liée à sa rupture et donc sa stabilité à l'ELU. De manière conservative, elle est liée à $\tau_{ULS-Bea}$. Il s'agit de la conséquence C qui est analysée.

La réponse de la stabilité de l'ouvrage au taux d'affouillement $Y = p_{sc}$ est fortement non linéaire avec un seuil de comportement. Dès que le taux d'affouillement p_{sc} impliquant $\tau_{ULS-Bea} = 1$ est atteint, sa faible augmentation implique une très forte augmentation de l'instabilité (figure IV.13). Étant donné ce comportement, $n = 4$ classes θ_e sont proposées : $\theta_1 =$ très stable, $\theta_2 =$ stable, $\theta_3 =$ moyennement stable, $\theta_4 =$ instable avec $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$.

Les seuils entre classes sont établis par le décideur selon le taux de stabilité externe, ici $\tau_{ULS-Bea}$. Ils tiennent compte du comportement à seuil décrit précédemment.

◇ *Étape 4c* - Un taux d'affouillement p_{sc} correspond à chaque $\tau_{ULS-Bea}$ de l'étape 4a. Un « modèle de transposition » est établi pour un calcul pessimiste, optimiste et intermédiaire.

◇ *Étape 4d* - La fusion des « modèles de transposition » n'a pas été appliquée et reste à développer.

IV.2.1.3 Vers le déploiement de la méthodologie de validation

Au travers d'un exemple d'application, cette section détaille une approche générique pour aider l'expert à établir et justifier le « modèle de transposition » d'un indicateur (affouillement de pied) permettant d'évaluer une alternative (ouvrage de correction torrentielle) selon un critère donné (taux τ de stabilité externe). Cette approche peut-être reproduite pour différents indicateurs impactant la stabilité externe d'un ouvrage (renversement, glissement, etc.) mais aussi sa stabilité interne (niveau de fissuration, rupture).

L'apport essentiel est l'exploration d'une méthode de justification de la transformation de l'évaluation d'un indicateur « de terrain » dans celle floue de la stabilité d'une structure. Elle établit la correspondance entre une approche de justification de la stabilité et une approche d'évaluation experte.

Cette analyse est limitée à un ouvrage donné soumis à des situations prédéfinies. L'automatisation des calculs de stabilité, intégrant l'imperfection de l'information, et de l'élaboration du « modèle de transposition » doit être engagée. Elle peut permettre l'établissement des « modèles de transposition » pour différents ouvrages soumis à des situations variées.

La vérification théorique de la stabilité se base sur l'approche semi-probabiliste des Eurocodes. Des modèles plus avancés peuvent également être utilisés dans le cadre de cette démarche pour en améliorer les résultats.

Cette approche constitue une première étape de formalisation de l'évaluation de l'efficacité structurale d'un ouvrage de correction torrentielle vis-à-vis d'un scénario (situation) donné. Une fois l'ensemble des indicateurs et critères établis et leur échelle d'évaluation commune élaborée, les modes d'agrégation doivent être établis.

Une méthode de validation basée sur l'établissement d'une référence et une analyse de sensibilité a été développée. Elle permet de faire correspondre modélisation physique et évaluation experte. Elle a été appliquée au cas concret de l'évaluation de la stabilité structurale externe d'un ouvrage à partir de celle de son taux d'affouillement. La méthode est générique et peut être appliquée à tout type d'indicateur et critère.

IV.2.2 Nouvelle méthode de transposition pour ER-MCDA

La méthode de transposition classique de ER-MCDA repose sur une transposition géométrique (figure II.11, p. 86). Elle permet d'obtenir une BBA bayésienne, pour le cadre de discernement (FoD) commun Θ , à partir de l'évaluation imprécise de chaque alternative selon un critère (ou un indicateur) par une distribution de possibilité et d'un « modèle de transposition » de l'échelle d'évaluation de ce critère dans Θ .

Une nouvelle méthode de transposition est d'abord proposée. Elle permet d'obtenir une BBA sur tous les sous-ensembles de Θ , unions des éléments de Θ compris. Elle assure ainsi une meilleure propagation de l'imperfection de l'information disponible. La méthode classique de transposition et la nouvelle sont ensuite comparées sur un cas d'application réel : la stabilité structurale d'un ouvrage de stabilisation torrentielle est évaluée à partir de la mesure de son taux d'affouillement.

IV.2.2.1 Rappel du principe de la transposition

La décision finale est établie selon n labels (ou données catégorielles), généralement qualitatifs, regroupés dans le FoD $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$. Chaque alternative est évaluée sur une échelle spécifique à chaque critère : X_j est l'échelle d'évaluation du critère g_j . Dans cette section, le problème est générique à n'importe quel critère ou indicateur et l'échelle X est considérée.

Pour représenter l'imprécision et l'incertitude de l'évaluation sur X , un quadruplet $\{a, b, c, d\}$ est donné par l'expert pour une distribution de possibilité $\pi : X \rightarrow [0, 1]$ (figure II.8b, p. 81). Chaque distribution de possibilité fournie par chaque source est transformée dans une BBA $m^\Theta(\cdot)$, établie sur 2^Θ (figure IV.15). Pour cela, un « modèle de transposition » est préalablement fourni avec n ensembles flous $\mu_e : X \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$ (figure (II.7), p. 79). Un quadruplet $\{a_e, b_e, c_e, d_e\}$, $e = 1, \dots, n$ est spécifique à chaque fonction μ_e .

Selon le principe initial de Tacnet (2009), la construction des n ensembles flous respecte la condition $\sum_{e=1}^n \mu_{\theta_e} \leq 1$: si un élément $x^* \in X$ appartient totalement au label θ_e ($\mu_{\theta_e}(x^*) = 1, e \in [1, n]$), il ne peut pas appartenir partiellement à un autre label de Θ ($\mu_{\theta_f}(x^*) = 0, f \neq e \in [1, n]$). Par ailleurs, par construction, il existe au moins un élément $x^* \in X$ pour lequel $\mu_{\Theta = \bigcup \{\theta_e | e \in [1, n]\}}(x^*) \leq 1$: cela correspond à l'hypothèse d'un monde ouvert (noté *o.w.*, p. 83).

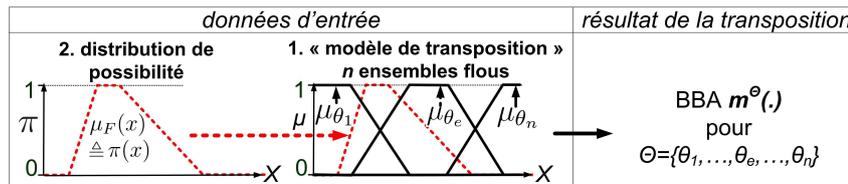


FIGURE IV.15 – Principe général de la transposition : d'une distribution de possibilité sur X et un « modèle de transposition » de X sur Θ à une BBA pour le FoD Θ .

IV.2.2.2 Étapes détaillées de la nouvelle méthode de transposition

La méthode de transposition utilisée dans les exemples 1 et 2 d'application (section IV.1.2, p. 143) était celle initiale de Tacnet (2009). Les BBAs obtenues pour représenter l'évaluation de l'ouvrage par chaque source selon chaque critère étaient bayésiennes : une masse positive ne peut être affectée qu'aux singletons de $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$. La nouvelle méthode de transposition repose sur cinq étapes pour obtenir une BBA $m^\Theta(\cdot)$ dont les éléments focaux sont tous les éléments $A \in 2^\Theta$ et non plus seulement les singletons.

Étant données les hypothèses de construction des n ensembles flous, on suppose les éléments de Θ mutuellement exclusifs mais non exhaustifs. Le modèle de la TBM de Smets et Kennes (1994), ou celui impliquant un élément de clôture θ^c de Yager (1983) (figure II.10, p. 84), peuvent être utilisés. L'interprétation de l'ensemble vide \emptyset dans la TBM étant critiquée, le modèle de clôture de Yager a été retenu. Dans ce cadre, on considère $\Theta^{o.w.} = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ et $\Theta^{c.w.} = \Theta^{o.w.} \cup \{\theta^c\}$.

◇ *Nouvelle transposition-1* : construction des sous-ensembles flous clôturés

Selon le détail de la figure IV.16, $2^n - 1$ fonctions $\mu_{A \cup \theta^c}^{c.w.}$ sont construites pour tout élément $A \neq \emptyset \subseteq \Theta^{o.w.}$. Étant données les n fonctions $\mu_{\theta_e}^{o.w.} : X \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$, leur union fournit les $2^n - 1$ fonctions $\mu_A^{o.w.} : X \rightarrow [0, 1]$ ($\mu_{\theta_1 \cup \theta_2}(x) \triangleq \max(\mu_{\theta_1}(x), \mu_{\theta_2}(x))$, $x \in X$, p. 79). L'équation (IV.13) clôture ces fonctions établies en monde ouvert en obtenant les $2^n - 1$ fonctions $\mu_{A \cup \theta^c}^{c.w.} : X \rightarrow [0, 1]$ en monde fermé.

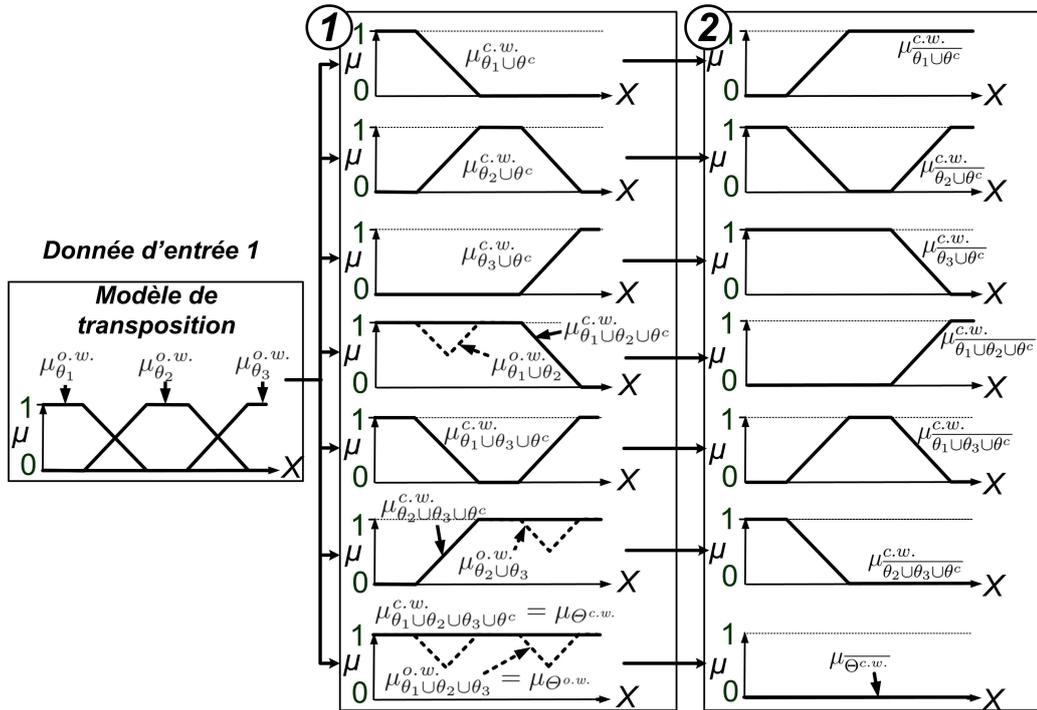


FIGURE IV.16 – Étapes 1 et 2 de la nouvelle méthode de transposition pour $n = 3$ ($2^n - 1 = 7$).

L'équation (IV.13) signifie que l'appartenance totale d'une évaluation $x \in X$ à un sous-ensemble $A \in 2^{\Theta^{o.w.}}$ en monde ouvert ($\mu_A^{o.w.}(x) = 1$) impose l'appartenance totale au sous-ensemble $A \cup \theta^c$ en monde fermé. Si $x \in X$ n'appartient que partiellement à $A \in 2^{\Theta^{o.w.}}$ ($\mu_A^{o.w.}(x) < 1$) et qu'il existe un autre élément $Y_i \in 2^{\Theta^{o.w.}}$ auquel x appartient également partiellement, alors l'appartenance aux sous-ensembles $A \cup \theta^c$ et $Y_i \cup \theta^c$ en monde fermé est la même que celle aux sous-ensembles A et Y_i en monde ouvert. Par contre, s'il n'y a aucun élément $Y_i \in 2^{\Theta^{o.w.}}$ auquel x appartient partiellement, alors $x \in X$ appartient totalement au sous-ensemble A en monde fermé.

$$\mu_{A \cup \theta^c}^{c.w.}(x) \triangleq \begin{cases} 1 & \text{if } \mu_A^{o.w.}(x) = 1 \\ \mu_A^{o.w.}(x) & \text{if } \mu_A^{o.w.}(x) < 1 \\ & \text{and if } \sum_{i=1}^{2^n} \mu_{Y_i}^{o.w.}(x) > 0, Y_i \subseteq \Theta^{o.w.}, Y_i \cap A = \emptyset \\ 1 & \text{if } \mu_A^{o.w.}(x) < 1 \\ & \text{and if } \sum_{i=1}^{2^n} \mu_{Y_i}^{o.w.}(x) = 0, Y_i \subseteq \Theta^{o.w.}, Y_i \cap A = \emptyset \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

Pour obtenir la BBA $m^{c.w.}(\cdot)$ à partir de la connaissance des fonctions d'appartenance aux ensembles flous $A \cup \theta^c$, $A \in 2^{\Theta^{o.w.}}$, l'idée est de passer par le complément $\overline{A \cup \theta^c}$ (étape 2) pour calculer la plausibilité (étape 3), puis la crédibilité (étape 4) et la BBA (étape 5).

◇ *Nouvelle transposition-2* : compléments des sous-ensembles flous clôturés

L'équation (II.16) (p. 79) produit $2^n - 1$ fonctions $\mu_{A \cup \theta^c}^{c.w.} : X \rightarrow [0, 1]$ à partir des $2^n - 1$ fonctions $\mu_{A \cup \theta^c}^{c.w.} : X \rightarrow [0, 1]$ (figure IV.16).

◇ *Nouvelle transposition-3* : pour chaque distribution de possibilité, mesures de possibilité des compléments des sous-ensembles flous clôturés

Pour chaque distribution de possibilité $\mu_F : X \rightarrow [0, 1]$ et chaque fonction d'appartenance $\mu_{A \cup \theta^c}^{c.w.} : X \rightarrow [0, 1]$, $A \in 2^{\Theta^{o.w.}} - \{\emptyset\}$, l'équation (II.21) (p. 80) permet de calculer la mesure de possibilité $\Pi^{c.w.}(\overline{A \cup \theta^c}) \triangleq \sup_{x \in X} \mu_{\overline{A \cup \theta^c} \cap F}(x)$ qui correspond à la mesure de plausibilité $Pl^{c.w.}(\overline{A \cup \theta^c})$.

Pour la même distribution de possibilité μ_F , $2^n - 1$ mesures de plausibilité $Pl^{c.w.}(\overline{A \cup \theta^c})$, $\forall A \in 2^{\Theta^{o.w.}} - \{\emptyset\}$ sont ainsi obtenues (figure IV.17).

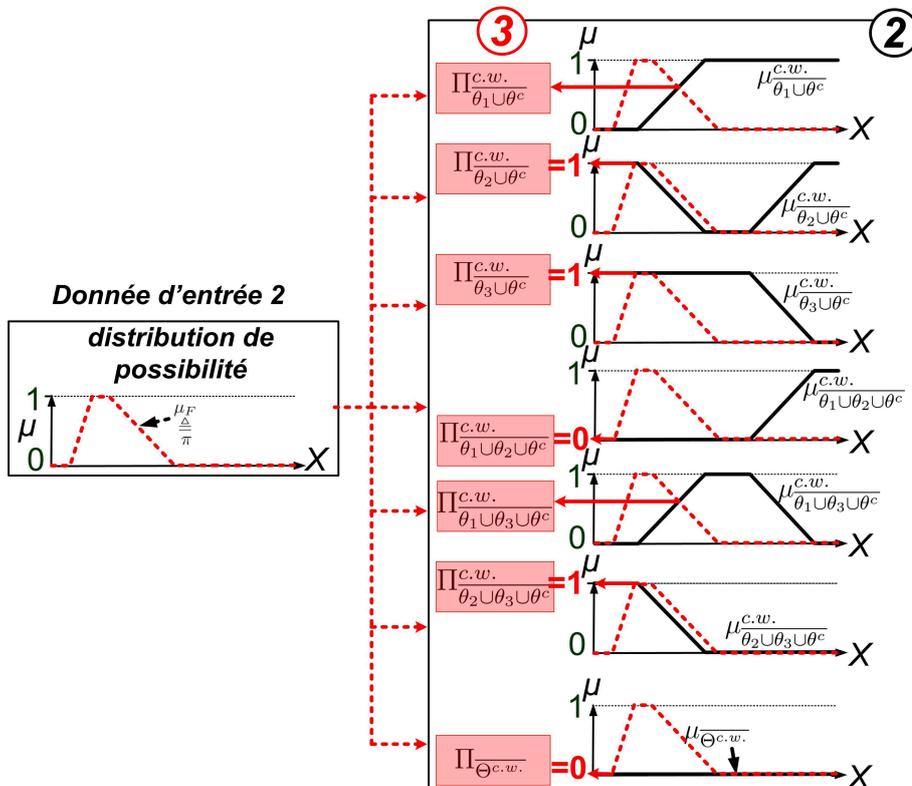


FIGURE IV.17 – Étape 3 de la nouvelle méthode de transposition pour une distribution de possibilité et un « modèle de transposition » avec $n = 3$.

◇ *Nouvelle transposition-4* : établissement de la fonction de crédibilité

La fonction de crédibilité $Bel^{c.w.}(\cdot)$ est obtenue à partir des $2^n - 1$ mesures de plausibilité $Pl^{c.w.}(\overline{A \cup \theta^c})$, $A \in 2^{\Theta^{o.w.}} - \{\emptyset\}$, car $Bel^{c.w.}(A \cup \theta^c) = 1 - Pl^{c.w.}(\overline{A \cup \theta^c})$ (p. 84).

◇ *Nouvelle transposition-5* : établissement de la fonction de masse (BBA)

L'équation (II.30) (p. 84) produit la BBA $m^{c.w.}(\cdot)$ sur $2^{\Theta^{c.w.}}$ à partir de $Bel^{c.w.}(\cdot)$.

IV.2.2.3 Application à l'évaluation de l'affouillement d'un ouvrage

Pour comparer les deux méthodes de transposition (la classique et la nouvelle), l'exemple d'application est simplifié. La stabilité d'un ouvrage n'est évaluée qu'à partir de trois labels qualitatifs constituant le FoD $\Theta = \{\theta_1 = \text{élevée}, \theta_2 = \text{moyenne}, \theta_3 = \text{faible}\}$. Plus le taux d'affouillement est faible, plus la stabilité (ou efficacité) structurale de l'ouvrage est élevée. La cardinalité du FoD $|\Theta|$ est $n = 3$. Pour chaque ouvrage, le choix du label de stabilité dépend notamment du taux d'affouillement de la fondation de l'ouvrage $x \in X = [0\%, 100\%]$. μ_{θ_e} est la fonction d'appartenance qui relie la mesure du taux d'affouillement $x \in X$ à chaque label de stabilité de l'ouvrage θ_e . Les $n = 3$ fonctions d'appartenance μ_{θ_e} du « modèle de transposition » sont représentées dans le tableau IV.12 selon le quadruplet $\{a_e, b_e, c_e, d_e\}$. Elles respectent les conditions de construction définies dans la section IV.2.2.1 précédente.

En pratique, la mesure du taux d'affouillement par les experts est empirique (figure IV.18). Le cas d'application compare les évaluations par des distributions de possibilité produites par six experts différents. Chaque évaluation est représentée par un quadruplet $\{a, b, c, d\}$ dans le tableau IV.12, depuis une évaluation très imprécise (expert 1) à des évaluations précises (experts 5 et 6). L'évaluation illustrée sur la figure IV.18 est donnée par l'expert 3.



FIGURE IV.18 – Exemple d'évaluation de la stabilité (efficacité) structurale d'un ouvrage selon son taux d'affouillement par l'expert 3.

μ_{θ_e}	θ_1	θ_2	θ_3			
a_e, b_e, c_e, d_e	0,0,30,50	30,50,60,70	60,70,100,100			
π	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6
a,b,c,d	20,30,80,90	30,40,60,80	40,50,50,60	30,40,40,50	40,40,40,40	45,45,45,45

TABLE IV.12 – Trois fonctions d'appartenance $\mu_{\theta_e}(x)$ et six distributions de possibilité $\pi(x)$, $\forall x \in X$.

• Application de la méthode classique de transposition

La méthode classique de transposition (figure II.11, p. 86) est appliquée aux données du tableau IV.12 en supposant quatre niveaux d' α -coupes ($d_{\max} = 4$) : $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0.7$, $\alpha_3 = 0.4$ et $\alpha_4 = 0.1$. Six BBAs $m^X(\cdot)$ sont ainsi extraites des six distributions de possibilité fournies par les experts (Baudrit 2005). Les BBAs bayésiennes $m^\Theta(\cdot)$ obtenues après transposition classique sont fournies dans les colonnes notées « 1 » du tableau IV.15 (page suivante).

• Application de la nouvelle méthode de transposition

Les cinq étapes de la nouvelle méthode de transposition sont appliquées successivement à partir des données du tableau IV.12.

◇ *Nouvelle transposition-1 à 3* : l'application des trois premières étapes de la nouvelle méthode de transposition est détaillée en Annexe H. Pour chacune des six distributions de possibilité et $n = 3$, les sept mesures de possibilité obtenues en Annexe H correspondent directement aux sept mesures de plausibilité des compléments des sous-ensembles $Pl^{c.w.}(\overline{A \cup \theta^c})$, $\forall A \in 2^{\Theta^{o.w.}} - \{\emptyset\}$, fournies dans le tableau IV.13.

Cette démarche est réalisée pour les six distributions de possibilité fournies par les six experts.

$\overline{A \cup \theta^c}$	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6
$\overline{\theta_1 \cup \theta^c}$	1	1	1	0.667	0.5	0.75
$\overline{\theta_2 \cup \theta^c}$	1	0.667	0.333	0.667	0.5	0.25
$\overline{\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c}$	1	0.667	0	0	0	0
$\overline{\theta_3 \cup \theta^c}$	1	1	1	1	1	1
$\overline{\theta_1 \cup \theta_3 \cup \theta^c}$	1	1	1	0.667	0.5	0.75
$\overline{\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c}$	1	0.667	0.333	0.667	0.5	0.25
$\overline{\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c}$	0	0	0	0	0	0

TABLE IV.13 – Nouvelle transposition-1 à 3 : mesures de plausibilité $Pl^{c.w.}(\overline{A \cup \theta^c})$ pour chacune des six distributions de possibilité.

◇ *Nouvelle transposition-4* : pour chaque expert (ou distribution de possibilité initiale), la fonction de crédibilité $Bel^{c.w.}(\cdot)$ du tableau IV.14 est obtenue en appliquant l'équation (II.29) (p. 84) aux mesures de plausibilité du tableau IV.13.

$A \cup \theta^c$	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6
$\theta_1 \cup \theta^c$	0	0	0	0.333	0.5	0.25
$\theta_2 \cup \theta^c$	0	0.333	0.667	0.333	0.5	0.75
$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c$	0	0.333	1	1	1	1
$\theta_3 \cup \theta^c$	0	0	0	0	0	0
$\theta_1 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	0	0	0	0.333	0.5	0.25
$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	0	0.333	0.667	0.333	0.5	0.75
$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	1	1	1	1	1	1

TABLE IV.14 – Résultats intermédiaires de $Bel^{c.w.}(A \cup \theta^c)$ pour la nouvelle méthode de transposition.

◇ *Nouvelle transposition-5* : les six BBAs $m^{c.w.}(\cdot)$ sont calculées à partir des six fonctions de crédibilité du tableau IV.14. Elles sont fournies dans la colonne « 2 » du tableau IV.15 (page suivante) qui permet la comparaison avec les résultats issus de la méthode classique de transposition. Ce tableau ne présente que les éléments focaux sur lesquels une masse positive est affectée.

• Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes

Le tableau IV.15 permet de comparer les résultats obtenus selon les deux méthodes de transposition.

éléments focaux	Expert 1		Expert 2		Expert 3		Expert 4		Expert 5		Expert 6	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
θ_1	0.24	0	0.15	0	0.05	0	0.5	0	0.5	0	0.25	0
θ_2	0.44	0	0.75	0	0.95	0	0.5	0	0.5	0	0.75	0
θ_3	0.32	0	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\theta_1 \cup \theta^c$	-	0	-	0	-	0	-	$\frac{1}{3}$	-	0.5	-	0.25
$\theta_2 \cup \theta^c$	-	0	-	$\frac{1}{3}$	-	$\frac{2}{3}$	-	$\frac{1}{3}$	-	0.5	-	0.75
$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c$	-	0	-	0	-	$\frac{1}{3}$	-	$\frac{1}{3}$	-	0	-	0
$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	-	1	-	$\frac{2}{3}$	-	0	-	0	-	0	-	0

TABLE IV.15 – BBAs obtenues selon les deux méthodes de transposition : la colonne indexée par 1 fournit la BBA $m^\Theta(\cdot)$ issue de la méthode classique ; la colonne indexée par 2 fournit la BBA $m^{c.w.}(\cdot)$ produite par la nouvelle méthode.

La nouvelle méthode affecte une masse positive à l'ignorance totale (experts 1 et 2) ou partielle avec $m^{c.w.}(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c) > 0$ (experts 3 et 4) en cohérence avec le niveau d'imprécision des évaluations initiales. Plus l'évaluation du taux d'affouillement est imprécise, moins la BBA issue de la transposition est informative, c'est à dire plus les masses affectées à une ignorance partielle ou totale sont importantes.

La méthode classique de transposition n'utilisait pas l'information associée à ce niveau d'imprécision initial de l'évaluation et répartissait uniformément les masses sur les différents éléments de $\Theta^{o.w.}$, correspondant à une décision préalable. La nouvelle méthode de transposition permet de propager cette imprécision initiale sur le FoD $\Theta^{c.w.}$ sans réaliser de décision intermédiaire non explicite. En ce sens, elle améliore la méthode classique en permettant la conservation de l'imperfection de l'information initiale.

Une nouvelle méthode de transposition a été développée. Elle améliore la représentation de l'imperfection de l'évaluation d'un critère ou d'un indicateur par une source par une meilleure propagation de l'imprécision initiale. Cette méthode est générique et peut être intégrée à la méthodologie ER-MCDA en remplacement de la méthode existante.

IV.2.3 Nouvelle méthode de décision basée sur les distances

La représentation de l'imperfection de l'information dans le Raisonnement Évidentiel repose sur l'établissement d'une fonction de masse (BBA) pour un cadre de discernement (FoD) Θ donné. En pratique, la décision consiste généralement à choisir un élément $\hat{\theta} = \theta_{e^*} \in \Theta$ mais peut s'élargir au choix d'un sous ensemble $\hat{X} \subseteq \Theta$. Pour cela, les règles de décision classiques (p. 91) ne tiennent pas compte de l'ensemble de l'information disponible.

L'intervalle de croyance BI^Θ , établi à partir d'une BBA $m^\Theta(\cdot)$, représente l'ensemble de la connaissance disponible. Pour choisir la solution $\hat{X} \in 2^\Theta$, la nouvelle méthode de décision s'appuie sur le calcul de la distance euclidienne basée sur BI^Θ , notée $d_{BI}(m^\Theta, m_X^\Theta)$ (p. 88), entre la BBA étudiée $m^\Theta(\cdot)$ et chaque BBA catégorique m_X^Θ , $X \neq \emptyset \in 2^\Theta$ (p. 82).

La méthode est d'abord détaillée puis appliquée à des cas théoriques élémentaires.

IV.2.3.1 Principe de la nouvelle méthode de décision

La distance euclidienne basée sur BI^Θ , notée d_{BI} par Han et al. (2014), est une vraie métrique, comme celle de Jousselme et al. (2001), notée d_J (p. 88). La BBA catégorique, notée m_X^Θ , $X \neq \emptyset \in 2^\Theta$, joue un rôle important pour la nouvelle méthode puisque l'intervalle de croyance est alors réduit à $[1, 1]$, ce qui représente la certitude sur X .

La nouvelle méthode consiste à choisir un sous-ensemble, noté \hat{X} , tel que la distance $d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_{\hat{X}}^\Theta)$ de l'équation (II.33) (p. 88) soit la plus petite possible. Ce principe avait été proposé par Essaid et al. (2014) en utilisant la distance d_J . L'élément de décision final \hat{X} est ainsi donné par l'équation (IV.14).

$$\hat{X} = \arg \min_{X \in 2^\Theta} d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_X^\Theta) \quad (\text{IV.14})$$

La méthode développe également l'évaluation de la qualité de la décision \hat{X} en identifiant à quel point elle est bonne en comparaison avec les autres décisions possibles. L'indicateur de qualité correspondant $q(\hat{X})$ est donné par l'équation (IV.15), avec $q(\hat{X}) \in [0, 1]$.

$$q(\hat{X}) \triangleq 1 - \frac{d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_{\hat{X}}^\Theta)}{\sum_{X \in 2^\Theta \setminus \{\emptyset\}} d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_X^\Theta)} \quad (\text{IV.15})$$

L'indicateur de qualité est maximal ($q(\hat{X}) = 1$) lorsque $d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_{\hat{X}}^\Theta) = 0$. Cela signifie que la BBA $m^\Theta(\cdot)$ est totalement focalisée sur l'unique sous-ensemble \hat{X} . Plus $q(\hat{X})$ est grand (proche de un), plus une confiance importante peut être accordée à la décision prise \hat{X} .

Comme rappelé en introduction de cette section IV.2.3, de nombreuses décisions pratiques sont limitées au choix parmi les singletons de Θ . La décision est alors de choisir $\hat{\theta} = \theta_{e^*} \in \Theta$. Pour cela, les deux équations (IV.14) et (IV.15) sont respectivement simplifiées dans les équations (IV.16) et (IV.17).

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta_e \in \Theta} d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_{\theta_e}^\Theta) \quad (\text{IV.16})$$

$$q(\hat{\theta}) \triangleq 1 - \frac{d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_{\theta_e}^\Theta)}{\sum_{e=1}^n d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_{\theta_e}^\Theta)} \quad (\text{IV.17})$$

Si plusieurs décisions sont possibles ($\{\hat{X}_j, j > 1\}$), la décision la plus prudente consiste à choisir leur disjonction $\hat{X} = \cup_j \hat{X}_j$. Si le contexte ne le permet pas, seule une sélection aléatoire parmi les sous-ensembles \hat{X}_j peut être envisagée.

D'autres distances métriques réelles (d_{BI} , d_J , etc.) peuvent être utilisées. La d_{BI} a été retenue du fait des meilleurs résultats mis en avant par Han et al. (2014) pour un certain nombre de cas d'application. Ce développement basé sur la d_{BI} est comparé avec les travaux réalisés par Essaid et al. (2014) basés sur la d_J sur des cas d'application simplifiés.

IV.2.3.2 Application à des cas théoriques élémentaires

Les cas théoriques utilisés dans cette section sont limités aux cardinalités du FoD $|\Theta|$ de 2 et 3. Cela permet une analyse simplifiée pour vérifier si les résultats obtenus sont consistants. Seules les distances d_{BI} et d_J sont comparées : elles sont les seules à exploiter l'ensemble de l'information disponible fournie par les valeurs de crédibilité et de plausibilité de l'intervalle de croyance.

Les exemples d'application s'appuient sur plusieurs BBAs sur lesquelles une décision doit être prise. Par convention, la masse de l'ensemble vide est nulle ($m(\emptyset) = 0$) et ne sera pas indiquée dans les tableaux de résultats.

Dans ces tableaux, les lignes intitulées $d_{\text{BI}}^{\min}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$ et $d_{\text{J}}^{\min}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$ listent les valeurs minimales obtenues en appliquant respectivement $d_{\text{BI}}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$ et $d_{\text{J}}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$. Les lignes intitulées $\hat{X}^{d_{\text{BI}}}$ et $\hat{X}^{d_{\text{J}}}$ listent les décisions \hat{X} correspondantes. Les lignes intitulées $q(\hat{X}^{d_{\text{BI}}})$ and $q(\hat{X}^{d_{\text{J}}})$ listent les indicateurs de qualité de ces décisions.

Pour les mêmes BBAs étudiées, les résultats présentés différencient les cas où tous les éléments \hat{X} du « power-set » 2^{\ominus} peuvent être choisis pour décider et ceux où seul un singleton $\hat{\theta}$ de Θ peut être retenu.

• Exemples avec $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$

Le tableau IV.16 présente les résultats lorsque la décision peut porter sur tous les sous-ensembles \hat{X} , $X \neq \emptyset \in 2^{\ominus}$.

$X \in 2^{\ominus}$	$m_1^{\ominus}(\cdot)$	$m_2^{\ominus}(\cdot)$	$m_3^{\ominus}(\cdot)$	$m_4^{\ominus}(\cdot)$	$m_5^{\ominus}(\cdot)$	$m_6^{\ominus}(\cdot)$	$m_7^{\ominus}(\cdot)$
θ_1	0.9	0.5	0.8	0.1	0.4	0.9	0.1
θ_2	0.1	0.5	0.1	0.1	0.4	0	0
$\theta_1 \cup \theta_2$	0	0	0.1	0.8	0.2	0.1	0.9
$d_{\text{BI}}^{\min}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$	0.100	0.289	0.153	0.058	0.231	0.058	0.058
$q(\hat{X}^{d_{\text{BI}}})$	0.933	0.776	0.894	0.950	0.813	0.962	0.951
$\hat{X}^{d_{\text{BI}}}$	θ_1	$\theta_1 \cup \theta_2$	θ_1	$\theta_1 \cup \theta_2$	$\theta_1 \cup \theta_2$	θ_1	$\theta_1 \cup \theta_2$
$d_{\text{J}}^{\min}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$	0.100	0.500	0.158	0.100	0.400	0.071	0.071
$q(\hat{X}^{d_{\text{J}}})$	0.939	0.667	0.900	0.928	0.641	0.957	0.950
$\hat{X}^{d_{\text{J}}}$	θ_1	$\theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2$	θ_1	$\theta_1 \cup \theta_2$	$\theta_1 \cup \theta_2$	θ_1	$\theta_1 \cup \theta_2$

TABLE IV.16 – Exemples de différents BBAs et des décisions associées, sans limiter la décision aux seuls singletons du FoD Θ ($n = 2$).

Dans la plupart des cas, les méthodes basées sur le calcul de la distance minimale par la $d_{\text{BI}}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$ ou la $d_{\text{J}}(m_i^{\ominus}, m_X^{\ominus})$ produisent les mêmes décisions. Pour la BBA m_2^{\ominus} , plusieurs décisions sont possibles ($\hat{X}^{d_{\text{J}}} = \{\theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2\}$) avec un indice de qualité de 0.667 en utilisant la distance d_{J} . Ce résultat est surprenant car il y a un partage réel de la décision entre les deux éléments θ_1 et θ_2 : la décision $\theta_1 \cup \theta_2$ devrait être préférée. Pour cette même BBA m_2^{\ominus} , l'utilisation de la d_{BI} produit une seule décision possible $\hat{X}^{d_{\text{BI}}} = \theta_1 \cup \theta_2$ avec un meilleur indice de qualité de 0.776 ce qui paraît plus raisonnable au vu de l'explication précédente. Par ailleurs, les valeurs des distances minimales en utilisant la d_{BI} sont moins importantes (ou égales dans le cas de la BBA m_1^{\ominus}) aux valeurs minimales obtenues en utilisant la distance d_{J} .

En fait, lorsque la fonction de masse est distribuée symétriquement entre les éléments du FoD, il est naturellement attendu qu'aucune décision ne puisse être réellement prise simplement (comme illustré par les cas des BBAs $m_2^{\ominus}(\cdot)$ et $m_5^{\ominus}(\cdot)$ dans le Tableau IV.16). La décision $\theta_1 \cup \theta_2$ pour les BBAs $m_2^{\ominus}(\cdot)$ et $m_5^{\ominus}(\cdot)$ peut être interprétée comme l'absence de décision possible, $\theta_1 \cup \theta_2$ correspondant à l'ensemble des décisions possibles. Une telle absence peut être très utile pour les processus de fusion d'information. Elle alerte en effet sur le fait que l'information fournie n'est pas assez riche pour pouvoir décider et que des informations supplémentaires sont nécessaires.

Pour des fonctions de masse symétriques, la décision produite par la nouvelle méthode de décision est consistante avec ce qu'il est raisonnable d'attendre. Dans ce cas, la décision entre les différents éléments de Θ nécessite d'introduire des contraintes supplémentaires aux décisions possibles.

Pour les mêmes BBAs, le tableau IV.17 montre les décisions prises si seul le choix d'un singleton $\hat{\theta}$ du FoD Θ est accepté.

$X \in 2^\Theta$	$m_1^\Theta(\cdot)$	$m_2^\Theta(\cdot)$	$m_3^\Theta(\cdot)$	$m_4^\Theta(\cdot)$	$m_5^\Theta(\cdot)$	$m_6^\Theta(\cdot)$	$m_7^\Theta(\cdot)$
θ_1	0.9	0.5	0.8	0.1	0.4	0.9	0.1
θ_2	0.1	0.5	0.1	0.1	0.4	0	0
$\theta_1 \cup \theta_2$	0	0	0.1	0.8	0.2	0.1	0.9
$d_{\text{BI}}^{\min}(m_i^\Theta, m_X^\Theta)$	0.100	0.500	0.153	0.551	0.503	0.058	0.520
$q(\hat{X}^{d_{\text{BI}}})$	0.900	0.500	0.848	0.500	0.500	0.943	0.539
$\hat{X}^{d_{\text{BI}}}$	θ_1	θ_1, θ_2	θ_1	θ_1, θ_2	θ_1, θ_2	θ_1	θ_1
$d_{\text{J}}^{\min}(m_i^\Theta, m_X^\Theta)$	0.100	0.500	0.158	0.640	0.510	0.071	0.636
$q(\hat{X}^{d_{\text{J}}})$	0.900	0.500	0.843	0.500	0.500	0.931	0.528
$\hat{X}^{d_{\text{J}}}$	θ_1	θ_1, θ_2	θ_1	θ_1, θ_2	θ_1, θ_2	θ_1	θ_1

TABLE IV.17 – Exemples de différents BBAs et des décisions associées, en limitant la décision possible aux seuls singletons du FoD Θ ($n = 2$).

Les décisions prises sont les mêmes en utilisant la $d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_X^\Theta)$ ou la $d_{\text{J}}(m^\Theta, m_X^\Theta)$. Par contre, Les indicateurs de qualité de ces décisions sont identiques pour les BBAs $m_1^\Theta(\cdot)$, $m_2^\Theta(\cdot)$, $m_4^\Theta(\cdot)$ et $m_5^\Theta(\cdot)$. Par contre, ils sont un peu meilleurs en utilisant la $d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_X^\Theta)$ pour les BBAs $m_3^\Theta(\cdot)$, $m_6^\Theta(\cdot)$ et $m_7^\Theta(\cdot)$. Par exemple, pour cette dernière, la décision est θ_1 mais sa qualité est évaluée à 0.528 en utilisant la $d_{\text{J}}(m^\Theta, m_X^\Theta)$ tandis qu'elle est de 0.539 en utilisant la $d_{\text{BI}}(m^\Theta, m_X^\Theta)$.

Les valeurs de ces indicateurs de qualité diffèrent entre le tableau IV.17 et le tableau IV.16. Ceci est normal car le dénominateur ne prend pas en compte les mêmes éléments : seuls les singletons de Θ sont considérés dans le premier cas tandis que tous les sous-ensembles de 2^Θ le sont dans le second.

• Exemples avec $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$

Les tableaux IV.18 et IV.19 montrent, respectivement, les résultats quand les décisions sur \hat{X} sont acceptées, $X \neq \emptyset \in 2^\Theta$, et lorsque seuls les singletons de Θ peuvent être choisis.

$X \in 2^\Theta$	$m_1^\Theta(\cdot)$	$m_2^\Theta(\cdot)$	$m_3^\Theta(\cdot)$	$m_4^\Theta(\cdot)$	$m_5^\Theta(\cdot)$	$m_6^\Theta(\cdot)$	$m_7^\Theta(\cdot)$	$m_8^\Theta(\cdot)$
θ_1	0.9	0.5	1/3	0.5	0	0	0	0.2
θ_2	0.1	0.5	1/3	0	0	0	0	0.1
$\theta_1 \cup \theta_2$	0	0	0	0.5	0.5	2/3	1/3	0.05
θ_3	0	0	1/3	0	0	0	0	0.05
$\theta_1 \cup \theta_3$	0	0	0	0	0	0	1/3	0.1
$\theta_2 \cup \theta_3$	0	0	0	0	0.5	1/3	1/3	0.2
$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$	0	0	0	0	0	0	0	0.3
$d_{\text{BI}}^{\min}(m_i^\Theta, m_X^\Theta)$	0.100	0.289	0.408	0.289	0.289	0.193	0.236	0.223
$q(\hat{X}^{d_{\text{BI}}})$	0.978	0.924	0.879	0.927	0.912	0.942	0.924	0.928
$\hat{X}^{d_{\text{BI}}}$	θ_1	$\theta_1 \cup \theta_2$	$2^\Theta \setminus \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_3\}$	$\theta_1,$ $\theta_1 \cup \theta_2$	$\theta_1 \cup \theta_2,$ $\theta_2 \cup \theta_3, \Theta$	$\theta_1 \cup \theta_2$	$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$	$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$
$d_{\text{J}}^{\min}(m_i^\Theta, m_X^\Theta)$	0.100	0.500	0.577	0.354	0.408	0.272	0.333	0.315
$q(\hat{X}^{d_{\text{J}}})$	0.980	0.887	0.857	0.923	0.899	0.934	0.911	0.915
$\hat{X}^{d_{\text{J}}}$	θ_1	$\theta_1, \theta_2,$ $\theta_1 \cup \theta_2$	$2^\Theta \setminus \{\emptyset\}$	$\theta_1,$ $\theta_1 \cup \theta_2$	$\theta_1 \cup \theta_2,$ $\theta_2 \cup \theta_3, \Theta$	$\theta_1 \cup \theta_2$	$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$	$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$

TABLE IV.18 – Exemples de différents BBAs et des décisions associées, sans limiter la décision aux seuls singletons du FoD Θ ($n = 3$).

La distance d_{BI} permet d'obtenir des valeurs de distance minimales inférieures (ou égales) à celles utilisant la distance d_{J} . L'indicateur de qualité des décisions est meilleur en utilisant la distance d_{BI} , sauf dans le cas de la BBA m_1^Θ du tableau IV.18.

Les décisions obtenues sont en général consistantes, sauf dans les cas des BBAs m_2^Θ et m_3^Θ du tableau IV.18 où l'ensemble des décisions potentielles est plus important avec la d_J que avec la d_{BI} . Si les décisions sont limitées aux singletons de Θ (tableau IV.19), les décisions produites par la d_{BI} et la d_J sont les mêmes, avec une meilleure qualité si la distance d_{BI} est utilisée.

$X \in 2^\Theta$	$m_1^\Theta(\cdot)$	$m_2^\Theta(\cdot)$	$m_3^\Theta(\cdot)$	$m_4^\Theta(\cdot)$	$m_5^\Theta(\cdot)$	$m_6^\Theta(\cdot)$	$m_7^\Theta(\cdot)$	$m_8^\Theta(\cdot)$
θ_1	0.9	0.5	1/3	0.5	0	0	0	0.2
θ_2	0.1	0.5	1/3	0	0	0	0	0.1
$\theta_1 \cup \theta_2$	0	0	0	0.5	0.5	2/3	1/3	0.05
θ_3	0	0	1/3	0	0	0	0	0.05
$\theta_1 \cup \theta_3$	0	0	0	0	0	0	1/3	0.1
$\theta_2 \cup \theta_3$	0	0	0	0	0.5	1/3	1/3	0.2
$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$	0	0	0	0	0	0	0	0.3
$d_{BI}^{\min}(m_i^\Theta, m_X^\Theta)$	0.100	0.500	0.577	0.289	0.500	0.509	0.624	0.577
$q(\hat{X}^{d_{BI}})$	0.949	0.732	0.667	0.853	0.739	0.736	0.667	0.686
$\hat{X}^{d_{BI}}$	θ_1	θ_1, θ_2	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	θ_1	θ_2	θ_2	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	θ_1
$d_J^{\min}(m_i^\Theta, m_X^\Theta)$	0.100	0.500	0.577	0.354	0.577	0.593	0.667	0.612
$q(\hat{X}^{d_J})$	0.949	0.732	0.667	0.830	0.726	0.723	0.667	0.684
\hat{X}^{d_J}	θ_1	θ_1, θ_2	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	θ_1	θ_2	θ_2	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	θ_1

TABLE IV.19 – Exemples de différents BBAs et des décisions associées, en limitant la décision possible aux seuls singletons du FoD Θ ($n = 3$).

• Conclusion à partir des exemples présentés

Une nouvelle méthode de décision a été développée pour aider à décider sur la base de la connaissance d'une BBA. Elle exploite la totalité de l'information disponible fournie par l'intervalle de croyance issu de cette BBA. Facile à mettre en œuvre, elle peut être appliquée en utilisant n'importe quelle distance métrique réelle entre deux BBAs. Elle est générale car la décision peut être prise aussi bien uniquement sur les singletons, que sur n'importe quel sous-ensemble du FoD. Elle fournit également un indicateur de qualité de la décision prise qui représente la confiance qui peut lui être attribuée. L'utilisation de la distance euclidienne basée sur l'intervalle de croyance a été comparée avec celle de la distance de Jusselme sur des cas d'application théoriques simplifiés. La qualité des décisions prises est en général meilleure en utilisant la première plutôt que la seconde.

Synthèse de la section IV.2

Trois développements techniques permettent d'améliorer l'aide à la décision basée sur le Raisonnement Évidentiel. 1) L'établissement d'une référence à partir de modèles externes aide à tracer l'évaluation d'un critère ou d'un indicateur dans le flou du langage. 2) Une nouvelle méthode de transposition a été développée et appliquée pour mieux représenter la connaissance disponible lors de l'évaluation de chaque indicateur ou critère. Ces deux premiers développements contribuent à l'amélioration de la méthodologie ER-MCDA. 3) Par ailleurs, une nouvelle méthode de décision permet de s'affranchir d'une hypothèse sur l'attitude du décideur et d'évaluer la qualité de la décision.

IV.3 Association des méthodes pour une aide multicritère à la décision en univers incertain

La méthode multicritère ER-MCDA intègre l'imperfection de l'évaluation des différents indicateurs et critères. Elle permet l'évaluation de chaque alternative selon des labels. Elle peut aider le classement des alternatives en mettant en évidence le niveau d'appartenance à une hypothèse du cadre de discernement. Elle nécessite une interprétation des valeurs de masse de croyance obtenues.

Parmi les méthodes aidant au classement, BF-TOPSIS est privilégiée car elle est plus robuste au phénomène de renversement de rang. Par contre, elle ne prend en compte que des évaluations précises des différents critères. La section IV.3.1 développe l'association des méthodes ER-MCDA et BF-TOPSIS pour permettre un classement total en tenant compte de l'imperfection initiale de l'évaluation des critères.

Pour aider à la décision dans l'incertain, les états de la nature peuvent être représentés dans le cadre théorique du Raisonnement Évidentiel. Il permet de s'affranchir des limites de l'utilisation classique des probabilités subjectives. L'association de l'aide à la décision dans l'incertain et des AMC doit être explorée pour propager l'imperfection de l'information dans l'ensemble du processus de décision (p. 103). Pour cela, deux approches seront développées dans la section IV.3.2.

IV.3.1 Classement multicritère basé sur des évaluations imparfaites

La méthode ER-MCDA permet d'évaluer chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon un label $\hat{\theta}(A_i)$ choisi dans le cadre de discernement (FoD) $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$. Les méthodes BF-TOPSIS permettent de classer toutes les alternatives et de choisir la meilleure A_{i^*} dans le FoD $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_i, \dots, A_M\}$.

L'objectif est de traiter le problème de classement en prenant en compte l'imperfection de l'évaluation des critères. Pour cela, il est proposé de coupler ER-MCDA avec BF-TOPSIS. La méthode qui en découle est appelée ER-MCDA-Rank (figure IV.19). Après avoir présenté les modalités techniques de la nouvelle association, elle sera appliquée à l'exemple 3 (présenté en p. 149).

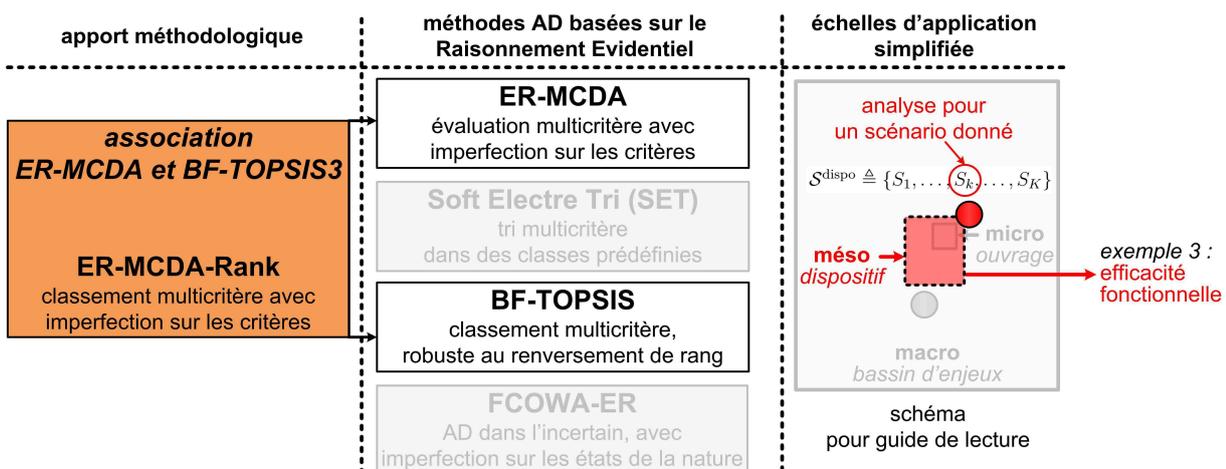


FIGURE IV.19 – Exemple 3 : ER-MCDA-Rank à l'échelle du dispositif (mésodispositif) pour un scénario donné.

IV.3.1.1 Association des méthodes ER-MCDA et BF-TOPSIS

Les quatre premières étapes de la méthodologie ER-MCDA permettent d'obtenir la matrice $\mathbf{M}^\Theta = [m_{ij}^\Theta(\cdot)]$ (p. 90). Cette matrice regroupe les BBAs représentant l'évaluation imparfaite de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$ pour le FoD Θ .

Sur la base de \mathbf{M}^Θ , le développement proposé repose sur une décision intermédiaire en choisissant un label $\hat{\theta}(A_i, g_j)$ dans Θ , pour chaque A_i et chaque g_j . Pour cela, la nouvelle méthode de décision est utilisée (p. 172). Son indicateur de qualité $q(\hat{\theta}(A_i, g_j))$ est interprété comme le coefficient de fiabilité de cette décision intermédiaire. Pour chaque A_i et chaque g_j , un score x_{ij} est associé au label $\hat{\theta}(A_i, g_j)$ pour établir la matrice \mathbf{S} (p. 51). Les méthodes BF-TOPSIS, comme BF-TOPSIS3, peuvent alors s'appliquer dessus.

• Étapes de la nouvelle méthode : ER-MCDA-Rank

La nouvelle méthode ER-MCDA-Rank est décomposée en trois étapes (figure IV.20).

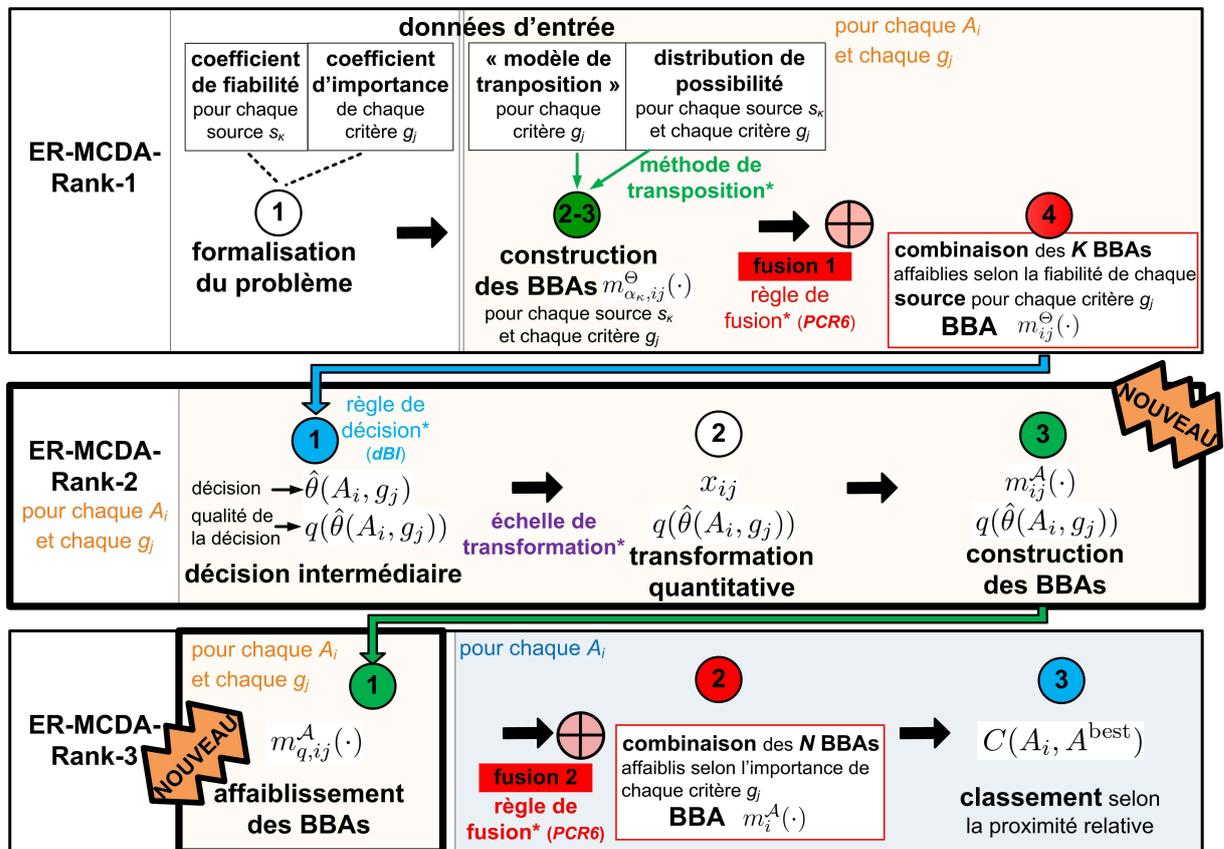


FIGURE IV.20 – Étapes de la nouvelle méthode ER-MCDA-Rank (N.B. : les astérisques (*) identifient les étapes au niveau desquelles un choix de méthode est réalisé).

◇ ER-MCDA-Rank-1 :

Cette première étape regroupe les quatre premières étapes de ER-MCDA (Annexe F.2) pour obtenir la matrice de BBAs $\mathbf{M}^\Theta = [m_{ij}^\Theta(\cdot)]$, pour le FoD $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$. Une méthode de transposition doit être choisie parmi les deux maintenant disponibles. La méthode classique de Tacnet (2009) présente l'avantage de disposer d'un code de calcul sous Matlab[®]. La nouvelle méthode permet une meilleure propagation de la connaissance disponible mais n'est pas encore implémentée (section IV.2.2).

◇ *ER-MCDA-Rank-2* :

Cette étape est le cœur du nouveau développement : la matrice $\mathbf{M}^A = [m_{ij}^A(\cdot)]$ est établie pour le FoD $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, à partir de \mathbf{M}^Θ .

1. Pour chaque BBA $m_{ij}^\Theta(\cdot)$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$, l'élément $\hat{\theta}(A_i, g_j)$ est choisi en appliquant l'équation (IV.16) si la méthode de transposition classique est utilisée ou l'équation IV.14 (p. 173) si la nouvelle méthode l'est. Pour ce dernier cas, une contrainte est ajoutée (Dezert et al. 2016a) : la décision est limitée aux éléments $X = A \cup \theta^c$, avec A un singleton de Θ . La matrice $\mathbf{S}^\Theta = [\hat{\theta}(A_i, g_j)]$ obtenue regroupe les labels $\hat{\theta}(A_i, g_j)$.
L'indicateur de qualité de cette décision intermédiaire, noté $q(\hat{\theta}(A_i, g_j))$, est obtenu en appliquant l'équation (IV.17) ou (IV.15) (p. 173) si la méthode classique de transposition ou la nouvelle est utilisée.
2. — Si le FoD Θ regroupe des labels qualitatifs, chaque label $\theta_e \in \Theta$ est transformé dans un score quantitatif pour obtenir la matrice $\mathbf{S} = [x_{ij}]$ de dimensions $M \times N$: x_{ij} est la transformation quantitative de $\hat{\theta}(A_i, g_j)$. Une analyse de sensibilité à différentes échelles de transformation devra être réalisée.
— Si le FoD Θ regroupe des labels quantitatifs, l'égalité $x_{ij} = \hat{\theta}(A_i, g_j)$ est retenue.
3. Étant donnée la matrice de scores $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, l'étape commune préalable aux méthodes BF-TOPSIS (Annexe F.4) permet d'obtenir la matrice de BBAs $\mathbf{M}^A = [m_{ij}^A(\cdot)]$.

 ◇ *ER-MCDA-Rank-3* :

Cette étape permet de classer toutes les alternatives de \mathcal{A} , selon trois étapes intermédiaires.

1. Pour chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ et chaque g_j , $j = 1, \dots, N$, le facteur de qualité $q(\hat{\theta}(A_i, C_j))$ est considéré comme le coefficient de fiabilité permettant d'affaiblir chaque BBA $m_{ij}^A(\cdot)$ selon l'équation (II.31) (p. 87). Les BBAs $m_{q,ij}^A(\cdot)$ sont ainsi obtenues.
2. Pour chaque A_i et chaque g_j , la BBA $m_{q,ij}^A(\cdot)$ est affaiblie par le coefficient d'importance w_j selon l'équation (II.32) (p. 87). Pour chaque A_i , les N BBAs ainsi affaiblies sont combinées selon la règle de fusion PCR6 $_\theta$ pour obtenir la BBA $m_i^A(\cdot)$.
3. La proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}}) \in [0, 1]$ de chaque A_i avec une meilleure alternative potentielle A^{best} est établie. Toutes les alternatives sont finalement classées : plus $C(A_i, A^{\text{best}})$ est élevée, plus l'alternative A_i est préférée.

IV.3.1.2 Échelle dispositif : classement de plusieurs dispositifs selon leur efficacité fonctionnelle (exemple 3)

La méthode Soft Electre Tri (SET) a été appliquée sur l'exemple 3 (p. 149) pour classer quatre dispositifs de stabilisation torrentielle selon leur niveau d'efficacité fonctionnelle. La méthode ER-MCDA peut être utilisée pour évaluer ce niveau d'efficacité. Cependant, le problème à traiter est de classer ces dispositifs. La méthode ER-MCDA-Rank est alors appliquée. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparés.

• Application de ER-MCDA

L'ensemble des alternatives \mathcal{A} regroupe les quatre dispositifs de stabilisation ($M = 4$) à analyser. Pour correspondre à la pratique, le FoD de l'évaluation est établi selon quatre labels qualitatifs de niveaux d'efficacité fonctionnelle avec $\Theta = \{\theta_1 = \text{élevée}, \theta_2 = \text{moyenne}, \theta_3 = \text{faible}, \theta_4 = \text{nulle}\}$. L'évaluation est établie pour un scénario S_k de magnitude de phénomène torrentiel donnée.

Les sept critères g_j , $j = 1, \dots, 7$ ont déjà été listés avec leurs échelles d'évaluation (p. 150). Le vecteur des coefficients d'importance $\mathbf{w} = [0.1, 0.2, 0.1, 0.15, 0.05, 0.2, 0.2]$ est repris.

L'objectif est de comparer la méthode ER-MCDA et la méthode ER-MCDA-Rank. Les quatre premières étapes de ER-MCDA sont communes. Elle ne sont donc pas détaillées. On considère directement la matrice de BBAs $\mathbf{M}^\Theta = [m_{ij}^\Theta(\cdot)]$ obtenue après ces quatre étapes pour le FoD Θ . Elle est donnée dans le Tableau IV.20.

	A_i	élément focal	$m_{ij}^\Theta(\cdot)$						
			g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
\mathbf{M}^Θ	A_1 <i>dispositif 1</i>	$\theta_1 = \text{élevée}$	0.296	0.175	0.016	0.000	0.000	0.000	0.138
		$\theta_2 = \text{moyenne}$	0.627	0.756	0.911	0.000	0.039	0.175	0.808
		$\theta_3 = \text{faible}$	0.047	0.039	0.043	0.001	0.410	0.778	0.024
		$\theta_4 = \text{nulle}$	0.000	0.000	0.000	0.969	0.521	0.017	0.000
		Θ	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
	A_2 <i>dispositif 2</i>	$\theta_1 = \text{élevée}$	0.845	0.005	0.031	0.928	0.069	0.643	0.007
		$\theta_2 = \text{moyenne}$	0.125	0.268	0.923	0.042	0.347	0.327	0.925
		$\theta_3 = \text{faible}$	0.000	0.605	0.016	0.000	0.267	0.000	0.038
		$\theta_4 = \text{nulle}$	0.000	0.092	0.000	0.000	0.287	0.000	0.000
		Θ	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
	A_3 <i>dispositif 3</i>	$\theta_1 = \text{élevée}$	0.716	0.002	0.646	0.000	0.000	0.715	0.000
		$\theta_2 = \text{moyenne}$	0.254	0.146	0.324	0.045	0.034	0.255	0.377
		$\theta_3 = \text{faible}$	0.000	0.666	0.000	0.379	0.219	0.000	0.558
		$\theta_4 = \text{nulle}$	0.000	0.156	0.000	0.546	0.717	0.000	0.035
		Θ	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
	A_4 <i>dispositif 4</i>	$\theta_1 = \text{élevée}$	0.337	0.395	0.385	0.000	0.058	0.002	0.000
		$\theta_2 = \text{moyenne}$	0.473	0.568	0.246	0.156	0.339	0.703	0.508
		$\theta_3 = \text{faible}$	0.160	0.007	0.339	0.783	0.514	0.264	0.437
		$\theta_4 = \text{nulle}$	0.000	0.000	0.000	0.031	0.059	0.001	0.025
		Θ	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030

TABLE IV.20 – Exemple 3 : matrice de BBAs \mathbf{M}^Θ obtenue après les quatre premières étapes de ER-MCDA (g_1 est la dimension moyenne des cuvettes des ouvrages ; g_2 est leur orientation moyenne ; g_3 est l'implantation longitudinale ; g_4 et g_5 sont l'efficacité structurale des ouvrages plus ou moins importants ; g_6 et g_7 sont l'érosion active longitudinale et latérale).

◇ *ER-MCDA-5* :

Pour chaque dispositif A_i , $i = 1, \dots, 4$, et critère g_j , $j = 1, \dots, 7$, les sept BBAs $m_{ij}^\Theta(\cdot)$ sont affaiblies par le coefficient d'importance ω_j selon l'équation (II.32) (p. 87). Pour chaque A_i , les sept BBAs $m_{\omega_j, ij}^\Theta(\cdot)$ obtenues sont combinées selon la règle de fusion PCR₆₀ pour obtenir la BBA $m_i^\Theta(\cdot)$.

◇ *ER-MCDA-6* :

Pour choisir $\hat{\theta}(A_i)$ sur la base de $m_i^\Theta(\cdot)$, la nouvelle méthode de décision est choisie. Pour rappel, elle est basée sur le calcul de la distance $d_{\text{BI}}(m_i^\Theta, m_{\{\theta_e\}}^\Theta)$, $e = 1, \dots, n = 4$. Pour chaque A_i , la colonne d_{BI}^{\min} du Tableau IV.21 liste les valeurs minimales de distance obtenues et le label correspondant $\hat{\theta}(A_i) \in \Theta$ est choisi.

A_i	d_{BI}^{\min}	$\hat{\theta}(A_i)$	label d'efficacité	comparaison aux autres A_i
A_1	0.377	θ_2	moyenne	$\sim A_2$; $\succ A_3$; $\sim A_4$
A_2	0.484	θ_2	moyenne	$\sim A_1$; $\succ A_3$; $\sim A_4$
A_3	0.510	θ_3	faible	$\prec A_1$; $\prec A_2$; $\prec A_3$
A_4	0.391	θ_2	moyenne	$\sim A_1$; $\sim A_2$; $\succ A_3$

TABLE IV.21 – Exemple 3 : résultats obtenus en appliquant la méthode ER-MCDA.

Les dispositifs A_1 , A_2 et A_4 sont évalués par ER-MCDA comme d'efficacité fonctionnelle moyenne ($\hat{\theta}(A_i) = \theta_2$, $i = 1, 2, 4$) tandis que le dispositif A_3 est d'efficacité faible ($\hat{\theta}(A_3) = \theta_3$). La préférence entre les quatre labels est connue avec $\theta_1 \succ \theta_2 \succ \theta_3 \succ \theta_4$. Sur cette base, le classement des dispositifs selon leur efficacité ne peut être que partiel : $(A_1 \sim A_2 \sim A_4) \succ A_3$.

• Application de ER-MCDA-Rank

L'étape *ER-MCDA-Rank-1*, commune avec ER-MCDA, permet d'obtenir le tableau IV.20.

◇ *ER-MCDA-Rank-2* :

1. Le FoD d'évaluation est $\Theta = \{\theta_1 = \text{élevée}, \theta_2 = \text{moyenne}, \theta_3 = \text{faible}, \theta_4 = \text{nulle}\}$. Pour chaque dispositif A_i , $i = 1, \dots, 4$, et chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 7$, la BBA $m_{ij}^\ominus(\cdot)$, est extraite du Tableau IV.20. Le label $\hat{\theta}(A_i, g_j)$ est choisi pour $\arg \min_{e=1, \dots, 4} d_{\text{BI}}(m_{ij}^\ominus, m_{\{\theta_e\}}^\ominus)$. La matrice $\mathbf{S}^\ominus = [\hat{\theta}(A_i, g_j)]$ de dimensions 4×7 est ainsi établie. L'indicateur de qualité $q(\hat{\theta}(A_i, g_j))$ correspondant à chaque choix $\hat{\theta}(A_i, C_j)$ est calculé selon l'équation (IV.17) (p. 173). Ces indicateurs sont collectés dans le tableau IV.22. Par exemple, pour A_1 et g_1 , la BBA $m_{11}^\ominus(\cdot)$ est définie par le quintuplet $\{m_{11}^\ominus(\theta_1) = 0.296, m_{11}^\ominus(\theta_2) = 0.627, m_{11}^\ominus(\theta_3) = 0.047, m_{11}^\ominus(\theta_4) = 0, m_{11}^\ominus(\Theta) = 0.03\}$ (tableau IV.20). Sur cette base, le label retenu est $\hat{\theta}(A_1, g_1) = \theta_2$ avec une qualité de $q(\hat{\theta}(A_1, g_1)) = 0.875$.
2. Le FoD Θ regroupe des labels qualitatifs. Une échelle de transformation quantitative doit être définie. Pour cet exemple, la transformation linéaire $\theta_1 = 4, \theta_2 = 3, \theta_3 = 2, \theta_4 = 1$ est utilisée. La matrice de scores $\mathbf{S} = [x_{ij}]$ (tableau IV.22) est établie à partir de la matrice \mathbf{S}^\ominus . Par exemple, pour A_1 et g_1 , le label retenu étant $\hat{\theta}(A_1, g_1) = \theta_2$, la note x_{11} donnée est 3.

g_j, w_j	$g_1, 0.1$		$g_2, 0.2$		$g_3, 0.1$		$g_4, 0.15$		$g_5, 0.05$		$g_6, 0.2$		$g_7, 0.2$	
A_i	x_{i1}	$q(i, 1)$	x_{i2}	$q(i, 2)$	x_{i3}	$q(i, 3)$	x_{i4}	$q(i, 4)$	x_{i5}	$q(i, 5)$	x_{i6}	$q(i, 6)$	x_{i7}	$q(i, 7)$
A_1	3	0.875	3	0.923	3	0.975	1	0.992	1	0.833	2	0.929	4	0.940
A_2	4	0.951	2	0.871	3	0.979	4	0.980	3	0.874	4	0.875	3	0.979
A_3	4	0.903	2	0.895	4	0.877	1	0.844	1	0.908	4	0.903	2	0.847
A_4	3	0.824	3	0.848	4	0.794	2	0.932	2	0.838	3	0.898	3	0.827

TABLE IV.22 – Exemple 3 : scores x_{ij} , et qualité de ces scores $q(\hat{\theta}(A_i, g_j)) (= q(i, j))$, établis à partir de la matrice de BBAs \mathbf{M}^\ominus du tableau IV.20 (ER-MCDA-Rank-2).

3. La matrice de scores \mathbf{S} de dimensions 4×7 extraite du tableau IV.22 est transformée en une matrice de BBAs $\mathbf{M}^{\mathcal{A}} = [m_{ij}^{\mathcal{A}}(\cdot)]$, avec $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ (tableau IV.23). Pour cela, l'étape commune préalable aux méthodes BF-TOPSIS est appliquée (Annexe F.4).

◇ *ER-MCDA-Rank-3*

1. Pour chaque A_i et chaque g_j , la BBA $m_{ij}^{\mathcal{A}}(\cdot)$ du tableau IV.23 est affaiblie par l'indicateur de qualité $q(\hat{\theta}(A_i, g_j))$ du tableau IV.22 pour obtenir la BBA $m_{q,ij}^{\mathcal{A}}(\cdot)$.
2. Pour chaque A_i et chaque g_j , les BBAs $m_{q,ij}^{\mathcal{A}}(\cdot)$ sont affaiblies selon le coefficient d'importance ω_j . Pour chaque A_i , les sept BBAs ainsi affaiblies sont combinées selon la règle de fusion PCR6 $_{\emptyset}$ pour obtenir la BBA $m_i^{\mathcal{A}}(\cdot)$.
3. Pour chaque A_i , les distances $d^{\text{best}}(A_i) = d_{\text{BI}}(m_i^{\mathcal{A}}, m^{\mathcal{A}, \text{best}})$, avec $m^{\mathcal{A}, \text{best}}(A_i) = 1$, et $d^{\text{worst}}(A_i) = d_{\text{BI}}(m_i^{\mathcal{A}}, m^{\mathcal{A}, \text{worst}})$, avec $m^{\mathcal{A}, \text{worst}}(A_i) = 1$, sont calculées. La proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$ est calculée selon l'équation (II.14) (p. 66). Ces résultats et le classement associé des dispositifs selon leur efficacité fonctionnelle sont fournis dans le tableau IV.24.

	A_i	élément focal	$m_{ij}^A(\cdot)$						
			g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
M^A	A_1	A_1	0	1	0	0	0	0	1
		$\bar{A}_1 = A_2 \cup A_3 \cup A_4$	1	0	1	1	1	1	0
		$\mathcal{A} = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4$	0	0	0	0	0	0	0
	A_2	A_2	1	0	0	1	1	1	0.25
		$\bar{A}_2 = A_1 \cup A_3 \cup A_4$	0	1	1	0	0	0	0.25
		$\mathcal{A} = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4$	0	0	0	0	0	0	0.50
	A_3	A_3	1	0	1	0	0	1	0
		$\bar{A}_3 = A_1 \cup A_2 \cup A_4$	0	1	0	1	1	0	1
		$\mathcal{A} = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4$	0	0	0	0	0	0	0
	A_4	A_4	0	1	1	0.25	0.40	0.333	0.25
		$\bar{A}_4 = A_1 \cup A_2 \cup A_3$	1	0	0	0.50	0.333	0.40	0.25
		$\mathcal{A} = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4$	0	0	0	0.25	0.267	0.267	0.50

 TABLE IV.23 – Exemple 3 : matrice de BBAs M^A obtenue pour $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ (ER-MCDA-Rank-2).

A_i	$d^{\text{best}}(A_i)$	$d^{\text{worst}}(A_i)$	$C(A_i, A^{\text{best}})$	classement
A_1	0.457	0.409	0.472	3
A_2	0.379	0.489	0.564	1
A_3	0.538	0.328	0.378	4
A_4	0.400	0.477	0.544	2

TABLE IV.24 – Exemple 3 : classement des dispositifs selon leur efficacité fonctionnelle (ER-MCDA-Rank-3).

L'application de ER-MCDA-Rank permet d'obtenir le classement des dispositifs selon leur efficacité fonctionnelle : $A_2 \succ A_4 \succ A_1 \succ A_3$. Il est consistant avec les évaluations selon ER-MCDA. Pour un scénario S_k , le dispositif de stabilisation le plus efficace parmi les trois est A_2 .

La méthode ER-MCDA permet d'évaluer chaque alternative selon un label, en correspondance avec la pratique experte. Cependant, il n'est pas possible de comparer toutes les alternatives pour les classer. La nouvelle méthode ER-MCDA-Rank permet ce classement. Son apport réside dans la propagation de l'imperfection de l'évaluation des critères dans la méthode AMC de classement : elle repose sur l'évaluation de la qualité des décisions intermédiaires. La consistance des résultats n'ayant été montrée que sur un cas d'application, elle reste à vérifier pour d'autres cas. En outre, la sensibilité des résultats à des échelles de transformation différentes, depuis les labels qualitatifs vers des labels quantitatifs, reste à analyser.

IV.3.2 Aide multicritère à la décision dans l'incertain

Deux types de problèmes de décision ont été formalisés jusqu'à présent : les problèmes multicritères modélisés par la matrice de scores $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$ (p. 51) et les problèmes de décision dans l'incertain modélisés par la matrice de conséquences $\mathbf{C} = [C_{ik}]$, $k = 1, \dots, K$ (p. 50). L'association des méthodes permettant de traiter individuellement ces problèmes peut aider à décider selon plusieurs critères en environnement incertain.

Pour cela, deux approches peuvent être envisagées (figure IV.21).

- L'approche 1 consiste à aider à décider dans l'incertain pour chaque critère g_j avant d'appliquer une AMC. De manière classique, cette approche s'appuie sur une représentation probabiliste des états de la nature \mathcal{S} . Pour chaque alternative A_i et chaque critère g_j , la valeur espérée des conséquences est le score x_{ij} de la matrice \mathbf{S} . Cette section propose d'améliorer cette approche en représentant la connaissance sur \mathcal{S} par une BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$.
- L'approche 2 consiste à aider à décider selon plusieurs critères pour chaque scénario S_k

avant de prendre en compte la connaissance sur $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$. L'application de la méthode FCOWA-ER sur l'exemple 4 (p. 153) était une expérience préalable mais cette approche restait à formaliser.

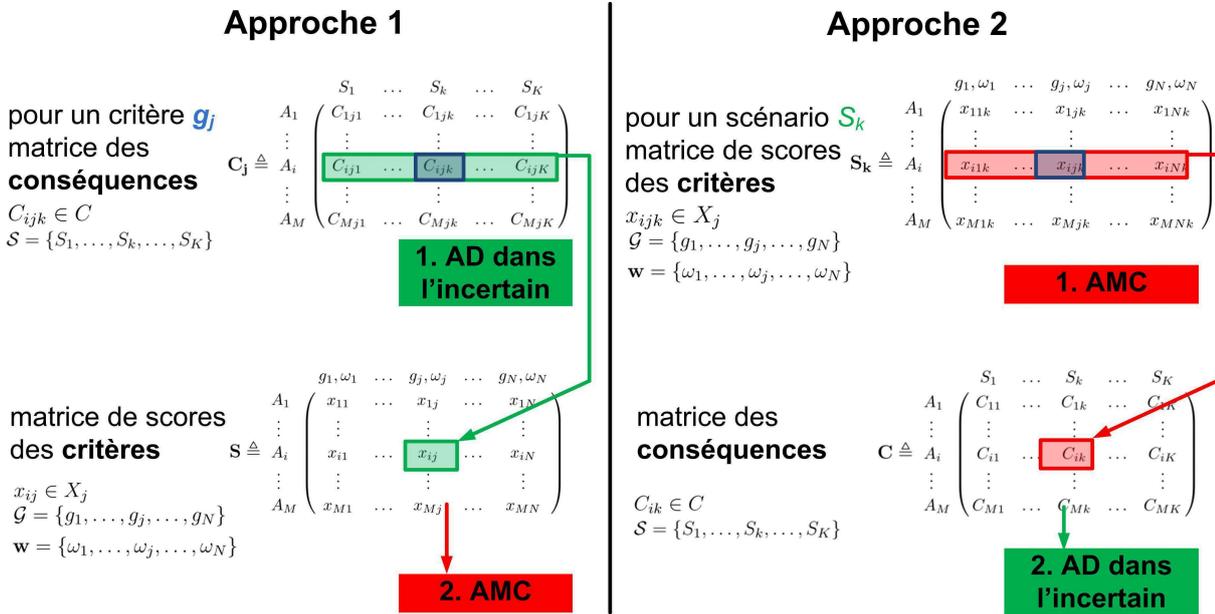


FIGURE IV.21 – Deux approches d'association pour une aide multicritère à la décision en univers incertain.

Pour traiter l'aide à la décision dans l'incertain, les approches COWA-ER et FCOWA-ER ont été retenues. Pour l'évaluation multicritère de la conséquence, ER-MCDA a été choisie. Cette section développe d'abord leur association selon les deux approches. Seule l'approche 2 sera appliquée pour évaluer l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage (figure IV.22) selon l'exemple 2 (p. 147). L'approche 1 sera utilisée dans le chapitre V consacré à l'intégration.

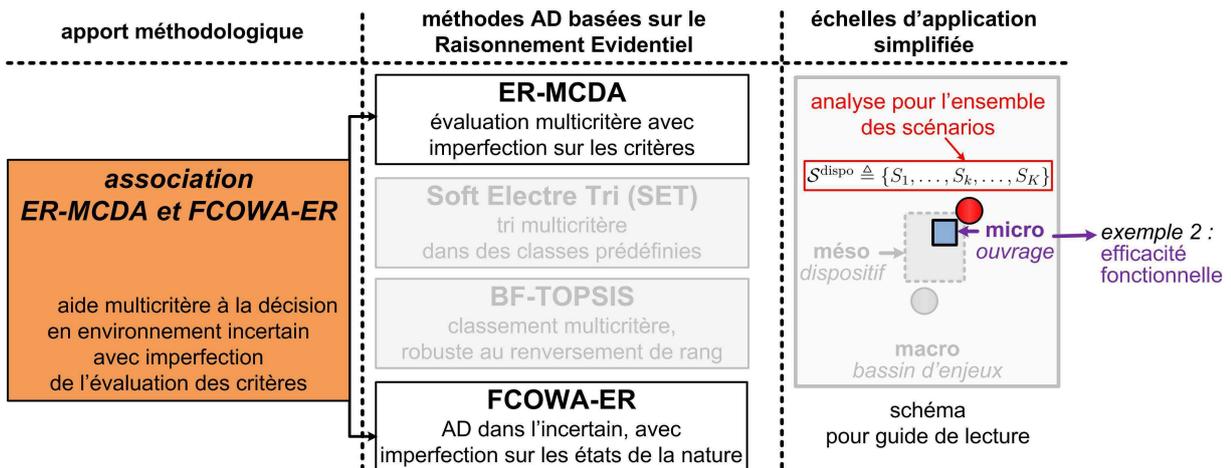


FIGURE IV.22 – Exemple 2 : Association de ER-MCDA et FCOWA-ER à l'échelle d'un ouvrage (micro).

IV.3.2.1 Association des méthodes ER-MCDA et FCOWA-ER : deux approches

Le problème d'aide à la décision, dans sa globalité, consiste à comparer les alternatives $A_i \in \mathcal{A}$, $i = 1, \dots, M$ selon les critères $g_j \in \mathcal{G}$, $j = 1, \dots, N$. Leur évaluation est fournie par plusieurs sources s_q , $q = 1, \dots, Q$ dans un univers incertain représenté par les états de la nature $S_k \in \mathcal{S}$, $k = 1, \dots, K$. Dans cette section, pour simplifier les notations, on note $C_{q,ijk}$ l'évaluation par la source s_q de la conséquence de A_i selon chaque critère g_j pour le scénario S_k .

- **Approche 1 : aide à la décision dans l'incertain selon les attitudes extrêmes puis agrégation multicritère (ER-MCDA)**

L'approche 1 (figure IV.21) repose sur l'évaluation de chaque critère $g_j \in \mathcal{G}$ pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}$. La définition des probabilités $P(S_k)$, $k = 1, \dots, K$ permet de calculer la valeur espérée des évaluations de chaque g_j . Il est proposé de tenir compte de l'imprécision de l'évaluation de cette valeur espérée pour appliquer ER-MCDA ensuite.

La connaissance sur les états de la nature \mathcal{S} est représentée par la BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$, au lieu des probabilités $P(S_k)$, $k = 1, \dots, K$. Comme proposé par Tacnet et Dezert (2011) pour développer la méthode COWA-ER (p. 96), l'approche OWA de Yager (2008) est appliquée selon deux attitudes extrêmes : pessimiste et optimiste (étape 1). L'intervalle des valeurs espérées est ainsi obtenu pour chaque critère g_j . Étant données ces évaluations imprécises, la méthode ER-MCDA ou la méthode ER-MCDA-Rank sont ensuite appliquées si le problème est de trier ou de classer les alternatives (étape 2).

◇ **Étape 1**

Cette première étape repose sur la formalisation du problème, les évaluations puis l'établissement de la matrice des évaluations imprécises des valeurs espérées pour chaque source d'information et chaque critère de décision.

1. Le problème d'aide à la décision dans l'incertain est d'abord formalisé en identifiant les ensembles \mathcal{A} des alternatives à comparer et \mathcal{S} des états de la nature à considérer. La connaissance sur \mathcal{S} est représentée par la BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$. Les critères g_j et leur poids ω_j , $j = 1, \dots, N$ ainsi que les sources d'évaluation s_q et leurs coefficients de fiabilité α_q , $q = 1, \dots, Q$, sont préalablement établis. Chaque source s_q fournit pour chaque critère g_j une matrice d'évaluation $\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}} = [C_{q,ijk}]$, $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, K$ selon l'équation (IV.18).
2. Pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$ et chaque source s_q , $q = 1, \dots, Q$, la matrice d'intervalles $\mathbf{E}[\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}}]$, $i = 1, \dots, M$ est établie à partir de la matrice $\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}}$, selon le principe préalable à FCOWA-ER (Annexe F.5). Chaque intervalle de la ligne i de la matrice $\mathbf{E}[\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}}]$ est l'évaluation imprécise des valeurs espérées des évaluations fournies par une source s_q de l'alternative A_i selon le critère g_j .

$$\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & \dots & S_k & \dots & S_K \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_M \end{matrix} & \begin{pmatrix} C_{q,1j1} & \dots & C_{q,1jk} & \dots & C_{q,1jK} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{q,ij1} & \dots & C_{q,ijk} & \dots & C_{q,ijK} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{q,Mj1} & \dots & C_{q,Mjk} & \dots & C_{q,MjK} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{IV.18})$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}}] \triangleq \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_M \end{matrix} \begin{pmatrix} [C_{q,ij}^{\min}, C_{q,ij}^{\max}] \\ \vdots \\ [C_{q,ij}^{\min}, C_{q,ij}^{\max}] \\ \vdots \\ [C_{q,ij}^{\min}, C_{q,ij}^{\max}] \end{pmatrix} \quad (\text{IV.19})$$

◇ *Étape 2*

L'intervalle $[C_{q,ij}^{\min}, C_{q,ij}^{\max}]$ est l'évaluation imprécise de l'alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon le critère g_j , $j = 1, \dots, N$ fournie par la source s_q , $q = 1, \dots, Q$. Dans ce cas, la distribution de possibilité $\pi_{q,ij}$ est représentée par le quadruplet $\{a, b, c, d\}$ avec $a = b = C_{q,ij}^{\min}$ et $c = d = C_{q,ij}^{\max}$.

Sur la base de l'ensemble de ces éléments, d'un « modèle de transposition » pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, du choix d'une méthode de transposition et d'une règle de fusion, la méthode ER-MCDA est appliquée pour évaluer chaque alternative A_i selon les labels de $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ (Annexe F.2). La méthode ER-MCDA-Rank, développée dans la section IV.3.1 précédente, est appliquée pour classer toutes les alternatives de \mathcal{A} .

• **Approche 2 : agrégation multicritère (ER-MCDA) puis aide à la décision dans l'incertain (FCOWA-ER)**

L'approche 2 (figure IV.21) consiste à réaliser une évaluation multicritère pour chaque scénario S_k , $k = 1, \dots, K$ puis à décider dans l'incertain. L'application de FCOWA-ER en section IV.1.4 (p. 153) sur l'exemple 4 a montré qu'une évaluation quantitative précise de la conséquence de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque scénario S_k , $k = 1, \dots, K$ est nécessaire.

Cette approche est améliorée en appliquant au préalable la méthode ER-MCDA pour aider à évaluer cette conséquence (étape 1). L'étape de transformation dans une évaluation quantitative est ensuite proposée (étape 2) pour finalement appliquer la méthode FCOWA-ER (étape 3).

 ◇ *Étape 1*

Les six étapes de la méthode ER-MCDA (Annexe F.2) sont rappelées ci-dessous.

1. Le cadre de discernement de l'évaluation $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ est précisé et le problème multicritère formalisé $(\mathcal{A}, \mathcal{G}, \mathbf{w})$.
2. Pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, un « modèle de transposition » est établi avec $\mu_{\theta_e} : X_j \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$.
3. Chaque source s_q , $q = 1, \dots, Q$ fournit son évaluation de l'alternative A_i , $i = 1, \dots, M$, selon g_j et le scénario S_k , par la distribution de possibilité $\pi_{q,ijk} : X_j \rightarrow [0, 1]$. La méthode de transposition classique (p. 85) ou nouvelle (p. 167) permet d'obtenir la BBA $m_{q,ijk}^{\Theta}(\cdot)$.
4. Pour chaque A_i , g_j et S_k , les BBAs $m_{q,ijk}^{\Theta}(\cdot)$ sont affaiblies par la fiabilité α_q , $q = 1, \dots, Q$, puis combinées selon la règle de fusion PCR6 pour obtenir la BBA $m_{ijk}^{\Theta}(\cdot)$.
5. Pour chaque A_i et S_k , les BBAs $m_{ijk}^{\Theta}(\cdot)$ sont affaiblies par l'importance ω_j , $j = 1, \dots, N$ puis combinées selon la règle de fusion PCR6₀ pour obtenir la BBA $m_{ik}^{\Theta}(\cdot)$.
6. Pour chaque A_i et S_k , une méthode de décision est appliquée pour choisir le label $\hat{\theta}(A_i, S_k)$. La nouvelle méthode développée en section IV.2.3 (p. 172) évalue la qualité de la décision par $q(\hat{\theta}(A_i, S_k))$, alors que les méthodes classiques (p. 91) ne le permettent pas.

 ◇ *Étape 2*

La matrice de conséquences $\mathbf{C} = [C_{ik}]$, $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, K$ doit être établie selon l'équation (II.1) (p. 50). Pour cela, chaque label $\hat{\theta}(A_i, S_k)$ est transformé dans une évaluation quantitative des conséquences, comme pour le deuxième point de l'étape ER-MCDA-Rank-2 (p. 181).

- Si les labels du FoD Θ sont quantitatifs, l'égalité $C_{ik} = \hat{\theta}(A_i, S_k)$ est directement appliquée.
- Si les labels de Θ sont qualitatifs, une échelle de transformation doit être définie pour établir l'évaluation quantitative de C_{ik} à partir de $\hat{\theta}(A_i, S_k)$.

◇ *Étape 3*

L'ensemble des états de la nature $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$ doit être préalablement défini. La connaissance sur cet ensemble est représentée par la BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$. Connaissant la matrice \mathbf{C} et $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$, la méthode FCOWA-ER est appliquée (Annexe F.5).

1. La matrice d'intervalles $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ (p. 97) est établie. La procédure de normalisation donne la matrice $\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}]$.
2. Les deux BBAs $m_{\text{Pess}}^{\mathcal{A}}(\cdot)$ et $m_{\text{Opti}}^{\mathcal{A}}(\cdot)$ sont construites, pour le FoD $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_i, \dots, A_M\}$.
3. Ces deux BBAs sont combinées selon la règle de fusion PCR6 pour établir la BBA $m^{\mathcal{A}}(\cdot)$.
4. Une des règles de décision classique (p. 91) ou la nouvelle méthode de décision (p. 172) est appliquée à $m^{\mathcal{A}}(\cdot)$ pour classer les alternatives de l'ensemble \mathcal{A} .

IV.3.2.2 Échelle ouvrage : classement selon l'efficacité fonctionnelle par l'approche 2 (exemple 2)

Le problème de décision à traiter est celui de l'exemple 2 (p. 147). Trois ouvrages sont à comparer selon leur efficacité fonctionnelle. L'ensemble des alternatives est $\mathcal{A}^1 = \{A_1, A_2, A_3\}$ et le FoD d'évaluation est $\Theta = \{\theta_1 = \text{élevée}, \theta_2 = \text{moyenne}, \theta_3 = \text{faible}, \theta_4 = \text{nulle}\}$.

Les états de la nature S_k , $k = 1, \dots, K = 7$ sont regroupés dans l'ensemble $\mathcal{S}^{\text{dispo}}$ qui sont les scénarios de phénomènes qui menacent l'ouvrage : écoulement permanent (S_1), écoulements torrentiels (S_2, S_3, S_4 de débit liquide croissant) et laves torrentielles (S_5, S_6, S_7 de débit de lave torrentielle croissant). L'évaluation est donc dépendante du phénomène qui est mal connu.

 ◇ *Étape 1*

L'exemple 2 a appliqué les six étapes de ER-MCDA pour évaluer les trois ouvrages soumis au même scénario S_4 . Les résultats du tableau IV.3 (p. 149) ont été obtenus pour les différentes règles de décision classiques : $\hat{\theta}(A_1) = \hat{\theta}(A_3) = \theta_1$ et $\hat{\theta}(A_2) = \theta_3$. La masse affectée à θ_1 pour l'ouvrage A_3 est supérieure à celle affectée à l'ouvrage A_1 ($m_1^{\Theta}(A_3) = 0.648 < m_1^{\Theta}(A_1) = 0.771$).

La même démarche d'évaluation a été réalisée pour les six autres scénarios de \mathcal{S} .

 ◇ *Étape 2*

Les labels de Θ sont qualitatifs. Une échelle de transformation en évaluations quantitatives doit être proposée. Pour évaluer l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage, l'échelle de notes discrètes [1; 10] est retenue. Elle est basée sur le même principe que celle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques proposée par Curt et al. (2010) mais est inversée pour une transformation croissante. La correspondance est ainsi la suivante : $\theta_4 = [1; 3]$, $\theta_3 = [4; 5]$, $\theta_2 = [6; 7]$, $\theta_1 = [8; 10]$.

Sur cette base, la conséquence C_{ik} (niveau d'efficacité fonctionnelle) est évaluée pour chaque alternative A_i , $i = 1, 2, 3$ et chaque scénario S_k , $k = 1, \dots, 7$. Par exemple, pour le scénario S_4 , la transformation donne : $C_{14} = \theta_1 = 8$, $C_{24} = \theta_3 = 4$ et $C_{34} = \theta_1 = 9$. La note de l'ouvrage A_3 est supérieure à celle de A_1 du fait de la différence entre les masses affectées au label θ_1 . Suivant le même principe pour tous les S_k , la matrice \mathbf{C} de l'équation (IV.20) est établie.

$$\mathbf{C} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 10 & 10 & 9 & \mathbf{8} & 9 & 6 & 3 \\ 10 & 8 & 6 & \mathbf{4} & 5 & 2 & 1 \\ 10 & 10 & 10 & \mathbf{9} & 9 & 6 & 5 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{IV.20})$$

◇ *Étape 3*

Selon la connaissance sur l'ensemble des états de la nature \mathcal{S} , la BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$ est donnée par : $m^{\mathcal{S}}(X_1 = S_1 \cup S_2 \cup S_5) = 0.3$, $m^{\mathcal{S}}(X_2 = S_1 \cup S_3 \cup S_6) = 0.2$, $m^{\mathcal{S}}(X_3 = S_1 \cup S_4) = 0.1$, $m^{\mathcal{S}}(X_4 = S_1 \cup S_7) = 0.05$ et $m^{\mathcal{S}}(X_4 = \mathcal{S}) = 0.25$. Sur cette base et la matrice \mathbf{C} , la méthode FCOWA-ER est appliquée.

1. La matrice d'intervalles $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ de l'équation (IV.21) est d'abord extraite. La procédure de normalisation donne la matrice $\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}]$ de l'équation (IV.22).

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}] \triangleq \begin{bmatrix} [3.30, 7.75] \\ [3.20, 7.85] \\ [5.40, 8.50] \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21}) \quad \mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}] \triangleq \begin{bmatrix} [0.98, 0.91] \\ [0.59, 0.92] \\ [1.00, 1.00] \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

2. L'approche par $M = 3\alpha$ -coupes permet d'extraire les deux BBAs $m_{\text{Pess}}^{\mathcal{A}^1}(\cdot)$ et $m_{\text{Opti}}^{\mathcal{A}^1}(\cdot)$, pour le FoD $\mathcal{A}^1 = \{A_1, A_2, A_3\}$. Elles sont données dans le tableau IV.25.
3. Leur combinaison par la règle de fusion PCR6 établit la BBA $m^{\mathcal{A}^1}(\cdot)$ du même tableau IV.25.
4. Les règles de décision classiques (crédibilité, probabilité pignistique et selon la DSMP, plausibilité) ont été utilisées. Les résultats sont rassemblés dans le tableau IV.25.

éléments focaux	$m_{\text{Pess}}^{\mathcal{A}^1}(\cdot)$	$m_{\text{Opti}}^{\mathcal{A}^1}(\cdot)$	$m^{\mathcal{A}^1}(\cdot)$	A_i	$Bel(A_i)$	$BetP(A_i)$	$DSmP(A_i)$	$Pl(A_i)$
A_3	0,019	0,076	0,098	A_1	0	0,357	0,000	0,895
$A_1 \cup A_3$	0,389	0	0,355	A_2	0	0,184	0,000	0,547
$A_2 \cup A_3$	0	0,012	0,007	A_3	0,098	0,459	1,000	1,000
$A_1 \cup A_2 \cup A_3$	0,592	0,912	0,540					

TABLE IV.25 – Exemple 2 : les deux BBAs à combiner (étape 3.2), BBA issue de leur combinaison par la règle de fusion PCR6 (étape 3.3) et résultats selon les règles de décision possibles pour chaque A_i (étape 3.4).

Selon le tableau IV.25, si on tient compte de l'ensemble des états de la nature \mathcal{S} auxquels sont exposés les trois ouvrages, l'ouvrage A_3 est plus efficace fonctionnellement que A_1 , et A_2 est l'ouvrage le moins efficace. Ces résultats sont valables quelle que soit la règle de décision choisie.

Cette application s'est appuyée sur la méthode de transposition et les règles de décision classiques. Les nouvelles méthodes de transposition et de décision auraient aussi pu être appliquées. Leur intérêt majeur réside dans une meilleure propagation de l'imperfection de l'information initiale. Cependant, la méthode FCOWA-ER ne permet pas, à ce stade de développement, d'intégrer la qualité des décisions intermédiaires issues de ER-MCDA. De fait, l'intérêt d'utiliser des méthodes permettant une meilleure propagation de l'imperfection reste limité à ce stade.

Synthèse de la section IV.3

Les méthodes d'aide multicritère à la décision développées dans le Raisonnement Évidentiel ont été associées pour permettre de passer du tri par ER-MCDA à un classement total des alternatives par BF-TOPSIS. Nommée ER-MCDA-Rank, cette méthode s'appuie sur 1) des décisions intermédiaires dont la qualité est évaluée et propagée et sur 2) une transformation quantitative dont l'influence sur les résultats est à analyser.

Les deux approches d'aide multicritère d'aide à la décision dans l'incertain ont été développées. Des décisions intermédiaires sont également nécessaires mais pas toujours possibles selon l'information disponible. Ces développements ne permettent pas de prendre en compte l'ensemble de l'imperfection de l'information. Malgré ces limites, elles permettent d'améliorer la traçabilité du raisonnement intégrant l'imperfection de l'information.

IV.4 Synthèse : une nouvelle méthodologie d'aide à la décision avancée

La méthodologie suivante a été développée et améliorée pour une meilleure prise en compte de la connaissance disponible. Elle a été appliquée à des problèmes individualisés d'évaluation de l'efficacité aux différentes échelles de mesures de protection.

1. Formalisation de chaque sous-problème par identification successive de :
 - (a) ensemble des alternatives ;
 - (b) ensemble des scénarios ;
 - (c) échelle d'évaluation de la conséquence sur laquelle repose la décision ;
 - (d) problème de décision et cadre de discernement associé ;
 - (e) ensemble des critères et ensemble des indicateurs pour chaque critère ;
 - (f) échelle d'évaluation des indicateurs et critères.
2. Modélisation des éléments suivants, selon l'information disponible :
 - (a) connaissance disponible sur les états de la nature \mathcal{S} par une fonction de masse (FCOWA-ER) ou une distribution de probabilité (analyse de risque) ;
 - (b) évaluation imparfaite de chaque indicateur ou critère par une distribution de possibilité (ER-MCDA) ;
 - (c) structure de préférence pour l'évaluation de chaque alternative selon chaque critère (« modèle de transposition » pour ER-MCDA avec une nouvelle méthode d'aide à la construction, définition des classes et seuils pour SET, normalisation pour AHP, comparaison à des solutions de référence pour BF-TOPSIS) ;
 - (d) règles d'agrégation entre les différents indicateurs pour évaluer un critère ;
 - (e) structure de préférence entre les différents critères (méthode de Saaty (1980) avec un nombre de critères limité à sept).
3. Traitement et application aux différents sous-problèmes :
 - (a) approche 1 :
 - i. analyse de risque préalable permettant d'obtenir une valeur espérée par critère ;
 - ii. AMC sur la base de la valeur espérée précise (BF-TOPSIS à privilégier) ;
 - iii. AMC sur la base d'une valeur espérée imprécise (ER-MCDA pour trier ou ER-MCDA-Rank pour classer) ;
 - (b) approche 2 :
 - i. AMC avancée par ER-MCDA améliorée par une nouvelle « méthode de transposition » et une nouvelle méthode de décision (préférée à SET) pour évaluer chaque alternative, pour chaque scénario ;
 - ii. décision (transformation) sur une évaluation quantitative pour chaque scénario selon l'échelle d'évaluation de la conséquence ;
 - iii. décision dans l'incertain basée sur FCOWA-ER.
4. Validation et recommandation :
 - (a) une méthode de validation a été développée sur la base de l'établissement de références modélisées ;
 - (b) la recommandation s'appuie sur la représentation de la connaissance disponible, une proposition de décision et un indicateur de qualité associé.

Intégration des échelles et composantes de la décision pour une évaluation globale de l'efficacité

Le chapitre III a explicité les problèmes de décision aux différentes échelles de mesures de protection torrentielle (micro, méso, macro). Le chapitre IV a développé une méthodologie basée sur le Raisonnement Évidentiel pour aider à décider selon chacun de ces problèmes en considérant plusieurs critères et le contexte d'information imparfaite. Les méthodes ont été appliquées aux problèmes d'évaluation de l'efficacité aux échelles des ouvrages (micro) et dispositifs (méso) de protection torrentielle.

Cependant l'analyse de l'efficacité doit être intégrée à la macro-échelle du bassin d'enjeu. Pour cela, elle s'évalue séquentiellement en termes de besoin, de fonction, d'utilité, d'adaptation, de capacité, d'effet, de performance, de sécurité et d'efficience (figure III.20, p. 135). Par ailleurs, la dimension temporelle est à prendre en compte avec une évaluation au moment de l'inspection qui doit intégrer une analyse prospective dans le temps : la mesure de protection est efficace aujourd'hui mais le sera-t-elle encore dans 5 ans, 10 ans ?

Pour répondre à ce problème d'intégration multi-échelle, multi-composante et multi-temporelle, la section V.1 de ce chapitre V développe une méthodologie séquentielle qui intègre de manière évolutive les apports méthodologiques issus des développements du chapitre IV (figure V.1). La section V.2 propose ensuite une application pour comparer plusieurs actions potentielles de protection à l'échelle d'un bassin d'enjeux.

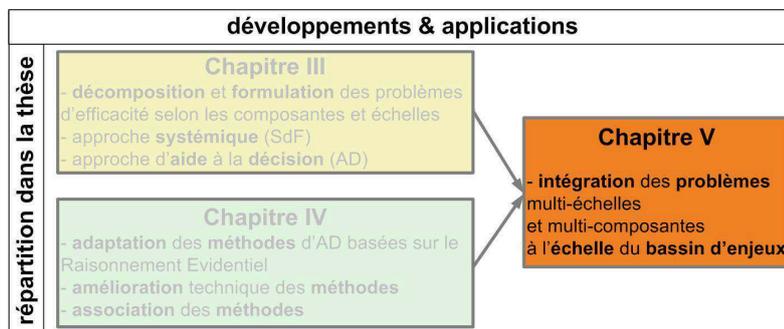


FIGURE V.1 – Le chapitre V dans les développements de la thèse.

V.1 Méthodologie d'intégration multi-échelle séquentielle

Les phénomènes torrentiels sont à l'origine de dommages sur des enjeux exposés. Les systèmes de protection ont pour objectif de les réduire. L'évaluation de leur efficacité mobilise des approches issues du génie civil, de l'hydraulique torrentielle et des méthodes de formalisation de traitement de l'information (aide multicritère à la décision, représentation de l'imperfection, etc.) à différentes échelles d'analyse (micro, méso, macro). Au final, l'évaluation globale dépend de l'analyse de la réduction des dommages que les mesures permettent à la macro-échelle du bassin d'enjeux. Elle est réalisée en univers incertain.

L'évaluation de l'efficacité concerne les systèmes de protection existant mais également les actions de maintenance qui peuvent être engagées dessus. Pour permettre une analyse qui intègre les différentes échelles et composantes, une démarche spécifique séquentielle et spatialisée est proposée (figure V.2). Tout d'abord, les systèmes doivent être triés, de la macro-échelle à la micro-échelle, pour aider la définition opérationnelle des priorités d'analyse (phase 1). Les critères de tri doivent être préalablement identifiés. Ensuite, l'évaluation de l'efficacité des systèmes prioritaires doit être menée sachant que l'évaluation à la micro-échelle conditionne celle à la macro-échelle (phase 2). Finalement, l'évaluation de l'efficacité des actions de maintenance sur des systèmes existants, ou de construction de nouveaux systèmes, doit être engagée (phase 3).

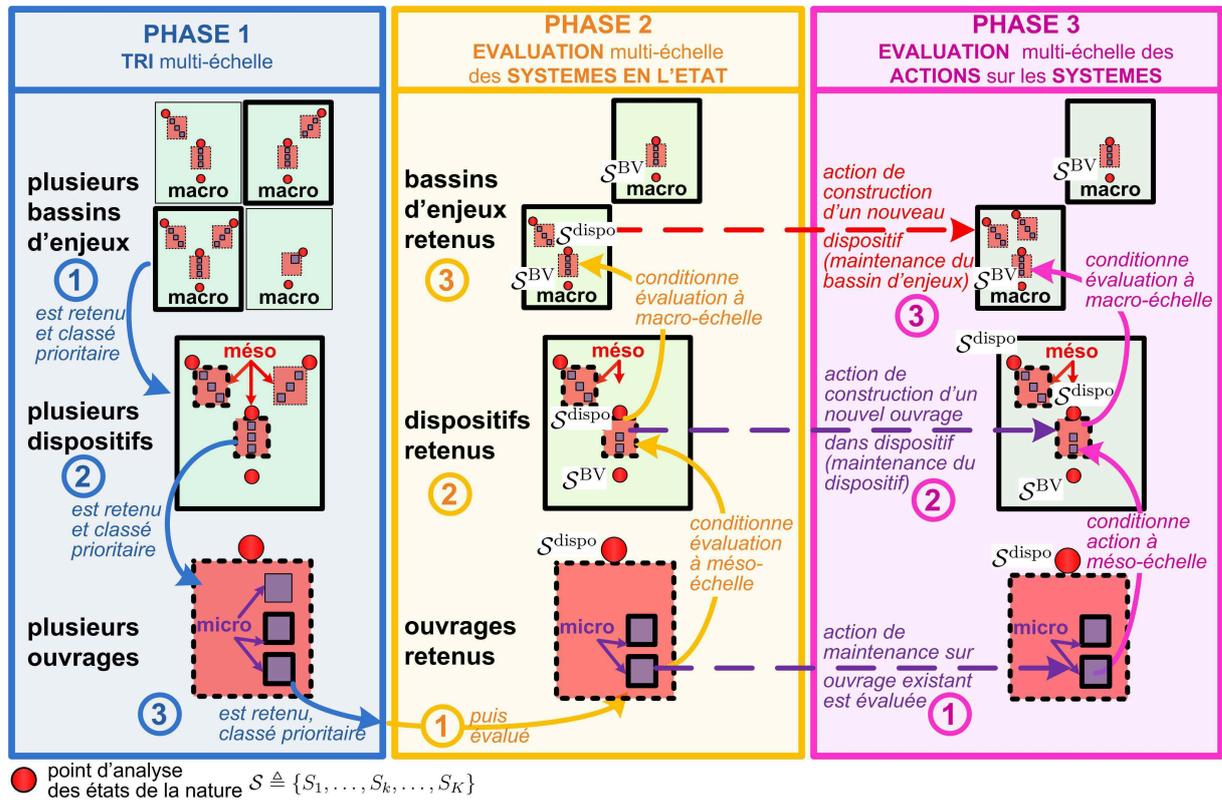


FIGURE V.2 – Principe multi-échelle de la méthodologie intégrée : tri des systèmes existants (phase 1), évaluation des systèmes existants (phase 2), évaluation des actions sur les systèmes (phase 3).

Sur cette base, la section V.1.1 introduit d'abord un nouveau formalisme pour évaluer les concepts relatifs à l'efficacité, établis dans le chapitre III. La méthodologie séquentielle est ensuite explicitée selon les trois phases (figure V.2). La section V.1.2 détaille les étapes de chacune d'elles. Les méthodes développées dans le chapitre IV peuvent être utilisées pour aider ces décisions intermédiaires en contexte d'information imparfaite et impliquant plusieurs critères.

V.1.1 Principe général : tri puis évaluation multi-échelle

L'efficacité des mesures de protection dépend de la réduction du risque qu'elles permettent (Rheinberger et al. 2009). L'évaluation de la réduction des dommages pour différents scénarios de phénomènes torrentiels est alors nécessaire. Deux hypothèses sont faites : l'évaluation du risque peut être menée en univers incertain en représentant la connaissance sur les scénarios par des probabilités subjectives ; les dommages sont évalués dans une seule unité, généralement monétaire.

Un nouveau formalisme est introduit pour s'affranchir de ces deux hypothèses critiquables (p. 58). Il doit permettre l'évaluation des dommages et de leur réduction selon différentes unités et pour chaque scénario, sans hypothèse sur la représentation de leur connaissance. Ce formalisme est ensuite développé pour permettre d'évaluer les différents concepts relatifs à l'efficacité (par exemples l'utilité ou l'importance) dans le processus séquentiel (figure III.20, p. 135). Finalement, les évaluations formalisées sont intégrées aux trois phases de la méthodologie intégrée (figure V.2).

V.1.1.1 Réduction des dommages : formalisation adaptée au contexte multicritère et incertain

Rheinberger et al. (2009) a proposé d'évaluer l'effet d'une mesure de protection d à partir de la réduction du risque $\Delta R_\Omega(d)$ depuis le risque initial $R_\Omega(0)$ jusqu'au risque résiduel $R_\Omega(d)$, avec Ω le nombre total d'enjeux exposés z_e (p. 18). À la macro-échelle du bassin d'enjeux, l'ensemble $\mathcal{S}^{\text{BV}} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$ regroupe les scénarios de phénomènes torrentiels, définis selon un critère de magnitude noté M_k (p. 13). Les dommages associés à chaque scénario sont notés D_{Ω, S_k} .

Dans le cadre probabiliste, le risque R_Ω est évalué comme la valeur espérée des dommages avec $R_\Omega = \sum_{k=1}^K P(S_k) \cdot D_{\Omega, S_k}$ (p. 55). Devant les limites de cette approche, on note Ω_j le nombre total d'enjeux du même type, eux mêmes notés z_{e_j} . Les dommages sur ces enjeux sont évalués sur une échelle spécifique X_j , $j = 1, \dots, N$.

Les dommages occasionnés par le scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$ sur des enjeux du même type sont alors notés D_{Ω_j, S_k} , $k = 1, \dots, K$, $j = 1, \dots, N$.

• Évaluation des dommages initiaux et résiduels

Les dommages D_{Ω_j, S_k} , $j = 1, \dots, N$, $k = 1, \dots, K$, sont établis selon l'équation (V.1) (rappel des équations (I.1-I.2), p. 16) avec : $P(X_{y_l}|S_k)$ la probabilité d'atteinte de chaque enjeu z_{e_j} situé à la localisation géographique X , avec une intensité de niveau y_l étant donné le scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$; $V(z_{e_j}, y_l)$ son taux d'endommagement potentiel ; $q(z_{e_j}, X_{y_l})$ son taux d'exposition. La valeur $C(z_{e_j})$ n'est pas intégrée car est établie par l'évaluation des dommages sur z_{e_j} selon l'échelle X_j .

$$D_{\Omega_j, S_k} = \sum_{e_j=1}^{\Omega_j} D_{z_{e_j}, S_k} = \sum_{e_j=1}^{\Omega_j} P(X_{y_l}|S_k) \cdot q(z_{e_j}, X_{y_l}) \cdot V(z_{e_j}, y_l) \quad (\text{V.1})$$

Les mesures de protection $d = A_i$ agissent alors sur le niveau de magnitude M_k associé à chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$, sur la probabilité d'atteinte $P(X_{y_l}|S_k)$, ou sur le niveau d'intensité y_l à la localisation géographique X , pour diminuer les dommages à un niveau résiduel $D_{\Omega_j, S_k}(A_i)$ (figure V.3). Les mesures de protection ont différentes échelles. La notation A_i est générique. Selon le formalisme établi dans le chapitre IV (p. 141), si $A_i \in \mathcal{A}^1$, alors A_i est un ouvrage ; si $A_i \in \mathcal{A}^2$, alors A_i est un dispositif de protection ; si $A_i \in \mathcal{A}^3$, alors A_i est un ensemble de dispositifs dans un bassin d'enjeux donné.

Sur cette base, les différents niveaux de dommages illustrés sur la figure V.3, pour un scénario $S_k \in \mathcal{S}^{BV}$ donné et un ensemble d'enjeux du même type Ω_j , sont :

1. $D_{\Omega_j, S_k}(0)$: dommage initial, sans mesure A_i ;
2. $D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t)$: l'objectif de dommage acceptable fixé par le décideur peut évoluer dans le temps, et doit être défini à un instant t donné ;
3. $D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$: niveau de dommage résiduel attendu sur la base d'un fonctionnement nominal de A_i , en lien avec sa capacité nominale ;
4. $D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$: niveau de dommage résiduel sur la base de la capacité réelle de A_i , à l'instant t , avec t_0 celui de la mise en service, t_i celui de l'inspection, t_{i+1} un instant après l'inspection, et t_f celui de la fin d'exploitation établie comme objectif initial (figure I.19, p. 27) ;
5. $D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{action})$: niveau de dommage résiduel après mise en œuvre d'une action de maintenance sur A_i (figure V.2).

$D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$ est différencié de $D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t)$ car des contraintes techniques peuvent limiter la capacité de A_i à atteindre les objectifs fixés. Cette distinction entre les objectifs donnés par le décideur et les limites techniques est à la base du concept d'efficacité.

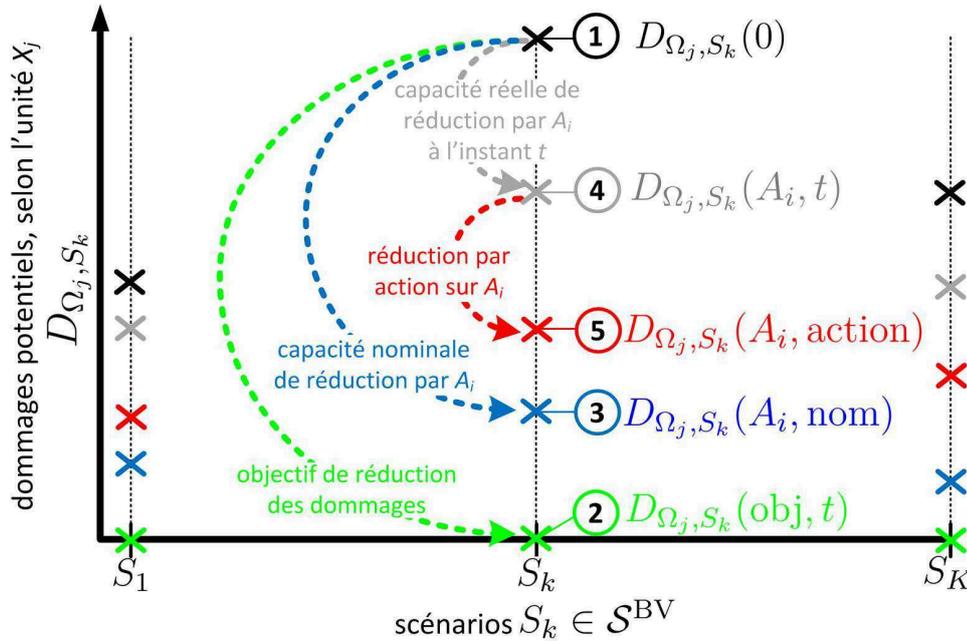


FIGURE V.3 – Mesures des dommages sur des enjeux du même type Ω_j , pour chaque scénario S_k .

La figure V.3 illustre une évaluation des conséquences que sont les dommages pour chaque scénario. Elle peut être mise en parallèle de la courbe de Farmer qui définit, dans un cadre probabiliste, les scénarios rares comme ceux ayant les conséquences les plus élevées (figure I.8, p. 13). Dans un même bassin versant torrentiel, des phénomènes de crues liquides, de crues avec charriage ou des laves torrentielles peuvent survenir. S'agissant de phénomènes aux caractéristiques physiques très différentes, les conséquences le sont également. Par exemple, les laves peuvent être plus fréquentes que les crues avec charriage dans certains bassins. Cependant, le niveau de dommage occasionné est plus important. C'est en ce sens qu'une analyse par scénario est proposée, sans faire d'hypothèse, dans un premier temps, sur leur fréquence. Cela n'exclut en rien la possibilité de travailler dans un cadre probabiliste si les données sont disponibles.

• Typologie de la réduction de dommage

Plusieurs types de réduction de dommage par A_i , notée $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i)$, sont évaluables sur la base du formalisme des niveaux de dommage établi (figure V.3) :

- $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t) = D_{\Omega_j, S_k}(0) - D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t)$: objectif de réduction des dommages ;
- $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom}) = D_{\Omega_j, S_k}(0) - D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$: réduction par une nouvelle mesure A_i , établie selon les dommages résiduels attendus en fonctionnement nominal ;
- $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t) = D_{\Omega_j, S_k}(0) - D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$: réduction par une mesure A_i en fonctionnement ;
- $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{action}) = D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t) - D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{action})$: réduction par une action sur une mesure A_i existante.

Dans le cadre d'une approche d'aide multicritère à la décision (AMC) dans l'incertain, la réduction des dommages, à l'instant t , est la conséquence C_{ijkt} de A_i , $i = 1, \dots, M$, pour le critère g_j , $j = 1, \dots, N$, et S_k , $k = 1, \dots, K$.

V.1.1.2 Nouveau formalisme pour une évaluation multi-composante de l'efficacité

Cette section formalise l'évaluation séquentielle et multi-échelle de différentes composantes de l'efficacité des mesures de protection (figure III.20, p. 135).

• Effet des mesures de protection

L'effet d'une mesure de protection peut être technique aux échelles de l'ouvrage (micro) et du dispositif (méso). Il peut aussi être socio-économique en termes de réduction des dommages à l'échelle du bassin d'enjeux (macro).

1. *L'effet socio-économique* est généralement établi en considérant une mesure du risque à la macro-échelle du bassin d'enjeux (Rheinberger et al. 2009). Le coefficient d'effet $\epsilon_{d=A_i}$, avec $\epsilon_d \in [0, 1]$, permet d'évaluer la réduction du risque depuis le risque initial au risque résiduel avec : $R_{\Omega}(d) = (1 - \epsilon_d) \cdot R_{\Omega}(0)$ (p. 18). Nous notons ici $\epsilon_{j, S_k}(A_i)$ le coefficient d'effet en termes de réduction des dommages par la mesure A_i . Il est défini par l'équation (V.2) pour une évaluation pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$. La mesure A_i est établie de manière générique dans l'équation (V.2) et peut être déclinée selon ses différents états en fonctionnement nominal (A_i, nom) ou à chaque pas de temps ($A_i, t_0, A_i, t_i, A_i, t_{i+1}, A_i, t_f$). L'évolution de l'effet de A_i dans le temps est ainsi prise en compte.

$$\epsilon_{j, S_k}(A_i) \triangleq 1 - \frac{D_{\Omega_j, S_k}(A_i)}{D_{\Omega_j, S_k}(0)}, S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}} \quad (\text{V.2})$$

2. *L'effet technique* d'une mesure de protection A_i conditionne l'effet en termes de réduction des dommages. Ce dernier dépend de l'évaluation des dommages selon l'équation (V.1). Certaines des composantes impliquées représentent les phénomènes physiques : le niveau de magnitude M_k associé à chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$; la probabilité d'atteinte $P(X_{y_l} | S_k)$; le niveau d'intensité y_l à la localisation géographique X . L'effet technique d'un dispositif est établi en analysant la modification d'une ou plusieurs de ces composantes.

• Utilité et importance multi-échelle

L'utilité d'une mesure A_i correspond à son aptitude à satisfaire le besoin auquel elle doit contribuer (Tacnet et Curt 2013). Ce besoin est spécifique à chaque échelle (figure III.20, p. 135) : le

besoin de réduction des dommages (macro) conditionne le besoin technique associé aux dispositifs (méso) et aux ouvrages (micro) de protection.

L'importance est le niveau avec lequel le système assure la satisfaction du besoin en raison de ses capacités propres ou des interactions avec les autres éléments. Ce concept permet le changement d'échelles (figure III.20, p. 135) : un ouvrage (micro) a une importance dans le dispositif (méso) qui a lui-même une importance dans le bassin d'enjeux (macro).

À la *méso-échelle*, l'importance et l'utilité du dispositif sont évalués selon les besoins socio-économiques établis à l'échelle du bassin d'enjeux (macro). Il est défini par le besoin de réduction des dommages permettant d'atteindre $D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t)$ à l'instant t , identifié comme l'effet objectif noté $\epsilon_{j, S_k}(\text{obj}, t)$.

L'*importance* d'un dispositif de protection A_i (méso), notée $\omega_{j, S_k}(A_i, t)$, est évaluée comme un rapport d'effet pour l'objectif donné. A_i a un effet attendu de réduction des dommages qui dépend de sa capacité nominale et est notée $\epsilon_{j, S_k}(A_i, \text{nom})$. Plus l'effet est grand, plus la mesure de protection A_i est importante. Cette définition est formalisée par l'équation (V.3), avec $\omega_{j, S_k}(A_i, t) \in [0, 1]$. Une mesure de protection A_i est alors d'autant plus importante qu'elle contribue à atteindre l'objectif de réduction des dommages.

$$\omega_{j, S_k}(A_i, t) \triangleq \frac{\epsilon_{j, S_k}(A_i, \text{nom})}{\epsilon_{j, S_k}(\text{obj}, t)} = \frac{\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})}{\Delta D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t)}, S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}} \quad (\text{V.3})$$

L'*utilité* d'un dispositif (méso) est établie par sa contribution au besoin de réduction des dommages dans le bassin d'enjeux (macro). Trois conditions permettent d'établir qu'un dispositif A_i a une utilité nulle (c'est à dire est inutile), pour tout $j = 1, \dots, N$ et $\forall S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$:

- $D_{\Omega_j, S_k}(0) = 0$: il n'y a aucun besoin de réduction dans le bassin d'enjeux car les dommages en situation initiale sont nuls ;
- $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t) \leq 0$: aucun besoin de réduction n'est identifié dans le bassin d'enjeux, même en tenant compte de l'évolution possible dans le temps ;
- $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom}) = 0$: la capacité nominale de A_i à réduire les dommages est nulle ; les dommages sont les mêmes qu'en situation initiale.

À la *micro-échelle*, l'importance et l'utilité de l'ouvrage dépendent de l'identification des besoins en termes de fonctions techniques à réaliser dans le dispositif (méso). Le besoin de réduction des dommages conditionne le besoin d'effet technique sur les phénomènes à l'échelle du bassin d'enjeux avec $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$ qui conditionne le besoin d'effet technique à l'échelle même du dispositif $S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}}$ (figure V.2). Ce dernier est la fonction technique que doit réaliser le dispositif localement.

L'*importance* d'un ouvrage (micro) est évaluée comme la part relative de l'influence de sa fiabilité (probabilité de non défaillance) sur la fiabilité globale du dispositif (méso) auquel il appartient (Birnbaum 1968). Connaissant la fonction à réaliser par le dispositif, l'analyse des modes de défaillance (AMDE) multi-échelle présentée dans le chapitre III (p. 120) peut aider cette évaluation.

L'*utilité* de l'ouvrage est établie comme la vérification que la fonction qu'il réalise contribue à réaliser la fonction donnée au dispositif.

- **Deux échelles d'efficacité : technique (méso) et socio-économique (macro)**

L'efficacité d'une mesure A_i est évaluée relativement à deux objectifs : le premier est socio-économique et établi à l'échelle du bassin d'enjeux (macro) ; le second est technique et fixé à

l'échelle du dispositif (mésos).

1. *L'efficacité socio-économique*, notée $\eta_{j,S_k}^D \in [0, 1]$, $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$, est associée à l'objectif de réduction des dommages à l'échelle du bassin d'enjeux. Si on considère que $\epsilon_{j,S_k}(A_i, \text{nom})$ est l'effet maximum de réduction des dommages possible étant données les contraintes techniques, il peut être considéré comme la valeur de normalisation par rapport à laquelle comparer l'effet de la mesure A_i en fonctionnement. L'efficacité de A_i à réduire les dommages à l'instant t , notée $\eta_{j,S_k}^D(A_i, t)$, est alors donnée par l'équation (V.4).

$$\eta_{j,S_k}^D(A_i, t) \triangleq \frac{\epsilon_{j,S_k}(A_i, t)}{\epsilon_{j,S_k}(A_i, \text{nom})} = \frac{\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)}{\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})}, S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}} \quad (\text{V.4})$$

2. *L'efficacité technique*, notée $\eta_{S_k}^F \in [0, 1]$, est associée au niveau de réalisation de la fonction technique d'une mesure de protection (stabiliser, retenir, etc.), en étant exposée aux scénarios $S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}}$. L'évaluation de l'efficacité technique $\eta_{S_k}^F(A_i, t)$ conditionne celle de l'efficacité socio-économique $\eta_{j,S_k}^D(A_i, t)$.

L'effet nominal de réduction des dommages est conditionné par la capacité nominale attendue de la mesure, notée $\kappa_{S_k}(A_i, \text{nom})$ (tableau III.10, p. 134). Si on note $\kappa_{S_k}(A_i, t)$ la capacité de la mesure en fonctionnement réel, son efficacité technique à réaliser sa fonction est donnée par l'équation (V.5).

$$\eta_{S_k}^F(A_i, t) \triangleq \frac{\kappa_{S_k}(A_i, t)}{\kappa_{S_k}(A_i, \text{nom})}, S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}} \quad (\text{V.5})$$

• Sécurité de la mesure de protection

La sécurité de A_i est relative à l'absence d'augmentation des dommages à l'échelle du bassin d'enjeux par rapport à la situation sans mesure. Si $D_{\Omega_j, S_k}(A_i) > D_{\Omega_j, S_k}(0)$, la sécurité n'est pas assurée pour le scénario S_k . Cette condition doit être vérifiée pour tous les scénarios $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$ et pour toutes les évaluations des dommages selon les types d'enjeux Ω_j , $j = 1, \dots, N$.

Tant qu'elle n'est pas atteinte, le niveau de sécurité est le plus élevé. Si elle l'est, le niveau de sécurité diminue avec l'augmentation des dommages en présence de la mesure A_i $D_{\Omega_j, S_k}(A_i)$.

• Efficacité d'une action à réduire les dommages

L'efficacité, notée $r_{j,S_k}(A_i)$, est formalisée par l'équation (V.6). Elle est le rapport de la réduction des dommages effective obtenue par A_i et notée $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i)$ avec le coût global associé, noté $C(A_i)$. Ce dernier intègre les coûts d'investissement, d'entretien annuel, de réparation. Comme pour l'évaluation de l'effet, l'évaluation de l'efficacité est établie pour une mesure A_i générique.

$$r_{j,S_k}(A_i) \triangleq \frac{\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i)}{C(A_i)}, S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}} \quad (\text{V.6})$$

Plusieurs types d'actions peuvent être mises en œuvre (figure V.2) :

1. un nouveau dispositif de protection A_i est créé dans un bassin d'enjeux : $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$, $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$, est évaluée ;
2. l'action vise à maintenir une mesure A_i existante dont l'efficacité a été évaluée à t_i et t_{i+1} : $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{action})$, $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$, est établie pour ces différents moments.

V.1.1.3 Approche séquentielle multi-échelle

Cette section décrit une méthodologie d'évaluation des mesures de protection intégrant les différentes échelles (micro, méso, macro) et moments t . Elle s'appuie sur trois phases (figure V.2). Les questions associées à chacune de ces phases sont formulées en correspondance avec le détail de la séquence d'analyse proposé dans cette figure. Les concepts formalisés précédemment y sont introduits car ils permettent d'aider à répondre à ces questions.

• Phase 1 : établissement préalable des priorités d'évaluation

La question finale est : « quels sont les ouvrages sur lesquels mener une évaluation détaillée en priorité ? » Pour y répondre, plusieurs problèmes successifs sont posés de la macro-échelle à la micro-échelle.

1. « Quels sont les bassins d'enjeux sur lesquels une analyse doit être réalisée en priorité ? »

La réduction des dommages est le besoin identifié. S'il n'y a pas de besoin à l'échelle d'un bassin d'enjeux, les mesures de protection sont inutiles. Il n'est alors pas nécessaire de réaliser une étude détaillée. Les bassins d'enjeux peuvent ainsi être triés selon le niveau de besoin en termes de réduction des dommages. Il est formalisé par les dommages initiaux $D_{\Omega_j, S_k}(0)$ et l'objectif fixé $D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj})$.

2. « Quels sont les dispositifs dont l'efficacité est à évaluer en priorité ? »

La réduction des dommages est permise par les dispositifs. Si un dispositif à une capacité nominale de réduction des dommages nulle, il est inutile et ne doit pas être analysé.

Si le besoin de réduction des dommages attendu $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$ est élevé, le dispositif est important. Les dispositifs peuvent alors être triés selon leur niveau d'importance formalisé par $\omega_{j, S_k}(A_i, \text{nom})$ et évalué selon l'équation (V.3).

Pour être efficace, l'adaptation du dispositif est une condition nécessaire mais pas suffisante. Elle doit donc être vérifiée avant d'engager l'analyse de son efficacité.

La sécurité associée aux dispositifs inutiles et inadaptés doit être vérifiée. Ce n'est pas parce qu'ils ne participent pas à l'atteinte des objectifs fixés qu'ils ne peuvent pas entraîner de dommages supplémentaires par rapport à la situation initiale. Si la sécurité est jugée satisfaisante, l'analyse peut être arrêtée pour le dispositif analysé. Si elle est insuffisante, des actions peuvent être proposées.

3. « Quels sont les ouvrages dont l'efficacité est à évaluer en détail ? »

Un ouvrage est utile s'il participe à la réalisation de la fonction du dispositif. Elle doit d'abord être vérifiée. Si un ouvrage est inutile, son efficacité n'est pas analysée.

Dans un dispositif, les ouvrages sont plus ou moins importants. L'importance est liée à la part prise par la défaillance de l'ouvrage dans la défaillance du dispositif (p. 112). Les ouvrages les plus importants doivent être analysés en priorité.

Comme à l'échelle du dispositif, l'adaptation de l'ouvrage doit être vérifiée comme préalable à l'évaluation de son efficacité.

● Phase 2 : évaluation multi-échelle des systèmes existants

La question posée est : « Quelle est l'efficacité des ouvrages à réduire les dommages à l'échelle du bassin d'enjeux ? » Pour y répondre, la séquence de problèmes à résoudre est la suivante.

1. « Quelle est l'efficacité technique de l'ouvrage $A_i \in \mathcal{A}^1$? »

L'efficacité technique $\eta_{S_k}^F(A_i, t)$ de chaque ouvrage A_i dépend de l'évaluation de son efficacité structurale et fonctionnelle, comme pour les exemples 1 et 2 du chapitre IV. Cette évaluation peut être reproduite à plusieurs pas de temps, comme pratiqué en Autriche (p. 37).

2. « Quelle est l'efficacité du dispositif $A_i \in \mathcal{A}^2$? »

Le dispositif doit assurer une fonction. Son efficacité technique $\eta_{S_k}^F(A_i, t)$, qui dépend de celle de l'ouvrage, est d'abord évaluée, comme pour l'exemple 3 du chapitre IV. De même, que pour l'ouvrage, elle peut être réalisée à différents pas de temps.

La connaissance de l'efficacité technique à l'instant t permet de déduire la capacité réelle de l'ouvrage $\kappa_{S_k}(A_i, t)$. L'effet associé sur la magnitude M_k pour $S_k \in \mathcal{S}^{BV}$ permet d'extraire l'évaluation des dommages résiduels $D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$. L'effet $\epsilon_{j, S_k}(A_i, t)$ et l'efficacité $\eta_{j, S_k}^D(A_i, t)$ à réduire les dommages sont établis à partir des équations (V.2) et (V.4).

3. « Quelle est la réduction des dommages permise à l'échelle du bassin d'enjeux $A_i \in \mathcal{A}^3$? »

La connaissance de l'efficacité $\eta_{j, S_k}^D(A_i, t)$ des dispositifs existants permet d'évaluer le niveau de réduction des dommages $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$ dans le bassin d'enjeux $A_i \in \mathcal{A}^3$.

La connaissance des dommages résiduels associés pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}^{BV}$ et chaque unité X_j d'évaluation permet d'évaluer la sécurité à l'échelle du bassin d'enjeux.

Finalement, des actions peuvent être proposées si le niveau de réduction des dommages ou le niveau de sécurité est considéré comme insuffisant.

● Phase 3 : évaluation multi-échelle des actions sur les systèmes existants

Si des actions sont proposées, la question qui se pose est : « Quelle est la meilleure action à mettre en œuvre ? » Cette décision repose sur l'évaluation de l'efficacité r_{j, S_k} de chaque action, qui dépend de l'évaluation de la réduction des dommages à macro-échelle.

Les mêmes étapes que celles de la phase 2 sont reprises. Les questions ne sont pas posées en termes d'évaluation de l'efficacité et de la capacité mais en termes de modification de ces éléments à évaluer, du fait de l'action. Finalement, la réduction des dommages permise par chaque action permet d'évaluer l'efficacité. L'action la plus efficace sera retenue.

L'analyse dépend du type d'actions à analyser :

- actions de maintenance d'un ouvrage ou d'un dispositif : la série de questions, depuis la modification du niveau d'efficacité technique de l'ouvrage, aboutit à l'évaluation de l'efficacité de chaque action, basée sur la réduction des dommages $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{action})$ qu'elle permet ;
- actions de construction d'un nouveau dispositif dans un bassin d'enjeux non équipé : les questions sont posées en termes d'efficacité en fonctionnement nominal. Finalement, l'efficacité est évaluée selon la réduction des dommages $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$.

La démarche d'évaluation multi-échelle et multi-composante de l'efficacité et de l'efficacité des mesures de protection s'appuie sur trois phases successives. Elle intègre les concepts formulés dans le chapitre III. Leur analyse est réalisée par scénario et par type de dommages. Pour chaque phase, des questions sont posées et correspondent à des problèmes de décision intermédiaires. Les méthodes d'aide multicritère à la décision dans l'incertain développées dans le chapitre IV sont candidates pour aider à y répondre.

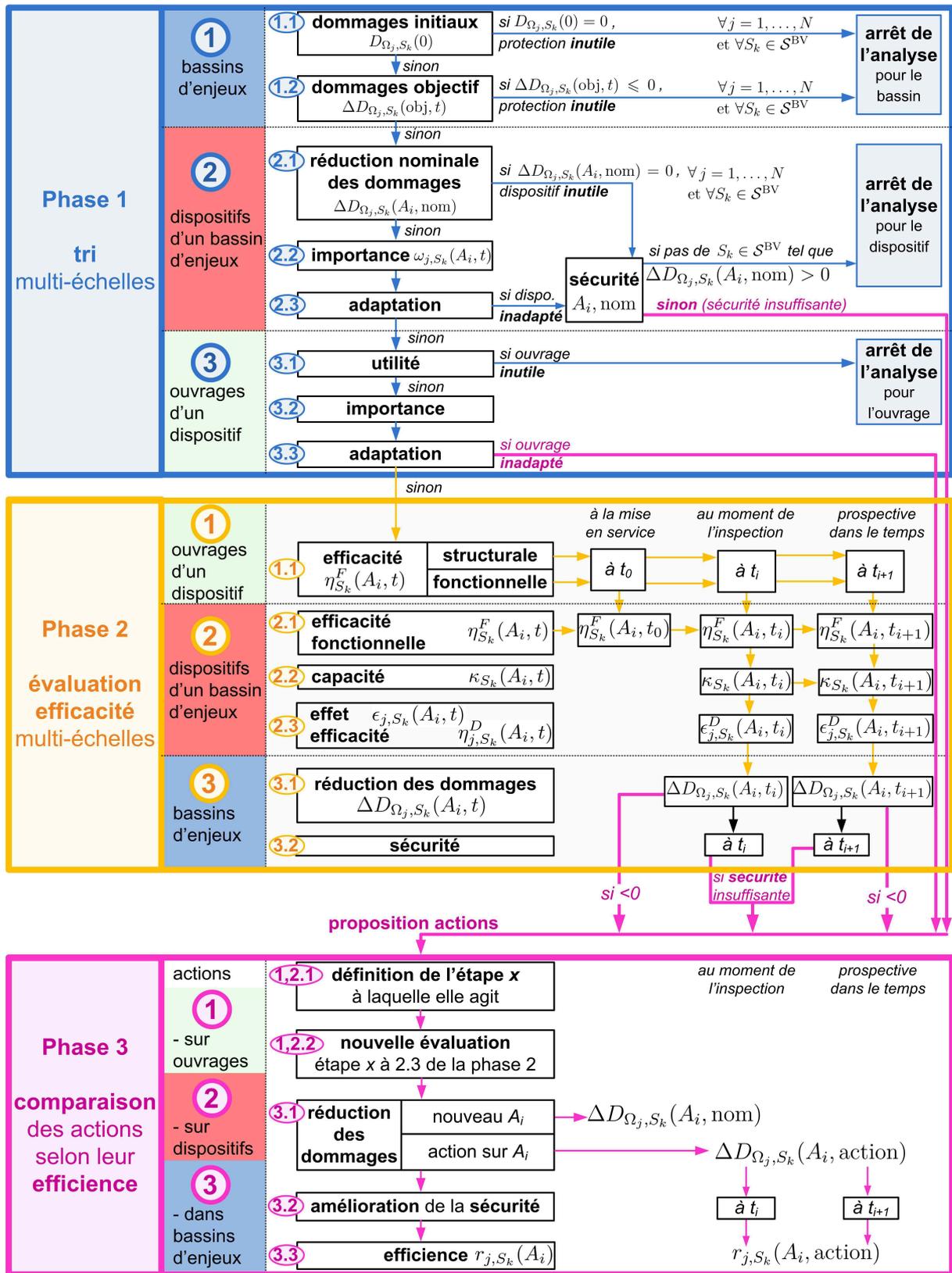


FIGURE V.4 – Approche séquentielle multi-échelle d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection et de l'efficacité des actions associées, à partir de concepts formalisés et selon trois phases.

V.1.2 Aide à la décision intégrée

Les développements des méthodes d'aide à la décision du chapitre IV sont intégrés dans la méthodologie précédemment décrite.

Lors de la phase 1, l'objectif est de trier les bassins d'enjeux, dispositifs et ouvrages pour définir des priorités d'analyse (figure V.2, p. 4). La section V.1.2.1 détaille les méthodes pouvant être utilisées pour aider ces tris successifs en s'appuyant sur la figure V.5.

L'efficacité des ouvrages retenus comme prioritaires doit ensuite être évaluée au cours de la phase 2. Elle aide à établir l'efficacité des dispositifs de protection en termes de réduction des dommages à l'échelle du bassin d'enjeux. La section V.1.2.2 rappelle les méthodes qui ont été utilisées pour aider cette évaluation. La figure V.6 détaille leur implication dans le processus.

Finalement, si le niveau d'efficacité est jugé insuffisant, des actions de maintenance ou de construction de nouveaux dispositifs peuvent être envisagées. Leur efficacité doit être évaluée pour aider à choisir la meilleure. La section V.1.2.3 introduit les méthodes permettant d'aider à décider pour ce problème. Les détails sont fournis sur la figure V.7.

V.1.2.1 Phase 1 : tri multi-échelle préalable

étapes	formalisation			aide à la décision			décision
	alternatives A_i	critères g_j	états de la nature	acquisition des données	problème	méthodes	
1	1.1 \mathcal{A}^3 A_i = un bassin d'enjeux	dommages initiaux (unité X_j)	S^{BV}	- cartes d'intensité pour chaque S_k - dommages potentiels par type d'enjeux z_e	trier les bassins d'enjeux selon le niveau de dommages	association selon approche 1 : AD dans l'incertain + ER-MCDA (p. 184) règle - si $D_{\Omega_j, S_k}(0) \leq D_{\Omega_j, S_k}(obj, t)$ - sinon	dommages dans A_i → priorités d'analyse nul → bassins inutiles faible → bassins de priorité 3 moyen → bassins de priorité 2 fort → bassins de priorité 1
	1.2 bassins prioritaires de \mathcal{A}^3	dommages objectifs (unité X_j)		- établis avec le décideur			
2	2.1 \mathcal{A}^2 A_i = un dispositif	importance à réduire les dommages (unité X_j)	S^{dispo}	- analyse thématique : fonctions de A_i - analyse structurelle : capacité et effet de réduction de l'aléa en nominal - dommages résiduels en fonctionnement nominal	trier les dispositifs selon leur importance pour établir ceux pour lesquels l'analyse est prioritaire	association selon approche 1 : AD dans l'incertain + ER-MCDA (p. 184) règle - si conception incohérente avec fonction - sinon	importance de A_i → priorités d'analyse nul → dispos inutilés faible → dispos de priorité 3 moyen → dispos de priorité 2 fort → dispos de priorité 1
	2.3 dispositifs prioritaires de \mathcal{A}^2	adaptation		- comparaison aux règles de conception			
3	3.1 \mathcal{A}^1 A_i = un ouvrage	importance	S^{dispo}	- analyse fonctionnelle interne du dispositif - analyse des modes de défaillance	trier les ouvrages selon leur importance	règle - si fonction donnée incohérente avec fonction technique - sinon part à la défaillance du dispo	importance de A_i → ouvrages inutilés faible → ouvrages secondaires moyen → ouvrages nécessaires fort → ouvrages prédominants
	3.3 ouvrages prioritaires de \mathcal{A}^1	adaptation		- comparaison aux règles de conception			

FIGURE V.5 – Phase 1 - tri multi-échelle : utilisation de la modélisation systémique, des règles de décision et de l'aide multicritère à la décision dans l'incertain pour aider à décider à chaque étape.

• **Macro-échelle : retenir les bassins d'enjeux avec les dommages les plus importants**

◇ *Étape 1.1* : les bassins d'enjeux sont triés selon le niveau initial de dommages.

Pour cela, un problème d'aide multicritère au tri dans l'incertain est formalisé. Les alternatives A_i , $i = 1, \dots, M$, sont les bassins d'enjeux de l'ensemble \mathcal{A}^3 . Le niveau initial de dommages $D_{\Omega_j, S_k}(0)$ est la conséquence analysée selon les différentes unités X_j : ce sont les critères de décision g_j , $j = 1, \dots, N$. Pour chaque bassin d'enjeux A_i , plusieurs experts s_q , $q = 1, \dots, Q$, fournissent l'évaluation des dommages initiaux selon chaque scénario de l'ensemble $\mathcal{S}^{\text{BV}} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$. Cette évaluation est la conséquence notée $C_{q,ijk}$ de la matrice $\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}} = [C_{q,ijk}]$ fournie par chaque source s_q pour chaque critère g_j (p. 184).

La problématique de décision est celle du tri (P_β) ou d'évaluation selon des labels (P_α) correspondant au niveau initial de dommage. Pour aider à décider dans ce contexte multicritère, la méthode ER-MCDA est privilégiée à Soft Electre Tri. Les labels θ_e , $e = 1, \dots, n$, du cadre de discernement Θ sont définis de manière arbitraire. Par exemple, $\Theta = \{\theta_1 = \text{nul}, \theta_2 = \text{faible}, \theta_3 = \text{moyen}, \theta_4 = \text{fort}\}$ pour évaluer le niveau de dommage initial.

L'approche 1 développée dans la section IV.3.2.1 (p. 184) est utilisée. Pour chaque matrice $\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}}$, une matrice d'intervalles $\mathbf{E}[\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}}]$ est d'abord établie (étape 1). Pour chaque bassin d'enjeux A_i , $i = 1, \dots, M$, l'intervalle de cette matrice est l'évaluation imprécise de la valeur espérée des dommages initiaux. La méthode ER-MCDA est ensuite appliquée (étape 2).

L'évaluation des bassins d'enjeux selon des labels permet non seulement d'éliminer ceux avec des dommages initiaux de niveau « nul » mais aussi de proposer des priorités d'analyse. Les bassins d'enjeux dont le niveau de dommages initiaux est jugé « fort » (priorité 1) seront analysés avant ceux au niveau de dommages « moyen » (priorité 2) et « faible » (priorité 3).

◇ *Étape 1.2* : les bassins d'enjeux sont triés selon l'objectif fixé.

L'objectif de niveau de dommages résiduels est celui jugé comme acceptable par le décideur. En son absence, on retient l'hypothèse d'une réduction totale des dommages comme l'objectif. Il s'agit d'une approche conservatrice avec $D_{\Omega_j, S_k}(\text{obj}, t) = 0$, $\forall j = 1, \dots, N$ et $\forall k = 1, \dots, K$.

• **Méso-échelle : retenir les dispositifs les plus importants**

◇ *Étapes 2.1 et 2.2* : les dispositifs sont triés selon leur importance.

Comme précédemment, un problème d'aide multicritère au tri dans l'incertain est formalisé. Les alternatives A_i , $i = 1, \dots, M$, correspondent aux dispositifs de l'ensemble \mathcal{A}^2 sur un bassin d'enjeux. Pour chaque A_i , l'importance $\omega_{j, S_k}(A_i)$ est évaluée selon chaque unité X_j , $j = 1, \dots, N$, dans l'incertain ($\mathcal{S}^{\text{BV}} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$).

Selon l'équation V.3 (p. 193), l'évaluation de l'importance repose sur celle de la réduction nominale des dommages $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$. Pour déterminer cette valeur nominale, trois étapes se succèdent :

1. l'approche historique aide à identifier les objectifs et fonctions du dispositif ;
2. pour chaque fonction, la capacité technique en fonctionnement nominal $\kappa_{S_k}(A_i, \text{nom})$ est évaluée ;
3. l'analyse structurelle à l'échelle du bassin d'enjeux permet de définir la participation de chaque dispositif aux dommages initiaux selon leur capacité nominale : pour cela, les cartes d'intensité (figure I.23, p. 32) tenant compte de la capacité nominale du dispositif, $\kappa_{S_k}(A_i, \text{nom})$, sont utilisées ;

Sur cette base, l'importance de chaque dispositif A_i en termes de réduction des dommages est établie selon l'approche 1 (p. 184). Le cadre de discernement pour évaluer l'importance est défini par $\Theta = \{\theta_1 = \text{nulle}, \theta_2 = \text{faible}, \theta_3 = \text{moyenne}, \theta_4 = \text{élevée}\}$. Pour chaque unité de dommages $X_j, j = 1, \dots, N$, les dommages sont évalués pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}^{BV}$. L'aide à la décision en univers incertain établit l'évaluation imprécise de la valeur espérée des dommages pour chaque unité X_j . L'aide multicritère à la décision tenant compte de l'imperfection de l'évaluation des critères (ER-MCDA) est appliquée.

Comme pour les bassins d'enjeux, ce tri permet d'établir les dispositifs qui doivent être analysés en priorité : les dispositifs d'importance élevée seront évalués avant ceux d'importance moyenne et ceux d'importance faible.

◇ *Étape 2.3* : seuls les dispositifs adaptés sont retenus.

Les règles de conception associées aux fonctions préalablement définies sont considérées connues. Le dispositif est adapté si ses caractéristiques de conception réelles leur correspondent. Par exemple, un dispositif constitué d'ouvrages sans ailes latérales n'est pas adapté si sa fonction est de recentrer les écoulements.

Cette étape de tri n'est pas formalisée comme un problème d'aide à la décision. Par contre, le développement de l'identification des fonctions associées aux dispositifs aide l'expertise.

Les dispositifs inutiles et inadaptés peuvent avoir une sécurité limitée. Par exemple, un dispositif a pour fonction de retenir les matériaux pour limiter le volume de lave et l'intensité liée à son étalement sur le cône de déjection. En l'absence d'enjeux sur un cône de déjection, il est inutile à réduire les dommages. Cependant, il peut être à l'origine de problèmes d'incision de la rivière dont le torrent est l'affluent (Annexe B). Si des dommages sont occasionnés par cette incision, le dispositif a un niveau de sécurité réduit. Des actions permettant d'améliorer la sécurité peuvent être envisagées.

Cette étape n'est pas formalisée comme un problème d'aide à la décision mais est appuyée par une meilleure définition du concept de sécurité des dispositifs.

- **Micro-échelle : retenir les ouvrages utiles, importants et adaptés**

◇ *Étape 3.1* : seuls les ouvrages utiles sont retenus.

L'ouvrage est utile s'il assure la satisfaction d'un besoin. Ce besoin est défini par les fonctions à assurer. L'analyse fonctionnelle interne (AFI) à l'échelle du dispositif permet d'extraire les fonctions techniques, c'est à dire le besoin, que chaque ouvrage doit réaliser. En parallèle, les fonctions réellement assurées par l'ouvrage sont identifiées. S'il n'y a pas correspondance, cet ouvrage ne satisfait pas le besoin et est inutile.

Par exemple, si la fonction principale d'un dispositif est de consolider le pied d'un glissement, la fonction technique principale attendue d'un ouvrage situé à son amont est de recentrer les écoulements. Si la fonction qui lui est donnée est de retenir des matériaux, cet ouvrage est inutile.

◇ *Étape 3.2* : les ouvrages sont triés selon leur niveau d'importance.

Dans le dispositif, l'importance de chaque ouvrage peut être évaluée selon des labels qualitatifs ou quantitatifs, comme ceux utilisés en pratique : « secondaire », « nécessaire » et « prédominant ». Elle est la part relative de la probabilité de défaillance de l'ouvrage sur la probabilité de défaillance du dispositif, pour un mode de défaillance donné.

◇ **Étape 3.3** : seuls les ouvrages adaptés sont retenus

L'adaptation d'un ouvrage est une condition nécessaire mais suffisante pour qu'il soit efficace. Par exemple, l'ouvrage analysé est celui situé à l'amont d'un dispositif de consolidation d'un glissement. Ses fonctions techniques principales sont de recentrer les écoulements et de les orienter vers l'aval pour qu'ils n'affectent pas le pied du glissement. Si l'ouvrage est construit sans aile, il n'est pas adapté car ses caractéristiques de conception ne permettent pas de réaliser la fonction attribuée. Il ne sera donc pas efficace même s'il est utile et important.

La sécurité est évaluée par rapport aux dommages occasionnés pour un scénario donné. La sécurité d'un ouvrage est dépendante de celle du dispositif.

Si le dispositif ne peut pas entraîner de dommages supérieurs à la situation où il ne serait pas présent, sa sécurité est assurée : celle de l'ouvrage n'a pas à être analysée. Par contre, si la sécurité du dispositif est réduite, celle de l'ouvrage doit être analysée. Si la conception de l'ouvrage favorise la défaillance du dispositif, alors son niveau de sécurité est diminué.

V.1.2.2 Phase 2 : de l'efficacité technique des ouvrages à l'efficacité de réduction des dommages

La phase 1 précédente a permis de retenir les ouvrages, dispositifs et bassins d'enjeux pour lesquels une évaluation multi-échelle de l'efficacité des mesures de protection doit être menée. Cette section décrit comment les méthodes d'aide à la décision développées précédemment, et appliquées à des exemples simplifiés, sont adaptées à l'évaluation multi-échelle de l'efficacité.

étapes	formalisation			aide à la décision			décision
	alternatives A_i	critères g_j	états de la nature	acquisition des données	problème	méthodes	
1 (1.1) (2.1)	A^1 A_i = un ouvrage	définis selon AF, AMDE	S_{dispo}	- formalisation de l'échelle d'évaluation selon une référence	évaluation de l'efficacité technique	systèmes à base de règles ↓ association selon approche 2 (p. 185) : ER-MCDA + FCOWA-ER	évaluation de chaque A_i , pour chaque S_k et chaque t si besoin, classement de tous les A_i pour chaque t évaluation de la capacité de chaque A_i , pour chaque S_k et t (selon tableau III.10, p.134)
					évaluation de l'efficacité technique		
2 (2.2) (2.3)	A^2 A_i = un dispositif	capacité réelle	S_{BV}	- capacité réelle calculée selon la capacité nominale et l'évaluation de l'efficacité fonctionnelle			évaluation de chaque A_i et chaque t si besoin, classement de tous les A_i pour chaque t
		efficacité à réduire les dommages dans unité X_j à l'instant t		- effet de réduction de l'aléa - cartes d'intensité pour chaque S_k - dommages résiduels évalués à t	évaluation de l'efficacité en termes de réduction des dommages	association selon approche 1 (p. 184) : AD dans l'incertain + ER-MCDA OU + ER-MCDA-Rank	
3 (3.1)	A^3 A_i = un bassin d'enjeux	réduction des dommages dans unité X_j à l'instant t		- dommages initiaux et dommages résiduels dans unités X_j , évalués à t	évaluation du niveau de réduction des dommages	association selon approche 1 (p. 184) : AD dans l'incertain + ER-MCDA OU + ER-MCDA-Rank	évaluation pour chaque A_i et chaque t classement de tous les A_i pour chaque t

FIGURE V.6 – Phase 2 - évaluation multi-échelle de l'efficacité appuyée par l'aide multicritère à la décision en univers incertain.

L'évaluation de l'efficacité technique d'un ouvrage (étape 1.1) conditionne le niveau d'efficacité technique du dispositif à un instant t (étape 2.1). La connaissance de cette dernière permet de définir la capacité réelle du dispositif à l'instant t (étape 2.2) qui conditionne l'effet réel de réduction du niveau de magnitude du phénomène à l'échelle du bassin d'enjeux, pour un scénario

$S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$ donné (étape 2.3). La carte d'intensité peut alors être établie pour le scénario S_k en tenant compte de cette réduction. Cela permet d'évaluer le niveau de dommages résiduels à l'instant t . Finalement, la comparaison avec le niveau initial de dommages permet d'évaluer la réduction des dommages due à l'ouvrage (étape 3.1). La comparaison de cette réduction effective avec l'objectif de réduction fixé au départ permet d'évaluer l'efficacité à réduire les dommages. La sécurité est finalement vérifiée (étape 3.2)

Cette analyse repose donc sur l'évaluation successive de l'efficacité technique de l'ouvrage, du dispositif, de l'efficacité socio-économique à réduire les dommages et du niveau de réduction des dommages. Les méthodes développées précédemment peuvent aider chacune de ces étapes d'évaluation.

• **Micro et méso-échelles : évaluation de l'efficacité technique des ouvrages et des dispositifs (étapes 1.1 et 2.1)**

L'évaluation multi-temporelle de l'efficacité peut s'appuyer sur l'approche systémique de la section III.1 et les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel, développées dans le chapitre IV. Deux étapes se succèdent.

◇ Les indicateurs et critères d'évaluation doivent être formalisés.

Lors de l'étape 2.2 de la phase 1, les fonctions principales que doivent assurer les dispositifs et ouvrages retenus ont été définies. Pour chaque échelle de système, l'analyse fonctionnelle externe (AFE) permet d'établir les fonctions contraintes associées. Celles que chaque ouvrage doit réaliser sont les fonctions techniques à assurer en tant que composant du dispositif. Elles sont spécifiées par l'analyse fonctionnelle interne (AFI) de ce dernier.

Deux approches permettent d'extraire les indicateurs et critères d'évaluation de l'efficacité (p. 121). La première est détaillée mais chronophage. La seconde est simplifiée pour une évaluation plus rapide. Ces deux méthodes peuvent être associées : la première détaille les indicateurs d'évaluation de chaque critère utilisé dans la seconde.

L'échelle d'évaluation des indicateurs et critères de l'efficacité est basée sur une référence relative à la conception optimale ou la capacité nominale attendue : par exemples, l'orientation optimale d'un ouvrage vers l'aval ou la longueur prévue de profil en long de torrent à stabiliser. En accord avec l'équation (V.4), chaque indicateur d'efficacité évalue ainsi la capacité à un instant t relativement à la capacité attendue en fonctionnement nominal.

La construction d'un « modèle de transposition » a été développée en section IV.2.1 pour valider la transformation de la mesure de l'indicateur ou du critère dans chaque label qualitatif d'efficacité.

◇ Les évaluations des indicateurs et des critères doivent être agrégées.

Pour aider à évaluer l'efficacité aux échelles des ouvrages et dispositifs, des modèles d'agrégation multicritère ont été développés en formalisant l'établissement de l'importance accordée à chaque critère retenu. Chacun de ces critères peut être évalué à partir de plusieurs indicateurs agrégés selon un système à base de règles spécifique (figure III.17, p. 127).

Les ouvrages et dispositifs sont exposés aux phénomènes naturels dont les différents états sont regroupés dans l'ensemble $\mathcal{S}^{\text{dispo}}$. Leur efficacité est évaluée relativement à chacun des scénarios $S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}}$, $k = 1, \dots, K$. Pour tenir compte de la durabilité, une évaluation multi-temporelle de l'efficacité doit être menée à t_i, t_{i+1} , etc.

Les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel ont été adaptées pour évaluer l'efficacité structurale et fonctionnelle des ouvrages et dispositifs dans le chapitre IV. Ainsi, la méthode ER-MCDA (préférée à Soft Electre Tri) aide l'évaluation de l'efficacité du système exposé au scénario S_k . Si le décideur le souhaite, l'association avec la méthode FCOWA-ER aide au classement dans l'incertain de ces systèmes selon leur niveau d'efficacité globale.

Afin de correspondre avec la pratique experte, l'évaluation de l'efficacité a été établie selon un cadre de discernement (FoD) regroupant des labels qualitatifs pour appliquer ER-MCDA. Une échelle de transformation a ensuite été proposée pour une évaluation quantitative sur l'échelle [1, 10]. Un FoD regroupant ces labels quantitatifs peut aussi être proposé (Curt et al. 2010).

- De la méso à la macro-échelle : de l'évaluation de l'efficacité technique du dispositif à la réduction des dommages dans le bassin d'enjeux

◇ *Étape 2.2* : évaluation de la capacité réelle du dispositif.

La capacité réelle du dispositif A_i ($\kappa_{S_k}(A_i, t)$, $S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}}$) est évaluée en appliquant l'équation (V.5). Pour cela, sa capacité nominale attendue et son efficacité fonctionnelle $\eta_{S_k}^F(A_i, t)$ sont issues des étapes précédentes.

◇ *Étape 2.3* : évaluation de l'efficacité du dispositif en termes de réduction des dommages.

La démarche de l'étape 2.1 de la phase 1 est appliquée. Le fonctionnement réel du dispositif à l'instant t remplace son fonctionnement nominal. La capacité réelle $\kappa_{S_k}(A_i, t)$, $S_k \in \mathcal{S}^{\text{dispo}}$, aide à évaluer l'effet réel sur les scénarios $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$, à l'échelle du bassin d'enjeux. Les cartes d'intensité tenant compte de l'effet réel sont alors établies pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$. Les dommages résiduels $D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$ sont évalués en présence du dispositif A_i .

L'évaluation de la réduction des dommages $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$ par le dispositif A_i à l'instant t est alors possible en tenant compte des dommages initiaux $D_{\Omega_j, S_k}(0)$ précédemment établis. L'équation V.4 permet ensuite d'évaluer l'efficacité du dispositif A_i en termes de réduction des dommages, selon chaque unité X_j , $j = 1, \dots, N$.

La valeur espérée de l'efficacité de chaque dispositif A_i , $i = 1, \dots, M$, pour chaque unité de dommages X_j , $j = 1, \dots, N$, peut être évaluée par une modélisation de la connaissance sur \mathcal{S}^{BV} dans le Raisonnement Évidentiel. Sur cette base, la méthode ER-MCDA aide à évaluer chaque dispositif selon son efficacité multicritère, car tenant compte des différentes unités de dommages X_j , $j = 1, \dots, N$. La méthode ER-MCDA-Rank développée précédemment permet d'aider à classer ces différents dispositifs A_i , $i = 1, \dots, M$ selon la réduction des dommages permise.

◇ *Étape 3.1* : évaluation de la réduction des dommages par l'ensemble des dispositifs.

Les étapes 1.1 à 2.3 permettent d'évaluer l'efficacité de chaque dispositif. L'évaluation de la réduction globale des dommages $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$ permise par cet ensemble de dispositif est alors possible. Dans ce cas, la décision porte sur chaque bassin d'enjeux qui est l'alternative $A_i \in \mathcal{A}^3$. L'application de l'association des méthodes d'aide à la décision en univers incertain avec l'analyse multicritère, selon l'approche 1 développée précédemment (p. 184), permet de classer les bassins d'enjeux selon la réduction de dommages.

◇ *Étape 3.2* : vérification de la sécurité à l'échelle du bassin d'enjeux

Cette dernière étape a pour objectif de vérifier la sécurité associée aux dispositifs. Pour cela, le niveau de dommages résiduels, évalué à différents instants t , est comparé à celui des dommages initiaux pour chaque scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$ et chaque unité de dommages X_j , $j = 1, \dots, N$.

V.1.2.3 Phase 3 : évaluation multi-échelle des actions de protection pour retenir la plus efficiente

La phase 2 consiste à évaluer l'efficacité des mesures de protection existantes. Si elle est jugée insuffisante, différentes actions (maintenance, construction nouvelle) peuvent être proposées aux différentes échelles (micro, méso, macro). L'évaluation de chaque action dépend de la comparaison entre la situation tenant compte de l'action et la situation initiale, sans action. La phase 2 permet l'évaluation en situation initiale. La phase 3 s'appuie sur une nouvelle évaluation, selon les mêmes étapes que la phase 2, mais en tenant compte de l'action (figure V.7).

Les actions à comparer doivent être identifiées. La meilleure action est la plus efficiente : elle permet le bénéfice le plus important pour un coût le plus réduit possible. On s'intéresse ici à l'évaluation de l'efficacité de chaque action, à chaque échelle, pour retenir la meilleure.

étapes	formalisation			aide à la décision			décision
	alternatives A_i	critères g_j	états de la nature	acquisition des données	problème	méthodes	
1.1 1 1.2	\mathcal{A}^4 A_i = action sur un ouvrage	- coût - augmentation efficacité à l'instant t selon g_j	S^{dispo}	niveau efficacité structurale et/ou fonctionnelle après action	choix de la meilleure action selon l'efficacité à améliorer l'efficacité technique	association selon approche 2 (p. 185) : ER-MCDA + FCOWA-ER	classement de toutes les actions sur l'ouvrage, à l'instant t
2.1 2 2.2	\mathcal{A}^5 A_i = action sur un dispositif	- coût - augmentation efficacité fonctionnelle à l'instant t selon g_j		niveau efficacité fonctionnelle après action capacité après action			
3.1 3 3.3	\mathcal{A}^6 A_i = actions dans un bassin d'enjeux	- coût - réduction des dommages dans unité X_j à l'instant t	S^{BV}	effet après action cartes d'intensité après action dommages résiduels après action - si nouvelle mesure, comparaison aux dommages initiaux - si action sur mesure existante, comparaison aux dommages résiduels avant action			classement de toutes les actions dans le bassin d'enjeux, à l'instant t

FIGURE V.7 – Phase 3 - classement des actions de protection : application multi-échelle de l'aide multicritère à la décision en univers incertain.

• Définition multi-échelle des actions à comparer

Différentes actions peuvent être envisagées. Elles peuvent intervenir aux différentes échelles (figure V.2, p. 190). Les alternatives à analyser A_i , $i = 1, \dots, M$, sont ces actions potentielles.

L'ensemble \mathcal{A}^4 regroupe les actions envisagées sur un ouvrage donné (micro). L'ensemble \mathcal{A}^5 regroupe celles prévues sur un dispositif (méso). Finalement, l'ensemble \mathcal{A}^6 rassemble toutes les actions possibles à l'échelle du bassin d'enjeux (macro).

1. À l'échelle d'un ouvrage, les actions de maintenance $A_i \in \mathcal{A}^4$ ont pour objectif d'augmenter son efficacité structurale et/ou fonctionnelle. Le bénéfice de l'action est l'augmentation de l'efficacité technique, au niveau local.
2. À l'échelle d'un dispositif, les actions de maintenance $A_i \in \mathcal{A}^5$ visent à augmenter son efficacité fonctionnelle et/ou sa sécurité. Le bénéfice de chaque action est l'augmentation de l'efficacité fonctionnelle technique, au niveau local.

3. À l'échelle d'un bassin d'enjeux, avec des mesures de protection existantes, les actions $A_i \in \mathcal{A}^6$ de construction de nouveaux dispositifs ou de maintenance des dispositifs existants visent à réduire les dommages résiduels $D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$. Les bénéfices associés sont la réduction des dommages résiduels $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, t)$ (figure V.3, p. 192) et l'augmentation de la sécurité.
4. Dans un bassin d'enjeux, sans mesure de protection existante, les actions $A_i \in \mathcal{A}^6$ réduisent les dommages initiaux $D_{\Omega_j, S_k}(0)$. Le bénéfice associée à chaque action A_i est la réduction des dommages initiaux $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(0)$ qu'elle permet (figure V.3, p. 192).

Dans le chapitre IV, l'application des méthodes avancées d'aide à la décision sur l'exemple 4 a permis de comparer différentes actions à l'échelle du dispositif. Cette comparaison se limitait à l'analyse du bénéfice (l'augmentation de l'efficacité fonctionnelle) et ne tenait pas compte des coûts associés pour comparer ces actions selon leur efficience

- **Application multi-échelle de l'aide multicritère à la décision en univers incertain**

À chaque échelle, les actions sont comparées selon leur niveau d'efficience. Pour cela, les bénéfices et coûts de chaque action sont les critères de décision à évaluer. Un problème d'aide multicritère à la décision peut alors être formalisé à chaque échelle en univers incertain (figure V.7). Aux échelles des ouvrages et dispositifs, les scénarios à prendre en compte sont ceux de l'ensemble $\mathcal{S}^{\text{dispo}}$, tandis qu'il s'agit de \mathcal{S}^{BV} à l'échelle du bassin d'enjeux.

Une fois le problème formalisé, les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) dans l'incertain sont applicables. Les deux approches d'association des méthodes basées sur le Raisonnement Évidentiel proposées en section IV.3.2 peuvent être utilisées.

L'application de l'approche 2 (aide multicritère à la décision par ER-MCDA puis aide à la décision en univers incertain par FCOWA-ER) sur l'exemple 2 a montré la possibilité de classer plusieurs alternatives dans ce cadre. L'application de la représentation de la connaissance sur \mathcal{S}^{BV} par une BBA peut permettre d'évaluer, de manière imprécise, la valeur espérée de la réduction des dommages permise par chaque action, selon les différentes unités X_j , $j = 1, \dots, N$. L'approche 1 d'association peut alors être envisagée.

Synthèse de la section V.1

Une nouvelle démarche séquentielle d'évaluation multi-échelle et multi-temporelle de l'efficacité des mesures de protection est proposée. Elle s'appuie sur la formalisation des concepts associés et trois phases : 1) tri multi-échelle préalable des mesures existantes, 2) évaluation multi-échelle et multi-temporelle de l'efficacité des mesures existantes, 3) évaluation multi-échelle de l'efficience des actions de maintenance ou de nouvelle construction pour choisir la meilleure.

En intégrant les développements précédents de cette thèse, cette démarche générique permet de cibler l'évaluation détaillée aux systèmes retenus, d'organiser l'analyse selon des priorités, d'aider à tracer le raisonnement et d'aider à décider en tenant compte des différentes formes d'imperfection et multiples sources d'information hétérogènes.

Même si elle résulte de l'analyse des différentes échelles et problèmes de décision abordés dans cette thèse, cette méthodologie intégrée n'a pas été stricto sensu appliquée à un cas d'exemple concret. Des applications ont été menées sur des exemples unitaires, aux échelles des ouvrages (micro) et dispositifs (mésos), lors des développements précédents. Une application à l'échelle du bassin d'enjeux (macro) est proposée dans la section V.2 suivante.

V.2 Échelle bassin d'enjeux : application pour choisir la meilleure solution de protection (exemple 5)

Dans le chapitre IV, les méthodes d'aide à la décision (AD) basées sur le Raisonnement Évidentiel ont été appliquées pour évaluer l'efficacité technique des ouvrages et dispositifs de protection (exemples 1 à 3). L'efficacité technique d'actions potentielles sur ces dispositifs a également été analysée (exemple 4). Le problème du choix de la meilleure action de protection à l'échelle d'un bassin d'enjeux n'a pas encore été traité.

L'analyse coûts bénéfiques (ACB) est utilisée pour aider ce type de décision. Deux limites majeures sont connues : 1) la non prise en compte des dommages intangibles ; 2) une décision basée sur une représentation probabiliste de la connaissance sur les états de la nature. Cette section propose de mettre en évidence l'apport des développements méthodologiques de cette thèse. Un exemple simplifié, numéroté 5, représente ce type de problème à macro-échelle.

Une analyse comparative des méthodes candidates est menée en deux temps.

1. Le premier objectif est de montrer comment prendre en compte les dommages intangibles par les approches d'aide multicritère à la décision (AMC). L'analyse multicritère hiérarchique (AHP) de Saaty (1980) et les quatre méthodes BF-TOPSIS, basées sur le Raisonnement Évidentiel et récemment développées par Dezert et al. (2016c), sont comparées à l'ACB.
2. Le second objectif est de propager l'ensemble de l'imperfection de l'information, selon ses différentes formes, dans le processus d'AD. L'association d'une AMC basée sur des évaluations imparfaites des critères (ER-MCDA) et de l'aide à la décision en univers incertain basée sur le Raisonnement Évidentiel, développée dans le chapitre IV, est ensuite appliquée.

V.2.1 Formalisation du problème multicritère, en univers incertain

Dans un bassin d'enjeux non équipé, le problème est de comparer cinq solutions potentielles A_i , $i = 1, \dots, M = 5$, pour protéger des enjeux exposés aux phénomènes torrentiels avec, selon le formalisme développé dans cette thèse, $A_i \in \mathcal{A}^6$ (Figure V.8) :

- A_1 : aucune action n'est entreprise ;
- A_2 : construire des dispositifs de consolidation/stabilisation dans le haut bassin versant ;
- A_3 : construire une plage de dépôt à l'apex du cône de déjection ;
- $A_4 = A_2 \cup A_3$: construire des dispositifs de consolidation/stabilisation et la plage de dépôt ;
- A_5 : construire des protections individuelles pour chaque élément exposé.

V.2.1.1 Représentation de la connaissance sur les états de la nature

Les états de la nature $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$ sont définis selon un critère de magnitude à l'apex du cône de déjection par M_k , $k = 1, \dots, K$ (figure V.9).

• Cadre probabiliste classique

Selon l'approche probabiliste de l'analyse et de la mesure du risque (p. 16), quatre périodes de retour T_k sont retenues, avec $T_1 = 10$ ans, $T_2 = 30$ ans, $T_3 = 100$ ans et $T_4 = 300$ ans. Pour chacune, le scénario S_{T_k} de magnitude M_k est établi (figure V.9). Dans ce cas, le critère de magnitude est le volume de matériaux transportés par une lave torrentielle (V_{Lave}). Les scénarios considérés sont $S_k = [S_{T_k}; S_{T_{k+1}}[$, $k = 1, \dots, K$ et l'ensemble des états de la nature correspondant est $\mathcal{S}^{\text{BV}} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$. Selon l'équation (II.4) (p. 55), les probabilités associées sont : $P(S_0) = 0.9$, $P(S_1) = 0.067$, $P(S_2) = 0.023$, $P(S_3) = 0.007$ et $P(S_4) = 0.003$.

• Cadre du Raisonnement Évidentiel

Plusieurs types de phénomènes peuvent survenir dans le bassin versant torrentiel : crues avec charriage caractérisées par le volume de matériaux solides transportés V_s ; laves torrentielles d'un volume V_{lave} . Pour traiter ce cas, le cadre de la théorie de Demspter-Shafer (DST) dans le Raisonnement Évidentiel est utilisé. Cinq scénarios sont considérés pour $\mathcal{S}^{BV} = \{S_1, \dots, S_5\}$:

- S_1 : crue avec charriage avec un volume inférieur à un certain niveau ($V_s < V_{s,p,seuil}$) ;
- S_2 : crue avec charriage avec un volume supérieur à ce niveau ($V_s \geq V_{s,p,seuil}$) ;
- S_3 : lave torrentielle avec un volume qui reste inférieur à un premier seuil ($V_{lave,p} < V_{lave,p,seuil1}$) ;
- S_4 : lave torrentielle avec un volume intermédiaire ($V_{lave,p,seuil1} \leq V_{lave,p} < V_{lave,p,seuil2}$) ;
- S_5 : lave torrentielle avec un volume qui est supérieur au deuxième seuil ($V_{lave,p} \geq V_{lave,p,seuil2}$).

Sur cette base, l'expert pourrait considérer quatre éléments focaux $X_r \in 2^{\mathcal{S}^{BV}}$, $s = 4$. L'analyse de bassin versant n'a pas été réalisée pour cette application et les éléments de la BBA ci-dessous sont donnés à titre d'exemple :

- $m^{\mathcal{S}^{BV}}(X_1) = m^{\mathcal{S}^{BV}}(S_1 \cup S_3) = 0.4$;
- $m^{\mathcal{S}^{BV}}(X_2) = m^{\mathcal{S}^{BV}}(S_2 \cup S_3 \cup S_4) = 0.25$;
- $m^{\mathcal{S}^{BV}}(X_3) = m^{\mathcal{S}^{BV}}(S_5) = 0.1$;
- $m^{\mathcal{S}^{BV}}(X_4) = m^{\mathcal{S}^{BV}}(S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5) = m^{\mathcal{S}^{BV}}(\mathcal{S}^{BV}) = 0.25$.

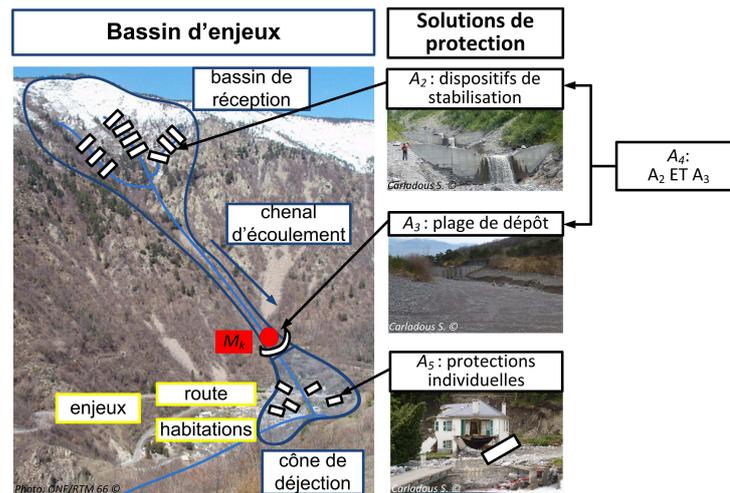


FIGURE V.8 – Exemple 5 - échelle du bassin d'enjeux : les cinq solutions de protection à comparer.

V.2.1.2 Problème multicritère pour décider selon l'efficience

La formalisation du problème multicritère nécessite d'identifier les critères de décision, de définir l'échelle d'évaluation de chacun et d'éliciter les préférences du décideur entre ces différents critères.

• Identification des critères d'efficience

D'un côté, chaque alternative a pour objectif de réduire les dommages potentiels sur les éléments exposés aux phénomènes torrentiels. Plusieurs types de dommages peuvent survenir : pertes de vie humaine, destruction d'habitations, réduction de l'activité économique (industrielle, agricole, etc.), coupures de réseaux (routes, voies ferrées, etc.), dommages environnementaux dus à la destruction de sites dangereux, etc. Chaque type de dommages peut être évalué selon une unité spécifique, dont la valeur monétaire. Par exemple, en France, la valorisation monétaire n'est pas

utilisée pour évaluer la mortalité humaine tandis qu'elle l'est en Suisse. D'un autre côté, chaque alternative a un coût pour l'investissement mais aussi pour maintenir les ouvrages tout au long de leur durée de vie.

La comparaison des coûts avec les bénéfices permet d'évaluer l'efficacité de chaque alternative. De manière classique, dans le domaine des risques naturels, les bénéfices sont la réduction du risque annuel calculée dans le cadre probabiliste. Les applications de l'AHP considèrent ces deux critères et les détaillent par des sous-critères (Communities and Local Government 2009 ; Triantaphyllou et Baig 2005). Sur cette base, l'application proposée considère $N = 5$ critères g_j d'évaluation de l'efficacité. Pour chaque g_j , $j = 1, \dots, 5$, une échelle de mesure spécifique X_j est établie. L'objectif est de minimiser les évaluations des critères g_1 et g_2 (préférence décroissante) et de maximiser celles des critères g_3 , g_4 , et g_5 (préférence croissante), avec :

- g_1 : coût d'investissement en € ($x_{i1} \in X_1 = \mathbb{R}^+$);
- g_2 : coût annuel d'entretien en € ($x_{i2} \in X_2 = \mathbb{R}^+$);
- g_3 : réduction des dommages en m^2 d'habitations endommagées ($x_{i3} \in X_3 = \mathbb{R}^+$);
- g_4 : réduction des dommages en *nombre de morts* ($x_{i4} \in X_4 = \mathbb{R}^+$);
- g_5 : réduction des dommages en *nombre* de sites dangereux pour l'environnement dans la zone exposée aux phénomènes ($x_{i5} \in X_5 = \mathbb{R}^+$).

• Évaluation de la réduction des dommages par type d'enjeux et par scénario

Pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ et chaque critère g_j , $j = 3, 4, 5$, la réduction des dommages, notée $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom}) = D_{\Omega_j, S_k}(0) - D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom})$, est établie selon l'unité X_j correspondante, pour chaque scénario S_k , et selon le fonctionnement nominal attendu de chaque A_i . Pour simplifier, nous noterons par la suite $\Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i, \text{nom}) = \Delta D_{\Omega_j, S_k}(A_i)$. Dans le cadre probabiliste, le scénario S_k est associé aux périodes de retour et est noté S_{T_k} avec, pour ce cas d'application, $k = 1, \dots, K - 1 = 4$. Ce qui est appliqué par la suite à S_{T_k} , peut être appliqué pour tout scénario $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$.

Trois étapes successives sont mises en œuvre pour évaluer ces réductions de dommages.

1. Pour chaque scénario S_{T_k} , $k = 1, \dots, K - 1 = 4$, une carte d'intensité est établie pour la situation initiale et en tenant compte de l'effet nominal de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, 5$. La figure V.9 est un exemple simplifié.

Les solutions A_1 et A_5 n'ont aucun effet sur le phénomène, quel que soit le scénario considéré. Par contre, la solution A_5 permet de diminuer la vulnérabilité de chaque enjeu.

2. Pour chaque scénario S_{T_k} , $k = 1, \dots, 4$, et critère g_j , $j = 3, \dots, 5$, la situation initiale et chaque solution de protection, les dommages en situation initiale $D_{\Omega_j, S_{T_k}}(0)$ et attendus pour chaque solution $D_{\Omega_j, S_{T_k}}(A_i)$, $i = 1, \dots, 5$, sont calculés selon l'équation (V.1). Pour cela, des hypothèses sont formulées et synthétisées dans le tableau V.1.

		critères		
		g_3	g_4	g_5
Mesure sur la carte d'intensité		nb habitations		nb sites dangereux
$V(z_{e_j}, y_l)$	intensité moyenne	0.4	0.004	0.5
	intensité forte	1	0.06	1
$q(z_{e_j}, y_l)$		1	0.6	0.5
$C(z_{e_j})$		120 m ² /hab.	3 pers./hab.	40 pers./site

TABLE V.1 – Exemple 5 : hypothèses pour le calcul des dommages selon chaque critère g_j , $j = 3, 4, 5$.

La probabilité d'atteinte est supposée telle que $P(X_{y_l}|M_k) = 1$. Pour calculer la valeur $C_{z_{e_j}}$ dans l'unité X_j , le nombre d'habitations (pour g_3) atteintes par une intensité moyenne et forte est relevé sur chaque carte (figure V.9). De la même manière, le nombre de sites dangereux (pour g_5) est comptabilisé. Les habitations ont une superficie moyenne de 120 m^2 . Pour g_4 , il y a en moyenne 3 personnes par habitation et 40 personnes par site dangereux. Le taux d'exposition $q(z_{e_j}, y_l)$ est défini de manière discrète en considérant une présence des personnes pendant 60 % du temps, que ce soit dans l'habitation ou le site dangereux. Sur le principe du logiciel EconoMe[®] qui permet l'application de l'analyse coûts bénéfices (ACB) en Suisse (Bründl 2012), le taux d'endommagement (ou de létalité pour g_4) potentiel $V(z_{e_j}, y_l)$ est établi de manière discrète, avec y_l une intensité forte ou moyenne. Pour A_i , $i = 1, \dots, 4$, la vulnérabilité $V(z_{e_j}, y_l)$ est celle définie dans le tableau V.1. Par contre, pour la solution A_5 , elle est modifiée et est ramenée à une vulnérabilité nulle, quel que soit l'enjeu et le niveau d'intensité auquel il est exposé.

- La réduction des dommages est alors calculée par $\Delta D_{\Omega_j, S_{T_k}}(A_i) = D_{\Omega_j, S_{T_k}}(0) - D_{\Omega_j, S_{T_k}}(A_i)$ pour chaque unité X_j , $j = 3, 4, 5$ et chaque scénario S_{T_k} , $k = 1, \dots, 4$.

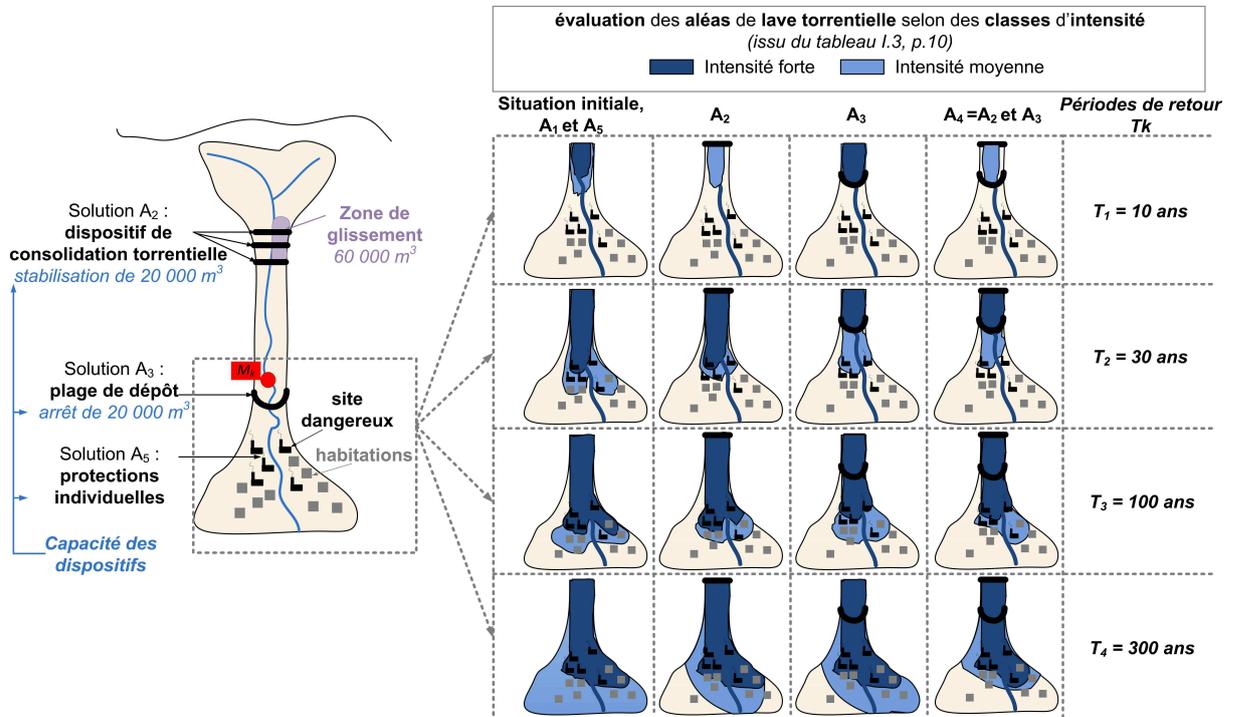


FIGURE V.9 – Exemple 5 : cartes d'intensité selon la situation initiale et en tenant compte de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, 5$, pour chaque période de retour T_k , $k = 1, \dots, K = 4$.

• Élicitation des préférences entre critères

Une fois les cinq critères établis ($N = 5$), le décideur définit le vecteur correspondant des coefficients d'importance \mathbf{w} . Pour cela, sur la base de la méthode de Saaty (1980) (p. 73), la matrice de préférence \mathbf{P}_g de dimensions 5×5 est établie comme sur l'équation (V.7). L'ordonnement des critères selon les préférences du décideur est, sur cet exemple : $g_4 \succ g_5 \succ g_3 \succ g_1 \succ g_2$. Le calcul du vecteur propre \mathbf{P}_g fournit le vecteur $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$.

$$\mathbf{P}_g \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1/2 & 1/7 & 1/4 \\ 1/4 & 1 & 1/4 & 1/9 & 1/6 \\ 2 & 4 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 7 & 9 & 5 & 1 & 2 \\ 4 & 6 & 7 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.7})$$

V.2.1.3 Évaluation des conséquences

Dans cet exemple, la comparaison finale des mesures de protection est établie selon l'efficience qui est la conséquence. Comme l'efficacité, elle peut être évaluée selon différentes échelles :

- pour une problématique d'évaluation, les labels peuvent être qualitatifs comme l'ensemble {nulle, faible, moyenne, forte} ;
- ces labels peuvent également être quantitatifs sur l'échelle [1; 10] avec, ici, l'hypothèse que plus la note est haute, plus la mesure est efficiente.

V.2.2 Classement multicritère en univers risqué : comparaison des méthodes ACB, AHP et BF-TOPSIS

En univers risqué, la connaissance de la réduction des dommages, notée $\Delta D_{\Omega_j, S_{T_k}}(A_i)$, que permet chaque mesure de protection A_i , $i = 1, \dots, 5$, permet de calculer la réduction du risque correspondante $\Delta R_{\Omega_j}(A_i)$, $j = 3, 4, 5$ par l'équation (V.8) (p. 55).

$$\Delta R_{\Omega_j}(A_i) = \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{k+1}} \right] \cdot \Delta D_{\Omega_j, S_{T_k}}(A_i) \quad (\text{V.8})$$

La réduction du risque $\Delta R_{\Omega_j}(A_i)$ est le score de la solution A_i selon chaque critère g_j , $j = 3, 4, 5$. Avec l'évaluation précise du coût d'investissement (g_1) et du coût d'entretien annuel (g_2) de chaque solution de protection, la matrice de scores \mathbf{S} est ainsi fournie.

$$\mathbf{S} \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 300000 & 6000 & 5 & 0.007 & 0.02 \\ 300000 & 1500 & 5 & 0.008 & 0.04 \\ 600000 & 7500 & 7 & 0.008 & 0.05 \\ 1000000 & 0 & 7 & 0.008 & 0.1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.9})$$

Deux cas d'étude sont considérés :

- cas 1 : seules les quatre premières solutions de protection A_i , $i = 1, \dots, 4$, sont prises en compte ; autrement dit, A_5 n'est pas une solution étudiée dans un premier temps ;
- cas 2 : les cinq solutions A_i , $i = 1, \dots, 5$ sont considérées comme des solutions potentielles.

Le problème est celui du classement (P_γ) des différentes alternatives pour choisir la meilleure solution de protection A_{i^*} (P_α). Le cadre de discernement de la décision pour le cas 1 est l'ensemble des solutions $\mathcal{A}^6 = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ tandis que celui pour le cas 2 est $\mathcal{A}^6 = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$.

Ce cas d'étude est un problème pratique. Dans un premier temps, un expert peut ne considérer que des solutions techniques de protection générale d'un site (A_1, A_2, A_3 et A_4). Puis, lors de réunions de concertation avec la collectivité, les particuliers et/ou les partenaires financiers, une

autre solution est envisagée : la mise en place de protections individuelles pour toutes les habitations potentiellement endommagées (A_5). Elle doit être comparée aux autres solutions selon les mêmes critères de décision.

Sur cette base, trois méthodes d'aide à la décision sont utilisées pour être comparées : l'analyse coût bénéfiques (ACB), l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) et les quatre méthodes BF-TOPSIS. Elles sont appliquées à ces deux cas et leurs résultats analysés, notamment par rapport au problème de renversement de rang. La question est en effet d'identifier si l'ajout de l'alternative A_5 au cours du processus d'aide à la décision peut conduire à faire évoluer le classement entre les quatre autres alternatives.

Pour réaliser cette comparaison finale, l'ensemble des résultats sont collectés dans le tableau V.6, pour le cas 1 (sans A_5), et le tableau V.7, pour le cas 2 (avec A_5) (p. 215).

V.2.2.1 Application de l'analyse coûts bénéfiques (ACB)

Sur la base de la matrice \mathbf{S} , la première étape de l'ACB consiste à établir la valeur monétaire de chaque score puis à établir l'efficacité de chaque alternative A_i par le calcul de la valeur actuelle nette, notée $\text{VAN}(A_i)$, ou celui du ratio $r(A_i)$ de la réduction des dommages sur les coûts.

• Valorisation monétaire

Pour chaque solution de protection A_i , $i = 1, \dots, 5$ et chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 5$, le score x_{ij} de la matrice \mathbf{S} de l'équation V.9 est d'abord transformé en une valeur monétaire notée x_{ij}^ϵ . La méthode directe basée sur les coûts est utilisée pour correspondre à la pratique actuelle.

Pour le critère g_3 , le prix moyen d'une habitation est estimé à $2\ 300\ \text{€}/\text{m}^2$. Il s'agit d'une valeur moyenne basée sur le coût de l'immobilier dans les onze départements français de montagne dans les Pyrénées et les Alpes (site « www.meilleursagents.com/prix-immobilier »). Pour chaque A_i , $i = 1, \dots, 5$, les valeurs $x_{i3}^\epsilon = 2\ 300 \cdot x_{i3}$ sont alors calculées, avec x_{i3} provenant de la matrice \mathbf{S} .

Pour le critère g_5 , la transformation de l'évaluation de la réduction des dommages environnementaux dans une valeur monétaire est un processus difficile. En pratique, elle est rarement établie ce qui, dans le cadre de l'ACB, correspond à supposer que $x_{i5}^\epsilon = 0$.

Pour le critère g_4 , la valorisation monétaire de la perte de vie humaine est un sujet de débats importants. Deux méthodes sont comparées :

- *méthode 1*, pour la pratique en France : la perte de vie humaine ne peut pas être monétarisée ; pour chaque A_i , l'évaluation du critère g_4 est alors donnée par $x_{i4}^\epsilon = 0$;
- *méthode 2*, pour la pratique en Suisse : le prix moyen d'une vie humaine en France est estimé à *2.5 millions d'€* (Meunier et Mardsen 2009) ; l'évaluation de chaque A_i selon le critère g_4 est alors donnée par $x_{i4}^\epsilon = 2\ 500\ 000 \cdot x_{i4}$, avec x_{i4} provenant de la matrice \mathbf{S} .

Sur la base de ces transformations, les deux matrices de scores transformés $\mathbf{S}_{\text{cas1}}^\epsilon$ et $\mathbf{S}_{\text{cas2}}^\epsilon$ sont établies dans le tableau V.2 à partir de la matrice initiale de scores \mathbf{S} . Pour chaque A_i , $i = 1, \dots, 5$, le score g_3 correspond au critère global de réduction du risque en valeur monétaire (€) évalué par $x_{i3}^\epsilon + x_{i4}^\epsilon + x_{i5}^\epsilon$.

			g_1	g_2	g_3	
					méthode 1	méthode 2
$S_{cas2}^{\text{€}}$	$S_{cas1}^{\text{€}}$	A_1	0	0	0	0
		A_2	300 000	6 000	11 500	29 000
		A_3	300 000	1 500	11 500	31 500
		A_4	600 000	7 500	16 100	36 100
	A_5	1 000 000	0	16 100	36 100	

TABLE V.2 – Matrice des scores transformés en € pour les deux cas $S_{cas1}^{\text{€}}$ (sans A_5) et $S_{cas2}^{\text{€}}$ (avec A_5).

• Calcul de l'efficience : valeur actuelle nette ou ratio des bénéfiques sur les coûts

Pour appliquer l'ACB (détails en p. 56), un horizon temporel de projet $t_{\text{projet}} = 50$ ans, conseillé par Erdlenbruch et al. (2008), et un taux d'actualisation fixé à $q_t = 3\%$, $\forall t \in [1, t_{\text{projet}}]$ sont retenus. Pour chaque A_i , $i = 1, \dots, 5$, les équations du système (II.10) (p. 56) sont appliquées. Les résultats de la Valeur Actuelle Nette $VAN(A_i)$ et du ratio $r(A_i)$ sont fournis dans le tableau V.3.

	méthode 1		méthode 2	
	$VAN(A_i)$	$r(A_i)$	$VAN(A_i)$	$r(A_i)$
A_1	0	–	0	–
A_2	-158 487	0.65	291 784	1.64
A_3	-42 702	0.87	471 894	2.39
A_4	-378 724	0.52	135 871	1.17
A_5	-585 751	0.41	-71 156	0.93

TABLE V.3 – Résultats de l'application de l'ACB aux données du tableau V.2, selon les deux méthodes : 1) sans ou 2) avec monétarisation de la valeur de la vie humaine.

L'analyse des résultats selon la VAN ou le ratio r fournissent le même classement ordonné des solutions de protection (sauf pour A_1 que le ratio ne permet pas d'évaluer). Les résultats de la VAN sont utilisés comme critère de décision du classement des alternatives (tableaux V.6 et V.7, p. 215).

V.2.2.2 Application de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP)

Les étapes de l'AHP ont été détaillées dans l'état de l'art (p. 65). Les deux premières étapes permettent d'identifier les cinq critères de décision (AHP-1) et d'établir le vecteur des coefficients d'importance $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$ (AHP-2).

Pour prendre en compte les deux cas d'étude, deux matrices de scores S_{cas1} et S_{cas2} sont établies dans le tableau V.4, à partir de la matrice initiale de scores S de l'équation (V.9).

		g_j	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
S_{cas2}	S_{cas1}	A_1	0	0	0	0	0
		A_2	300 000	6 000	5	0.007	0.02
		A_3	300 000	1 500	5	0.008	0.04
		A_4	600 000	7 500	7	0.008	0.05
	A_5	1 000 000	0	7	0.008	0.1	

TABLE V.4 – AHP-3 : Matrices de scores pour chaque cas S_{cas1} (sans A_5) et S_{cas2} (avec A_5).

• Normalisation des scores (AHP-3)

Cette étape consiste à établir une matrice de scores normalisés à partir de la matrice initiale \mathbf{S} . Deux méthodes de normalisation des scores sont comparées.

- *Méthode 1* (méthode originale de Saaty (1980), détaillée en p.65) : pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 5$, le décideur produit sa matrice de préférences entre les alternatives. Les matrices de scores normalisés de l'équation (V.10) pour le cas 1 et de l'équation (V.11) pour le cas 2 sont obtenues.

$$\mathbf{S}_{\text{cas1}}^1 = \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.643 & 0.576 & 0.038 & 0.037 & 0.042 \\ 0.158 & 0.071 & 0.197 & 0.219 & 0.128 \\ 0.158 & 0.308 & 0.197 & 0.372 & 0.320 \\ 0.041 & 0.045 & 0.568 & 0.372 & 0.510 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.10})$$

$$\mathbf{S}_{\text{cas2}}^1 = \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.515 & 0.368 & 0.028 & 0.028 & 0.032 \\ 0.190 & 0.046 & 0.124 & 0.156 & 0.071 \\ 0.190 & 0.186 & 0.124 & 0.272 & 0.137 \\ 0.073 & 0.032 & 0.363 & 0.272 & 0.228 \\ 0.032 & 0.368 & 0.363 & 0.272 & 0.532 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.11})$$

- *Méthode 2* (normalisation par la somme) : pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 5$, chaque score x_{ij} est normalisé par la somme $\sum_j x_{ij}$ pour obtenir les deux matrices de scores normalisés de l'équation (V.12) pour le cas 1, et de l'équation (V.13) pour le cas 2.

$$\mathbf{S}_{\text{cas1}}^2 = \begin{matrix} & g_1 & Cg_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.750 & 0.600 & 0.294 & 0.304 & 0.182 \\ 0.750 & 0.900 & 0.294 & 0.348 & 0.364 \\ 0.500 & 0.500 & 0.412 & 0.348 & 0.455 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.12})$$

$$\mathbf{S}_{\text{cas2}}^2 = \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.864 & 0.600 & 0.208 & 0.226 & 0.095 \\ 0.864 & 0.900 & 0.208 & 0.258 & 0.190 \\ 0.727 & 0.500 & 0.292 & 0.258 & 0.238 \\ 0.545 & 1.000 & 0.292 & 0.258 & 0.476 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.13})$$

• Calcul du score de synthèse et classement (AHP-4 et 5)

Pour chacune des quatre matrices de scores normalisés, le score de synthèse s_i est calculé pour chaque solution de protection A_i , $i = 1, \dots, 4$ (cas 1) et $i = 1, \dots, 5$ (cas 2) à partir de l'équation (II.13) (p. 66). Ces résultats et le classement associé des alternatives sont fournis dans les tableaux V.6 (cas 1) et V.7 (cas 2).

V.2.2.3 Application des quatre méthodes BF-TOPSIS

La préférence décroissante selon g_1 and g_2 doit être prise en compte. Pour cela, les scores initiaux x_{i1} et x_{i2} , $i = 1, \dots, 5$ du tableau V.4 sont multipliés par -1 pour obtenir les matrices de scores correspondantes $\mathbf{S}_{\text{cas1}}^{\text{pref}}$ et $\mathbf{S}_{\text{cas2}}^{\text{pref}}$, de dimensions 4×5 (cas 1) et 5×5 (cas 2), dans le tableau V.5.

Sur cette base, les quatre méthodes BF-TOPSIS sont appliquées selon le détail calculatoire disponible (Annexe F.4). Toutes les étapes de calcul ne sont pas présentées ici.

Pour chacun des deux cas, les quatre méthodes BF-TOPSIS permettent d'établir la proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$ avec la solution idéalement la meilleure A^{best} . Ces résultats sont consignés dans les tableaux V.6 et V.7 qui permettent de comparer les résultats obtenus par les différentes méthodes pour les deux cas étudiés.

		g_j	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
S_{cas2}^{pref}	S_{cas1}^{pref}	A_1	0	0	0	0	0
		A_2	-300 000	-6 000	5	0.007	0.02
		A_3	-300 000	-1 500	5	0.008	0.04
		A_4	-600 000	-7 500	7	0.008	0.05
	A_5	-1 000 000	0	7	0.008	0.1	

TABLE V.5 – BF-TOPSIS : Matrices de scores S_{cas1}^{pref} (sans A_5) et S_{cas2}^{pref} (avec A_5) en tenant compte des sens de préférence pour chaque critère $g_j, j = 1, \dots, 5$.

V.2.2.4 Comparaison des résultats obtenus

Les tableaux V.6 (cas 1 - sans A_5) et V.7 (cas 2 - avec A_5) fournissent l'ensemble des résultats obtenus en appliquant les deux méthodes ACB (sans ou avec valorisation monétaire de la vie humaine), les deux méthodes AHP (normalisation selon les matrices de préférences de Saaty (1980) ou par la somme) et les quatre méthodes BF-TOPSIS.

méthodes		vecteurs de résultats $[A_1, A_2, A_3, A_4]$	ordre de préférence
ACB	1	$[0, -1.6, -0.4, -3.8].10^5$	$A_1 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_4$
	2	$[0, 2.9, 4.7, 1.4].10^5$	$A_3 \succ A_2 \succ A_4 \succ A_1$
AHP	1	$[0.11, 0.18, 0.32, 0.40]$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	2	$[0.12, 0.31, 0.40, 0.41]$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
BF-TOPSIS	1	$[0.12, 0.54, 0.79, 0.88]$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	2	$[0.12, 0.54, 0.79, 0.88]$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	3	$[0.03, 0.76, 0.96, 0.97]$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	4	$[0.03, 0.76, 0.96, 0.97]$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$

TABLE V.6 – Résultats selon les ACB, AHP et BF-TOPSIS dans le cas 1 (sans A_5).

méthodes		vecteurs de résultats $[A_1, A_2, A_3, A_4, A_5]$	ordre de préférence
ACB	1	$[0, -1.6, -0.4, -3.8, -5.9].10^5$	$A_1 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_4 \succ A_5$
	2	$[0, 2.9, 4.7, 1.4, -0.7].10^5$	$A_3 \succ A_2 \succ A_4 \succ A_1 \succ A_5$
AHP	1	$[0.07, 0.12, 0.20, 0.24, 0.35]$	$A_5 \succ A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	2	$[0.12, 0.25, 0.31, 0.30, 0.39]$	$A_5 \succ A_3 \succ A_4 \succ A_2 \succ A_1$
BF-TOPSIS	1	$[0.12, 0.49, 0.66, 0.69, 0.92]$	$A_5 \succ A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	2	$[0.12, 0.49, 0.66, 0.69, 0.92]$	$A_5 \succ A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	3	$[0.03, 0.68, 0.85, 0.88, 0.97]$	$A_5 \succ A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
	4	$[0.03, 0.68, 0.85, 0.88, 0.97]$	$A_5 \succ A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$

TABLE V.7 – Résultats selon les ACB, AHP et BF-TOPSIS dans le cas 2 (avec A_5).

Pour l'ACB, la comparaison des résultats des cas 1 et 2, pour une même méthode, mettent en évidence qu'il n'y a pas de problème de renversement de rang. Par contre, l'ACB est très sensible à la valorisation monétaire des dommages, ici la vie humaine, avec un ordonnancement différent selon sa prise en compte ou non.

Si le critère environnemental g_5 et l'importance attribuée à chaque critère $g_j, j = 1, \dots, 5$ sont pris en compte, l'AHP modifie la décision en comparaison aux résultats de l'ACB. Selon cette dernière, la meilleure solution est A_1 (méthode 1 de l'ACB) ou A_3 (méthode 2 de l'ACB) alors qu'elle est A_5 ou A_4 si on prend en compte (cas 2) ou pas (cas 1) l'alternative A_5 dans l'analyse du problème. Il convient de rappeler que ce résultat dépend du vecteur \mathbf{w} des coefficients d'importance et qu'une étude de sensibilité des résultats aux variations de \mathbf{w} devrait être menée.

Pour l'AHP, la méthode 1 de normalisation selon la méthode de Saaty (1980) est plus robuste au problème de renversement de rang que la méthode 2 de normalisation par la somme. Pour cette dernière, l'ordre de préférence entre les alternatives est $A_4 \succ A_3$ dans le cas 1 (sans A_5) alors qu'il s'inverse avec $A_3 \succ A_4$ pour le cas 2 (avec A_5). La méthode 1 de normalisation, elle, reste limitée aux cas où le nombre d'alternatives ne dépasse pas sept, ce qui est limitant en pratique.

Comme l'AHP, les méthodes BF-TOPSIS aident à prendre en compte tous les types de critères sans étapes de valorisation monétaire. Pour cet exemple d'application, elles sont toutes robustes au phénomène de renversement de rang. De plus, en comparaison avec la méthode 1 de l'AHP, un grand nombre d'alternatives peut être pris en compte.

V.2.3 Application de l'aide multicritère à la décision en univers incertain

L'application des méthodes ACB, AHP et BF-TOPSIS s'est appuyée sur l'évaluation précise des critères de coût (g_1 et g_2) mais aussi de réduction du risque (valeur espérée des dommages) pour les trois autres. Cependant, l'évaluation de chacun de ces critères et généralement imparfaite et provient de plusieurs sources. De plus, la connaissance sur les états de la nature est limitée.

Dans ce contexte, l'aide multicritère à la décision en univers incertain, basée sur le Raisonnement Évidentiel et développée en section IV.3, est utilisée. L'approche 1 est privilégiée pour l'évaluation de chaque critère dans l'incertain suivie d'une aide multicritère à la décision (p. 185).

V.2.3.1 Évaluation imparfaite des critères en univers incertain

La connaissance sur les états de la nature $S_k \in \mathcal{S}^{BV}$, $k = 1, \dots, 5$, est représentée, en Raisonnement Évidentiel, par la BBA $m^{\mathcal{S}^{BV}}(\cdot)$ (p. 208). De même, les cinq solutions de protection A_i , $i = 1, \dots, 5$, et les cinq critères g_j , $j = 1, \dots, 5$, permettant d'évaluer l'efficacité des actions ont été identifiés précédemment (p. 209). Le cadre de discernement (FoD) de la décision rassemble les quatre labels qualitatifs d'évaluation de l'efficacité dans $\Theta = \{\theta_1 = \text{nulle}, \theta_2 = \text{faible}, \theta_3 = \text{moyenne}, \theta_4 = \text{forte}\}$. Le cadre de la théorie de Dempster Shafer (DST) est utilisé (Shafer 1976).

- Évaluation de la réduction des dommages

Selon le même principe que la figure V.9 (p. 210), une carte d'intensité est établie pour chacun des scénarios S_k , $k = 1, \dots, 5$, en situation initiale et en tenant compte de la mise en place de chacune des solutions protections (A_i , $i = 1, \dots, 5$). Pour rappel, la solution A_1 est celle pour laquelle aucune action de protection n'est mise en œuvre. Deux jeux de cartes d'intensité sont fournis par deux experts indépendants, qui sont les sources d'information s_1 et s_2 . Ces experts sont considérés comme totalement fiables ($\alpha_1 = \alpha_2 = 1$).

Pour chaque scénario S_k , $k = 1, \dots, 5$, chaque expert s_q , $q = 1, 2$, et chaque critère g_j , $j = 3, 4, 5$, les dommages en situation initiale $D_{q,\Omega_j,S_k}(0)$ et attendus en mettant en œuvre chaque action A_i , $D_{q,\Omega_j,S_k}(A_i)$, $i = 1, \dots, 5$, sont calculés selon l'équation (V.1) (p. 191).

Pour chaque solution A_i , chaque critère g_j , chaque scénario S_k et chaque source s_q , la réduction des dommages $\Delta D_{q,\Omega_j,S_k}(A_i) = D_{q,\Omega_j,S_k}(0) - D_{q,\Omega_j,S_k}(A_i)$, $i = 1, \dots, 5$, $j = 3, 4, 5$, $k = 1, \dots, 5$ et $q = 1, 2$, est établie. Cette évaluation est celle de la conséquence des six matrices $\mathbf{C}_{\mathbf{q},\mathbf{j}} = [C_{q,ijk}] = [\Delta D_{q,\Omega_j,S_k}(A_i)]$ de dimensions 5×5 des équations (V.14-V.19).

L'ensemble de cette démarche d'évaluation n'a pas été appliquée sur un cas réel. Les données ci-après sont fictives, l'objectif étant d'analyser l'applicabilité de la démarche.

$$\mathbf{C}_{1,3} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ A_2 & \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 & 5 & 2 \end{pmatrix} \\ A_3 & \begin{pmatrix} 5 & 3 & 1 & 5 & 3 \end{pmatrix} \\ A_4 & \begin{pmatrix} 9 & 7 & 3 & 8 & 6 \end{pmatrix} \\ A_5 & \begin{pmatrix} 9 & 6 & 4 & 10 & 6 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.14})$$

$$\mathbf{C}_{2,3} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ A_2 & \begin{pmatrix} 5 & 4 & 2 & 6 & 2 \end{pmatrix} \\ A_3 & \begin{pmatrix} 6 & 2 & 0 & 6 & 1 \end{pmatrix} \\ A_4 & \begin{pmatrix} 10 & 8 & 3 & 8 & 4 \end{pmatrix} \\ A_5 & \begin{pmatrix} 9 & 8 & 5 & 8 & 4 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.15})$$

$$\mathbf{C}_{1,4} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ A_2 & \begin{pmatrix} 0.009 & 0.005 & 0.002 & 0.010 & 0.003 \end{pmatrix} \\ A_3 & \begin{pmatrix} 0.012 & 0.006 & 0.002 & 0.013 & 0.005 \end{pmatrix} \\ A_4 & \begin{pmatrix} 0.015 & 0.007 & 0.003 & 0.020 & 0.008 \end{pmatrix} \\ A_5 & \begin{pmatrix} 0.009 & 0.006 & 0.004 & 0.009 & 0.003 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.16})$$

$$\mathbf{C}_{2,4} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ A_2 & \begin{pmatrix} 0.010 & 0.006 & 0.001 & 0.012 & 0.003 \end{pmatrix} \\ A_3 & \begin{pmatrix} 0.013 & 0.008 & 0.003 & 0.015 & 0.004 \end{pmatrix} \\ A_4 & \begin{pmatrix} 0.016 & 0.009 & 0.003 & 0.018 & 0.007 \end{pmatrix} \\ A_5 & \begin{pmatrix} 0.010 & 0.008 & 0.002 & 0.010 & 0.003 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.17})$$

$$\mathbf{C}_{1,5} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ A_2 & \begin{pmatrix} 0.03 & 0.05 & 0.06 & 0.03 & 0.07 \end{pmatrix} \\ A_3 & \begin{pmatrix} 0.09 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.06 \end{pmatrix} \\ A_4 & \begin{pmatrix} 0.09 & 0.06 & 0.06 & 0.10 & 0.08 \end{pmatrix} \\ A_5 & \begin{pmatrix} 0.10 & 0.05 & 0.03 & 0.06 & 0.04 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.18})$$

$$\mathbf{C}_{2,5} \triangleq \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ A_2 & \begin{pmatrix} 0.10 & 0.07 & 0.06 & 0.07 & 0.04 \end{pmatrix} \\ A_3 & \begin{pmatrix} 0.09 & 0.08 & 0.05 & 0.09 & 0.04 \end{pmatrix} \\ A_4 & \begin{pmatrix} 0.1 & 0.08 & 0.06 & 0.09 & 0.04 \end{pmatrix} \\ A_5 & \begin{pmatrix} 0.1 & 0.05 & 0.02 & 0.1 & 0.02 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{V.19})$$

• Intervalle des valeurs espérées de réduction des dommages

Pour chacune des six matrices \mathbf{C}_{qj} , $q = 1, 2$, $j = 1, \dots, 5$, la matrice d'intervalles $\mathbf{E}[\mathbf{C}_{qj}]$ est établie selon la méthode développée par Tacnet et Dezert (2011) sur la base des travaux de Yager (2008) (Annexe F.5). Les six matrices correspondantes sont données par les équations (V.20-V.25).

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}_{1,3}] \triangleq \begin{matrix} A_1 & \begin{pmatrix} [0.000, 0.000] \\ [1.100, 4.300] \\ [1.200, 4.800] \\ [3.300, 8.450] \\ [4.200, 9.200] \end{pmatrix} \\ A_2 & \\ A_3 & \\ A_4 & \\ A_5 & \end{matrix} \quad (\text{V.20})$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}_{2,3}] \triangleq \begin{matrix} A_1 & \begin{pmatrix} [0.000, 0.000] \\ [2.000, 5.200] \\ [0.100, 5.500] \\ [3.100, 8.900] \\ [4.650, 8.250] \end{pmatrix} \\ A_2 & \\ A_3 & \\ A_4 & \\ A_5 & \end{matrix} \quad (\text{V.21})$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}_{1,4}] \triangleq \begin{matrix} A_1 & \begin{pmatrix} [0.000, 0.000] \\ [0.002, 0.009] \\ [0.002, 0.012] \\ [0.004, 0.017] \\ [0.004, 0.008] \end{pmatrix} \\ A_2 & \\ A_3 & \\ A_4 & \\ A_5 & \end{matrix} \quad (\text{V.22})$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}_{2,4}] \triangleq \begin{matrix} A_1 & \begin{pmatrix} [0.000, 0.000] \\ [0.001, 0.010] \\ [0.003, 0.013] \\ [0.003, 0.016] \\ [0.002, 0.009] \end{pmatrix} \\ A_2 & \\ A_3 & \\ A_4 & \\ A_5 & \end{matrix} \quad (\text{V.23})$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}_{1,5}] \triangleq \begin{matrix} A_1 & \begin{pmatrix} [0.000, 0.000] \\ [0.034, 0.064] \\ [0.051, 0.085] \\ [0.062, 0.094] \\ [0.031, 0.084] \end{pmatrix} \\ A_2 & \\ A_3 & \\ A_4 & \\ A_5 & \end{matrix} \quad (\text{V.24})$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}_{2,5}] \triangleq \begin{matrix} A_1 & \begin{pmatrix} [0.000, 0.000] \\ [0.043, 0.087] \\ [0.037, 0.085] \\ [0.043, 0.092] \\ [0.015, 0.092] \end{pmatrix} \\ A_2 & \\ A_3 & \\ A_4 & \\ A_5 & \end{matrix} \quad (\text{V.25})$$

• Évaluation imprécise des critères

Un intervalle a été obtenu comme évaluation des critères g_j , $j = 3, 4, 5$. Une distribution de possibilité est définie par le quadruplet $\{a, b, c, d\}$. Un intervalle en est une particulière avec $a = b$ et $c = d$. Par ailleurs, les deux experts fournissent une distribution de possibilité $\pi_{q,ij}$, $q = 1, 2$, $j = 1, 2$ pour évaluer chaque solution A_i , $i = 1, \dots, 5$, selon les deux critères de coût g_1 et g_2 .

Les quadruplets $\{a, b, c, d\}$ représentant les distributions de possibilité ainsi définies sont fournies dans le tableau V.8. L'évaluation de la solution A_1 est particulière. Elle correspond au fait de ne rien faire. Comme elle n'implique aucun coût ni aucune réduction du risque, le score précis et certain de 0 lui est attribué par chacune des sources.

solutions	sources	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
A_i	s_q	$\{a, b, c, d\}$		$\{a, d\}$ car $a = b$ et $c = d$		
A_1	s_1			0,0,0,0		
	s_2			0,0,0,0		
A_2	s_1	$(2, 3, 3, 5) \cdot 10^5$	$(3, 5, 7, 8) \cdot 10^3$	1.1, 4.3	$(2.1, 8.9) \cdot 10^{-3}$	$(3.4, 6.4) \cdot 10^{-2}$
	s_2	$(1, 2, 2, 3) \cdot 10^5$	$(2, 3, 4, 5) \cdot 10^3$	2, 5.2	$(1.2, 10.3) \cdot 10^{-3}$	$(4.3, 8.7) \cdot 10^{-2}$
A_3	s_1	$(2, 4, 4, 6) \cdot 10^5$	$(1, 1.5, 2, 3) \cdot 10^3$	1.2, 4.8	$(2.3, 11.8) \cdot 10^{-3}$	$(5.1, 8.5) \cdot 10^{-2}$
	s_2	$(4, 5, 6, 8) \cdot 10^5$	$(0.5, 1, 1, 2) \cdot 10^3$	0.1, 5.5	$(3.1, 13.1) \cdot 10^{-3}$	$(3.7, 8.5) \cdot 10^{-2}$
A_4	s_1	$(4, 7, 7, 11) \cdot 10^5$	$(4, 7.5, 9, 11) \cdot 10^3$	3.3, 8.45	$(3.5, 16.8) \cdot 10^{-3}$	$(6.2, 9.4) \cdot 10^{-2}$
	s_2	$(5, 7, 8, 11) \cdot 10^5$	$(2.5, 4, 5, 7) \cdot 10^3$	3.1, 8.9	$(3.4, 16.1) \cdot 10^{-3}$	$(4.3, 9.2) \cdot 10^{-2}$
A_5	s_1	$(9, 10, 12, 14) \cdot 10^5$	0, 0, 0, 0	4.2, 9.2	$(3.7, 8.4) \cdot 10^{-3}$	$(3.1, 8.4) \cdot 10^{-2}$
	s_2	$(8, 9, 10, 11) \cdot 10^5$	0, 0, 0, 0	4.65, 8.25	$(2.1, 9.3) \cdot 10^{-3}$	$(1.5, 9.2) \cdot 10^{-2}$

TABLE V.8 – Exemple 5 : évaluations imprécises $\pi_{q,ij}$ de chaque solution A_i , $i = 1, \dots, 5$, selon chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 5$, fournies par chaque source s_q , $q = 1, 2$.

• Imperfection des préférences du décideur : modèles de transposition

Pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, le « modèle de transposition » rassemble les sous-ensembles flous μ_{j,θ_e} , $e = 1, \dots, n = 4$ (figure V.10). Ils prennent en compte les sens de préférence décroissant pour les critères de coût g_1 and g_2 et croissant pour les critères de réduction du risque g_3 à g_5 .

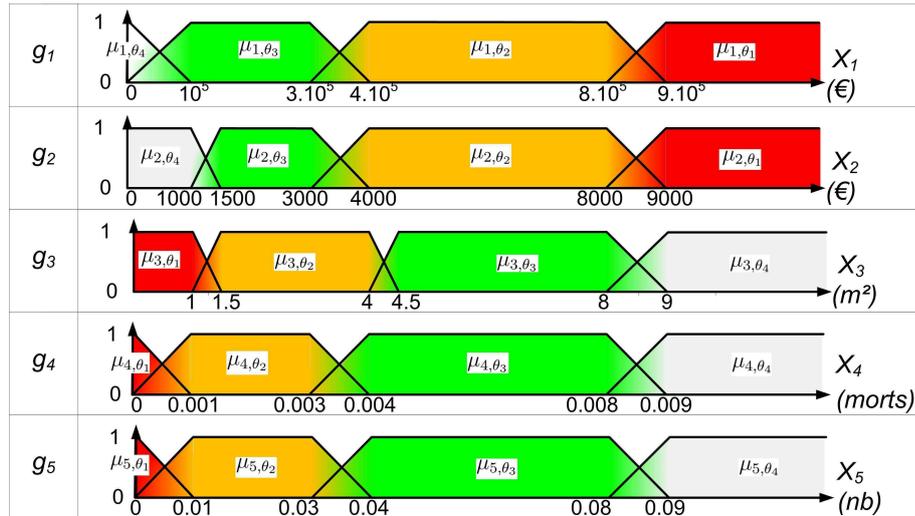


FIGURE V.10 – Exemple 5 : définition des « modèles de transposition » pour les cinq critères.

V.2.3.2 Application de ER-MCDA-Rank pour classer les alternatives

Le problème de décision est de classer les solutions de protection dans le bassin d'enjeux pour choisir la meilleure. La méthode ER-MCDA-Rank, qui a été développée dans le chapitre IV (p. 178), peut aider à atteindre cet objectif. Elle est appliquée.

- ER-MCDA-Rank-1 : établissement de la matrice de BBAs $M^{\Theta^{c.w.}}$.

Pour cette étape, chaque distribution de possibilité du tableau V.8 est transposée dans le « modèle de transposition » du critère correspondant dans la figure V.10.

Pour cela, la nouvelle méthode de transposition (section IV.2.2, p. 167) est utilisée pour établir les BBAs $m_{q,ij}^{c.w.}(\cdot)$, $q = 1, 2$, $i = 1, \dots, 5$, $j = 1, \dots, 5$. Le FoD considéré est $\Theta^{c.w.} = \Theta \cup \{\theta^c\}$, avec θ^c l'élément de clôture selon Yager (1983) et $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$.

Les BBAs $m_{q,ij}^{c.w.}(\cdot)$ ainsi obtenues ne sont pas affaiblies car les deux sources s_q sont considérées comme totalement fiables. Pour chaque A_i et chaque g_j , les deux BBAs sont combinées selon la règle de fusion PCR6 pour obtenir la BBA $m_{ij}^{c.w.}(\cdot)$, donnée dans le tableau V.9.

Les BBAs intermédiaires ainsi obtenues permettent de prendre en compte l'imprécision initiale de l'évaluation de chaque critère. Par exemple, pour l'action A_4 et le critère g_3 , une masse de 0.595 est affectée à l'ignorance partielle entre θ_2 et θ_3 alors qu'une masse de 0.405 est affectée à une ignorance encore plus importante entre θ_2 , θ_3 et θ_4 . Cela correspond à une imprécision importante de l'évaluation fournie par chacune des sources dans le tableau V.8 (évaluations repérées en gras).

A_i	éléments focaux	$m_{i1}^{c.w.}(\cdot)$	$m_{i2}^{c.w.}(\cdot)$	$m_{i3}^{c.w.}(\cdot)$	$m_{i4}^{c.w.}(\cdot)$	$m_{i5}^{c.w.}(\cdot)$
A_1	$\theta_1 \cup \theta^c$	0	0	1	1	1
	$\theta_4 \cup \theta^c$	1	1	0	0	0
A_2	$\theta_2 \cup \theta^c$	0	0.667	0.4	0	0
	$\theta_3 \cup \theta^c$	1	0	0	0	1
	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	0	0.333	0.6	0.1	0
	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4 \cup \theta^c$	0	0	0	0.9	0
A_3	θ^c	0	0.167	0	0	0
	$\theta_2 \cup \theta^c$	1	0	0	0	0
	$\theta_3 \cup \theta^c$	0	0.333	0	0	0.75
	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	0	0	0.4	0	0
	$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	0	0	0.6	0	0
	$\theta_4 \cup \theta^c$	0	0.167	0	0	0
	$\theta_3 \cup \theta_4 \cup \theta^c$	0	0.333	0	0.1	0.25
A_4	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4 \cup \theta^c$	0	0	0	0.9	0
	$\theta_2 \cup \theta^c$	0.55	1	0	0	0
	$\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta^c$	0.45	0	0	0	0
	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	0	0	0.595	0	0
	$\theta_3 \cup \theta_4 \cup \theta^c$	0	0	0	0.8	1
A_5	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4 \cup \theta^c$	0	0	0.405	0.2	0
	$\theta_1 \cup \theta^c$	1	0	0	0	0
	$\theta_3 \cup \theta^c$	0	0	0.75	0.6	0.1
	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta^c$	0	0	0	0	0.5
	$\theta_4 \cup \theta^c$	0	1	0	0	0
A_5	$\theta_3 \cup \theta_4 \cup \theta^c$	0	0	0.25	0.1	0
	$\theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4 \cup \theta^c$	0	0	0	0.3	0.4

TABLE V.9 – Exemple 5 : BBAs $m_{ij}^{c.w.}(\cdot)$ obtenues pour chaque solution A_i , $i = 1, \dots, 5$ et chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 5$ (ER-MCDA-Rank-1).

• ER-MCDA-Rank-2 : établissement de la matrice de BBAs \mathbf{M}^{A^6}

1. Pour chaque solution A_i , $i = 1, \dots, 5$ et chaque critère g_j , $j = 1, \dots, 5$, la BBA $m_{ij}^{c.w.}(\cdot)$ est extraite du tableau V.9. Pour choisir le label $\hat{\theta}(A_i, g_j)$, l'équation IV.14 (p. 173) est appliquée mais en limitant la décision aux éléments $X = \theta_e \cup \theta^c$, avec θ_e un singleton de Θ . Selon Dezert et al. (2016a), l'équation (V.26) est alors appliquée pour le choix de $\hat{\theta}(A_i, g_j)$ et l'équation (V.27) pour le calcul de l'indicateur de qualité correspondant.

$$\hat{X} = \arg \min_{X \in 2^{\Theta^{c.w.}} \setminus \{\emptyset\} \text{ s.t. } X = \theta_e \cup \theta^c} d_{BI}(m, m_X) \quad (\text{V.26})$$

$$q(\hat{X}) \triangleq 1 - \frac{d_{BI}(m^\ominus, m_X^\ominus)}{\sum_{X \in 2^\Theta \setminus \{\emptyset\} \text{ s.t. } X = \theta_e \cup \theta^c} d_{BI}(m, m_X)} \quad (\text{V.27})$$

2. Sur le même principe que la première application de la méthode ER-MCDA-Rank (p. 181), une transformation linéaire est retenue avec $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 2$, $\theta_3 = 3$ et $\theta_4 = 4$. La matrice de scores $\mathbf{S} = [x_{ij}]$ est ainsi établie. Les scores et indicateurs de qualité correspondant sont donnés dans le tableau V.10.

g_j, w_j	$g_1, 0.08$		$g_2, 0.04$		$g_3, 0.10$		$g_4, 0.46$		$g_5, 0.32$	
A_i	x_{i1}	$q(i, 1)$	x_{i2}	$q(i, 2)$	x_{i3}	$q(i, 3)$	x_{i4}	$q(i, 4)$	x_{i5}	$q(i, 5)$
A_1	4	1.000	4	1.000	1	1.000	1	1.000	1	1.000
A_2	3	1.000	2	0.921	2	0.861	2 ou 3	0.763	3	1.000
A_3	2	1.000	3	0.837	2 ou 3	0.774	3 ou 4	0.763	3	0.940
A_4	2	0.894	2	1.000	2 ou 3	0.781	3 ou 4	0.788	3 ou 4	0.793
A_5	1	1.000	4	1.000	3	0.940	3	0.891	3	0.794

TABLE V.10 – Exemple 5 : scores x_{ij} , et qualité de ces scores $q(\hat{\theta}(A_i, g_j)) (= q(i, j))$, établis à partir des BBAs du tableau V.9 (ER-MCDA-Rank-2).

Les résultats intermédiaires de ce tableau V.10 mettent en évidence que certaines décisions intermédiaires ne sont pas possibles sur la base du formalisme proposé. Pour ces cas de figure, Dezert et al. (2016a) a proposé de réaliser un tirage aléatoire entre les deux scores. Les différentes configurations ont été analysées. À titre d'exemple, deux attitudes extrêmes ont été considérées :

- l'attitude pessimiste considère tous les scores les plus faibles avec $x_{24} = x_{33} = x_{43} = 2$ et $x_{34} = x_{44} = x_{45} = 3$;
- l'attitude optimiste prend en compte les scores les plus élevés avec $x_{24} = x_{33} = x_{43} = 3$ et $x_{34} = x_{44} = x_{45} = 4$.

La matrice de BBAs correspondante $\mathbf{M}^{A^6} = m_{ij}^{A^6}(\cdot)$ (Annexe F.4) est établie, pour chacune des deux attitudes.

• ER-MCDA-Rank-3 : application deux attitudes extrêmes

Pour chaque A_i , $i = 1, \dots, 5$ et chaque g_j , $j = 1, \dots, 5$, la BBA $m_{ij}^{A^6}(\cdot)$ est affaiblie par le coefficient de fiabilité $q(\hat{\theta}(A_i, g_j))$. L'application des étapes de ER-MCDA-Rank-3 permet d'obtenir le tableau V.11 de résultats. Les cinq solutions de protection sont alors classées selon, respectivement, une attitude pessimiste ou optimiste définie par le choix des scores dans le tableau V.10. Ces résultats mettent en évidence une incohérence des classements des alternatives selon les décisions intermédiaires aléatoires prises.

A_i	attitude pessimiste		attitude optimiste	
	$C(A_i, A^{\text{best}})$	classement	$C(A_i, A^{\text{best}})$	classement
A_1	0.0296	5	0.0296	5
A_2	0.3271	4	0.6570	4
A_3	0.7373	2	0.9104	2
A_4	0.9119	1	0.8881	3
A_5	0.3719	3	0.9425	1

TABLE V.11 – Exemple 5 : résultats pour classement des solutions de protection selon leur efficence selon deux attitudes extrêmes (ER-MCDA-Rank-3).

V.2.3.3 Résultats : la propagation de l'imperfection permet de tracer les décisions intermédiaires aléatoires

L'application de cette approche combinée permet de représenter les états de la nature dans le cadre théorique du Raisonnement Évidentiel, comme alternative à la pratique de représentation selon des probabilités subjectives. L'évaluation imprécise de la valeur espérée est propagée dans le processus d'aide à la décision par l'indicateur de qualité calculé pour la décision intermédiaire.

Les résultats de ce cas d'application mettent en évidence les limites de la propagation de l'imperfection de l'information dans l'ensemble du processus pour permettre le classement des alternatives. Si l'évaluation des critères n'est pas suffisamment précise, un choix aléatoire doit être réalisé et va conditionner l'ensemble des résultats et le classement final. Cette situation met en évidence que, dans ce cas d'application, l'évaluation des critères g_j , $j = 3, 4, 5$, doit être précisée pour classer les alternatives.

Synthèse de la section V.2

L'aide à la décision intégrée, développée dans cette thèse, a été comparée avec les méthodes classiques d'aide à la décision, pour un exemple à l'échelle du bassin d'enjeux.

L'apport des méthodes d'analyse multicritère a été analysé en comparaison à l'analyse coûts bénéfiques (ACB) utilisée classiquement. Les dommages intangibles peuvent être considérés. Les méthodes BF-TOPSIS sont plus robustes au phénomène de renversement de rang que l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) pour cet exemple d'application.

L'aide multicritère à la décision en univers incertain, basée sur le Raisonnement Évidentiel, a été appliquée. La représentation et la propagation des différentes formes d'imperfection de l'information qui affectent l'évaluation des critères de coût et de réduction des dommages, les préférences du décideur et la connaissance sur les phénomènes sont permises. De plus, plusieurs sources d'information inégalement fiables peuvent être combinées.

À l'issue de la propagation, l'imperfection peut être telle qu'une décision finale n'est pas possible, d'autant plus que l'imperfection sur l'évaluation des dommages pour chaque scénario n'a pas été considérée. Cependant, la traçabilité est assurée et les étapes auxquelles des décisions intermédiaires doivent être prises de manière aléatoire sont identifiées.

Il est à noter que la représentation de la connaissance sur les scénarios par des fonctions de masse en Raisonnement Évidentiel a été proposée sans correspondance avec un cas réel. Une méthode d'élicitation reste à proposer pour l'application aux phénomènes naturels.

CHAPITRE VI

Discussion

Les mesures de protection font partie intégrante du processus de gestion intégrée du risque torrentiel. Elles ont pour objectif de le réduire. Cet objectif est évolutif dans le temps et dans l'espace. Il dépend également des différentes échelles de mesures : les objectifs sont techniques aux échelles des ouvrages et dispositifs ; ils sont socio-économiques à l'échelle du bassin d'enjeux. Dans ce contexte, la définition et l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection en termes d'atteinte de ces objectifs est nécessaire. Cependant, en l'absence de méthodologie harmonisée, la traçabilité du processus d'évaluation est limitée. Les indicateurs et critères considérés sont nombreux et évalués dans un contexte d'information imparfaite, pouvant provenir de sources multiples et inégalement fiables.

Cette thèse considère l'évaluation de l'efficacité comme un problème de décision multi-échelle. Dans le cadre d'une approche constructive, elle a pour ambition de développer un processus d'aide à la décision qui intègre les différentes échelles. Les approches de description des contextes sont associées à une démarche historique pour analyser l'évolution relative des objectifs. La méthode APTE de la sûreté de fonctionnement est retenue pour aider à structurer l'analyse multi-échelle (micro, méso, macro) et formuler les problèmes de décision associés.

Les méthodes d'aide multicritère à la décision sont identifiées comme pertinentes pour aider à répondre aux problèmes de choix, de tri, de rangement qui sont posés à chacune des échelles. L'association des théories des possibilités et des ensembles flous est choisie pour représenter l'évaluation imparfaite de chaque critère, fournie par chaque source, et la transposer dans le cadre théorique du Raisonnement Évidentiel. Les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel sont alors retenues pour aider à décider selon plusieurs critères, en univers incertain. Leur association doit permettre de propager l'ensemble de l'imperfection de l'information dans le processus d'aide à la décision.

La décision finale de gestion du risque repose sur l'évaluation de la réduction des dommages que les mesures de protection permettent. L'analyse de risque est le cadre retenu pour intégrer les évaluations menées aux micro et méso-échelles des ouvrages et dispositifs de protection à la macro-échelle du bassin d'enjeux. Les méthodes avancées d'aide à la décision qui permettent ces évaluations sont alors partie intégrante de cette analyse de risque.

Cette discussion analyse tout d'abord les apports de cette thèse selon les trois axes de développements identifiés (figure VI.1). Les limites méthodologiques sont ensuite mises en évidence pour proposer des perspectives de développements des processus et méthodes d'aide à la décision mais aussi de l'analyse multi-échelle du risque en univers incertain. Finalement, l'intérêt méthodologique pour la gestion opérationnelle des mesures de protection est discuté.

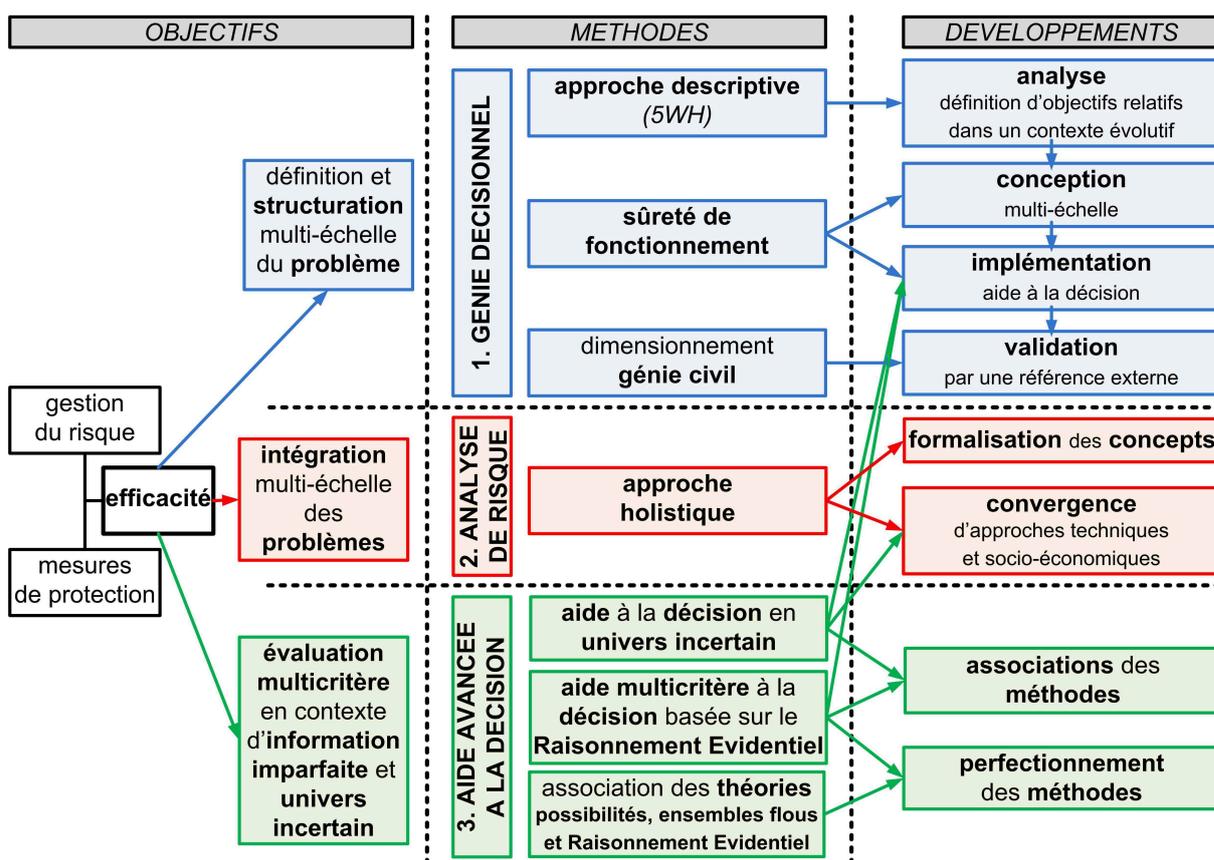


FIGURE VI.1 – Les trois axes de développements.

VI.1 Apports méthodologiques

Les apports méthodologiques concernent (figure VI.1) :

- la contribution aux différentes étapes du processus d'aide à la décision dans le cadre du génie décisionnel ;
- une approche holistique d'analyse et d'intégration du risque ;
- l'accompagnement du développement des méthodes d'aide multicritère à la décision en contexte d'information imparfaite.

VI.1.1 Contribution au génie décisionnel

Le processus d'aide à la décision se divise en quatre étapes : la description du contexte, la formulation du problème de décision, son implémentation et sa validation. Ce processus est générique pour tout problème de décision établi à un moment et une échelle donnés. Pour l'implémentation, il existe plusieurs types de modèles mais l'optimisation reste le cadre théorique privilégié. La validation d'une décision est un enjeu particulier étant donnée la subjectivité impliquée.

Les développements réalisés contribuent à ces différentes étapes. Ils ont concerné plusieurs disciplines pour décrire un contexte de décision qui évolue dans le temps et dans l'espace, pour concevoir et formuler un problème de décision multi-échelle, pour aider à choisir parmi les différentes méthodes d'aide à la décision existantes et pour appuyer la validation sur la base d'une référence externe.

- **L'approche historique appuie l'analyse relative des contextes décisionnels**

La définition de l'objectif conditionne la décision qui dépend du contexte dans lequel l'objectif est fixé. Ce dernier évolue dans le temps. Sa relativité doit être prise en compte pour aider la décision actuelle. Les approches descriptives, comme la méthode « 5WH » de Lasswell (1960), permettent de décrire le contexte de décision en identifiant le décideur, l'objet de la décision, l'objectif et les moyens techniques. Elles sont cependant limitées à une description à un moment et un lieu donné.

L'approche développée en section III.2 associe une analyse historique et géographique à la démarche descriptive de la méthode « 5WH ». La variabilité dans le temps et dans l'espace est ainsi considérée. Pour un objet de décision donné, l'analyse est organisée selon les thèmes représentés par les trois questions restant à traiter selon la méthode « 5WH » : évolution de la structure de décision, des objectifs et des techniques disponibles.

Cette démarche est, par exemple, appliquée à l'analyse de l'évolution du contexte d'implantation des mesures de protection contre les phénomènes torrentiels en montagne. Elle permet d'identifier l'évolution des objectifs. Elle permet également de comprendre l'état des connaissances et des contraintes techniques au moment de leur réalisation. La décision prise à ce moment-là ne serait plus la même aujourd'hui, étant donnée l'évolution de ces connaissances et contraintes.

- **La sûreté de fonctionnement pour structurer un problème de décision multi-échelle**

Un problème de décision peut impliquer plusieurs échelles de systèmes (micro, méso, macro). Cependant, l'effet d'une décision prise à la micro-échelle (ou méso) sur la décision à la méso-échelle (ou macro) n'est pas formulé explicitement. Par ailleurs, la méthode APTE de la sûreté de fonctionnement (SdF) est utilisée pour aider à concevoir le problème, mais est limitée à une échelle de système donnée comme, par exemple, un barrage hydraulique.

Dans la section III.1, la méthode APTE est adaptée au contexte multi-échelle. i) L'analyse structurelle permet de décomposer chaque système. Le système à la micro-échelle est un composant du système à la méso-échelle, qui est lui-même un composant du système à la macro-échelle. ii) L'analyse fonctionnelle identifie les fonctions à réaliser par chaque système et par ses composants. Les fonctions de service d'un système à micro-échelle (ou méso) sont les fonctions techniques qu'il doit réaliser pour que le système à méso-échelle (ou macro) assure sa fonction. iii) L'analyse des modes de défaillance permet de définir les scénarios de défaillance impliquant les différentes échelles : la défaillance à une fonction technique à la micro-échelle peut être à l'origine d'une défaillance du système à la méso-échelle. L'évaluation de l'importance de chaque composant selon Birnbaum (1968) permet de faire le lien entre les échelles de systèmes. Elle est la part relative de l'influence de la fiabilité du composant sur la fiabilité du système auquel il appartient.

Ce développement est, par exemple, appliqué aux dispositifs de consolidation et stabilisation des torrents. Il permet de structurer l'analyse d'un problème multi-échelle en identifiant les objectifs fonctionnels à chaque échelle de système et les liens entre ces échelles.

- **Expertise pour identifier les indicateurs et critères**

Pour chaque problème de décision, des indicateurs permettent d'évaluer un critère. Ils sont généralement évalués selon des observations visuelles. En l'absence d'une méthode commune d'analyse, leur définition est hétérogène. De même, les échelles d'évaluation sont variables, même si elles sont établies selon le principe commun d'une évaluation par des labels linguistiques. La performance selon un mode de défaillance donné est considérée comme un des critères d'évaluation du système.

Deux approches ont été comparées, en section III.1, pour aider l'identification des critères et indicateurs. L'approche 1, dite « simplifiée », identifie les indicateurs représentatifs de chaque mode de défaillance et les considère comme des critères directement évalués. L'approche 2, dite « formalisée », consiste à mettre en œuvre une analyse de chaque mode de défaillance et à extraire les indicateurs correspondant pour les formaliser.

Elles sont, par exemple, appliquées aux échelles des ouvrages et dispositifs de correction torrentielle. La mise à disposition des deux approches laisse la possibilité d'adapter l'identification des indicateurs et critères aux contraintes opérationnelles de temps disponible limité. L'approche 1 se rapproche de la pratique déjà existante. Cependant, de manière nouvelle, une échelle d'évaluation est formalisée selon une mesure physique et non pas transformée directement en une évaluation linguistique. L'approche 2, déjà pratiquée dans le domaine des ouvrages hydrauliques, permet de définir les indicateurs à prendre en compte de manière exhaustive et de séparer clairement les indicateurs et les critères. Elle est formalisée, de manière nouvelle, dans un contexte multi-échelle.

- Choisir la méthode d'aide à la décision

- ◇ *Choisir la méthode d'agrégation : optimisation, système à base de règles, analyse multicritère*

Les évaluations des indicateurs sont d'abord agrégées pour évaluer différents critères, qui sont ensuite agrégés pour aider la décision. Plusieurs méthodes sont candidates pour réaliser ces étapes : l'optimisation, l'optimisation multicritère, les systèmes à base de règles, les méthodes d'agrégation multicritère totale ou partielle.

L'état de l'art des sciences de la décision (section II.1) met en évidence les limites théoriques connues à l'optimisation, dont l'aspect monocritère et de méthode « de décision » plutôt que d'« aide à la décision ». Ces limites affectent la méthode d'analyse coûts bénéfiques (ACB) utilisée en pratique pour choisir une solution de protection selon l'efficacité économique : elle ne peut pas considérer les dommages intangibles. Les systèmes à base de règles (SBC) sont établis de manière déductive et s'appuient sur des règles logiques alors que les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC), comme l'analyse multicritère hiérarchique (AHP), tiennent compte de l'élicitation des préférences du décideur entre les critères. Dès lors, les SBC sont privilégiées pour des problèmes liés à des processus physiques et les AMC pour des décisions conditionnées par les préférences du décideur. L'AHP est comparée à l'ACB, sur un exemple particulier, pour choisir une solution selon son efficacité socio-économique.

L'apport de cette analyse est d'aider au choix d'une méthode d'agrégation. Les SBC sont définitivement retenus pour agréger les évaluations des indicateurs. Une fois la performance établie pour chaque mode de défaillance, l'AMC est adaptée de manière nouvelle au problème d'évaluation technique d'un système en section IV.1 : on considère que l'évaluation du système dépend de préférences subjectives entre les performances vis-à-vis des différents modes de défaillance. Comme toute AMC, l'AHP peut remplacer l'ACB pour évaluer l'efficacité économique des solutions de protection en tenant compte des dommages intangibles.

- ◇ *Adapter les méthodes basées sur le Raisonnement Évidentiel*

Le Raisonnement Évidentiel (ER) permet de représenter les différentes formes d'imperfection et de combiner plusieurs sources. Il est retenu comme cadre de représentation et de propagation de l'imperfection de l'information. Tacnet (2009) a initié l'adaptation du cadre du ER au domaine des risques naturels en développant la méthodologie ER-MCDA. Depuis, de nouvelles méthodes d'aide à la décision (AD) ont été développées en Raisonnement Évidentiel mais n'ont pas été adaptées à un contexte réel. Elles permettent de répondre à deux types de problèmes : multicritère ou décision en univers incertain.

Pour un problème multicritère, la méthodologie ER-MCDA trie les alternatives en tenant compte de l'imperfection de l'évaluation des critères. La méthode Soft Electre Tri (SET) de Dezert et Tacnet (2012b) trie les alternatives selon des évaluations précises des critères. Les quatre méthodes BF-TOPSIS de Dezert et al. (2016c) classent les alternatives dans un pré-ordre total sur la base d'évaluations précises et en étant particulièrement robustes au renversement de rang. Pour un problème d'aide à la décision en univers incertain, la conséquence de chaque alternative est évaluée pour différents états de la nature. Sur cette base, la méthode FCOWA-ER de Han et al. (2012) perfectionne les travaux initiaux de Tacnet et Dezert (2011) en Raisonnement Évidentiel.

De manière nouvelle, on adapte les formalismes de l'aide multicritère à la décision et du Raisonnement Évidentiel aux problèmes de décision multi-échelle dans le domaine des risques naturels : par exemple, l'évaluation de l'efficacité structurale et fonctionnelle aux échelles des ouvrages (micro) et dispositifs (méso) de correction torrentielle ; l'efficacité économique de solutions de protection torrentielle à l'échelle du bassin d'enjeux (macro).

La comparaison des méthodes sur des cas d'application simplifiés, mais concrets, aide à identifier la plus adaptée au problème posé. Pour classer des alternatives selon des évaluations précises des critères, la robustesse des méthodes BF-TOPSIS au phénomène de renversement de rang est confirmée par rapport à l'analyse multicritère hiérarchique. La méthode ER-MCDA est privilégiée à la méthode SET pour traiter des problèmes de tri : sa complexité calculatoire est moins importante et elle tient compte de l'imperfection de l'évaluation des critères. La méthode FCOWA-ER peut être adaptée au contexte des risques naturels. Pour cela, la connaissance sur les phénomènes naturels doit être représentée par une fonction de masse en Raisonnement Évidentiel.

- **Une approche de validation/calibration des méthodes d'aide à la décision**

Les méthodes d'aide à la décision sont souvent utilisées dans des cadres ou contextes où la décision ne se prend que de manière unique. La validation théorique comprend un cercle entre l'analyste et le décideur. La démarche proposée établit un lien entre ces méthodes et les approches déductives : elle enrichit et valorise le processus d'expertise. L'évaluation des indicateurs et critères ainsi que des décisions associées est toujours dépendante du choix de seuils. La méthodologie générique de calibration de l'évaluation d'un critère à partir d'un indicateur en tient compte. Elle s'appuie sur l'établissement d'une référence à partir de modèles extérieurs.

Cette approche quantifiée fait le lien avec des méthodes d'ingénierie classique. Par exemple, elle est appliquée à l'évaluation de l'affouillement d'un ouvrage de stabilisation torrentielle en se reposant sur un modèle simplifié de génie civil et les normes des Eurocodes. Cette démarche peut être appliquée à tout type de modèle et aux différents indicateurs. Elle ouvre la voie à la confrontation entre les modèles d'agrégation multicritère et les modèles déterministes.

VI.1.2 Une approche holistique d'analyse et d'intégration du risque

Le risque naturel est classiquement défini comme le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité. En agissant sur les phénomènes, les mesures de protection ont pour objectif de réduire l'aléa. Leur efficacité est alors définie par rapport à la réduction du risque qu'elles permettent. Cependant, la prise en compte des mesures de protection et de leur vieillissement dans le temps n'est ni formalisée, ni tracée dans le processus d'analyse de cette réduction du risque.

Une approche holistique a été développée pour aider à formaliser leur intégration au processus d'analyse. Elle contribue ainsi au développement méthodologique de l'analyse du risque naturel.

- Replacer la protection au cœur de l'analyse multi-échelle du risque

Il est communément admis que les mesures de protection ont pour objectif de réduire le risque. L'analyse de cette réduction repose sur la comparaison des conséquences en situation initiale (sans tenir compte des mesures) et en situation où leur effet est considéré. Cet effet est établi à la macro-échelle alors qu'il dépend de l'efficacité locale de la mesure à réaliser ses fonctions à la micro et méso-échelle. D'une part, le lien entre efficacité locale et effet distant n'est pas établi. D'autre part, la diminution de l'efficacité des mesures dans le temps, du fait du vieillissement, n'est pas considérée en termes de réduction des dommages (figure VI.2).

La démarche intégrée développée en section V.1 remplace les mesures de protection au cœur de l'analyse du risque. L'évaluation multi-temporelle et multi-échelle de l'efficacité des mesures de protection conditionne l'évaluation du risque résiduel. Elle devient un résultat d'analyse de l'efficacité des mesures de protection. Les décisions qui concernent les mesures de protection (maintenance, nouvelle construction) sont alors prises en considérant cette évaluation multi-échelle. Une fois ces décisions prises, une nouvelle évaluation de l'efficacité est menée dans le cadre d'un processus itératif (figure VI.2).

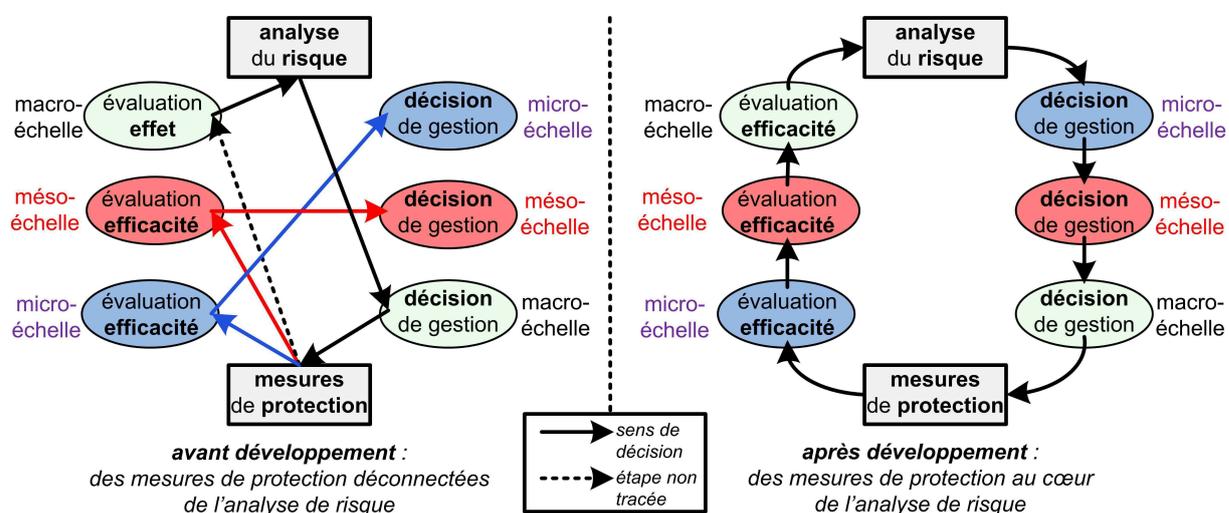


FIGURE VI.2 – L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est maintenant au cœur de l'analyse du risque et de la gestion qui en découle.

- Définir les concepts d'efficacité et formaliser leur évaluation

L'efficacité est un concept polymorphe, ce qui le rend ambigu. Par conséquence, l'évaluation qui en est faite est hétérogène. Sa définition, puis sa formalisation, sont un préalable nécessaire à son évaluation.

Pour améliorer les conditions d'évaluation de l'efficacité et des concepts qui lui sont associés, deux phases sont mises en œuvre. i) Tout d'abord, les concepts sont identifiés, définis et leurs interrelations formalisées dans un schéma conceptuel (section III.1). Ce dernier est établi pour un système, quel qu'il soit. Les concepts principaux associés à l'efficacité, qui doivent également être évalués, sont extraits : l'utilité, l'adaptation, l'importance, l'effet, la capacité, la performance, la sécurité et l'efficacité. ii) Ensuite, un formalisme est proposé en section V.1 pour aider à évaluer ces concepts aux différentes échelles de systèmes (micro, méso, macro). Les mesures de protection ayant pour objectif de réduire les dommages, le formalisme de l'évaluation de cette réduction est utilisé.

Cette démarche de formalisation conceptuelle permet de préciser les différents concepts utilisés en pratique, mais qui n'étaient pas clairement explicités. Elle propose, de manière nouvelle, un formalisme adapté à l'évaluation de ces concepts pour des systèmes qui sont des mesures de protection contre les risques.

- **Faire converger les approches techniques et socio-économiques**

L'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est maintenant au cœur de l'analyse de la réduction du risque. La mesure doit réaliser des fonctions à chacune de ses échelles : ce sont des objectifs techniques. La réalisation de ces fonctions techniques permet de réduire le risque, qui est évalué selon une dimension socio-économique. Un objectif de réduction du risque est fixé. L'efficacité peut donc être évaluée selon des composantes techniques (structural, fonctionnel) ou socio-économiques. Généralement, l'évaluation de ces deux types d'efficacité est réalisée selon des processus indépendants, alors que l'évaluation de la composante socio-économique à macro-échelle dépend de l'évaluation des composantes techniques aux micro et méso-échelles (figure VI.2).

L'application critique de l'analyse coûts bénéfiques (ACB) en section V.2 en est un exemple. Elle illustre l'absence de prise en compte formelle de la composante technique de l'efficacité. Des cartes d'intensité sont directement établies en tenant compte ou pas des mesures de protection.

La démarche intégrée développée en section V.1 formalise un processus d'analyse multi-échelle qui permet de faire le lien entre les composantes techniques et socio-économiques. Tout d'abord, l'objectif socio-économique conditionne l'objectif technique. Ensuite, l'évaluation de l'efficacité relative à l'objectif technique conditionne l'évaluation de la conséquence socio-économique en termes de réduction des dommages, et donc du risque dans un cadre probabiliste (figure VI.2).

VI.1.3 Contribution au développement de l'aide multicritère à la décision en contexte d'information imparfaite

Les développements du chapitre IV ont contribué à celui des méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel i) en les perfectionnant sur certains aspects méthodologiques de représentation de l'imperfection de l'information et de décision et ii) en les associant pour une aide à la décision en univers incertain, selon plusieurs critères.

- **Perfectionner les méthodes existantes**

L'aide à la décision basée sur le Raisonnement Évidentiel dépend de trois étapes successives : i) La connaissance d'une source d'information est représentée par une fonction de masse (BBA), pour un cadre de discernement (FoD) de la décision donné. ii) Plusieurs BBAs fournies pour un même FoD sont combinées, en tenant compte de la fiabilité ou de l'importance des sources. iii) Étant donnée la BBA issue de la combinaison, la décision consiste à choisir un élément (singleton) ou un sous-ensemble du FoD. Les développements d'outils méthodologiques concernent spécifiquement le premier et le troisième points. Leurs apports sont analysés ci-dessous.

◇ *Transposer l'ensemble de la connaissance disponible*

La méthodologie ER-MCDA établit, en première étape, une fonction de masse (BBA) pour représenter l'évaluation imparfaite d'un critère fournie par une source. Chaque critère est évalué selon une échelle de mesure spécifique. La source fournit une évaluation imprécise du critère par une distribution de possibilité. En parallèle, « un modèle de transposition » établit le niveau d'appartenance d'une mesure de ce critère à chaque élément du cadre de discernement final (FoD).

Sur cette base, une méthode de transposition permet d'établir la BBA de l'évaluation imprécise dans le FoD. Cependant, cette méthode est basée sur une transformation géométrique et s'appuie sur l'hypothèse forte d'une distribution uniforme de la fonction de masse. Elle fournit finalement une BBA bayésienne : une masse positive n'est affectée qu'aux singletons du FoD. Elle ne permet pas de représenter l'ignorance partielle ou totale correspondant à une évaluation initiale imprécise.

Le développement réalisé améliore la méthode de transposition sur ces deux points. Elle s'affranchit de l'hypothèse d'une distribution uniforme de la fonction de masse. Elle produit une BBA pour laquelle une masse positive peut être affectée à tous les sous-ensembles du cadre de discernement. Cette nouvelle méthode s'appuie sur le calcul de la mesure de la possibilité d'un sous-ensemble (Zadeh 1978), sur la correspondance entre mesure de possibilité et mesure de plausibilité (Dubois et Prade 1987) et sur l'établissement d'une fonction de masse à partir des mesures de plausibilité en monde ouvert, issu des travaux de Yager (1983).

Cette nouvelle méthode permet ainsi de propager l'imprécision de l'évaluation initiale fournie par une source dans la BBA finale obtenue, pour un « modèle de transposition » donné.

◇ *Aider à décider en identifiant la qualité de la décision recommandée*

De manière classique en Raisonnement Évidentiel, la décision recommandée à partir d'une fonction de masse (BBA) est définie par une règle de décision qui représente l'attitude du décideur (pessimiste, optimiste, ou de compromis). Ces règles ne permettent pas d'assortir un niveau de confiance à la décision recommandée. Or la confiance attribuée à une décision prise pour une masse dispersée entre les éléments du FoD doit être plus faible que celle qui accompagne une décision basée sur une masse totalement affectée à l'élément choisi. Essaid et al. (2014) ont introduit le principe d'une nouvelle méthode de décision basée sur le calcul de la distance selon une métrique réelle entre deux BBAs. La distance utilisée était celle de Jusselme et al. (2001). Des travaux récents ont développé le calcul d'une nouvelle distance basée sur l'intervalle de croyance qui produit de meilleurs résultats (Han et al. 2014).

Cette thèse participe au développement de la nouvelle méthode de décision portée par l'ONERA. Basée sur la méthode de Essaid et al. (2014), la distance de Jusselme et al. (2001) est remplacée par celle développée par Han et al. (2014). Le calcul d'un coefficient de qualité est associé à la décision finalement recommandée. Pour les mêmes exemples théoriques simplifiés, l'application de la nouvelle méthode fournit des résultats plus cohérents et de meilleure qualité qu'en utilisant la distance de Jusselme et al. (2001).

Le premier apport de cette nouvelle méthode est donc l'amélioration de la méthode de Essaid et al. (2014) qui s'affranchit du choix d'une attitude du décideur pour recommander une décision. Le second apport est l'attribution d'un degré de confiance à la décision recommandée, au travers du facteur de qualité. Il permet de tenir compte de l'imperfection de l'information initiale pour aider à décider. Il est utilisé dans les développements suivants pour l'association des méthodes qui nécessite des décisions intermédiaires.

• Associer les différentes méthodes

La méthodologie multicritère ER-MCDA permet de trier les alternatives selon des labels en considérant l'imperfection de l'évaluation de plusieurs critères. Les méthodes BF-TOPSIS classent les alternatives sans prendre en compte cette imperfection. La méthode FCOWA-ER établit un intervalle de valeurs espérées qui modélise l'imprécision sur la connaissance des valeurs espérées des conséquences, en univers incertain. Prises individuellement, ces méthodes ne permettent pas de propager l'imperfection de l'information dans l'ensemble du processus d'aide à la décision.

Ces différentes méthodes sont alors associées de manière innovante pour permettre cette propagation complète. Deux types d'association ont été développés.

◇ *Classer les alternatives en tenant compte de l'imperfection de l'évaluation des critères*

La méthode ER-MCDA est associée avec le principe des méthodes BF-TOPSIS pour classer les alternatives en tenant compte de l'évaluation imparfaite de chaque critère, pouvant être issue de plusieurs sources. La nouvelle méthode qui en découle est appelée ER-MCDA-Rank. Une étape de décisions intermédiaires est nécessaire. L'indicateur de qualité de ces décisions est alors utilisé pour propager la connaissance disponible dans BF-TOPSIS. Une étape de transformation de ces décisions intermédiaires en évaluation quantitative est également impliquée. Elle sera discutée par la suite.

Pour un cas d'exemple, les mêmes données d'entrée imparfaites sont utilisées pour appliquer ER-MCDA et ER-MCDA-Rank. Dans ces conditions, ER-MCDA-Rank permet le classement des alternatives en un pré-ordre total, là où ER-MCDA permet un classement en un pré-ordre partiel en permettant l'incomparabilité des alternatives.

◇ *Aider à décider selon plusieurs critères évalués imparfaitement, en univers incertain : deux approches*

L'analyse multicritère ER-MCDA est associée avec la méthode d'aide à la décision dans l'incertain FCOWA-ER. Deux approches sont proposées. L'approche 1 établit d'abord, en univers incertain, l'intervalle des valeurs espérées. Il s'agit d'une distribution de possibilité particulière d'évaluation de chaque alternative selon chaque critère, par une source donnée. La méthode ER-MCDA peut alors être utilisée si la problématique est le tri selon des labels. La méthode ER-MCDA-Rank, précédemment développée, est préférée si le problème est de classer les alternatives. L'approche 2 met d'abord en œuvre la méthode ER-MCDA. Une étape de décision intermédiaire suivie d'une transformation quantitative est alors nécessaire pour appliquer FCOWA-ER.

L'approche 2 ne permet pas de propager toute l'imperfection de l'information. En effet, le niveau de qualité de la décision intermédiaire ne peut pas être pris en compte dans FCOWA-ER. L'approche 1 reste également limitée. L'imperfection de l'évaluation des conséquences, pour chaque critère et chaque scénario, ne peut pas être prise en compte pour établir l'intervalle des valeurs espérées. Cependant, le processus de propagation est amélioré et peut conduire à l'impossibilité de décider sans décisions intermédiaires aléatoires. Ceci présente l'avantage de définir à quel niveau ce type de décision est nécessaire. Cela permet de cibler les informations dont la qualité doit être améliorée par de nouvelles connaissances pour augmenter les chances de décider.

VI.2 Limites et perspectives méthodologiques

Cette section analyse les lacunes méthodologiques et propose des perspectives de développements pour chacun des trois axes de développement correspondant à la contribution au génie décisionnel, à l'analyse du risque et aux méthodes d'aide multicritère à la décision en contexte d'information imparfaite (figure VI.1, p. 224).

VI.2.1 Génie décisionnel

- **La difficulté d'évaluation de l'importance d'un composant**

La structuration du problème de décision multi-échelle a mis en évidence que l'importance était un concept clef au changement d'échelle. Cependant, son évaluation reste difficile à obtenir.

◇ *L'importance est multiple car spécifique à chaque mode de défaillance.*

L'importance technique est établie en analysant la participation des défaillances de chaque composant à la défaillance globale du système auquel il appartient. L'évaluation de l'importance du composant d'un système est alors relative à chaque mode de défaillance. Établie pour le système à la micro-échelle, elle est intégrée dans la définition des critères d'évaluation de la performance d'un système à la méso-échelle. Une évaluation qualitative (« primordial », « nécessaire », « secondaire ») est considérée selon des labels qualitatifs mais reste empirique.

◇ *Perspective : analyse multicritère de l'importance des composants*

L'importance technique est définie relativement à plusieurs modes de défaillance. Son évaluation peut donc être considérée comme un problème d'évaluation multicritère. Les méthodes d'aide multicritère à la décision, comme ER-MCDA, sont candidates pour aider à évaluer l'importance selon des labels qualitatifs. Elles nécessiteront de développer l'analyse pour tous les modes de défaillance en amont de leur application.

- **Détailler ou simplifier**

Deux approches sont proposées pour identifier les indicateurs et critères d'évaluation à chaque échelle de système. La première, simplifiée, permet de limiter le nombre de critères à évaluer. La seconde, formalisée selon l'analyse des modes de défaillances, est exhaustive mais chronophage. La différenciation entre indicateurs et critères est un autre point qui distingue les deux approches.

◇ *La définition des indicateurs peut se confondre avec celle des critères.*

La performance technique d'un système vis-à-vis d'un mode de défaillance donné est considérée comme un critère d'évaluation de la performance globale. L'approche simplifiée s'appuie sur la définition directe de critères qui sont censés permettre d'évaluer cette performance individuelle. L'évaluation du critère peut alors être assimilée à un processus d'agrégation qui n'est pas tracé. Pour assurer cette traçabilité, l'autre approche, dite formalisée, a été menée pour un mode de défaillances donné. Si la faisabilité de cette approche a été démontrée, elle n'a pas pu l'être pour tous les modes de défaillance.

◇ *Perspective : poursuivre la formalisation détaillée des indicateurs et des critères*

Malgré ces limites, l'approche simplifiée a été privilégiée pour avoir le temps de développer l'adaptation de l'agrégation multicritère à l'évaluation de l'efficacité des systèmes. Cependant,

la mise en œuvre de l'approche formalisée pour les différents modes de défaillance doit être envisagée pour bien séparer l'identification des indicateurs de celle des critères de performance. Il faut rester conscient que, en pratique, une telle démarche est difficile à mettre en œuvre, faute de temps. On pourrait alors considérer ces deux approches, détaillées et simplifiées, comme complémentaires. La première aidera à formaliser le processus complet d'analyse et à identifier les hypothèses simplificatrices réalisées lors de la mise en œuvre de la seconde.

• **Gérer l'importance des critères et la fiabilité des sources**

La conception d'un problème de décision s'appuie sur sa modélisation. Pour les méthodes d'analyse multicritère, un vecteur de coefficients d'importance représente les préférences du décideur entre les critères. Ils deviennent des coefficients d'affaiblissement pour combiner les critères qui sont assimilés à des sources en Raisonnement Évidentiel. Dans ce cadre, les sources peuvent aussi être combinées en tenant compte de leur fiabilité, modélisée par un coefficient de fiabilité. L'établissement de ces coefficients d'importance et de fiabilité doit être discuté.

◇ *L'importance des critères peut varier selon les alternatives.*

Les méthodes d'aide multicritère à la décision sont utilisées pour évaluer la performance technique globale d'un système. Pour cela, sa performance vis-à-vis de chaque mode de défaillance est assimilée à un critère d'évaluation. Deux points sont discutés. i) La méthode de Saaty (1980) est retenue pour établir le vecteur des coefficients d'importance mais aucune analyse de sensibilité n'est menée. ii) Au travers de l'exemple de l'évaluation de l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage, il est mis en évidence que l'importance de chaque critère n'est pas le même selon l'importance du composant dans le système. Pour pallier à ce problème, un vecteur de coefficients d'importance spécifique à chaque composant est établi mais la cohérence de cette démarche n'est pas établie de manière formelle.

◇ *Perspective : analyse de cohérence et de sensibilité*

La méthode de Saaty (1980) analyse la cohérence de l'établissement du vecteur d'importance des critères. Une analyse de cohérence de l'établissement des coefficients d'importance des critères qui intègre l'importance des composants analysés peut être envisagée en trois temps. i) Pour chaque composant, la méthode de Saaty (1980) fournirait le vecteur de coefficients d'importance des critères. ii) Pour chaque critère, elle produirait le vecteur de coefficients d'importance des composants. iii) Pour chaque critère, la compatibilité de l'ordonnement des composants selon le poids attribué dans le premier temps serait vérifiée en comparaison avec l'ordonnement établi dans le second. Dans tous les cas, une analyse de sensibilité de résultats aux vecteurs de poids établis devra être menée.

◇ *Les coefficients d'affaiblissement sont établis de manière arbitraire.*

Les coefficients d'affaiblissement des sources selon leur fiabilité sont définis de manière arbitraire dans les exemples proposés. Ils font l'hypothèse qu'un niveau de fiabilité peut être attribué à chaque expert.

◇ *Perspective : éliciter la fiabilité des sources*

Des méthodes d'élicitation de la fiabilité des sources existent, comme celle de Martin et al. (2008). Celle-ci permet notamment d'établir la fiabilité des experts. Ces méthodes doivent être comparées avant d'envisager leur mise en œuvre.

- **Le choix de la référence pour la validation**

La démarche de validation développée s'est basée sur l'établissement d'une référence à partir d'une modélisation externe simplifiée.

◇ *La modélisation ne représente pas la réalité.*

L'évaluation d'un système est toujours réalisée dans un contexte spécifique à l'implantation du système. Son comportement physique est modélisé pour ce contexte particulier. Les modèles sont une représentation imparfaite de cette réalité complexe. Leur simplification introduit généralement un niveau d'imperfection supplémentaire. L'établissement d'une référence externe qui s'appuie sur ces modèles physiques peut alors être considérée comme une source supplémentaire d'information imparfaite.

◇ *Perspective : multiplier et combiner les sources de validation*

Plusieurs approches peuvent aider à la validation. i) L'analyse statistique de données empiriques permet de faire correspondre l'évaluation réalisée avec le comportement réel observé (Dell'Agnese et al. 2013). Cette approche est cependant limitée par la disponibilité et la qualité des données. ii) L'établissement d'une référence par modélisation externe peut être poursuivi en utilisant des modèles de plus en plus complexes. Cependant, ils seront toujours limités pour représenter le comportement réel du système. iii) L'optimisation peut être utilisée pour établir la référence. Cependant, cette méthode est tributaire d'une modélisation du système et des limites de ce modèle.

Finalement, ces différentes approches pourraient être considérées comme des sources d'information inégalement fiables. Leur combinaison est alors envisageable comme cadre à la validation.

VI.2.2 Analyse et intégration du risque

- **Réduire l'imperfection ou décider avec elle**

La démarche développée intègre l'évaluation multi-échelle de l'efficacité des mesures de protection à l'analyse de risque. Elle implique la connaissance sur de nombreux processus physiques, que ce soit sur les aspects structuraux (génie civil, géotechnique) ou fonctionnels (géomorphologie, hydraulique). En général, l'analyse de risque est basée sur les sciences de l'ingénieur. Elle s'appuie alors principalement sur cette connaissance physique.

◇ *La connaissance sur les processus physiques n'est pas améliorée.*

L'imperfection de l'information concerne les différentes composantes du risque : le taux d'endommagement potentiel des enjeux, leur taux d'exposition, les scénarios d'occurrence du phénomène, l'atteinte des enjeux, l'effet, l'intensité. Elle affecte également l'évaluation de l'efficacité technique des mesures de protection sollicitées par les phénomènes naturels. Les connaissances dans ces divers domaines se sont améliorées. L'hypothèse faite est que l'information disponible sera toujours entachée des différentes formes d'imperfection et qu'il faut en tenir compte pour aider à décider. Cependant, l'amélioration des connaissances physiques, si elle est possible, peut améliorer le processus d'aide à la décision en réduisant le niveau d'imperfection.

◇ *Perspective : améliorer la connaissance sur les phénomènes physiques*

La courbe de taux d'endommagement potentiel d'un enjeu permet d'évaluer les dommages potentiels. Elle est établie à partir de retours d'expérience ou de modélisations numériques ou physiques du processus d'endommagement de l'enjeu. La confrontation de ces travaux doit être

poursuivie pour améliorer la connaissance sur ces courbes. Par ailleurs, l'effet des mesures de protection est défini par l'influence sur l'initiation et/ou la propagation du phénomène physique. Les modèles numériques sont généralement utilisés pour la représenter comme, par exemple, l'influence sur les phénomènes de laves torrentielles (Remaître et al. 2008). Cependant, ces modèles ne représentent pas toute la complexité physique (Chambon et Laigle 2013). Leur développement doit aider à évaluer l'effet des dispositifs de protection pour apporter un référentiel notamment.

◇ *Perspective : combiner les informations sur les processus physiques*

Plusieurs sources d'information sur les phénomènes physiques sont disponibles : expertise, analyse statistique, modèles physiques, modèles numériques. Leur combinaison en Raisonnement Évidentiel est une piste à explorer pour prendre en compte l'imperfection de l'information qui est liée et la propager dans l'analyse du risque.

● **Analyser puis évaluer le risque**

L'analyse de l'aléa et l'analyse de la vulnérabilité permettent l'analyse du risque. Sur cette base, son évaluation dépend de sa perception par les acteurs du territoire concerné, de leur aversion pour ce risque et de leur niveau d'acceptabilité (Renn et Graham 2006). Dans cette thèse, l'analyse issue des sciences de l'ingénieur se limite à l'aléa et aux dommages potentiels.

◇ *L'évaluation du risque est partielle.*

L'analyse de l'aléa dépend de la connaissance sur les processus physiques. Sa prise en compte a déjà été discutée. L'analyse de la vulnérabilité intègre la valorisation des dommages potentiels. Elle peut être directe, si elle dépend d'endommagements physiques, ou indirecte si elle est liée à des pertes de fonctionnalité comme, par exemple, la coupure de réseaux. Les courbes de taux d'endommagement potentiel permettent l'analyse de la vulnérabilité directe. La vulnérabilité indirecte n'est pas analysée, alors qu'elle est importante en montagne (PARN 2011). La valorisation monétaire des dommages directs et tangibles s'appuie sur la monétarisation basée sur les coûts. Les préférences des acteurs du territoire ne sont pas prises en compte pour une évaluation du risque. Les dommages intangibles ne sont pas valorisés monétairement mais établis dans une unité spécifique à chaque type d'enjeu. Le vecteur des poids, établi pour leur agrégation multicritère, représente les préférences entre les différents types de dommages. Cependant, l'aversion potentielle au risque n'est pas prise en compte pour mener l'évaluation pour un même type de dommages. Au final, l'évaluation du risque est incomplète.

◇ *Perspective : prendre en compte la vulnérabilité indirecte.*

Les travaux spécifiques sur la vulnérabilité indirecte sont limités (Meyer et al. 2012). Les méthodes développées sur la base des systèmes d'information géographiques (SIG) peuvent être utilisées (Tacnet et Curt 2013). Leur implémentation opérationnelle est à développer.

◇ *Perspective : intégrer les sciences économiques, humaines et sociales.*

L'évaluation du risque doit s'inscrire dans un contexte et un territoire donnés (November 2002). D'autres méthodes de valorisation monétaire que la monétarisation directe basée sur les coûts peuvent être utilisées. On pense notamment à l'évaluation contingente basée sur des préférences déclarées (Grelot 2004). Les développements menés par les sciences humaines et sociales pour aider à évaluer le risque en considérant les différents type de dommages dans leur contexte territorial doivent être explorés (Tacnet et al. 2010).

- Propager l'efficacité ou les conséquences des défaillances

L'évaluation multi-échelle de l'efficacité repose sur l'analyse séquentielle de l'efficacité structurale et fonctionnelle d'un ouvrage (micro-échelle), d'un dispositif (méso-échelle) et en termes de réduction des dommages à l'échelle du bassin d'enjeux (macro-échelle) (figure VI.2, p. 228).

◇ *L'évaluation de l'efficacité est au cœur de l'analyse mais n'est pas propagée.*

L'évaluation multi-échelle de l'efficacité des systèmes de protection s'appuie sur celle de leur performance selon différents modes de défaillances. Ces performances spécifiques sont considérées comme les critères à agréger pour évaluer la performance globale à chaque échelle de système. L'analyse de chaque mode de défaillance, à chaque échelle, permet d'extraire les indicateurs d'évaluation correspondant. Les scénarios de défaillance ne sont pas définis pour établir les conséquences liées. L'approche holistique de l'analyse du risque formalise l'évaluation multi-échelle de l'efficacité des mesures de protection. Cependant, la propagation effective des conséquences n'est pas réalisée d'un niveau d'échelle à l'autre, étant donné que les scénarios de défaillance ne sont pas établis.

◇ *Perspective : adapter la sûreté de fonctionnement à l'évaluation multi-échelle de l'efficacité*

L'adaptation multi-échelle de la méthode du nœud papillon (Zwinglestein 1996) peut être envisagée pour définir les scénarios de défaillance. Le lien entre les conséquences d'une défaillance à la micro-échelle (ouvrage) et la défaillance à la méso-échelle (dispositif) serait ainsi établi pour chaque mode de défaillance. Ensuite, le principe de l'évaluation de la fiabilité selon les méthodes de la sûreté de fonctionnement serait adapté à l'évaluation multi-échelle de l'efficacité des mesures de protection. Des premiers éléments de réflexion sont fournis en ce sens (Annexe I). Dans un premier temps, la démarche serait réalisée dans le cadre classique des probabilités conditionnelles. Si elle est validée, l'utilisation des règles de conditionnement dans le Raisonnement Évidentiel (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015) (Vol. 3) pourrait être envisagée dans un second temps. Cela permettrait de représenter la connaissance réellement disponible sur les scénarios de défaillance.

- Évaluer dans le temps

La démarche intégrée présente l'évaluation de l'efficacité aux différentes échelles mais également à différents pas de temps. Ceci permet de faire le lien avec l'évaluation selon la pratique autrichienne (Suda 2009).

◇ *L'évaluation multi-temporelle de l'efficacité n'est pas formalisée.*

L'évaluation de l'efficacité est d'abord établie au moment de l'inspection (t_i). Au cours de cette visite, une analyse prospective à t_{i+1} est demandée. Il s'agit pour l'analyste de projeter son évaluation dans le temps, sur la base des connaissances dont il dispose à t_i . Pour l'aider dans cette analyse, la comparaison du niveau d'efficacité à t_i avec celui de la visite précédente (à t_{i-1}) permet de connaître la tendance de la vitesse d'évolution. Cette évaluation multi-temporelle s'appuie sur les mêmes indicateurs et critères évalués aux différents moments (t_{i-1} , t_i , t_{i+1}). Cependant, la formalisation des relations entre ces différentes évaluations temporelles manque.

◇ *Perspective : évaluer selon les indicateurs de la sûreté de fonctionnement*

L'intégration de la dimension temporelle fait le lien avec les différents indicateurs de fiabilité, maintenabilité et disponibilité de la sûreté de fonctionnement d'un système (Annexe D). La formalisation de ce type d'analyse au contexte des mesures de protection torrentielle est envisagée.

- Représenter la connaissance sur les scénarios de phénomènes naturels

La définition des scénarios de phénomènes naturels S_k , $k = 1, \dots, K$, est nécessaire à l'évaluation multi-échelle de l'efficacité des mesures de protection. Les connaissances limitées sur les phénomènes torrentiels et sur l'effet des mesures de protection sur ces phénomènes amènent à proposer un autre cadre théorique que les probabilités. Le Raisonnement Évidentiel est retenu.

◇ *Le définition de la fonction de masse sur les scénarios est théorique.*

En Raisonnement Évidentiel, une fonction de masse (BBA) représente l'information fournie par une source sur l'ensemble des états de la nature $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$. Cela suppose connu cet ensemble \mathcal{S} . La BBA est notée $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$. Dans les exemples traités, son établissement est théorique et ne représente par une évaluation réelle. La méthode qui permet d'établir cette fonction de masse pour des phénomènes naturels n'est pas fournie.

◇ *Perspective : utiliser le raisonnement plausibiliste et la capacité de Choquet*

Les méthodes d'élicitation des fonctions de masse doivent être analysées. À notre sens, l'élicitation directe à dire d'expert serait un exercice délicat. Par contre, un raisonnement plausibiliste peut être envisagé. En effet, il paraît plus simple de raisonner sur tout ce qui ne contredit pas l'hypothèse, que directement sur l'hypothèse elle-même. Cette forme de raisonnement peut s'approcher de l'aide à la décision en univers incertain basée sur la capacité de Choquet (Chateaufort et Cohen 2006). Ce cadre théorique pourrait être exploré. Son adaptation aux décisions dans le domaine des phénomènes naturels serait ensuite vérifiée.

VI.2.3 Aide à la décision en contexte d'information imparfaite

- La multiplicité des modèles de transposition

La méthodologie ER-MCDA utilise un modèle de transposition pour établir une fonction de masse (BBA) à partir de l'évaluation imprécise d'un indicateur.

◇ *Plusieurs modèles de transposition sont possibles.*

Assimilé à une fonction d'utilité floue, le modèle de transposition peut être spécifique à chaque expert (ou source) qui évalue un indicateur (Tacnet 2009). Par ailleurs, la démarche de validation montre que plusieurs modèles de transposition peuvent être établis pour un même expert en représentant différentes attitudes possibles (pessimiste, optimiste). Pour un même indicateur, les modèles de transposition sont donc multiples car spécifiques aux sources et à leur attitude. Or, l'application de la méthodologie ER-MCDA repose sur un modèle de transposition unique pour chaque indicateur. La question de la prise en compte de cette multiplicité est alors posée.

◇ *Perspective : combiner les fonctions de masse obtenues après transposition*

Pour une évaluation imprécise, la construction d'une BBA à partir de chaque modèle de transposition est envisageable. Deux étapes de combinaison pourraient alors se succéder. i) Pour un indicateur, l'évaluation imprécise fournie par chaque expert serait transposée dans une BBA pour chaque modèle de transposition établi pour une attitude donnée. La fusion des BBAs ainsi obtenues permettrait d'obtenir une BBA pour chaque expert et chaque indicateur. ii) Les BBAs issues des différents experts seraient ensuite fusionnées pour produire une BBA finale pour chaque indicateur. Le fait d'agréger à plusieurs niveaux nécessitera de vérifier la conservation des mêmes propriétés et, si nécessaire, d'exploiter d'autres opérateurs de fusion.

- **Améliorer la méthode de transposition**

La méthode de transposition permet l'établissement d'une BBA à partir d'une distribution de possibilité et d'un modèle de transposition. L'évaluation de l'indicateur est transformée en niveau d'appartenance à des labels qualitatifs, issus du cadre de discernement (FoD) de l'évaluation finale. La méthode initiale proposée par Tacnet (2009) est améliorée en permettant une meilleure représentation de l'imprécision de l'évaluation initiale.

◇ *La nouvelle méthode a été développée selon des hypothèses discutables.*

Le développement de la nouvelle méthode s'est principalement appuyé sur les bases théoriques de la logique floue de Zadeh (1965, 1978) et sur un raisonnement plausibiliste. L'hypothèse d'exclusivité mutuelle des éléments du FoD a été faite comme base au développement. Cela a permis de raisonner dans le cadre de la théorie de Dempster-Shafer (Shafer 1976). Cette hypothèse peut être discutée : les éléments sont extraits d'un modèle de transposition où il y a intersection des sous-ensembles flous. La relaxe de cette hypothèse d'exclusivité mutuelle doit donc être envisagée.

◇ *Perspective : développer la méthode dans le cadre de la DS_{mT}*

La théorie du raisonnement plausible et paradoxal (DS_{mT}) (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015) est un cadre adapté pour développer la méthode en relaxant l'hypothèse d'exclusivité mutuelle (Annexe F.1). Elle doit permettre d'intégrer l'intersection entre les sous-ensembles flous. Au final, une masse positive pourra être affectée à des sous-ensembles qui sont l'intersection de plusieurs éléments du FoD. Le temps de calcul sera alors augmenté pour les étapes de combinaison qui suivent. En effet, on raisonne sur des ensembles disjoints qui n'ont pas un recouvrement selon l'échelle de la variable X alors qu'il existe en réalité. Cela montre les limites de l'utilisation d'un cadre de discernement discrétisé et de ne pas décider sur un espace continu.

- **Choix du processus de fusion**

Un processus de fusion est défini par la règle de fusion utilisée pour combiner plusieurs BBAs et par l'ordre de fusion lorsque plusieurs étapes de combinaison se succèdent.

◇ *Un seul processus de fusion est pris en compte.*

Parmi les multiples règles de fusion existantes, la PCR6 et la PCR6₀ ont été retenues. Leur application a été menée sur des cas d'exemples simplifiés. Or, il est reconnu qu'elles sont plus compliquées à appliquer que d'autres règles, comme celle de Dempster Shafer (DS) par exemple. Ceci pourra entraîner un temps de calcul important si le nombre d'éléments du cadre de discernement (FoD), ou celui d'étapes de combinaison, augmente. Par ailleurs, les étapes de combinaisons peuvent se succéder comme, par exemple, pour la méthodologie ER-MCDA : fusion des fonctions de masse (BBAs) produites par plusieurs sources pour chaque indicateur puis de celles obtenues pour les différents critères. Un autre ordre de fusion pourrait être envisagé en combinant d'abord les critères évalués par une source avant de fusionner les BBAs obtenues pour les différentes sources. Finalement, un seul processus de fusion a été considéré alors qu'il en existe une multitude.

◇ *Perspective : analyse de sensibilité sur les processus de fusion*

Comme initié par Tacnet (2009), une analyse de sensibilité des résultats obtenus devrait être menée en utilisant différentes règles de fusion et différents ordres de combinaisons. La comparaison pourra non seulement porter sur les résultats obtenus et l'analyse de leur consistance mais aussi sur les temps de calcul nécessaires aux différents processus.

- **Atteindre un classement totalement robuste au renversement de rang**

Les méthodes d'aide multicritère à la décision BF-TOPSIS, notées BF-TOPSIS1 à 4, ont été développées par Dezert et al. (2016c) pour résoudre le problème de robustesse au phénomène de renversement de rang des autres méthodes du même type. Pour rappel, le renversement de rang intervient lorsque l'ajout d'une alternative à un ensemble d'alternatives préalablement ordonné conduit à une modification de cet ordonnancement.

◇ *Aucune méthode existante n'est totalement robuste au renversement de rang.*

Dans leur développement, Dezert et al. (2016c) ont montré que les quatre méthodes BF-TOPSIS ont des niveaux de robustesse qui augmentent avec leur complexité calculatoire. De plus certaines sont robustes pour certains problèmes alors que d'autres le sont pour d'autres. Elles ont été appliquées avec succès pour classer des solutions de protection à l'échelle d'un bassin d'enjeux, selon leur efficacité. Malgré tout, même la méthode la plus complexe (BF-TOPSIS4) n'est pas totalement robuste au phénomène de renversement de rang pour les exemples théoriques traités (Dezert et al. 2016c).

◇ *Perspective : développer une méthode totalement robuste*

Pour un problème de décision donné, une phase préalable de test pourrait être proposée. Un cas simplifié représentant le problème serait testé en appliquant les quatre méthodes BF-TOPSIS. La méthode ne présentant pas de problème de renversement de rang et à la complexité calculatoire la plus faible serait alors choisie. Cependant, le développement d'une méthode totalement robuste au phénomène de renversement de rang reste à proposer.

- **Décider selon plusieurs critères en univers incertain**

Les problèmes de décision sont généralement formalisés selon deux modèles en parallèle : le modèle multicritère et le modèle de l'aide à la décision (AD) en univers incertain. La prise en compte des différentes formes d'imperfection dans l'ensemble du processus de décision est proposée. Pour cela, les méthodes qui permettent de répondre à ces deux types problèmes en intégrant les différentes formes d'imperfection de l'information sont associées.

◇ *L'association des méthodes est proposée comme première approche.*

La démarche d'association proposée des méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel a pour objectif de prendre en compte toutes les formes d'imperfection de la connaissance sur les scénarios et l'évaluation des critères pour aider à décider. Pour cela, les méthodes existantes sont utilisées. La méthode ER-MCDA-Rank (association de ER-MCDA et BF-TOPSIS) permet le classement multicritère. Cependant, une étape de transformation quantitative de l'évaluation qualitative des critères est nécessaire pour permettre le classement des alternatives. L'association des méthodes ER-MCDA et FCOWA-ER selon l'approche 1 (ER-MCDA puis FCOWA-ER) nécessite la même étape. Leur association selon l'approche 2 (AD dans l'incertain puis ER-MCDA) établit une évaluation de chaque critère selon un intervalle. Cette dernière représentation est plus conservatrice qu'une distribution de possibilité, utilisée normalement pour appliquer ER-MCDA. La décision qui en découle peut alors être impossible sans étape intermédiaire de décision aléatoire. Il apparaît donc que la démarche d'association est limitée par des étapes de transformation intermédiaires ou une approche trop conservatrice.

◇ *Perspective : analyses de sensibilité à l'étape de transformation*

Pour ER-MCDA-Rank, une analyse de sensibilité aux variations dans le choix de l'étape de transformation quantitative peut être proposée. Cela permettrait de vérifier la robustesse des résultats à cette étape intermédiaire. Pour l'approche 1 d'association de ER-MCDA et FCOWA-ER, cette même démarche pourrait être engagée. Cependant, si l'imperfection de l'information est propagée dans ER-MCDA-Rank grâce à l'indice de qualité de la décision intermédiaire, ce n'est pas le cas de l'approche 1. Elle n'apparaît donc que peu intéressante en l'état et l'approche 2 est privilégiée.

◇ *Perspective : le conditionnement des masses*

Le cadre de la théorie des probabilités conditionnelles peut être utilisée pour relier les deux types de problèmes. Une distribution de possibilité représenterait l'évaluation de chaque critère (problème multicritère), conditionnée par la probabilité d'occurrence des scénarios (AD dans l'incertain). Cependant, toutes les formes d'imperfection de la connaissance sur les scénarios et d'évaluation des critères ne seraient pas prises en compte. Les développements des conditionnements de masse en Raisonnement Évidentiel pourraient alors être explorés pour améliorer le traitement de ce type de problème.

• **Développer un environnement de calcul interfacé**

De nombreux outils sont utilisées pour développer l'aide à la décision en contexte d'information imparfaite : analyse coûts bénéfices, aide multicritère à la décision, systèmes à base de règles, méthodes de transposition, règles de fusion, règles de décision, distances entre fonctions de masse, dimensionnement de génie civil pour la validation, méthodes avancées d'aide à la décision.

◇ *Les outils de calculs disponibles sont dispersés.*

Les développements menés se sont appuyés sur des routines de calcul sous MatlabTM des règles de fusion (développé par Arnaud Martin), des méthodes BF-TOPSIS (développé par Jean Dezert), de la méthode ER-MCDA (développé par Jean-Marc Tacnet) et du dimensionnement des ouvrages de correction torrentielle (développé par Rémy Peltier et Geoffroy Di Ciocco). Une routine de calcul a été créée pour mettre en œuvre l'analyse coût bénéfice et pour évaluer le comportement structural d'un ouvrage de correction soumis à un affouillement. Des interfaces ont été créées avec Excel[®] mais restent simplistes. L'interface de l'ensemble de ces outils n'est actuellement pas disponible pour une prise en main externe.

◇ *Perspective : regrouper les outils dans un environnement de calcul commun*

Cette thèse a permis la mise en œuvre et l'association de ces différents outils. D'autres outils n'ont pas été créés. Par exemple, tous les calculs impliquant la nouvelle méthode de transposition ont été réalisés manuellement. Le développement des routines de calcul manquantes, leur interfaçage puis leur regroupement dans un environnement de calcul commun où elles pourraient être facilement associées est, à notre sens, la prochaine étape de développement à mener. Elle permettrait une meilleure diffusion de ces outils qui est limitée à l'heure actuelle. Elle pourrait également être le support pour des formations à ces domaines. Les logiciels pour établir ces routines et proposer l'interfaçage restent à discuter pour favoriser l'accès au plus grand nombre.

VI.3 Aspects opérationnels

Dans cette section, les apports opérationnels sont analysés au regard des objectifs qui avaient été établis initialement. Le caractère opérationnel des développements réalisés et les conditions de leur mise en œuvre sont ensuite discutés.

VI.3.1 Apports

Les apports opérationnels sont établis en comparant les résultats des développements avec les objectifs initiaux :

- la méthodologie permet-elle d'évaluer l'efficacité des mesures de protection torrentielle aux échelles des ouvrages, dispositifs et bassins d'enjeux ?
- en quoi les méthodes impliquées permettent-elles d'améliorer et homogénéiser l'évaluation à partir d'indicateurs et critères multiples ?
- comment peut-elle améliorer la traçabilité de la prise en compte des mesures de protection dans l'analyse de risque ?
- comment est-ce que l'expertise est prise en compte ?

• Une vision globale de l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection

Même si l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est reconnue comme un processus nécessaire à la gestion du risque, elle repose sur un concept ambigu. Chaque praticien s'est forgé sa propre définition dans son champ d'expertise. Ce travail apporte une vision globale de l'évaluation de l'efficacité aux différentes échelles des mesures de protection. Par ailleurs, il établit le lien entre les différentes composantes de l'efficacité dans le cadre de l'analyse intégrée du risque.

◇ *L'efficacité est relative à des objectifs qui évoluent.*

L'analyse des définitions établies dans les normes, les documents scientifiques et de celles issues d'échanges techniques avec les praticiens a permis de clarifier le concept d'efficacité. Sa définition est établie en relation avec les autres concepts utilisés en pratique comme l'utilité, l'importance, l'adaptation, la capacité, la fiabilité ou encore l'efficience.

Selon cette définition, l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection est relative aux objectifs qui lui sont fixés. Ces objectifs dépendent de l'échelle d'analyse (ouvrage, dispositif, bassin d'enjeux) et du territoire dans lequel les mesures sont implantées. De plus, ils évoluent dans le temps. L'évaluation de l'efficacité n'est donc pas figée et change avec les objectifs. D'un point de vue opérationnel, cela amène à devoir accepter une remise en cause permanente des évaluations et décisions qui sont prises dans un contexte évolutif.

D'un point de vue technique, les fonctions attribuées aux ouvrages ont également évolué dans le temps. Il peut être aujourd'hui difficile de comprendre les objectifs que les praticiens précédents souhaitaient atteindre. L'analyse historique détaillée, menée en collaboration avec une autre thèse (Piton 2016), a permis de répreciser les fonctions données aux ouvrages de correction torrentielle. Cela constitue une nouvelle base sur laquelle s'appuyer en pratique.

◇ *L'efficacité intègre plusieurs composantes pour différentes échelles.*

La multiplicité des dimensions de l'efficacité des mesures de protection a été mise en évidence. Plusieurs échelles d'analyse doivent être prises en compte : l'ouvrage doit résister et fonctionner pour que le dispositif assure sa fonction et protège les enjeux. Par ailleurs, les composantes techniques (structural et fonctionnel) sont reliées à la composante socio-économique.

Jusqu'à présent, l'analyse de l'efficacité était principalement technique, en se focalisant sur les aspects structureaux. L'importance de l'analyse de la composante fonctionnelle est rappelée : la fonction doit être clairement identifiée au préalable à toute évaluation d'un système. La composante socio-économique de protection des enjeux, en lien avec l'efficacité fonctionnelle des dispositifs, est ensuite introduite. C'est à ce dernier niveau que les objectifs de protection sont décidés.

Cette démarche fait le lien entre les objectifs socio-économiques donnés et les fonctions techniques à réaliser puis entre la capacité à réaliser ces fonctions et à atteindre les objectifs.

◇ *L'efficacité dépend de la connaissance sur les phénomènes naturels.*

En pratique, l'évaluation de l'efficacité est établie en ne considérant qu'un seul scénario (ou état de la nature). Le développement d'une évaluation qui tient compte des conséquences évaluées pour différents scénarios est un premier apport. La conséquence peut, par exemple, être le niveau d'efficacité de la mesure. Cette analyse selon plusieurs scénarios s'appuie sur la démarche experte.

Par ailleurs, l'introduction du Raisonnement Évidentiel propose de tenir compte d'un fait auquel chaque praticien du domaine des risques torrentiels a pu un jour se confronter : on ne sait pas tout ce qui peut se passer. Ainsi, l'évaluation de l'efficacité est introduite de manière relative à cette connaissance limitée. Les scénarios sont identifiés tout en acceptant le fait qu'on ne peut pas les avoir tous imaginés.

● **Une méthode d'analyse structurée, basée sur l'expertise**

L'expertise est un processus d'aide à la décision. Elle intègre de nombreuses informations, issues de plusieurs sources et généralement imparfaites. Le développement d'une méthode d'analyse structurée et détaillée décompose le processus d'analyse. D'un point de vue pratique, cela permet de mettre en évidence ce qui n'est pas connu, ou l'est imparfaitement, pour mieux accepter cette méconnaissance et aider à prendre une décision plus éclairée.

◇ *L'organisation séquentielle limite le nombre d'évaluations détaillées.*

En France et en Autriche, l'évaluation de l'efficacité est limitée à celle technique des ouvrages et dispositifs. En Suisse, une démarche intégrée a été développée sur la base d'un concept de risque partagé (Romang 2008). Elle établit la démarche de prise en compte de l'effet des mesures de protection pour la gestion de l'occupation des sols, selon leur niveau de fiabilité technique. Son principe général est repris dans la méthodologie développée.

Cette approche en plusieurs phases accompagne la démarche d'évaluation opérationnelle. La première phase de tri préalable limite le nombre d'alternatives à évaluer en détail. Cela constitue un avantage pour une évaluation réalisée dans un temps contraint. La deuxième phase organise la démarche logique d'évaluation des mesures de protection existantes. Le détail des différentes étapes d'analyse permet d'identifier les décisions intermédiaires nécessaires et, éventuellement, les hypothèses faites à ces différents niveaux.

◇ *La démarche accompagne la formulation opérationnelle des problèmes.*

L'efficacité est multi-composante et multi-échelle. Les problèmes d'évaluation selon ce concept complexe sont confondus et mal explicités. La démarche développée en trois phases permet de décomposer les problèmes et d'identifier ceux qui relèvent de décisions (ou évaluations) purement techniques et ceux qui correspondent à des décisions stratégiques.

La première décision est établie à l'échelle du bassin d'enjeux : il s'agit d'un problème de hiérarchisation selon les niveaux de dommage (ou de risque) associés. Les préférences du décideur entre les différents types d'enjeux et critères de décision retenus doivent être élicitées. Une fois cette décision amont prise, le reste de la première phase et la deuxième phase répondent à des problèmes techniques : quelle est l'efficacité fonctionnelle du dispositif ? quelle est l'efficacité structurale de l'ouvrage ? Finalement, la troisième phase aide à répondre aux problèmes de choix d'une action à mener selon différents critères socio-économiques (réduction des dommages, coûts).

La démarche accompagne ainsi les acteurs de la décision. Elle les aide à spécifier ce qui relève de problèmes de hiérarchisation du risque, d'évaluation de l'efficacité technique ou socio-économique, et de choix d'une action de protection (maintenance ou construction nouvelle).

◇ *La structuration favorise la traçabilité du raisonnement.*

L'analyse des pratiques montre l'absence de traçabilité du raisonnement mené pour évaluer l'efficacité des mesures de protection et prendre en compte leur effet dans la gestion de l'occupation des sols. La démarche structure l'analyse en plusieurs étapes de décisions intermédiaires pour parvenir à la décision finale. Ainsi, le praticien peut établir les hypothèses faites à chacune de ces étapes. Cela favorise la traçabilité de son raisonnement jusqu'à la décision finale.

À chaque étape de l'analyse, l'expertise est nécessaire pour évaluer l'efficacité structurale, l'efficacité fonctionnelle et l'effet attendu à l'échelle du bassin d'enjeux. Ces évaluations reposent sur la compréhension des processus physiques liés aux phénomènes torrentiels. La connaissance disponible dans ce domaine et l'expertise nécessaire sont au cœur de la démarche proposée. C'est d'ailleurs ce lien entre connaissance et expertise que la méthode de validation développe en se basant sur un modèle externe.

● **Une connaissance approfondie des méthodes d'aide à la décision et de leurs limites**

En pratique, dans le domaine des phénomènes naturels, l'utilisation des méthodes d'aide à la décision est limitée à trois approches : l'expertise technique, les systèmes à base de règles et l'analyse coûts bénéfiques (ACB). En prenant en main et en mettant en œuvre différentes méthodes d'aide à la décision, dont celles les plus récemment développées, ce travail produit une analyse critique de l'ACB mais identifie aussi les limites des autres méthodes candidates.

◇ *Systèmes à base de règles et/ou analyse multicritère*

Les systèmes à base de règles sont adaptés aux problèmes d'évaluation technique, tant qu'il n'y a pas de préférence subjective de l'expert entre les critères. Leur développement est cependant chronophage, ce qui limite leur mise en œuvre opérationnelle. L'application de l'analyse multicritère aux problèmes d'évaluation technique est possible théoriquement. Cependant, l'expression des préférences entre critères est une limite à leur application. Elle a notamment été mise en évidence par l'exemple permettant l'évaluation de l'efficacité fonctionnelle d'un ouvrage.

◇ *Analyse coûts bénéfiques et/ou analyse multicritère*

Les méthodes d'aide multicritère à la décision sont appliquées pour comparer des actions selon leur efficacité ou efficience socio-économique à réduire les dommages. Cela constitue un apport opérationnel car elles permettent d'aller au-delà de la seule juxtaposition de critères, éventuellement contradictoires (CGDD 2014). Elles ont été comparées à l'analyse coûts-bénéfiques actuellement pratiquée.

Cette application s'est limitée à considérer les critères de coût et de réduction des dommages. Cependant, les méthodes d'aide multicritère à la décision permettent de prendre en compte d'autres critères, comme la sécurité, l'aspect patrimonial, l'intégration paysagère, etc. Leurs échelles d'évaluation restent cependant à formaliser.

L'intérêt majeur de ces méthodes est de prendre en compte les préférences du décideur entre les différents critères pour l'aider à décider. À notre sens, la modélisation de ces préférences constitue aussi la principale limite à une mise en œuvre opérationnelle. Dans les faits, cela demande au décideur de se prononcer sur ses choix et de les tracer, ce qu'il ne souhaite pas toujours.

◇ *La prise en compte de l'imperfection de l'information est possible mais complexe.*

Pour prendre en compte l'imperfection sur l'évaluation des indicateurs et des critères, la pratique opérationnelle s'appuie sur une évaluation selon des labels qualitatifs. Pour considérer la connaissance limitée sur les états de la nature, l'étude de scénarios pour des périodes de retour données est utilisée. L'approche s'inscrit alors dans le cadre des probabilités subjectives ce qui présente des limites théoriques.

Les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel permettent d'aller au-delà de ces limites. De plus, en proposant de décider sur la base d'un cadre de discernement qui regroupe des labels qualitatifs, la méthode ER-MCDA permet de considérer le raisonnement selon la pratique. Ces méthodes présentent donc des avantages. Cependant, en l'absence d'environnement de calcul, leur prise en main opérationnelle reste difficile, d'autant plus qu'elles font appel à un cadre théorique totalement inconnu dans le domaine de la gestion des risques naturels.

VI.3.2 Perspectives opérationnelles

Les perspectives opérationnelles qui sont envisagées concernent l'application de la démarche, la vulgarisation pour la sensibilisation des praticiens et des décideurs à des approches nouvelles et l'introduction de l'aide à la décision dans les approches opérationnelles en cours de développement.

● Appliquer la démarche

L'application de la démarche développée est limitée à des cas d'exemples pour différents problèmes d'évaluation à chaque échelle de mesure. Par ailleurs, la démarche intégrée n'a pas été mise en œuvre dans son ensemble.

◇ *Appliquer l'ensemble de la démarche d'évaluation intégrée*

Les exemples sur lesquels les méthodes d'aide à la décision ont été appliquées sont des simplifications de cas pouvant être réellement rencontrés. L'application à des cas réels reste à mener. Dans tous les cas, la démarche intègre de nombreux concepts qui ne sont pas appropriés par les praticiens. Le transfert de l'ensemble de la méthodologie ne pourra alors se faire que de manière progressive.

Pour cela, trois étapes sont envisagées :

- prise en main du principe général de la démarche en trois phases (tri, évaluation des systèmes, évaluation des actions) ;
- introduction de l'aide à la décision basée sur plusieurs indicateurs et critères ;
- introduction de la prise en compte de l'imperfection de l'évaluation des indicateurs et critères et de l'aide à la décision dans l'incertain.

◇ *Étendre la démarche aux autres phénomènes naturels et ouvrages de protection torrentielle*

La démarche et les méthodes d'aide à la décision utilisées sont génériques. Elles peuvent donc s'appliquer aux autres types de mesures de protection torrentielle que les ouvrages de correction mais aussi à d'autres types de phénomènes naturels comme les avalanches ou les chutes de blocs. La forêt de protection est également un système qui peut être évalué au même titre que les ouvrages de génie civil.

En parallèle de cette application aux mesures de protection, le concept de risque et d'aide à la décision en univers incertain doit être précisé pour un langage commun entre les différents acteurs de la décision. Dans l'esprit, cela s'inscrirait dans une démarche analogue à celle développée en Suisse (Margreth et Romang 2010) pour la prise en compte de l'effet des ouvrages dans les plans de gestion de l'occupation des sols et pour les choix d'investissement dans des solutions de protection.

● **Vulgariser pour transférer**

Les méthodes utilisées dans le cadre de ce travail ne le sont pas en pratique. De manière générale, les fondements théoriques sont absents. Pour pouvoir transférer la méthodologie et les méthodes associées, une phase de vulgarisation est nécessaire auprès des acteurs de la gestion des risques naturels, dont les décideurs.

◇ *Impliquer les décideurs dans le processus*

Dans un premier temps, la démarche d'un processus de décision doit être rappelée : i) description du contexte qui intègre l'identification du décideur, ou groupe de décision ; ii) formulation du problème de décision ; iii) modélisation en considérant les méthodes d'aide à la décision existantes ; iv) validation et études de sensibilité.

La participation active du décideur est nécessaire dès la définition des indicateurs, des critères et des alternatives à comparer. Son implication sera aussi demandée pour modéliser ses préférences entre les différents critères et entre les différentes alternatives pour chaque critère. Ce dernier point correspond à la construction d'une échelle d'évaluation qui lui est propre.

◇ *Co-construire des modèles d'évaluation technique avec les experts*

L'évaluation technique des ouvrages et dispositifs repose sur la définition d'indicateurs et de critères à chacune de ces échelles. Des exemples ont été proposés pour les ouvrages et dispositifs de stabilisation torrentielle. Cependant, l'implication des spécialistes et experts est nécessaire pour valider ces premières propositions et adapter ces travaux aux différents types de mesures de protection torrentielle. La constitution des groupes de travail pour l'élicitation peut s'appuyer sur des groupes nationaux mais également internationaux.

L'établissement des indicateurs et critères, puis des modalités de leur agrégation, pourraient s'appuyer sur la démarche d'analyse développée :

- établir les fonctions potentielles ;
- analyse structurelle multi-échelle ;
- analyse fonctionnelle multi-échelle ;
- analyse des modes de défaillance multi-échelle ;
- analyse des scénarios de défaillance et des conséquences ;
- développement des systèmes à base de règles.

- Associer l'aide à la décision et l'ingénierie du risque

L'aide à la décision n'est pas une discipline reconnue en pratique au même titre que l'ingénierie des risques. L'expert technique accompagne les décisions et son rôle dans ce processus est souvent ambigu : appui au décideur ou décideur ? L'ingénierie des risques et l'aide à la décision peuvent alors être vues comme deux approches complémentaires permettant de lever cette ambiguïté : la première fournit l'expertise et les données d'entrée nécessaires à la seconde.

- ◇ *Évaluer le risque*

La pratique actuelle d'analyse du risque s'appuie très majoritairement sur l'ingénierie du risque. Elle se limite en général à l'analyse de la vulnérabilité pour un scénario donné, correspondant à l'événement centennial. L'évaluation du risque est donc partielle. La décomposition du concept de risque serait nécessaire pour mieux appréhender son évaluation en pratique. Par ailleurs, une équipe d'analystes pluridisciplinaire, qui regrouperait des spécialistes des phénomènes naturels avec des géographes et économistes, pourrait aider à mener une évaluation complète du risque.

La prise en compte de plusieurs scénarios serait une première étape vers le développement d'une analyse intégrée. La deuxième étape consisterait à préciser la définition de la vulnérabilité et des modalités d'évaluation. En effet, ce concept est ambigu et sa définition n'est pas partagée. La spécification des différents types d'enjeux et la définition partagée de la probabilité d'atteinte, de l'intensité, du taux d'endommagement potentiel et du taux d'exposition sont un préalable nécessaire pour analyser les dommages potentiels. Cette analyse pourrait s'appuyer sur les outils existants développés dans des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Ensuite, une analyse issue des sciences humaines et sociales pourrait aider à l'évaluation de la vulnérabilité et donc du risque.

- ◇ *Intégrer l'aide à la décision aux approches opérationnelles*

L'aide à la décision et le traitement de l'imperfection de l'information ne sont donc que peu impliquées dans les approches opérationnelles mettant en jeu l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection contre les risques naturels. Elles pourraient cependant être utiles pour aider l'établissement de programmes opérationnels d'actions de prévention.

Par exemple, l'Etat a décidé d'accompagner l'établissement de programmes d'action et de prévention contre les aléas de montagne (PAPAM) à l'échelle des bassins versants de montagne. Ils doivent aider à définir une gouvernance locale pour proposer un programme d'actions de protection organisé. Pour cela, une étape préalable de hiérarchisation des risques à l'échelle du territoire est réalisée. Des actions sont ensuite proposées, analysées et triées selon des priorités. La démarche développée et les méthodes qui la composent auraient toute leur place pour aider les acteurs du territoire à décider ce programme d'actions stratégique.

Conclusion

Cette thèse a concerné l'analyse de l'efficacité d'ouvrages de protection contre les risques naturels. En montagne, les phénomènes d'avalanches ou les crues torrentielles ont toujours menacé les activités humaines. Ils surviennent de manière brutale et les limites des connaissances sur leurs caractéristiques et leurs effets ne permettent pas d'établir avec certitude ce qu'il peut se passer. Malgré tout, l'homme s'est depuis longtemps protégé contre ces phénomènes pour continuer de vivre dans ces zones reculées. L'efficacité des mesures mises en place a d'abord été admise de manière implicite, en accord avec l'espoir d'annihiler les phénomènes : on sait aujourd'hui que cet objectif est vain. Dans le même temps, la demande sociétale de sécurité est de plus en plus importante alors que le budget alloué à l'entretien des ouvrages se restreint. C'est pourquoi l'analyse de l'efficacité des mesures de protection est devenue une question centrale d'expertise pour la gestion des risques naturels en montagne, posant des problèmes difficiles d'aide à la décision.

L'analyse du contexte (chapitre I) a tout d'abord mis en exergue que le concept d'efficacité était ambigu en pratique et, qu'en l'absence de méthodologie claire, le raisonnement impliqué pour évaluer l'efficacité était finalement rarement explicite. Ce travail de thèse a alors appréhendé cette évaluation comme un problème de décision multi-échelles (ouvrages, dispositifs, bassin d'enjeux) et multi-composantes (structural, fonctionnel et socio-économique). Les différentes formes d'imperfection des informations qualitatives et/ou quantitatives ont été propagées en considérant les différentes sources d'informations, potentiellement conflictuelles et/ou inégalement fiables, dans un contexte d'incertitude épistémique sur la connaissance des phénomènes.

• *La problématique* globale a consisté à intégrer de multiples échelles et composantes dans un processus d'aide à la décision en contexte d'information imparfaite et de gestion du risque naturel. Quatre objectifs de travail ont été identifiés :

- structurer le problème d'aide à la décision qu'est l'évaluation de l'efficacité en tenant compte des différentes échelles et composantes ;
- aider à décider en considérant les différentes formes d'imperfection et les multiples sources inégalement fiables ;
- intégrer le processus d'expertise dans une démarche d'aide à la décision multi-échelle ;
- valider l'évaluation ou la décision prise.

Pour y répondre, cette thèse a décomposé le problème de décision initial en plusieurs problèmes indépendants selon les échelles, pour mieux les intégrer ensuite.

• *L'état de l'art* (chapitre II) a alors analysé les méthodes pouvant aider à structurer un problème de décision multi-échelle, à prendre en compte les différentes dimensions de réduction du risque et à décider sur la base d'informations imparfaites issues de sources multiples et inégalement fiables. Il a abordé successivement l'aide à la décision, les méthodes de la sûreté de fonctionnement et les cadres théoriques de représentation des différentes formes d'imperfection de l'information.

L'analyse des méthodes d'aide à la décision a conduit à retenir les approches d'aide multicritère à la décision. Elles ne répondaient cependant pas à tous les objectifs du fait des limites des probabilités subjectives en univers incertain, de la non prise en compte des différentes formes d'imperfection entachant l'évaluation des critères, et d'une identification des indicateurs et critères qui restait à mener.

Les méthodes de la sûreté de fonctionnement (SdF) ont été explorées pour identifier les indicateurs et critères. L'application aux ouvrages de protection contre les inondations a mis en évidence leur intérêt pour évaluer leur efficacité. Elles restaient cependant limitées pour répondre aux objectifs : l'aspect multi-échelle n'était que faiblement traité, la composante socio-économique restait à prendre en compte, et l'évaluation globale de la performance du système à partir des évaluations individuelles pour chaque mode de défaillance restait à proposer.

Les théories de représentation de l'imperfection de l'information et leur intégration dans les méthodes d'aide à la décision ont ensuite été analysées. En tant qu'extension des cadres théoriques des probabilités, des ensembles flous et des possibilités, le Raisonnement Évidentiel basé sur la théorie des fonctions de croyance permettait de répondre aux besoins et objectifs identifiés. Il a été retenu pour représenter les différentes formes d'imperfection de l'information et combiner les informations issues de plusieurs sources inégalement fiables et plus ou moins importantes.

Les méthodes d'aide à la décision basées sur Raisonnement Évidentiel ont alors été retenues parce que répondant à l'objectif d'une aide multicritère à la décision en contexte d'information imparfaite. Elles n'avaient cependant jamais été adaptées à des problèmes de décision réels. Par ailleurs, des limites techniques ont été mises en évidence. La méthode de transposition, introduite par Tacnet (2009) pour représenter l'imperfection de l'évaluation d'un critère par un expert, reposait sur l'hypothèse d'une distribution uniforme de la fonction de masse en Raisonnement Évidentiel. L'aide multicritère à la décision et l'aide à la décision en univers incertain traitaient les problèmes de manière indépendante : la propagation de la connaissance dans l'ensemble du processus de décision n'était pas établie. L'évaluation de la qualité de la décision prise et sa validation restaient des problèmes à résoudre.

L'efficacité a été définie comme la comparaison entre une capacité et un objectif associé à une fonction. Son évaluation a été considérée comme un problème de décision.

- Sur cette base et étant données les limites méthodologiques mises en avant dans l'état de l'art, *trois axes de développement* ont émergé pour répondre à la problématique et aux objectifs :
 - axe 1 : description, structuration et formulation d'un problème multi-échelle (chapitre III) ;
 - axe 2 : adaptation et perfectionnement de l'aide à la décision basée sur le Raisonnement Évidentiel (chapitre IV) ;
 - axe 3 : aide à la décision intégrée en contexte d'information imparfaite (chapitre V).

Pour *l'axe 1*, les contributions au processus d'aide à la décision ont consisté dans l'explicitation d'un problème ambigu, dans la structuration et la formulation d'un problème de décision multi-échelle et dans la prise en compte de l'évolution du contexte de décision. Ces développements ont été appliqués au problème d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection torrentielle selon les échelles de l'ouvrage (micro), du dispositif (méso) et du bassin d'enjeux (macro).

L'adaptation innovante des méthodes de la SdF à ce contexte multi-échelle a permis la décomposition systémique du problème : un ouvrage est le composant d'un dispositif, lui-même le composant d'un bassin d'enjeux. Après avoir identifié les modes de défaillances, deux approches ont été proposées pour extraire les indicateurs et critères d'évaluation de l'efficacité à chaque échelle de système. La première approche simplifiée a défini directement des critères représentatifs de chaque mode de défaillance. La seconde approche détaillée a réalisé une analyse des modes de défaillance et a développé un système à base de règles pour évaluer la performance d'un ouvrage vis-à-vis de sa défaillance par affouillement. Cette démarche générique n'avait jamais été développée pour ce contexte d'application.

Une approche d'aide à la décision a ensuite été proposée dans un contexte d'évolution des besoins, des objectifs et des fonctions techniques donnés aux mesures de protection torrentielle. Si leur identification est nécessaire à l'évaluation de l'efficacité de ces mesures, la prise en compte des évolutions au travers d'une analyse historique a introduit un niveau de complexité supplémentaire dans le processus de décision.

Sur la base de cette construction multi-échelle, les problèmes de décision ont pu être formulés indépendamment selon des problématiques de tri, de classement ou de choix : par exemples, à quelle classe d'utilité appartient chaque dispositif de protection ? quel est le classement des ouvrages selon leur niveau d'efficacité ? quelle est l'action la plus efficace dans un bassin d'enjeux ? Il s'agissait d'un préalable nécessaire à leur modélisation et à leur traitement.

Pour *l'axe 2*, les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel ont été adaptées à un contexte d'application réel. Elles ont été perfectionnées pour mieux représenter l'imperfection de l'évaluation des critères et qualifier la qualité d'une décision. Le traitement d'un problème multicritère, basé sur des informations imparfaites et en contexte incertain, a été ensuite abordé.

Le formalisme de ces méthodes a d'abord été adapté aux problèmes d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection contre les risques torrentiels. Elles sont ainsi comparées sur la base de cas concrets, pour chaque échelle de système. Par exemple, la méthode ER-MCDA de Tacnet (2009) sera privilégiée à la méthode Soft Electre Tri (SET) de Dezert et Tacnet (2012b) pour évaluer l'efficacité d'un système (un ouvrage ou un dispositif) selon des labels qualitatifs (nulle, faible, moyenne, forte), en tenant compte de différents critères. En effet, elle permet de prendre en compte l'imperfection de l'évaluation des critères et elle est d'une complexité calculatoire moindre.

Les outils impliqués ont ensuite été améliorés selon trois points. Une approche a été développée pour valider l'évaluation selon des labels qualitatifs en s'appuyant sur un modèle physique externe : par exemple, un modèle de dimensionnement structural d'un ouvrage a été utilisé pour aider à valider l'évaluation de son efficacité structurale. Une nouvelle méthode de transposition a perfectionné la propagation de l'imprécision initiale de la mesure en relaxant l'hypothèse d'une distribution uniforme de la fonction de masse. Finalement, une nouvelle règle de décision en Raisonnement Évidentiel a associé un niveau de confiance à la décision finale recommandée.

Les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel ont finalement été associées. La nouvelle méthodologie appelée ER-MCDA-Rank s'est appuyée sur la nouvelle règle de décision pour classer les alternatives selon un préordre total en tenant compte de l'imperfection de

l'évaluation des critères là où la méthodologie initiale ER-MCDA de Tacnet (2009) ne permettait qu'un classement selon un préordre partiel. Deux approches ont ensuite été proposées pour associer l'aide multicritère à la décision basée sur des informations imparfaites et l'aide à la décision dans l'incertain. Leur apport a été notamment d'identifier les étapes de décision intermédiaires impliquées. La traçabilité du raisonnement est ainsi favorisée.

Pour *l'axe 3*, une méthodologie intégrée d'aide à l'évaluation de l'efficacité des mesures en termes de réduction du risque naturel en univers incertain a été développée. Pour cela, l'analyse de risque a été décomposée pour prendre en compte plusieurs types de dommages et une connaissance limitée sur les états de la nature. Le lien entre les différentes échelles d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection a été formalisé.

L'approche intégrée a traité successivement les problèmes formulés aux différentes échelles de système. Pour aborder chacun de ces problèmes, les méthodes d'aide à la décision basées sur le Raisonnement Évidentiel ont été utilisées. La méthodologie a été construite selon trois phases : tri des systèmes existants depuis la macro-échelle à la micro-échelle (phase 1), évaluation de l'efficacité des systèmes retenus depuis l'évaluation technique aux micro et méso-échelles jusqu'à l'évaluation socio-économique à la macro-échelle (phase 2), comparaison des actions potentielles permettant d'améliorer l'efficacité selon leur efficacité, qui intègre le coût, pour choisir la meilleure (phase 3).

Les méthodes d'aide à la décision ont finalement été comparées sur un cas d'application simplifié à la macro-échelle du bassin d'enjeux. Cela a mis en évidence l'apport des approches d'aide multicritère à la décision par rapport à l'analyse coût-bénéfices utilisée classiquement pour prendre en compte plusieurs types de dommages. L'applicabilité de l'association des méthodes d'aide multicritère à la décision et d'aide à la décision dans l'incertain a ensuite été démontrée. Si la traçabilité du raisonnement et des décisions intermédiaires a été assurée, la propagation de l'ensemble de l'imperfection de l'information a cependant conduit à des ambiguïtés en termes de décision. On retrouve ici un paradoxe bien connu : propager l'imperfection montre en effet combien les décisions peuvent être délicates. Des règles d'interprétation sont alors nécessaires pour espérer être opérationnelles.

- *Au moment de conclure* ce travail, nous rappelons que la question de l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection contre les risques naturels en montagne n'est pas nouvelle. Elle a été posée dès les années 1970 (Commandeur 1979 ; RCB 1983). L'application de l'analyse coûts-bénéfices (ACB) à ce contexte a été envisagée jusqu'aux années 2000 (Brochot et al. 2003). Son développement a été abandonné en France alors qu'il s'engageait pour les inondations (Grelot 2004). Le problème de la prise en compte de nombreux paramètres et l'évaluation dans le domaine des phénomènes torrentiels où les connaissances sont très limitées ont expliqué cet abandon.

Cette thèse a proposé une alternative. L'expertise est souvent le dernier rempart contre la méconnaissance. L'expert assume des hypothèses et les choix correspondants. Le travail proposé considère et accepte l'imperfection mais propose de l'objectiver. Il ne s'agit cependant pas de proposer une boîte noire aux pouvoirs magiques pour décider. Au final, un résultat important est d'avoir été capable d'expliquer ce qu'on ne sait pas et de proposer un mode de prise en compte dans le processus de décision. Cela permet d'éviter de se vouer à des méthodes sans en mesurer clairement les limites, comme pour l'ACB par exemple. Certains résultats pourront donc paraître frustrants mais la méthodologie proposée a le mérite d'être objective et réaliste. Savoir ce qu'on ne sait pas éclaire déjà la décision.

Parmi les contributions à une approche holistique d'analyse intégrée du risque et à l'aide à la décision basée sur le Raisonnement Évidentiel, le développement d'une approche intégrée d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection permettant de tenir compte de toute sa complexité nous semble d'un intérêt particulier. La méthodologie développée dans le chapitre V fait le lien entre les approches techniques et d'aide à la décision, entre l'évaluation de l'efficacité technique et l'analyse du risque ce qui, paradoxalement, n'avait jamais été abordé.

Dans le cadre de cette thèse, ce sont des méthodes de complexité importante par rapport à la pratique qui ont été utilisées et perfectionnées. Différentes approches peuvent cependant être appliquées et comparées à chaque étape de la méthodologie avec une identification simplifiée ou détaillée des critères, différentes méthodes d'agrégation considérant ou non l'imperfection de l'évaluation des critères, plusieurs sources d'information et l'incertitude épistémique sur la connaissance des phénomènes naturels. La différence avec la pratique actuelle réside alors dans le fait de maîtriser la complexité des outils pour identifier ensuite les points de simplification.

Finalement, ce travail aura permis une prise de conscience qui pourrait améliorer la pratique de l'expertise au service de l'aide à la décision publique :

- La compréhension du rôle des ouvrages de protection en termes de réduction du risque est centrale ;
- Les objectifs changent avec les contextes de décision. Il faut l'accepter pour prendre des décisions actuelles sans remettre en cause la validité de celles prises dans le passé ;
- L'expertise est pluridisciplinaire et implique une complémentarité des approches techniques. L'analyse d'un expert doit être partagée et confrontée ;
- Chaque acteur a une place particulière dans le processus de décision. L'expert apporte des éléments d'aide à la décision ; le décideur décide ;
- L'aide à la décision est le processus final de l'expertise. La compréhension approfondie des outils d'aide à la décision est un atout pour l'expert pour mener cette dernière étape ;
- L'affichage des limites de la connaissance n'est pas forcément une demande des décideurs. Elle permet cependant à l'expert de se positionner clairement dans son rôle d'appui à la décision et d'engager le dialogue avec le décideur ;
- Un processus de décision s'appuie sur un raisonnement qui peut être complexe. Le décortiquer met en évidence cette complexité mais ne pas le faire ne lui enlève pas ce caractère.

En ayant pris en main le problème dans sa globalité et selon toute sa complexité, la perspective ultime de ce travail sera d'arriver à transférer progressivement ces outils vers la pratique en reconnaissant que « la simplicité est la sophistication suprême » (Léonard de Vinci).

Bibliographie : productions

Cette section présente, indépendamment des références bibliographiques générales, les productions techniques et scientifiques réalisées dans le cadre de cette thèse, en tant que premier auteur ou que co-auteur.

- Carladous, S. (2013). « Analyse critique des méthodes d'évaluation de l'efficacité économique des mesures de protection contre les risques naturels en montagne. » Mém.de mast. Montpellier, France : Université Paul Valéry, Géographie, 130 p.
- Carladous, S., Michaud, M.-P., Tacnet, J.-M. et Delvienne, Q. (2014a). *A survey on protection work databases used at the Alpine Space level : analysis of contents and state of the art related to protection work effectiveness assessment in START-it-uP (WP4)*. Rapp. tech. Grenoble, France : European Regional Development Fund - Alpine Space Program - START-it-uP project : State-of-the-Art in Risk Management Technology : Implementation and Trial for Usability in Engineering Practice and Policy, 83 p.
- Carladous, S., Piton, G., Recking, A., Liébault, F., Richard, D., Tacnet, J.-M., Kuss, D., Philippe, F., Quefféléan, Y. et Marco, O. (2016a). « Towards a better understanding of the today French torrents management policy through a historical perspective. » In : *3rd FLOODrisk Conference*. Lyon, France, 12 p.
- Carladous, S., Piton, G., Tacnet, J.-M., Philippe, F., Nepote-Vesino, R., Quefféléan, Y. et Marco, O. (2016b). « From the restoration of French mountainous areas to their global management : historical overview of the Water and Forestry Administration actions in public forests. » In : *13th Congress Interpraevent*. Lucerne, Suisse, p. 34–42.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M. et Batton-Hubert, M. (2016c). « Protection structures against natural hazards : from failure analysis to effectiveness assessment ». In : *13th Congress Interpraevent*. Lucerne, Suisse, p. 735–743.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Curt, C. et Batton-Hubert, M. (2014b). « Evaluation intégrée de l'efficacité des ouvrages de protection contre les risques naturels. Integrated assessment of the efficiency of protection systems against natural hazards in mountains. » In : *Institut pour la Maîtrise des Risques - Colloque Lambda Mu*. Dijon, France, 11 p.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Dezert, J. et Batton-Hubert, M. (2015). « Belief function theory based decision support methods : Application to torrent protection work effectiveness and reliability assessment. » In : *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems*. Sous la dir. de L. Podofillini, B. Sudret, B. Stojadinović, E. Zio et W. Kröger. Zurich, Suisse : Taylor et Francis Group, p. 3643–3652.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Dezert, J. et Batton-Hubert, M. (2016d). « Belief function theory based decision support methods applied to torrent protection effectiveness. » In : *(soumis 'a) Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems : Part A XX*. Special issue : The treatment of uncertainty in risk and reliability modeling and decision making, p. XX–XX.

- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Dezert, J., Curt, C. et Batton-Hubert, M. (2016e). « Méthode d'aide à la décision basée sur un raisonnement évidentiel pour évaluer l'efficacité d'un ouvrage torrentiel de stabilisation. » In : *9^{èmes} Journées Fiabilité, Matériaux et Structures*. Sous la dir. de T. Verdel. France.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Dezert, J., Dupouy, G. et Batton-Hubert, M. (2016f). « A New ER-MCDA Mapping for Decision-Making based on Imperfect Information. » In : *4th International Conference on Belief Functions*. Prague, République Tchèque, 10 p.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Dezert, J., Han, D. et Batton-Hubert, M. (2016g). « Applying ER-MCDA and BF-TOPSIS to Decide on Effectiveness of Torrent Protection. » In : *4th International Conference on Belief Functions*. C125. Prague, République Tchèque, 10 p.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Dezert, J., Han, D. et Batton-Hubert, M. (2016h). « Evaluation of Efficiency of Torrential Protective Structures With New BF-TOPSIS Methods. » In : *19th International Conference on Information Fusion*. Heidelberg, Allemagne, 8 p.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Di Ciocco, G., C., Curt et Batton-Hubert, M. (2016i). « Approche quantitative pour élaborer une échelle d'évaluation experte d'un indicateur de stabilité structurale. » In : *9^{èmes} Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures*. Sous la dir. de T. Verdel. Nancy, France, 8 p.
- Carladous, S., Tacnet, J.-M., Eckert, N., Curt, C. et Batton-Hubert, M. (2014c). « Vers une analyse intégrée de l'efficacité des ouvrages de protection contre les risques naturels en montagne : évaluation économique en complément des volets structurels et fonctionnels. » In : *8^{èmes} Journées Fiabilité, Matériaux et Structures*. Sous la dir. de C. Curt, L. Peyras, J. Baroth et A. Chateauneuf. France, p. 61–74.
- Dezert, J., Han, D., Tacnet, J.-M. et Carladous, S. (2016a). « Decision-Making with Belief Interval Distance ». In : *4th International Conference on Belief Functions*. Prague, République Tchèque, 9 p.
- Dezert, J., Han, D., Tacnet, J.-M. et Carladous, S. (2016b). « The BF-TOPSIS Approach for Solving Non-Classical MCDM Problems. » In : *(accepted in) 4th International Conference on Belief Functions*.
- Philippe, F., Carladous, S., Tacnet, J.-M. et Bouvet, P. (2016). « Taking into account protective works in land-use planning for mountain torrential floods : state of the art of the present French practices. » In : *3rd FLOODrisk Conference*. Lyon, France, 12 p.
- Piton, G., Carladous, S., Recking, A., Tacnet, J.-M., Liébault, F., Kuss, D., Quefféléan, Y. et Marco, O. (2016). « Why do we build check-dams? An historical perspective from the French experience. » In : *Earth Surface Processes and Landforms*. 17 p.
- Tacnet, J.-M., C., Curt, Carladous, S., Le Gat, Y., Rulleau, B. et Wery, C. (2016). « Combiner les modèles d'aide à la décision pour la gestion patrimoniale des infrastructures. » In : *Sciences Eaux et Territoires Spécial*, p. 82–88.
- Tacnet, J.-M., Curt, C., Carladous, S. et Ghariani, N. (2014a). *Dispositifs de protection contre les risques torrentiels. Agrégation d'indicateurs d'évaluation de l'efficacité des mesures de protection contre les risques naturels en montagne - Problématique et méthodologie. Rapport Final - V 1.0*. Rapp. tech. Grenoble, France : irstea, 76 p.
- Wery, C., Rulleau, B., Carladous, S., Grangeat, A., Labépie, E., Joalland, O., Piller, O. et Tacnet, J.-M. (2016). « Risque, vulnérabilité, résilience : quels apports pour la gestion patrimoniale des ouvrages de protection et des réseaux urbains ? » In : *Sciences Eaux et Territoires Spécial*, p. 8–13.

Bibliographie : références

- Abdellaoui, M. et Gonzales, C. (2006). « Théorie de l'utilité multiattribut. » In : *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision Vol. 3 : analyse multicritère*. Sous la dir. de D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot et H. Prade. Paris, France : Hermes - Lavoisier. Chap. 1, p. 25–62.
- AFNOR (1996). *NF EN 1325-1 : Vocabulaire de Management par la Valeur, de l'Analyse de la Valeur et de l'Analyse Fonctionnelle - Partie 1 : analyse de la valeur et Analyse Fonctionnelle*. 24 p.
- AFNOR (2001). *NF EN 13306 X 60-319 - Terminologie de la maintenance*. 26 p.
- AFNOR (2003a). *NF EN 1990 - Bases de calcul des structures*. 72 p.
- AFNOR (2003b). *NF X50-110 - Qualité en expertise. Prescriptions générales de compétence pour une expertise*. 29 p.
- AFNOR (2005a). *NF EN 1992-1-1 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments*. 204 p.
- AFNOR (2005b). *NF EN 1997-1 - Calcul géotechnique*. 168 p.
- AFNOR (2005c). *NF EN ISO 9000 - Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire*. 30 p.
- AFNOR (2006). *NF EN 60812 - Techniques d'analyses de la fiabilité du système - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)*. 46 p.
- AFNOR (2011). *NF X50-100 - Management par la valeur : Analyse fonctionnelle, caractéristiques fondamentales*. 39 p.
- AFNOR (2014a). *NF EN 1325 - Management par la valeur - Vocabulaire - Termes et définitions*. 20 p.
- AFNOR (2014b). *NF P 94-281 - Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Ouvrages de soutènement - Murs*. 91 p.
- Akbas, S. O., Blahut, J. et Sterlacchini, S. (2009). « Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. » In : *Landslide Processes : From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling : Proceedings of the Landslide Processes Conference, a Tribute to Dr. Theo Van Asch*. Sous la dir. de J.-P. Malet, A. Remaître et T. Bogard. Strasbourg, France : CERG Editions, p. 229–233.
- Allais, M. (1953). « Le comportement de l'homme rationnel devant le risque : Critique des postulats et axiomes de l'école américaine. » In : *Econometrica* 21, p. 503–546.
- Ancey, C., éd. (2006). *Dynamique des avalanches*. Lausanne, Suisse : Quae, 338 p.
- Appriou, A. (2002). « Discrimination multisignal par la théorie de l'évidence. » In : *Décision et Reconnaissance des formes en signal*. Sous la dir. de R. Lengllé. Paris, France : Hermes Science Publication. Chap. 7, p. 219–258.
- Arrow, K. J. (1951). *Special choice and individual values*. 2nd edition, 1963. U.S.A. : John Wiley & Sons, 124 p.

- Arrow, K. J. (1965). *Aspects of The Theory of Risk-Bearing*. Helsinki, Finlande : Yrjö Jahnssoonin Säätiö, 61 p.
- Astrade, L., E., Ployon et Veyrat-Charvillon, S. (2011). « Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond sur les tronçons torrentiels, retours d'expériences. » In : *Images et modèles 3D en milieux naturels*. Sous la dir. de S. Jaillot, E. Ployon et T. Villemin. 12. Bourget du Lac, France : Collection Edytem, p. 107–118.
- Bambara, G. (2016). « Elaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales. » Thèse de doct. Aix-en-Provence, France : Université Aix-Marseille, Géosciences de l'Environnement, 256 p.
- Barzilai, J. et Golany, B. (1994). « AHP rank reversal, normalization and aggregation rules. » In : *INFOR* 32.2, p. 57–63.
- Baudrit, C. (2005). « Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : application à l'évaluation des risques liés aux sites et aux sols pollués ». Thèse de doct. Toulouse, France : Université Toulouse III, Informatique, 198 p.
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M. et Ignatius, J. (2012). « A state-of the-art survey of TOPSIS applications. » In : *Expert Systems with Applications* 39.17, p. 13051–13069.
- Bernard, M. (1900). *Restauration et conservation des terrains en montagne. Correction des ruines de Pellafol (Isère)*. Paris, France : Ministère de l'Agriculture, Administration des eaux et forêts, Exposition universelle internationale de 1900, 15 p.
- Bernard, M. (1927). *Cours de restauration des montagnes*. Paris, France : Ecole Nationale des Eaux et Forêts, 788 p.
- Bernoulli, D. (1738). « Specimen Theoriae Novae de Mensura Sortis ». In : *Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 5, p. 175–192.
- Bernoulli, D. (1954). « Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk - Translated from Latin into English by Dr. Louise Sommer, from Specimen Theoriae Novae de Mensura Sortis ». In : *Econometrica* 22.1, p. 23–36.
- Besson, L. (1985). « Les risques naturels. » In : *Revue de géographie alpine* 73.3, p. 321–333.
- Beynon, M. (2002). « DS/AHP method : A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty. » In : *European Journal of Operational Research* 140.1, p. 148–164.
- Beynon, M. (2005). « A method of aggregation in DS/AHP for group decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group. » In : *Computers and Operations Research* 32, p. 1881–1896.
- Bilgiç, T. et Türkşen, B.I. (2000). « Measurement of membership functions : Theoretical and empirical work. » In : *Fundamentals of Fuzzy Sets*. Sous la dir. de D. Dubois et H. Prade. New York, U.S.A. : Springer Science & Business Media. Chap. 3, p. 195–227.
- Birnbaum, Z. W. (1968). *On the importance of different components in a multicomponent system*. Rapp. tech. Seattle, Washington, U.S.A. : Laboratory of Statistical Research, Department of Mathematics, University of Washington, 23 p.
- BLFUW (2009a). *Kosten-Nutzen-Untersuchungen im Schutzwasserbau Erläuterungen. Erläuterungen zur Benutzung der Berechnungsvorlage für Kosten-Nutzen-Untersuchungen im Schutzwasserbau gemäß RIWA-T und Erläuterungen zur Benutzung des Summenblattes für Gewässerentwicklungskonzepte*. Rapp. tech. Vienne, Autriche : BLFUW, WBF, 21 p.
- BLFUW (2009b). *Kosten-Nutzen-Untersuchungen im Schutzwasserbau Richtlinie. KNU gemäß Par. 3 Abs. 2 Ziffer 3 WBF Fassung*. Rapp. tech. Vienne, Autriche : BLFUW, WBF, 27 p.
- Bloch, I. (1999). « On fuzzy distances and their use in image processing under imprecision. » In : *Pattern Recognition* 32, p. 1873–1895.
- Bloch, I., éd. (2003). *Fusion d'informations en traitement du signal et d'images*. Paris, France : Hermes Science Publication, 324 p.

- Boncompain, I. et Quefféléan, Y. (2013). *Coûts des protections contre les crues torrentielles. Guide à l'attention des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'oeuvre et des experts chargés de l'évaluation des projets*. Rapp. tech. Grenoble, France : ONF-DTN RTM, 95 p.
- Bossé, É., Roy, J. et Wark, S. (2007). *Concepts, Models, and Tools for Information Fusion*. Artech House, 392 p.
- Bourrelier, P.-H., Deneufbourg, G. et de Vanssay, B. (2000). *Les catastrophes naturelles : le grand cafouillage*. Paris, France : Osman Eyrolles Multimedia, 262 p.
- Bouyssou, D., Dubois, D., Pirlot, M. et Prade, H., éd. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision Vol. 2 : risque et incertain*. Paris, France : Lavoisier.
- Bozóki, S. et Lewis, R. H. (2005). « Solving the Least Squares Method problem in the AHP for 3 X 3 and 4 X 4 matrices. » In : *Central European Journal of Operations Research* 13.3, p. 255–270.
- Brans, J. P., Mareschal, B. et Vincke, P. (1984). « Prométhée : A new family of outranking methods in multicriteria analysis. » In : *84th IFORS Conference*. Sous la dir. de J. P. Brans. Washington, U.S.A., p. 408–421.
- Braud, S. et Alber, A. (2013). *Synthèses et connaissances : proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau*. Rapp. tech. DREAL Centre.
- Bravard, J.-P. (2002). « Le « traitement » des versants dans le département de la Drôme : Des inondations de 1840 à la loi du 27 juillet 1860 ». In : *Annales des Ponts et Chaussées*, p. 37–43.
- Bravard, J.-P., Amoros, C., Pautou, G., Bornette, G., Bournaud, M., Creuzé des Châtelliers, M., Gibert, J., Peity, J.-L., Perrin, J.-F. et Tachet, H. (1997). « River incision in South-East France : morphological phenomena and ecological effects. » In : *Regulated Rivers : Research & Management* 13.3, p. 75–90.
- Breton, P. (1867). *Mémoire sur les barrages de retenue de graviers dans les gorges des torrents*. Paris, France : Dunod, 82 p.
- Brochot, S. (1998). « Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle - Apports des versants et production de sédiments. » In : *Ingénieries* 15, p. 61–78.
- Brochot, S., Duclos, P. et Bouzit, M. (2003). « L'évaluation économique des risques torrentiels : intérêts et limites pour les choix collectifs de prévention. » In : *Ingénieries Spécial*, p. 53–68.
- Brugnot, G. et Cassayre, Y. (2002). « De la politique française de restauration des terrains en montagne à la prévention des risques naturels. » In : *Les pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire*. Sous la dir. de MHS Alpes. Grenoble, France, 11 p.
- Bründl, M. (2009). *Guide du concept de risque*. Bern, Suisse : PLANAT, 61 p.
- Bründl, M. (2012). « EconoMe-Develop - a software tool for assessing natural hazard risk and economic optimisation of mitigation measures. » In : *2012 International Snow Science Workshop*. Anchorage, Alaska, U.S.A., p. 639–643.
- Bründl, M., Romang, H.E., Bischof, N. et Rheinberger, C.M. (2009). « The risk concept and its application in natural hazard risk management in Switzerland. » In : *Natural Hazards and Earth System Science* 9.3, p. 801–813.
- Bubeck, P. et Kreibich, H. (2011). *Natural Hazards : direct costs and losses due to the disruption of production processes, Report WP01-2*. Rapp. tech. Postdam, Pays-Bas : CONHAZ Consortium, 62 p.
- Castelli, B. (1628). *della misura dell'acqua corrente [traicté de la mesure des eaux courantes]*. 33 p.
- CEPRI (2008). *Evaluation de la pertinence des mesures de gestion du risque d'inondation. Manuel des pratiques existantes*. Rapp. tech. Paris, France : 194 p.

- CEPRI (2011). *L'ACB (analyse coût-bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations. Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires*. Rapp. tech. Paris, France : 44 p.
- CGDD (2012). *Analyse multicritères : application aux mesures de prévention des inondations. Cahier des charges*. Rapp. tech. Paris, France : MEDDE, 12 p.
- CGDD (2014). *Analyse multicritères des projets de prévention des inondations. Guide méthodologique*. Rapp. tech. Paris, France : MEDDE, 84 p.
- Chambon, G. et Laigle, D. (2013). « Les laves torrentielles. » In : *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Sous la dir. d'A. Recking, D. Richard et G. Degoutte. Paris, France : Quae. Chap. 4, p. 200–266.
- Champion, M. (1856). *Recherches historiques sur les inondations du Rhône et de la Loire*. Lyon, France : Typographie Panckoucke, 19 p.
- Charnes, A., Cooper, W. W. et Ferguson, R. (1955). « Optimal estimation of executive compensation by linear programming. » In : *Management Science* 1, p. 138–151.
- Chateauneuf, A. et Cohen, M. (2006). « Extensions cardinales du modèle EU basées sur l'intégrale de Choquet. » In : *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision Vol. 2 : risque et incertain*. Sous la dir. de D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot et H. Prade. Paris, France : Hermes - Lavoisier. Chap. 3, p. 67–98.
- Chateauneuf, A., Cohen, M. et Jaffray, J.-Y. (2006a). « Décision dans l'incertain : les modèles classiques. » In : *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision Vol. 2 : risque et incertain*. Sous la dir. de D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot et H. Prade. Paris, France : Hermes - Lavoisier. Chap. 2, p. 27–48.
- Chateauneuf, A., Cohen, M. et Tallon, J.-M. (2006b). « Décision dans le risque : mesure du risque, aversion pour le risque, modèle classique d'utilité espérée, paradoxe d'Allais, modèles à niveaux de sécurité. » In : *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision Vol. 2 : risque et incertain*. Sous la dir. de D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot et H. Prade. Paris, France : Hermes - Lavoisier. Chap. 1, p. 27–48.
- Chen, X., Cui, P., You, Y., Chen, J. et Li, D. (2015). « Engineering measures for debris flow hazard mitigation in the Wenchuan earthquake area. » In : *Engineering Geology* 194, p. 73–85.
- Chu, A.T.W., Kalaba, R.E. et Spingarn, K. (1979). « A comparison of two methods for determining the weight belonging to fuzzy sets. » In : *Journal of Optimization Theory and Applications* 4, p. 531–538.
- CIGB (1995). *Rupture de barrages. Analyse statistique*. Rapp. tech. 73 p. Commission Internationale des Grands Barrages.
- Cobb, R. R. et Shenoy, P. P. (2006). « On the plausibility transformation method for translating belief function models to probability models. » In : *International Journal of Advanced Research* 41.3, p. 314–330.
- Comiti, F. (2012). « How natural are Alpine mountain rivers? Evidence from the Italian Alps. » In : *Earth Surface Processes and Landforms* 37.7, p. 693–707.
- Commandeur, M. (1979). « Coûts et avantages des travaux RTM - Cas d'une zone urbanisée. » Mém.de mast. Grenoble, France : UER de Géographie, 84 p.
- Communities and Local Government, éd. (2009). *Multi-criteria analysis : a manual*. Londres, Royaume-Uni : Crown, 166 p.
- Conesa-Garcia, C. et Lenzi, M., édés. (2013). *Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams*. New-York, U.S.A. : Nova Science Publishers, Inc., 351 p.
- Cook, W. D. et Kress, M. (1985). « Deriving weights from pairwise comparison ratio matrices : An axiomatic approach. » In : *European Journal of Operations Research* 29, p. 387–405.

- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. et Smith, J. T. (2014). « Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. » In : *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73. Special issue on « The Geological and Geotechnical Hazards of the 2008 Wenchuan Earthquake, China : Part II », p. 209–263.
- Costa de Bastelica, M. (1874). *Les torrents : leurs lois, leurs causes, leurs effets, moyens de les réprimer et de les utiliser, leur action géologique universelle*. Paris, France : Librairie Polytechnique, 296 p.
- Coussot, P. (1992). « Rhéologie des boues et laves torrentielles. Études de dispersions et suspensions concentrées. » Thèse de doct. Grenoble, France : Université Joseph Fourier, Mécanique, 397 p.
- Crawford, G. et Williams, A. (1985). « A note on the analysis of subjective judgment matrices. » In : *Journal of Mathematical Psychology* 29, p. 387–405.
- Curt, C. (2008). « Évaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances - Application aux barrages en remblai. » Thèse de doct. Clermont-Ferrand, France : Université Blaise Pascal, Génie Civil, 201 p.
- Curt, C., Peyras, L. et Boissier, D. (2010). « A Knowledge Formalization and Aggregation-Based Method for the Assessment of Dam Performance. » In : *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 25, p. 171–184.
- Cuzzolin, F. (2008). « A geometric approach to the theory of evidence. » In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 38.4, p. 522–534.
- D4E (2007). *Evaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations*. Rapp. tech. Paris, France : MEDAD, 117 p.
- D’Agostino, V. (2013). « Assessment of Past Torrential Events Through Historical Sources. » In : *Dating Torrential Processes on Fans and Cones. Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment*. Sous la dir. de M. Schneuwly-Bollscheweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau. T. 47. Advances in Global Change Research. Pays-Bas : Springer, p. 131–146.
- Dantzig, G. B., Orden, A. et Wolfe, P. (1955). « The generalized simplex method for minimizing a linear form under linear inequality restraints. » In : *Pacific Journal of Mathematics* 5.2, p. 183–196.
- Dasarathy, B. V. (1997). « Sensor Fusion Potential Exploitation - Innovative Architectures and Illustrative Applications. » In : *Proceedings of the IEEE*. 85.1, p. 24–38.
- de Cooman, G. et Aeyels, D. (1999). « Supremum preserving upper probabilities ». In : *Information Sciences* 118.1-4, p. 173–212.
- de Crécy, L. (1983). « Evolution de la Restauration des terrains en montagne de 1860 à 1983. La politique de prévention des risques naturels en montagne depuis 150 ans. » In : *108^{ème} congrès national des Sociétés savantes*.
- De Finetti, B. (1937). « La prévision : ses lois logiques, ses sources subjectives. » In : *Annales de l’institut Henri Poincaré*. T. 7. 1. Paris, France, p. 1–68.
- de la Bretesche, B., éd. (2000). *La méthode APTE. Analyse de la Valeur. Analyse Fonctionnelle*. Paris, France : Pétrelle, 239 p.
- de Wolfe, V. G., Santi, P. M., Ey, J. et Gartner, J. E. (2008). « Effective mitigation of debris flows at Lenon Dam, La Plata County, Colorado ». In : *Geomorphology* 96.3, p. 366–377.
- Dell’Agnese, A., Mazzorana, B., Comiti, F., Von Maravic, P. et D’Agostino, V. (2013). « Assessing the physical vulnerability of check dams through an empirical damage index. » In : *Journal of Agricultural Engineering* 44, p. 9–16.

- Demontzey, P. (1882). *Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes*. Paris, France : Ministères de l'Agriculture et du Commerce et des Travaux Publics, 528 p.
- Demontzey, P. (1894). *L'extinction des torrents en France par le reboisement*. Sous la dir. de Ministère de l'Agriculture. Paris, France : Imprimerie Nationale, 449 p.
- Deymier, C., Tacnet, J.-M. et Mathys, N. (1995). *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle*. Grenoble, France : Cemagref Editions, 287 p.
- Dezert, J., Han, D. et Yin, H. (2016c). « A new belief function based approach for multi-criteria decision-making support ». In : *19th International Conference on Information Fusion*. Heidelberg, Allemagne, 8 p.
- Dezert, J. et Smarandache, F. (2008). « A new probabilistic transformation of belief mass assignment. » In : *11th International Conference on Information Fusion*. Cologne, Allemagne, 8 p.
- Dezert, J. et Tacnet, J.-M. (2012a). « Sigmoidal model for belief function-based Electre Tri method. » In : *Belief Functions : Theory and Applications*. Sous la dir. de T. Denoeux et M.-H. Masson. Heidelberg, Allemagne : Springer, p. 401–408.
- Dezert, J. et Tacnet, J.-M. (2012b). « Soft ELECTRE TRI outranking method based on belief functions. » In : *15th International Conference on Information Fusion Proceedings*. Singapour, p. 607–614.
- Dezert, J., Tacnet, J.-M., Batton-Hubert, M. et Smarandache, F. (2010). « Multi-criteria decision making based on DSMT-AHP. » In : *International Workshop of Belief Functions*. Compiègne, France, 8 p.
- Dezert, J. et Tchamova, A. (2014). « On the validity of Dempster's fusion rule and its interpretation as a generalization of Bayesian fusion rule. » In : *International Journal of Intelligent Systems* 29.3, p. 223–252.
- Di Ciocco, G. (2015). « Conception et réalisation d'un environnement d'évaluation de l'efficacité fonctionnelle et structurelle d'ouvrages de protection contre les risques torrentiels. » Mém.de mast. Clermont-Ferrand, France : Polytech, 138 p.
- DTRTM (2007). *Observatoire des Risques Naturels en Montagne, Notice Générale, Tome 1, Définition et descripteurs, Base de données RTM*. 2^e éd. Grenoble, France, 120 p.
- Dubois, D. et Prade, H. (1987). « Properties of measures of information in evidence and possibility theories. » In : *Fuzzy sets and systems* 24, p. 161–182.
- Dubois, D. et Prade, H. (1988). *Possibility Theory - An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. Paris, France : Springer, 280 p.
- Dubois, D. et Prade, H. (1989). « Fuzzy sets, probability and measurement. » In : *European Journal of Operational Research* 40, p. 135–154.
- Dubois, D. et Prade, H. (1992). « When upper probabilities are possibility measures. » In : *Fuzzy sets and systems* 49, p. 65–74.
- Duclos, P., Bouzit, M. et Brochot, S. (1999). « Application d'une méthode d'analyse économique à la définition d'une stratégie de protection. » In : *Eléments d'aide à la programmation des investissements contre les risques naturels et à l'élaboration de plans de prévention des risques (PPR)*. Grenoble, France, 85 p.
- Dupouy, G., Tacnet, J.-M., Bourrier, F., Berger, F., Crimier, N., Mekhnacha, K., Mamier, M. et Moulet-Vargas, E. (2016). « Propagating spatial and thematic uncertainties in mountain natural hazard assessment process. » In : *ESREL 2016 Conference*. Glasgow, Royaume-Uni, 8 p.
- Dupouy, G., Tacnet, J.-M., Laigle, D. et Chojnacki, E. (2012). « Uncertainty in natural hazards numerical modelling : application of an hybrid approach to debris-flows simulation. » In : *12th Congress Interpraevent*. Grenoble, France, p. 96–106.

- Dupuit, J. et De Bernardi, M. (1933). *De l'utilité et de sa mesure*. T. 2. La Riforma sociale.
- Eckert, N., Keylock, C.J., Bertrand, D., Parent, E., Faug, T., Favier, P. et Naaim, M. (2012). « Quantitative risk and optimal design approaches in the snow avalanche field : Review and extensions. » In : *Cold Regions Science and Technology* 79-80, p. 1–19.
- École Forestière (1911a). *Restauration et conservation des terrains en montagne. Deuxième partie, Description sommaire des périmètres de restauration, Région des Alpes*. Paris, France : Imprimerie Nationale, 215 p.
- École Forestière (1911b). *Restauration et conservation des terrains en montagne. Première partie, Renseignements généraux*. Paris, France : Imprimerie Nationale, 214 p.
- École Forestière (1911c). *Restauration et conservation des terrains en montagne. Troisième partie, Description sommaire des périmètres de restauration, Région des Cévennes et du Massif Central, Région des Pyrénées*. Paris, France : Imprimerie Nationale, 197 p.
- Edgeworth, F. Y. (1881). *Mathematical psychics - an essay on the application of mathematics to the moral sciences*. Londres, Royaume-Uni : C. Kegan Paul & Co., 150 p.
- Empereur Napoléon III (1860). *Loi du 28 juillet 1860 sur le reboisement des montagnes*. Paris, France, 5 p.
- Empereur Napoléon III (1864). *Loi du 8 juin 1864 complétant, en ce qui concerne le gazonnement, la loi du 28 juillet 1860, sur le reboisement des montagnes*. Paris, France, 3 p.
- Erdlenbruch, K., Gilbert, E., Grelot, F. et Lescoulier, C. (2008). « Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre les inondations - Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb. » In : *Ingénieries* 53, p. 3–20.
- Essaid, A., Martin, A., Smits, G. et Ben Yaghlane, B. (2014). « A distance-based decision in the credal level. » In : *12th International Conference on Artificial Intelligence and Symbolic Computation*. Séville, Espagne, p. 147–156.
- Fabre, J.-A. (1797). *Essai sur la théorie des torrens et des rivières*. Paris, France : Bidault Libraire, 200 p.
- Félix, H., Beullac, B., Tourment, R., Meriaux, P. et Peyras, L. (2011). « Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire ». In : *Pratiques des Etude De Dangers des barrages*. Lyon, France, p. 71–89.
- Ferro, V. (2013). « Modern strategies for torrent control : Slit and W-weir check dams. » In : *Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams*. Sous la dir. de C. Conesa-Garcia et M. Lenzi. New-York, U.S.A. : Nova Science Publishers, Inc. Chap. 3, p. 33–62.
- Fesquet, F. (1997). « Un corps quasi-militaire dans l'aménagement du territoire : le corps forestier et le reboisement des montagnes méditerranéennes en France et en Italie aux XIX^{èmes} et XX^{èmes} siècles. » Thèse de doct. Montpellier, France : Université Paul Valéry, Histoire, 992 p.
- Flez, C. et Lahousse, P. (2002). « La gestion du risque torrentiel à Serre-Chevalier : acteurs et enjeux. » In : *L'Espace Géographique* 31, p. 163–173.
- Flez, C. et Lahousse, P. (2014). « Recent Evolution of Natural Hazard Management Policy in France, the Example of Serre-Chevalier (French Alps). » In : *Environmental Management* 34.3, p. 353–362.
- Florea, M.C., Jusselme, A.-L., Grenier, D. et Bossé, E. (2008). « Approximation techniques for the transformation of fuzzy sets into random sets. » In : *Fuzzy Sets and Systems* 159, p. 270–288.
- Forman, E. H. (1993). « Facts and fictions about the analytic hierarchy process. » In : *Mathematical and Computer Modelling* 17.4-5, p. 19–26.
- Fourchy, P. (1966). « Déboisement et reboisement. Les débuts de la lutte contre l'érosion au XIX^{ème} siècle dans les Alpes françaises. » In : *Revue forestière française*, p. 467–487.

- Frei, M., Pfammater, C. et Brigger, A. (2012). *Handbuch zur Kontrolle und zum Unterhalt forstlicher Infrastruktur (KUfl - Handbuch)*. Rapp. tech. Kanton Graubünden, Kanton Bern, Kanton Wallis, 82 p.
- Fuchs, S., Heiss, K. et Hübl, J. (2007a). « Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. » In : *Natural Hazards and Earth System Science* 7, p. 495–506.
- Fuchs, S., Thöni, M., McAlpin, M. C., Gruber, U. et Bründl, M. (2007b). « Avalanche hazard mitigation strategies assessed by cost effectiveness analyses and cost benefit analyses - evidence from Davos, Switzerland. » In : *Natural Hazards* 41, p. 113–129.
- Galia, T., Škarpich, V., Hradecký, J. et Příbyla, Z. (2016). « Effect of grade-control structures at various stages of their destruction on bed sediments and local channel parameters. » In : *Geomorphology* 253, p. 305–317.
- Gamper, C.D., Thöni, M. et Weck-Hannemann, H. (2006). « A conceptual approach to the use of Cost Benefit and Multi Criteria Analysis in natural hazard management. » In : *Natural Hazards and Earth System Science* 6.2, p. 293–302.
- García-Ruiz, J. M., White, S., Martí-Bono, C., Valero, B., Errea, M. P. et Gómez Villar, A. (2004). « La avenida del barranco de Arás y los riesgos hidrológicos en el Pirineo central español. » In : *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*. P. 131–140.
- Garrabé, M. (1994). *Ingénierie de l'évaluation économique*. Paris, France : ellipses, 256 p.
- Gass, S. I. et Rapcsák, T. (2004). « Singular value decomposition in AHP. » In : *European Journal of Operational Research* 154, p. 573–584.
- Ghariani, N., Tacnet, J.-M. et Curt, C. (2014). « Analyse des dysfonctionnements des ouvrages de protection contre les crues torrentielles. » In : *8^{èmes} Journées Fiabilité, Matériaux et Structures*. Sous la dir. de C. Curt, L. Peyras, J. Baroth et A. Chateauneuf. France, p. 47–59.
- Grandjean, G., Malet, J.-P. et Bitri, A. (2006). « Geophysical data fusion by fuzzy logic for imaging the mechanical behaviour of mudslides. » In : *Bulletin de la Société Géologique de France* 177.2, p. 127–136.
- Gras, S. (1848). *Considérations sur les anciens lits de déjection des torrents des Alpes et sur leur liaison avec le phénomène erratique*. 14. Paris, France : Annales des Mines, 21 p.
- Gras, S. (1850). *Exposé d'un système de défense des cours d'eau torrentiels des Alpes et application au torrent de la Romanche dans le département de l'Isère*. Carilian-Gœuri et V^r Dalmont, Ch^{les} Vellot, 118 p.
- Gras, S. (1857). *Etudes sur les torrents des Alpes*. Paris, France : F. Salvy, 109 p.
- Grelot, F. (2004). « Gestion collective des inondations - Peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori? » Thèse de doct. Montpellier, France : ENSAM, Sciences économiques, 391 p.
- Greminger, P. et Balmer, J. (2011). *RiskPlan - Identify and assess risks planning of safety measures. Guidance and methodology (Version 2.3.)* Rapp. tech. Switzerland : OFEV, OFPP, 46 p.
- Han, D., Dezert, J., Tacnet, J.-M. et Han, C. (2012). « A fuzzy-cautious OWA approach with evidential reasoning. » In : *15th International Conference on Information Fusion*. Singapore, p. 278–285.
- Han, D., Dezert, J. et Yang, Y.. (2014). « New distance measures of evidence based on belief intervals. » In : *3rd Belief International Conference on Belief Functions*. Oxford, Royaume-Uni, p. 432–441.
- Helton, J.-C. (1997). « Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. » In : *Journal of Statistical Computation and Simulation* 57.1-4, p. 3–76.

- Hubert, G et Ledoux, B. (1999). *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*. Paris, France : Presses de l'ENPC, 237 p.
- Hübl, J., Strauss, A., Holub, M. et Suda, J. (2005). « Structural mitigation measures. » In : *3rd Probabilistic Workshop : Technical Systems + Natural Hazards*. Vienne, Autriche, 12 p.
- Indrayan, A. (2002). « Aleatory and epistemic uncertainties in official assessments. » In : *IAOS (International Association for Official Statistics)*.
- Irpino, A. et Verde, R. (2008). « Dynamic Clustering of Interval Data Using a Wasserstein-based Distance. » In : *Pattern Recognition Letters* 29, p. 1648–1658.
- Jaeggi, M.N.R. et Pellandini, S. (1997). « Torrent check dams as a control measure for debris flows ». In : *Recent Developments on Debris Flows*. Sous la dir. d'A. Armanini et M. Michiue. T. 64. Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin, Heidelberg, Allemagne : Springer, p. 186–207.
- Jaffé, W. (2007). « Menger, Jevons and Walras de-homogenized. » In : *Economic Inquiry* 14.7, p. 511–524.
- Jahanshahloo, G. R., Hosseinzadeh Lofti, F. et Izadikah, M. (2006). « Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. » In : *Applied Mathematics and Computation* 181, p. 1544–1551.
- Jenhani, J., Benferhat, S. et Elouedi, Z. (2008). « Properties analysis of inconsistency-based possibility similarity measures ». In : *Proceedings of IPMU'08*. Torremolinos, Espagne, p. 173–180.
- JORF (1961). *Décret n° 61-1298 du 30 novembre 1961 portant règlement d'administration publique pour l'application de l'article 91 du code de l'urbanisme et de l'habitation*. Paris, France.
- JORF (1982). *Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles*. Paris, France.
- JORF (1985). *Loi n° 85-30 du 5 janvier 1985 relative au développement et à la protection de la montagne*. Paris, France.
- JORF (1987). *Loi n° 87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques naturels*. Paris, France.
- JORF (1995). *Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection contre l'environnement*. Paris, France.
- JORF (2001). *Loi n° 2001-602 du 9 juillet 2001 d'orientation sur la forêt*. Paris, France.
- JORF (2015a). *Code de l'environnement - Version en vigueur au 6 novembre 2015*. Paris, France : MEDDE.
- JORF (2015b). *Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques*. Paris, France.
- Jousselme, A.-L., Grenier, D. et Bossé, É. (2001). « A new distance between two bodies of evidence. » In : *Information Fusion* 2, p. 91–101.
- Jousselme, A.-L. et Maupin, P. (2012). « Distances in Evidence Theory : Comprehensive Survey and Generalizations. » In : *International Journal of Approximate Reasoning* 5, p. 118–145.
- Jouyne, Z. (1850). *Reboisement des montagnes : Reboisement, difficultés, causes des inondations et moyens de les prévenir*. Digne, France : Repos, 169 p.
- Kaitna, R. et Hübl, J. (2013). « Silent Witnesses For Torrential Processes. » In : *Dating Torrential Processes on Fans and Cones. Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment*. Sous la dir. de M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau. T. 47. Advances in Global Change Research. Pays-Bas : Springer, p. 111–130.
- Kalaora, B. et Savoye, A. (1986). *La forêt pacifiée. Sylviculture et sociologie au XIXe siècle*. Paris, France : L'Harmattan, 134 p.

- Kaplan, S. et Garrick, B. J. (1981). « On the quantitative definition of risk. » In : *Risk analysis* 1.1, p. 11–27.
- Keeney, R. L. et Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives : Preferences and Value Tradeoffs*. New York, U.S.A. : John Wiley & Sons, 569 p.
- Kostadinov, S. et Dragović, N. (2013). « Check dams in the torrent control practice in small mountainous catchments. » In : *Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams*. Sous la dir. de C. Conesa-Garcia et M. Lenzi. New-York, U.S.A. : Nova Science Publishers, Inc. Chap. 4, p. 63–88.
- Koulinski, V. (1993). « Étude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain. » Thèse de doct. Grenoble, France : Université Joseph Fourier, Mécanique, 536 p.
- Kriner, C. (2013). « Évaluation de l'efficacité des dispositifs de correction torrentielle au sein des séries domaniales RTM. Cas des torrents du Nant Trouble et du Saint-Martin (Savoie, 73). » Mém.de mast. Strasbourg, France : ENGEES, 101 p.
- Kuss, M. (1900a). *Restauration et conservation des terrains en montagne. Éboulements, glissements et barrages*. Paris, France : Ministère de l'Agriculture, Administration des eaux et forêts, Exposition universelle internationale de 1900, 73 p.
- Kuss, M. (1900b). *Restauration et conservation des terrains en montagne. Les torrents glaciaires*. Paris, France : Ministère de l'Agriculture, Administration des eaux et forêts, Exposition universelle internationale de 1900, 95 p.
- Ladier, J., Rey, F. et Dreyfus, P., eds. (2012). *Guide de Sylvicultures de Montagne Alpes du Sud françaises*. CRPF - INRA - irstea - ONF, 302 p.
- Lai, Y.J., Liu, T.Y. et Hwang, C.L. (1994). « TOPSIS for MODM. » In : *European Journal of Operational Research* 76.3, p. 486–500.
- Laigle, D. et Peteuil, C. (2010). « Analyse de l'aléa «lave torrentielle» sur le cône de déjection du torrent du Rioulong (Hautes-Pyrénées) : une approche par scénarios. » In : *Sciences Eaux & Territoires* 2, p. 152–163.
- Lair, J. (2000). « Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. » Thèse de doct. Clermont-Ferrand, France : Université Blaise Pascal, Génie Civil, 246 p.
- Lasswell, H. D. (1960). « Technique of decision seminars. » In : *Midwest Journal of Political Science* 4.3, p. 213–236.
- Ledoux, B. (2006). *La gestion du risque inondation*. Paris, France : Lavoisier, 766 p.
- Lejeune, M. (1999). « Etude de la fonction d'explication dans les Systèmes à Bases de Connaissances - Application à la conduite de procédés. » Thèse de doct. Nancy, France : Université Henri Poincaré, Informatique, 250 p.
- Lenoble, F. (1923). « La légende du déboisement des Alpes. » In : *Revue de Géographie Alpine* 11, p. 5–116.
- Leone, F. (1996). « Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes naturels de mouvements de terrain. » Thèse de doct. Grenoble, France : Université Joseph Fourier, Géographie, 274 p.
- Leone, F., Colas, A., Garcin, Y., Eckert, N., Jomelli, V. et Gherardi, M. (2014). « Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français. Évaluation des impacts et cartographie de la perte d'accessibilité territoriale. » In : *Journal of Alpine Research. Revue de géographie Alpine*. [En ligne], mis en ligne le 30 septembre 2014, consulté le 08 décembre 2014, 19 p.
- Leone, F., Meschinet de Richemond, N. et Vinet, F. (2010). *Aléas naturels et gestion des risques*. Presses universitaires de France, 288 p.

- Liébault, F., Gomez, B., Page, M., MArden, M., Peacock, D., Richard, D. et Trotter, C. M. (2005). « Land-use change, sediment production and channel response in upland regions ». In : *River Research and Applications* 21, p. 739–756.
- Liébault, F., Peteuil, C. et Remaître, A. (2010). « Approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents. » In : *Sciences Eaux et Territoires Spécial.2*, p. 128–134.
- Liébault, F., Remaître, A. et Peteuil, C (2013). « Géomorphologie des rivières de montagne. » In : *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Sous la dir. d’A. Recking, D. Richard et G. Degoutte. Paris, France : Quae. Chap. 1, p. 15–89.
- Liébault, F. et Taillefumier, F. (2000). « The contemporary development of the active tract of the main tributaries of the Drôme, the Eygues and the Roubion, in the southern pre-Alps in France ». In : *Géocarrefour* 75.4, p. 327–336.
- Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T. et Ferguson, E. (2006). « From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management : Recent developments and applications. » In : *Environment International* 32.8, p. 1072–1093.
- Luce, R. D. (1956). « Semiorders and a Theory of Utility Discrimination. » In : *Econometrica* 24.2, p. 178–191.
- MA (1913). *Loi du 16 août 1913 modifiant et complétant la loi du 4 avril 1882, relative à la restauration et à la conservation des terrains en montagne, en vue d’assurer le reboisement du sol de la France*. Paris, France.
- MA (1933). *Loi du 6 janvier 1933 ayant pour but de faciliter le reboisement des terrains en montagne*. Paris, France.
- MA (1966). *Instruction du 06/01/1966 - Compétences et attributions de l’Office National des Forêts et relations avec l’Administration dans l’accomplissement des missions qui lui sont confiées par l’Etat*. Paris, France.
- MA (1971). *Circulaire ministérielle n°1272 du 27 mai 1971 : Rapports entre l’Administration et l’Office National des Forêts*. Paris, France.
- MA (1972, 1976, 1981, 1986, 1988, 1989, 2000, 2001, 2012). *Conventions générales entre l’Etat et l’Office National des Forêts relative à la Restauration des Terrains en Montagne*.
- MA (1980). *Circulaire ministérielle n°1051 du 25 janvier 1980 : Organisation du service de restauration des terrains en montagne*. Paris, France.
- MA (1984). *Circulaire ministérielle n°3001 du 12 octobre 1984 : Restauration des Terrains en Montagne*. Paris, France.
- MA et ME (1978). *Circulaire interministérielle n°78103 du 1 août 1978 - Financement des Equipements de Protection contre les risques naturels en Régions de Montagne notamment contre les avalanches*. Paris, France.
- MAAF (2012). *Code forestier - Version abrogée par le Décret n°2012-92 du 26 janvier 2012 relatif à la partie législative du code forestier et par le Décret n°2012-836 du 29 juin 2012 relatif à la partie réglementaire*. Paris, France : MAAF.
- MAAF (2015). *Code rural et de la pêche maritime - Version en vigueur au 31 octobre 2015*. Paris, France : MAAF.
- MAD (1882). *Circulaire ministérielle n°305 : Loi du 4 avril 1882 relative à la restauration et à la conservation des terrains en montagne*. Paris, France, 7 p.
- Magne, L. et Vasseur, D. (2006). *Risques industriels : complexité, incertitude et décision - une approche interdisciplinaire*. Paris, France : Lavoisier, 462 p.
- Manche, Y. (2000). « Analyse spatiale et mise en place de systèmes d’information pour l’évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels. » Thèse de doct. Grenoble, France : Université Joseph Fourier, Géographie, 172 p.

- Margreth, S. et Romang, H. (2010). « Effectiveness of mitigation measures against natural hazards. » In : *Cold Regions Science and Technology* 64.2, p. 199–207.
- Martin, A. (2005). *Cours sur La fusion d'informations*. Rapp. tech. Rennes, France : ENSIETA, 109 p.
- Martin, A., Jusselme, A.-L. et Osswald, C. (2008). « Conflict measure for the discounting operation on belief functions. » In : *11th International Conference on Information Fusion*. Cologne, Allemagne, p. 1003–1010.
- Martin, A. et Osswald, C. (2006). « A new generalization of the proportional conflict redistribution rule stable in terms of decision ». In : *Advances and applications of DSMT for information fusion - Collected works, vol. 2*. Sous la dir. de F. Smarandache et J. Dezert. American Research Press, p. 69–88.
- Marx, K. (1919). *Le Capital - Edition populaire (Résumés-Extraits) par Julien Borchardt*. electronic by Alméras. 417 p. Les classiques des sciences sociales.
- Masson, M.-H. (2005). *Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises*. Compiègne, France : Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne, 124 p.
- MATE et METL (2002). *Circulaire ministérielle n°234 du 30 avril 2002 : Circulaire relative à la politique de l'Etat en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations et les submersions marines*. Paris, France.
- MATETL (1999). *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), Guide général*. Paris, France, 77 p.
- Mathys, N., Lang, M., Sauquet, É., Cipriani, T. et Peteuil, C. (2013). « Hydrologie. » In : *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Sous la dir. d'A. Recking, D. Richard et G. Degoutte. Paris, France : Quae. Chap. 2, p. 90–132.
- Mazzorana, B., Comiti, F., Scherer, C. et Fuchs, S. (2012). « Developing consistent scenarios to assess flood hazards in mountain streams ». In : *Journal of Environmental Management* 94.1, p. 112–124.
- Mazzorana, B., Hübl, J. et Fuchs, S. (2009). « Improving risk assessment by defining consistent and reliable system scenarios. » In : *Natural Hazards and Earth System Science* 9.1, p. 145–159.
- McCarthy, J. (1960). « Programs with Common Sense. » In : *RLE and MIT Computation Center Conference*. Cambridge, U.S.A., p. 75–91.
- ME (1974). *Circulaire ministérielle n°74-201 du 5 décembre 1974 relative au Plan des zones exposées aux avalanches*. Paris, France.
- MEDDTL (2011). *Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel*. Rapp. tech. Paris, France : DGPR, DGALN, 125 p.
- MEFI (1999). *Règles BAEL 91 révisées 99, DTU P 18-702 - Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites - Fascicule 62, Titre 1er du CCTG - Travaux section 1 : béton armé*. Paris, France : Commission Centrale des Marchés, 226 p.
- MELT (1993). *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil - Fascicule 62, Titre 5 du CCTG*. Paris, France : CSTB, 182 p.
- Mendoza, G. A. et Martins, H. (2006). « Multi-criteria decision analysis in natural resource management : a critical review of methods and new modelling paradigms. » In : *Forest ecology and management* 230.1, p. 1–22.
- Merad, M. (2010). *Aide à la décision et expertise en gestion des risques*. Paris, France : Lavoisier, 257 p.

- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. et Thieken, A. (2010). « Review article - Assessment of economic flood damage. » In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, p. 1697–1724.
- Meschinet de Richemond, N. et Reghezza, M. (2010). « La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ? » In : *Annales de Géographie* 673.3, p. 248–267.
- Messines du Sourbier, J. (1964). *Enquête sur la conservation et la restauration des terrains en montagne*. Rapp. tech. Grenoble, France : Administration des Eaux et Forêts.
- Messines du Sourbier, J. (1970). *Projet de réorganisation des services spéciaux RTM de l'Office National des Forêts*. Rapp. tech. Grenoble, France : ONF - DN RTM, 79 p.
- Meunier, M. (1991). *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Etude montagne 1. Grenoble, France : Cemagref Editions, 280 p.
- Meunier, V. et Mardsen, É. (2009). *L'analyse coût-bénéfices. Guide méthodologique*. Rapp. tech. Toulouse, France : Institut pour une culture de sécurité industrielle, 48 p.
- Meyer, V., Becker, N., Markantonis, V., Schwarze, R., Aerts, J., Bergh, J. van den, Bouwer, L., Bubeck, P., Ciavola, P., Daniel, V., Genovese, E., Green, C., Hallegatte, S., Kreibich, H., Lequeux, Q., Lochner, B., Logar, I., Papyrakis, E., Pfuertscheller, C., Poussin, J., Przyluski, V., Thieken, A., Thompson, P. et Vivavattene, C. (2012). *Costs of Natural Hazards - A Synthesis. WP09*. Rapp. tech. Postdam, Pays-Bas : CONHAZ Report, 63 p.
- MI et MA (1979). *Circulaire interministérielle n°3005 du 10 janvier 1979 - Restauration des Terrains en Montagne*. Paris, France.
- Miller, G. (1994). « The magical number seven, plus or minus two : some limits on our capacity for processing information. » In : *Psychological Review* 101.2, p. 343–352.
- Mimoux, M. (1983). *programmation mathématique - théorie et algorithmes - tome 1*. Paris, France : Dunod, 530 p.
- Mortureux, Y. (2001). *La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques*. AG4670. Paris, France : Techniques de l'ingénieur. Sécurité et gestion des risques, 17 p.
- Motro, A. et Smets, P., édés. (1997). *Uncertainty Management in Information Systems - From Needs to Solutions*. Avalon, Santa Catalina, California, U.S.A. : Springer Science & Business Media, 464 p.
- Mougin, M. P. (1931). *La restauration des Alpes*. Paris, France : Ministère de l'Agriculture, Direction générale des eaux et des forêts, Eaux et génie rural, 584 p.
- Mougin, P. (1900). *Restauration et conservation des terrains en montagne. Consolidation des berges par dérivation d'un torrent (Torrent de Saint-Julien)*. Paris, France : Ministère de l'Agriculture, Administration des eaux et forêts, Exposition universelle internationale de 1900, 45 p.
- Mougin, P. (1914). *Les torrents de Savoie*. Chambéry, France : Administration des Eaux et Forêts, 1251 p.
- Mougin, P. (1919). *Les Forêts de Savoie*. Chambéry, France : Ministère de l'Agriculture. Direction générale des eaux et forêts, 776 p.
- Mousseau, V. (1992). « Analyse et classification de la littérature traitant de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision. » In : *Recherche opérationnelle / Operational Research* 26.4, p. 367–389.
- Mousseau, V. (1995). « Eliciting information concerning the relative importance of criteria ». In : *Advances in Multicriteria Analysis*. Sous la dir. de P.M. Pardalos, Y. Siskos et C. Zopoundis. Dordrecht, Pays-Bas : Springer Science & Business Media. Chap. 2, p. 17–43.
- Mousseau, V. (2009). « Décision en présence de risque - Théorie de l'utilité. » Paris, France : École Centrale Paris, support de présentation orale.
- Munier, B. (1984). « Quelques critiques de la rationalité économique dans l'incertain. » In : *Revue économique* 35, p. 65–86.
- Negishi, T. (1989). *History of Economic Theory*. Tokyo, Japan : North-Holland.

- November, V. (2002). « Les territoires du Risque. Le risque comme objet de réflexion géographique. » In : *Développement durable et territoires*. Sous la dir. de S. Callens. Berne, Suisse : Peter Lang, 3 p.
- OFAT (1997). *Recommandations 1997 - Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*. Berne, Suisse, 42 p. : OFAT, OFEE, OFEFP.
- OFEV (2010). *EconoMe 2.0 - Programme de calcul en ligne du caractère économique des mesures de protection contre les dangers naturels*. Rapp. tech. Berne, Suisse : DETEC, 40 p.
- ON (2008). *ONR 24803 - Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Betrieb, Überwachung und Instandhaltung (Protection works for torrent control - Operation, monitoring, maintenance)*. Vienne, Autriche : BLFUW, 40 p.
- ON (2009). *ONR 24800 - Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung (Protection works for torrent control - Terms and their definitions as well as classification)*. Vienne, Autriche : BLFUW, 66 p.
- ON (2010). *ONR 24802 - Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung (Protection works for torrent control - Design of structures)*. Vienne, Autriche : BLFUW, 90 p.
- ON (2013). *ONR 24801 - Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Statische und dynamische Einwirkungen (Protection works for torrent control - Static and dynamic actions on structures)*. Vienne, Autriche : BLFUW, 32 p.
- ONF (2007). *Instruction n°INS-07-T-62 du 26 janvier 2007 - Les missions, l'organisation des services RTM et la gestion des terrains domaniaux RTM*.
- ONF (2011). *Rapport d'activité 2011 - Restauration des Terrains en Montagne*. Rapp. tech. Grenoble, France : MAAPRAT, 15 p.
- ONF (2013). *Liste des personnels DERN - R.T.M. au 31/12/2013*.
- ONF-RTM 38 (2014). *Torrent de la Grollaz - Etude de bassin versant*. Rapp. tech. Grenoble, France, 79 p.
- Paelinck, J. (1976). « Qualitative multiple criteria analysis, environmental protection and multi-regional development. » In : *Papers of the Regional Science Association* 36, p. 59–74.
- Paelinck, J. (1978). « Qualiflex, a flexible multiple-criteria method. » In : *Economic letters* 3, p. 193–197.
- Pagetti, C. (2012). *Module de sûreté de fonctionnement*. Rapp. tech. Toulouse, France : EN-SEEIHT, 49 p.
- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M. et Glade, T. (2011). « Physical vulnerability assessment for alpine hazards : state of the art and future needs. » In : *Natural Hazards* 58, p. 645–680.
- Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., Totschnig, R. et Glade, T. (2012). « Improvement of vulnerability curves using data from extreme events : Debris flow event in South Tyrol. » In : *Natural Hazards* 64.3, p. 2083–2105.
- Pareto, V. (1896). *Cours d'économie politique*. Lausanne, Suisse : F. Rouge, 430 p.
- Pareto, V. (1912). « Manuel d'économie politique. » In : *Bulletin of the American Mathematical Society* 18.1, p. 462–474.
- PARN (2011). *Rapport d'activité - Analyse socio-économique des risques naturels en montagne*. Rapp. tech. Grenoble, France, 28 p.
- Pavlicic, D. (2001). « Normalization affects the results of MADM methods. » In : *Yugoslav Journal of Operations Research* 11.2, p. 251–265.
- Petit, F., Poinart, D. et Bravard, J. P. (1996). « Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France (« canal de Miribel »). » In : *Catena* 26.3, p. 209–226.

- Peyras, L. (2003). « Diagnostic et analyse de risques des barrages - Développement des méthodes d'aide à l'expertise. » Thèse de doct. Clermont-Ferrand, France : Université Blaise Pascal, Génie Civil, 199 p.
- Peyras, L., Boissier, D. et Carvajal, C. (2010). *Analyse de risques et fiabilité des barrages. Application aux barrages-poids en béton*. Rapp. tech. Aix-en-Provence, France : Cemagref, Université Blaise Pascal, SAFEGE, 208 p.
- Peyras, L., Royet, P., Boissier, D. et Vergne, A. (2004). « Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages : développement de méthodes d'aide à l'expertise. » In : *Ingénieries* 38, p. 3–12.
- Peyras, L., Royet, P., Salmi, A., Salembier, M. et Boissier, D. (2006). « Etude de la sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique de génie civil. » In : *Revue Européenne de Génie Civil* 10.5, p. 615–631.
- Pfurtscheller, C., Lochner, B. et Thielen, A. (2011). *Costs of Alpine Hazards, Report WP08-1*. Rapp. tech. Postdam, Pays-Bas : CONHAZ Consortium, 96 p.
- Pigeon, P. (2010). « Catastrophes dites naturelles, risques et développement durable : Utilisations géographiques de la courbe de Farmer. » In : *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* 10.1, p. 1–13.
- Piton, G. (2016). « Contrôle du transport sédimentaire des torrents par les barrages de correction torrentielle et les plages de dépôt. » Thèse de doct. Université Grenoble Alpes, Sciences de la Terre et de l'Univers et de l'Environnement, 200 p.
- Piton, G. et Recking, A. (2016a). « Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I : Hydraulic and Deposition Processes. » In : *Journal of Hydraulic Engineering* 142.2, p. 1–23.
- Piton, G. et Recking, A. (2016b). « Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II : Woody Debris. » In : *Journal of Hydraulic Engineering* 142.2, p. 1–17.
- Piton, G. et Recking, A. (2016c). « Effects of check dams on bedload transport and steep-slope stream morphodynamics. » In : *Geomorphology*, p. 1–12.
- Pitton, J. P. (1996). « RELIASEP - A Technique for Safe Design. » In : *Product Assurance Symposium and Software Product Assurance Workshop*. Noordwijk, Pays-Bas, p. 345–350.
- Poncet, A. (1968). *Cours de restauration et conservation des terrains en montagne*. Paris, France : Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux, des Eaux et Forêts.
- Poncet, A. (1995). *Restauration et conservation des terrains en montagne. 10 fascicules*. Paris, France : Office National des Forêts.
- Pratt, J. W. (1964). « Risk Aversion in the Small and in the Large. » In : *Econometrica* 32.1/2, p. 122–136.
- Quan Luna, B., Blahut, J., Van Westen, C. J., Sterlacchini, S., Van Asch, T. W. J. et Akbas, S. O. (2011). « The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical curves. » In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, p. 2047–2060.
- RCB (1983). *Etude pour l'amélioration des actions de restauration des terrains en montagne - Approche patrimoniale de la gestion de la sécurité et de la qualité du milieu physique en montagne*. Rapp. tech. Paris, France : MA, 69 p.
- Recking, A., Degoutte, G., Camenen, B. et Frey, P. (2013a). « Hydraulique et transport solide. » In : *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Sous la dir. d'A. Recking, D. Richard et G. Degoutte. Paris, France : Quae. Chap. 3, p. 133–199.
- Recking, A., Richard, D. et Degoutte, G., éd. (2013b). *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Paris, France : Quae, 337 p.
- Reid, L. M. et Dunne, T. (2003). « Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology. » In : *Tools in Fluvial Geomorphology*. Sous la dir. de G.M. Kondolf et H. Piégéay. Londres, Royaume-Uni : John Wiley & Sons. Chap. 16, p. 463–500.

- Remaître, A. et Malet, J.-P. (2013). « The effectiveness of torrent check dams to control channel instability : example of debris-flow events in clay schales. » In : *Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams*. Sous la dir. de C. Conesa-Garcia et M. Lenzi. New-York, U.S.A. : Nova Science Publishers, Inc. Chap. 10, p. 211–237.
- Remaître, A., Van Asch, T. W. J., Malet, J. P. et Maquaire, O. (2008). « Influence of check dams on debris-flow run-out intensity. » In : *Natural Hazards and Earth System Science* 8.6, p. 1403–1416.
- Renn, O. et Graham, P. (2006). *Risk Governance : Towards an integrative approach*. Rapp. tech. Genève, Suisse : international Risk Governance Council (iRGC), 157 p.
- Rheinberger, C. M., Bründl, M. et Rhyner, J. (2009). « Dealing with the White Death : Avalanche Risk Management for Traffic Routes. » In : *Risk Analysis* 29, p. 76–94.
- Richter, C. F. (1935). « An instrumental earthquake magnitude scale. » In : *Bulletin of the Seismological Society of America* 25.1, p. 1–32.
- Romang, H., éd. (2008). *Efficacité des mesures de protection*. Berne, Suisse : PLANAT, 21 p.
- Roqueplo, P. (1997). *Entre savoir et décision, l'expertise scientifique*. Paris, France : INRA Editions, 112 p.
- Ross, D. (1977). « Structured Analysis (SA) : A language for communicating ideas. » In : *IEEE Transactions on Software Engineering* SE-3, p. 16–34.
- Ross, D. et Schoman, K. (1977). « Structured Analysis for requirements definition. » In : *IEEE Transactions on Software Engineering* SE-3, p. 6–15.
- Roubens, M. (1979). « Agrégation des préférences en présence de préordres totaux sur l'ensemble des actions et d'une relation de préférence du type (I,P,Q) sur les points de vue. » In : *Réunion EURO-MULTI*. Liège, Belgique, 9 p.
- Roubens, M. (1980). « Ajustement de relations binaires et méthode multicritère. » In : *Regards sur la théorie des graphes*. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques romandes, p. 291–296.
- Roy, B. (1968). « Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode Electre). » In : *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle* 2.8, p. 57–75.
- Roy, B. (1974). « Critères multiples et modélisation des préférences. L'apport des relations de surclassement. » In : *Revue d'Economie Politique* 84.1, p. 1–44.
- Roy, B. (1977). *Electre III, un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples*. Rapp. tech. Paris, France : Sema, Direction scientifique, 32 p.
- Roy, B. (1980). *Préférence, indifférence, incomparabilité*. Rapp. tech. 9. Paris, France : LAMSADE.
- Roy, B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. Paris, France : Economica Collection Gestion, 423 p.
- Roy, B. et Bertier, P. (1971). *La méthode Electre II, une méthode de classement en présence de critères multiples*. Rapp. tech. Paris, France : Sema, Direction scientifique, 25 p.
- Roy, B. et Hugonnard, J. C. (1981). *Classement des prolongements de lignes de métro en banlieue parisienne*. Rapp. tech. Paris, France : Lamsade, Université Dauphine et RATP, 34 p.
- Rudolf-Miklau, F. (2008). *Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Maßnahmen der Wildbach- und Lawinerverbauung gemäß § 3 Abs. 2 Z 3*. Rapp. tech. Vienne, Autriche : BLFUW, 54 p.
- Rudolf-Miklau, F. et Suda, J. (2013). « Design Criteria for Torrential Barriers. » In : *Dating Torrential Processes on Fans and Cones. Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment*. Sous la dir. de M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau. T. 47. Advances in Global Change Research. Pays-Bas : Springer, p. 375–389.

- Saaty, T. L. (1977). « A scaling method for priorities in hierarchical structures ». In : *Journal of Mathematical Psychology* 15, p. 234–281.
- Saaty, T. L. (1980). *Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Pittsburgh, U.S.A. : McGraw-Hill (Tx), 287 p.
- Saaty, T. L. (1984). « Comparison of eigenvalue, logarithmic least squares and least squares methods in estimating ratios. » In : *Mathematical Modelling* 5, p. 309–324.
- Saaty, T. L. et Vargas, L. G. (1987). « Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process. » In : *European Journal of Operational Research* 32, p. 107–117.
- Saint-Geours, N. (2012). « Analyse de sensibilité de modèles spatialisés - Application à l'analyse coût-bénéfice de projets de prévention des inondations. » Thèse de doct. Montpellier, France : Université Montpellier 2, Biostatistiques, 271 p.
- Savage, L. J. (1954). *Foundations of Statistics*. New-York, U.S.A. : Wiley, 310 p.
- Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide à la décision multicritère*. Diriger l'entreprise. 1. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 304 p.
- Schärlig, A. (1996). *Pratiquer Electre et Prométhée - Un complément à Décider sur plusieurs critères*. Diriger l'entreprise. 11. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 176 p.
- Schneuwly-Bollschweiler, M., Stoffel, M. et Rudolf-Miklau, F., éd. (2013). *Dating Torrential Processes on Fans and Cones. Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment*. T. 47. Advances in Global Change Research. Pays-Bas : Springer, 423 p.
- Serre, D. (2005). « Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. » Thèse de doct. Paris, France : Université de Marne-La-Vallée, Sciences de l'Information Géographique, 240 p.
- Serre, D., Peyras, L., Curt, C., Boissier, D. et Diab, Y. (2007). « Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil. » In : *Canadian Geotechnical Journal* 44.11, p. 1298–1313.
- Shafer, G. (1976). *a mathematical theory of evidence*. Princeton, U.S.A. : Princeton University Press, 314 p.
- Shin, Y.B., Lee, S.G., Chun, D. et Chung, D. (2013). « A critical review of popular multi-criteria decision making methodologies ». In : *Issues in Information Systems* 14.1, p. 358–365.
- Shortliffe, E. H., Axline, S. G., Buchanan, B. G., Merigan, T. C. et Cohen, S. N. (1973). « An Artificial Intelligence Program to Advise Physicians Regarding Antimicrobial Therapy. » In : *Computers and Biomedical Research* 6, p. 544–560.
- Simon, H. A. (1947). *Administrative behaviour : a study of Decision Making Processes in Administrative Organizations*. New York, U.S.A. : Mac Millan, 368 p.
- Simon, H. A. (1954). « A behavior model of rational choice. » In : *Quarterly Journal of economics* 69, p. 99–118.
- Simon, H. A. (1969). *The Sciences of the Artificial*. 3^e éd. Londres, Royaume-Uni : The MIT Press, 248 p.
- Simon, H. A. (1991). « The Architecture of Complexity. » In : *Facets of systems Science*. Sous la dir. de G. J. Klir. T. 7. Binghampton, New York, U.S.A. : Springer Science & Business Media, p. 457–476.
- Smarandache, F. et Dezert, J. (2004, 2006, 2009, 2015). *Advances and applications of DS_mT for information fusion - Collected works, vol. 1-4*. American Research Press. Rehoboth, U.S.A. Available at : <http://www.onera.fr/staff/jean-dezert?page=2>.

- Smarandache, F. et Dezert, J. (2013). « On the consistency of PCR6 with the averaging rule and its application to probability estimation. » In : *16th International Conference on Information Fusion*. Istanbul, Turquie, p. 1119–1126.
- Smarandache, F. et Dezert, J. (2015). « Modified PCR Rules of Combination with Degrees of Intersections. » In : *18th International Conference on Information Fusion*. Washington D.C., U.S.A., p. 2100–2107.
- Smarandache, F., Dezert, J. et Tacnet, J.-M. (2010). « Fusion of sources of evidence with different importances and reliabilities. » In : *Workshop on the Theory of Belief Functions*. Brest, France, 8 p.
- Smets, P. (1997). « Imperfect Information : Imprecision - Uncertainty ». In : *Uncertainty Management in Information Systems - From Needs to Solutions*. Sous la dir. d'A. Motro et P. Smets. Avalon, Santa Catalina, California, U.S.A. : Springer Science & Business Media. Chap. 8, p. 225–254.
- Smets, P. (2005). « Decision making in the TBM : The necessity of the pignistic transformation. » In : *International Journal of Approximate Reasoning* 38.2, p. 133–147.
- Smets, P. et Kennes, R. (1994). « The transferable belief model. » In : *Artificial intelligence* 66.2, p. 191–234.
- Sodnik, J., Martinčič, M., Mikoš, M. et Kryžanowski, A. (2015). « Are Torrent Check-Dams Potential Debris-Flow Sources ? » In : *Engineering Geology for Society and Territory*. Sous la dir. de G. Lollino, D. Girodan, G. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski et N. Sciarra. T. 2. Switzerland : Springer International Publishing, p. 485–488.
- Sonnier, J. (1991). « Analyse du rôle de protection des forêts domaniales de montagne. » In : *Revue forestière française* 43.2, p. 131–146.
- Srivastava, R. P. (1997). « Decision Making Under Ambiguity : A Belief-Function Perspective. » In : *Archives of Control Sciences* 6 (XLII).1-2, p. 5–27.
- Stewart, T. J. (2005). « Dealing with Uncertainties in MCDA ». In : *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*. Sous la dir. de S. Greco. New York, U.S.A. : Springer-Verlag. Chap. 11, p. 445–466.
- Suda, J. (2009). « Zustandsbewertung von Schutzbauwerken der Wildbachverbauung - Maintenance strategies for torrent control measures ». Mém.de mast. Vienne, Autriche : Universität für Bodenkultur.
- Suda, J. (2013). *Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Handbuch zur Durchführung einer Bauwerkskontrolle*. Rapp. tech. Vienne, Autriche : BLFUW, 136 p.
- Suda, J. et Rudolf-Miklau, F. (2010). « Standards for design and maintenance of torrential barriers. » In : *8th ICOLD European Club Symposium*. Innsbruck, Autriche, 6 p.
- Surell, A. (1841). *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*. 2^e éd. Paris, France : Carilian-Gœury et Victor Dalmont, 317 p.
- Tacnet, J.-M. (2009). « Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information. » Thèse de doct. Saint-Étienne, France : ENSM-SE, Sciences et Génie de l'Environnement, 404 p.
- Tacnet, J.-M., éd. (2012). *Decision Support Guidelines. Methods, procedures and tools developed in PARAmount (WP7)*. Grenoble, France : imProved Accessibility : Reliability et safety of alpine transport infrastructure related to mountainous hazards in a changing climate, 216 p.
- Tacnet, J.-M. et Curt, C. (2013). *Dispositifs de protection contre les risques torrentiels. Indicateurs d'analyse de l'efficacité des ouvrages*. Rapp. tech. 62 p. Grenoble, France : irstea.
- Tacnet, J.-M., Curt, C., Richard, D. et Rey, B. (2011a). « Efficacité des ouvrages de correction torrentielle : indicateurs basés sur la sûreté de fonctionnement. » In : *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics* 4.5, p. 78–86.

- Tacnet, J.-M. et Degoutte, G. (2013). « Principes de conception des ouvrages de protection contre les risques torrentiels. » In : *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Sous la dir. d'A. Recking, D. Richard et G. Degoutte. Paris, France : Quae. Chap. 5, p. 267–331.
- Tacnet, J.-M. et Dezert, J. (2011). « Cautious OWA and Evidential Reasoning for Decision Making under Uncertainty. » In : *14th International Conference on Information Fusion*. Chicago, U.S.A., p. 2074–2081.
- Tacnet, J.-M., Dezert, J. et Batton-Hubert, M. (2011b). « AHP and Uncertainty Theories for Decision Making using the ER-MCDA Methodology. » In : *International Symposium on AHP*. Sorrento, Italie, 6 p.
- Tacnet, J.-M., Dezert, J., Curt, C., Batton-Hubert, M. et Chojnacki, E. (2014b). « How to manage natural risks in mountain areas in a context of imperfect information? New frameworks and paradigms for expert assessments and decision-making. » In : *Environment Systems and Decisions* 34.2, p. 288–311.
- Tacnet, J.-M., Garin, L. et Cheruy, O. (2000). « Calcul global des barrages de correction torrentielle, Prise en compte des interactions sol-structures. » In : *9th Congress Interpraevent*. Villach, Autriche, p. 295–306.
- Tacnet, J.-M., Lacroix, E. et Batton-Hubert, M. (2008). « Risques naturels en montagne : aspects juridiques de l’affichage de l’incertitude dans les expertises. » In : Paris, France : Edisud, p. 281–291.
- Tacnet, J.-M., Mermet, E., Zadonina, E., Deschatres, M., Humbert, P., Dissart, J.-C. et Labbe, S. (2013). « Road network management in the context of natural hazards : a decision-aiding process based on multi-criteria decision making methods and network structural properties analysis. » In : *International Snow Science Workshop*. Grenoble, Chamonix, France, p. 7–11.
- Tacnet, J.-M., November, V., Richard, D. et Batton-Hubert, M. (2010). « Expertise, décision et incertitude : jusqu’où une approche interdisciplinaire est-elle possible dans le cadre de la gestion intégrée des risques naturels en montagne? » In : *Conférence Outils Pour Décider Ensemble (OPDE)*. Montpellier, France, p. 1–18.
- Tacnet, J.-M. et Richard, D. (2010). « De la conception à la sûreté des barrages de correction torrentielle. » In : *Sciences Eaux et Territoires* 2, p. 164–175.
- Talon, A., Curt, C., Boissier, D. et Mauris, G. (2010). « Aide à la décision pour l’expertise des barrages. » In : *6^{èmes} Journées Fiabilité, Matériaux et Structures*. Sous la dir. de C. Curt, L. Peyras, J. Baroth et A. Chateauneuf. France.
- Tchamova, A. et Dezert, J. (2012). « On the Behavior of Dempster’s Rule of Combination and the Foundations of Dempster-Shafer Theory ». In : *6th International Conference of Intelligent Systems*. T. 6. Sofia, Bulgaria, p. 108–113.
- Teghem, J. (2012). *Recherche opérationnelle - Tome 1. Méthodes d’optimisation*. Paris, France : ellipses, 603 p.
- Teghem, J. (2013). *Recherche opérationnelle - Tome 2. Gestion de production, Modèles aléatoires, Aide multicritère*. Paris, France : ellipses, 603 p.
- Thiéry, E. (1891). *Restauration des montagnes. Correction des torrents - Reboisement*. Paris, France : Encyclopédie des travaux publics, 427 p.
- Thouret, J.-C. et D’Ercole, R. (1996). « Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. » In : *Cahiers des sciences humaines. ORSTOM* 32.2, p. 407–422.
- Torterotot, J.-P. (1993). « Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes. » Thèse de doct. Paris, France : ENPC, Sciences et Techniques de l’Environnement, 643 p.
- Totschnig, R., Sedlacek, W. et Fuchs, S. (2011). « A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. » In : *Natural Hazards* 58.2, p. 681–703.

- Tourment, R., Wallis, M., Beullac, B., Kortenhau, A., Schaal, D. M. et Schelfhout, H. (2014). « The risk analysis of levee systems ». In : *3rd IAHR Europe Congress*. Porto, Portugal, p. 1–13.
- Treich, N. (2005). *L'analyse Coût-Bénéfice de la Prévention des Risques*. Rapp. tech. Toulouse, France : LERNA INRA, 52 p.
- Triantaphyllou, E. et Baig, K. (2005). « The impact of aggregating benefit and cost criteria in four MCDA methods. » In : *IEEE Transactions on Engineering Management*, 52.2, p. 213–226.
- Tsoukiàs, A. (2006). « De la théorie de la décision à l'aide à la décision. » In : *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision Vol. 1 : outils de modélisation*. Sous la dir. de D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot et H. Prade. Paris, France : Lavoisier. Chap. 1, p. 25–70.
- Vaidya, O. S. et Kumar, S. (2006). « Analytic hierarchy process : An overview of applications. » In : *European Journal of Operational Research* 169.1, p. 1–29.
- Valles, F. (1857). *Etudes sur les inondations : leurs causes et leurs effets. Les moyens à mettre en oeuvre pour combattre leurs inconvénients et profiter de leurs avantages*. Sous la dir. de Victor Dalmont.
- Van Effenterre, C. (1982). « Les barrages perméables de sédimentation. » In : *Revue Forestière Française* 5. (In French), p. 87–93.
- Verrier, C. (1983). *Protection des voies de communication contre les risques naturels en Maurienne - Propositions pour un plan pluriannuel d'investissements*. Rapp. tech. Grenoble, France : Cemagref, 160 p.
- Verrier, M. (1980). « Coûts et avantages des travaux RTM - Cas des voies de communication. » Mém.de mast. Grenoble, France : UER de Géographie, 143 p.
- Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Paris, France : Editions Eyrolles, 798 p.
- Vincke, P. (1982). « Aggregation of preferences : a review. » In : *European Journal of Operational Research* 9, p. 17–22.
- Vincke, P. (1985). *La modélisation des préférences*. T. 83. Bruxelles, Belgique : Université libre de Bruxelles, 24 p.
- Vincke, P. (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Bruxelles, Belgique : Editions Ellipses, 179 p.
- von Neumann, J. et Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. New Jersey, USA : Princeton University Press, 779 p.
- Vuillet, M. (2012). « Elaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales. » Thèse de doct. Paris, France : Université Paris-Est, Génie Urbain, 201 p.
- Walras, L. (1874). *Eléments D'Economie Politique Pure Ou Théorie de La Richesse Sociale*. Lausanne, Suisse : Kessinger Legacy Reprints, 431 p.
- Wang, G. (2013). « Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zouqhu debris flow disaster in China. » In : *Natural Hazards* 69.3, p. 1835–1847.
- Wang, X. et Triantaphyllou, E. (2008). « Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods ». In : *Omega* 36.1, p. 45–63.
- Wang, Y.-M. et Luo, Y. (2009). « On rank reversal in decision analysis. » In : *Mathematical and Computer Modelling* 49, p. 1221–1229.
- Wang, Y.-M., Yang, J.-B. et Xu, D.-L. (2005). « Interval weight generation approaches based on consistency test and interval comparison matrices. » In : *Applied Mathematics and Computation* 167, p. 252–273.
- Wilhelm, C. (2001). « The avalanche winter 1999 in Switzerland - an overview. » In : *Proceedings International Snow Science Workshop, Big Sky*. Montana, U.S.A., p. 487–494.
- Woo, G. (1999). *The mathematics of natural catastrophes*. Londres, Royaume-Uni : édition 2000, Imperial College Press, 304 p.

- Yager, R. (2008). « Decision making under Dempster-Shafer uncertainties. » In : *Studies in Fuzziness and Soft Computing* 219, p. 619–632.
- Yager, R. R. (1983). « Hedging in the combination of evidence. » In : *Journal of Information and Optimization Sciences* 4.1, p. 73–81.
- Yang, J.-B., Liu, J., Wang, J., Sii, H.-S. et Wang, H.-W. (2006). « Belief Rule-Base Inference Methodology Using the Evidential Reasoning Approach - RIMER ». In : *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics - Part A : systems and Humans* 36, p. 266–285.
- Yatsalo, B., Gritsyuk, S., Sullivan, T., Trump, B. et Linkov, I. (2016). « Multi-criteria risk management with the use of DecernsMCDA : methods and case studies ». In : *Environment Systems and Decisions* 36, p. 266–276.
- Yin, H., Lan, J. et Li, X.-R. (2013). « Measures for ranking estimation performance based on single or multiple performance metrics. » In : *16th International Conference on Information Fusion*. Istanbul, Turquie, p. 453–460.
- Yu, W. (1992). « Aide multicritère à la décision dans le cadre de la problématique du tri : Concepts, méthodes et applications. » Thèse de doct. Paris, France : Université Paris-Dauphine, Sciences de gestion, 201 p.
- Zadeh, L. A. (1965). « Fuzzy sets. » In : *Information and control* 8.3, p. 338–353.
- Zadeh, L. A. (1978). « Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. » In : *Fuzzy sets and systems* 1, p. 3–28.
- Zadeh, L. A. (1979). *On the validity of Dempster's rule of combination, Memo M79/24*. University of California. Berkeley, U.S.A.
- Zollinger, F. (1985). « Debris detention basins in the European Alps. » In : *International Symposium on Erosion, debris flow and disaster prevention*. Tsukuba, Japan, p. 433–438.
- Zwengelstein, G. (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité, guide pratique d'application de la RCM*. Diagnostic et maintenance. Paris, France : Hermès, 672 p.

Annexes

Annexe A : Analyse statistique de la BD-RTM selon l'extraction du 17/04/2014

I. Analyse du nombre d'ouvrages et de dispositifs gérés en domanial RTM

		Nb dispositifs	Nb ouvrages
Domanial RTM	Foncier		20259
	Maître Ouvrage		20575
	Gestionnaire		
Etat (hors RTM)	Foncier		705
	Maître Ouvrage		92
	Gestionnaire		92
Inconnu	Foncier		213
	Maître Ouvrage		
	Gestionnaire		

Tableau 1 : Analyse de la gestion des ouvrages et dispositifs en forêts domaniales

Selon la Base de données, 20998 ouvrages, regroupés dans 1933 dispositifs, sont gérés en forêts domaniales RTM.

Ils ont pour objectifs de protéger contre les phénomènes d'avalanche (A), d'érosion (E), de glissement (G), d'inondations (I), de chutes de blocs (P) et torrentiels (T).

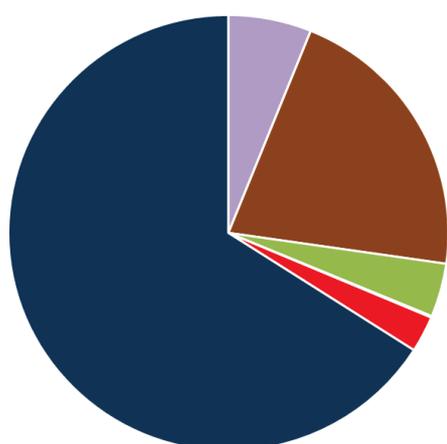


Fig. 1 : Répartition des dispositifs gérés en domanial RTM par type de phénomènes.

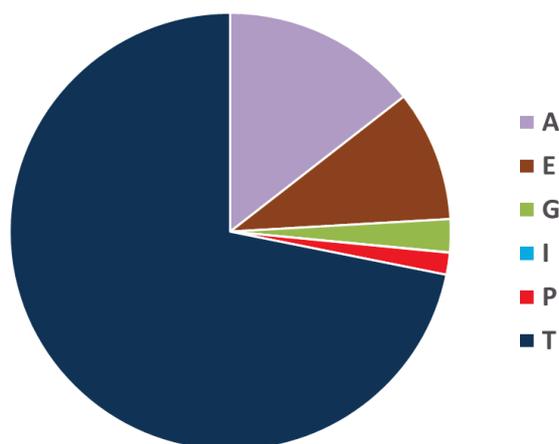


Fig. 2 : Répartition des ouvrages gérés en domanial RTM par type de phénomènes.

Approximativement, sur 21000 ouvrages, 15100 protègent contre le risque torrentiel et 2000 contre le phénomène d'érosion soit 82 % des ouvrages à gérer. Les ouvrages de protection contre les avalanches représentent 14% du parc.

A l'échelle des dispositifs, 87 % sont des ouvrages de protection contre les risques torrentiels et d'érosion, alors que les dispositifs de protection contre les avalanches ne représentent que 6% du parc de dispositifs gérés en domanial RTM. Les ouvrages de protection contre les avalanches sont surexprimés par rapport aux dispositifs.

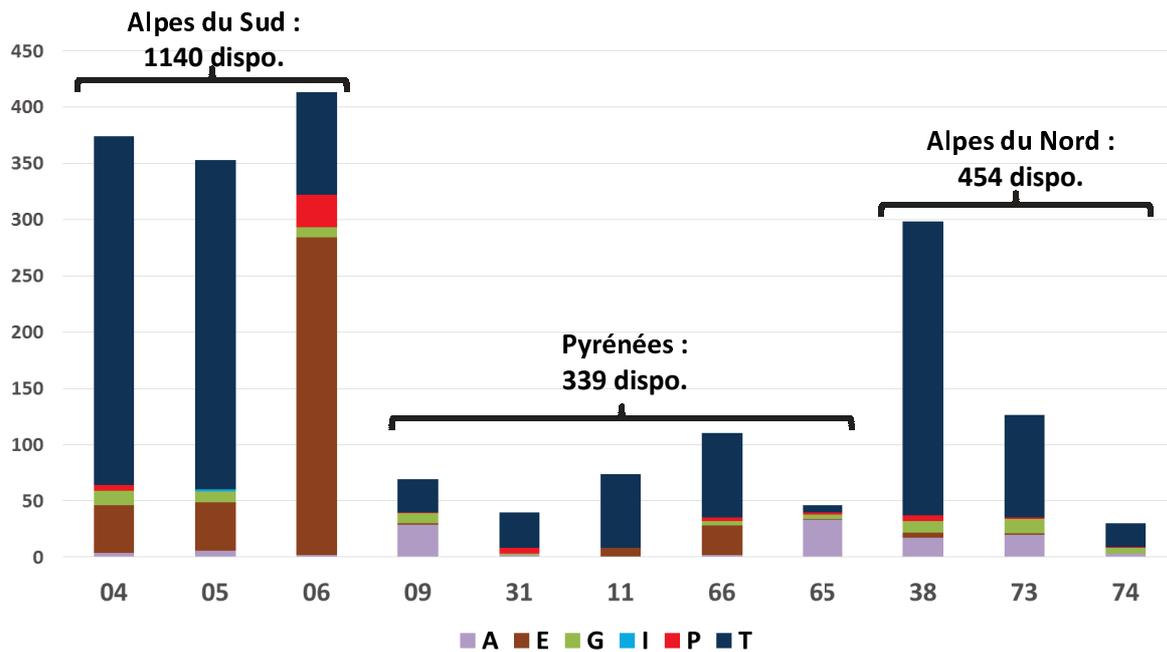


Fig. 3 : Répartition des dispositifs gérés en domanial RTM par département et par type de phénomènes.

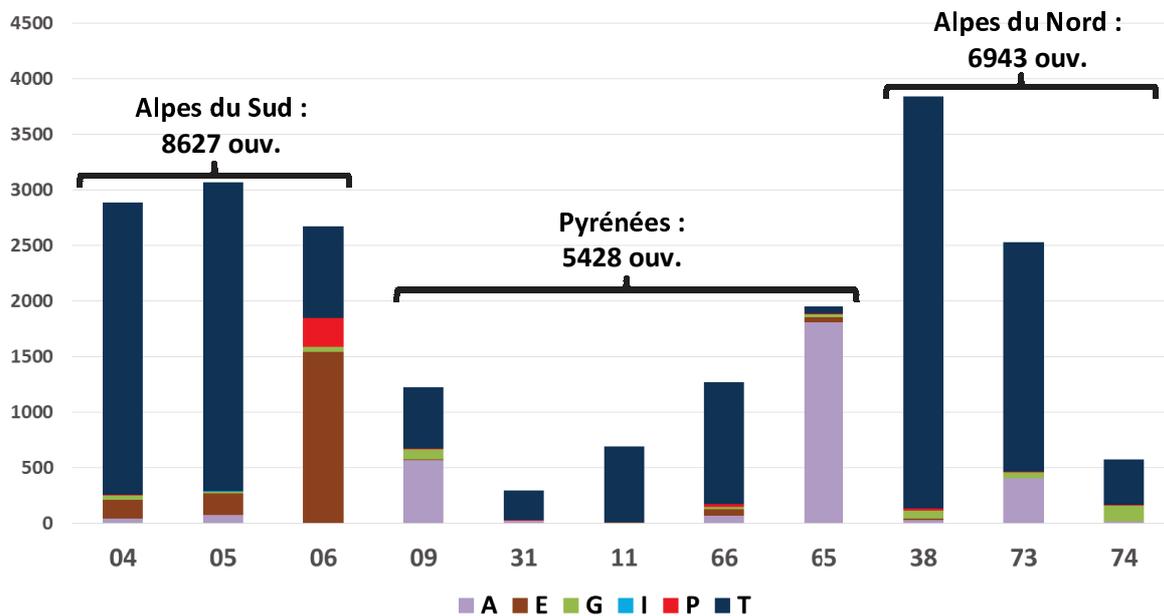


Fig. 4 : Répartition des ouvrages gérés en domanial RTM par département et par type de phénomènes.

Plus de la moitié des dispositifs de protection (58%) se situent dans le massif des Alpes du Sud, alors que cette part diminue à 41 % si on tient compte des ouvrages de protection (Fig. 3 et 4). Ceci est lié au nombre d'ouvrages considérés à l'échelle d'un dispositif (Fig. 5).

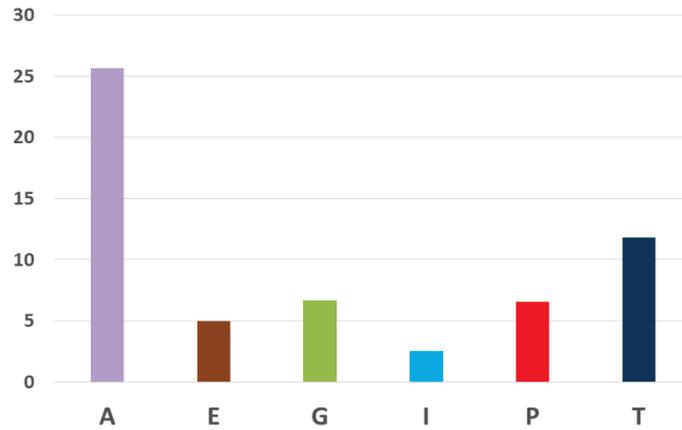


Fig. 5 : Nombre moyen d'ouvrages par dispositifs gérés en domaniaux RTM

En effet, le phénomène d'érosion est plus présent dans ce massif, notamment pour le département des Alpes-Maritimes (06) (Fig. 4). Or le nombre moyen d'ouvrages par dispositifs est de moins de 5 pour ce phénomène alors qu'il est supérieur à 10 pour le phénomène torrentiel et à 25 pour les avalanches (Fig.5).

Pour les Alpes-Maritimes (06), la surexpression de la protection contre l'érosion par rapport aux autres départements peut être liée à une définition différente entre érosion et torrentiel de celle des autres départements. Mais elle peut aussi être la représentation d'une expression nettement plus importante de ce phénomène par rapport aux autres départements. En retenant la première hypothèse, on peut considérer par la suite que la protection contre l'érosion est directement liée à la protection contre le phénomène torrentiel.

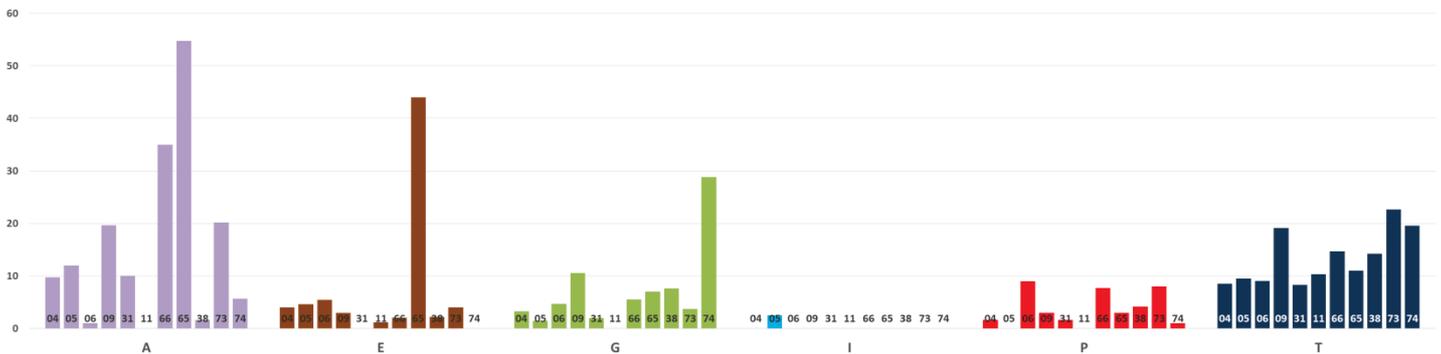


Fig. 6 : Nombre moyen d'ouvrages par dispositifs gérés en domaniaux RTM, analysé par département RTM

Pour les phénomènes torrentiels et chutes de blocs, le nombre moyen d'ouvrages par dispositifs est homogène dans les différents départements (Fig. 6).

Par contre, pour les autres phénomènes, certains départements se distinguent particulièrement. En Haute-Savoie (74), le nombre d'ouvrages par dispositifs de protection contre les glissements est très important (Fig. 6).

Dans les Hautes-Pyrénées (65), le nombre d'ouvrages par dispositifs de protection contre l'érosion et contre les avalanches est beaucoup plus important que dans les autres départements (Fig. 6). Dans ce département, cette répartition singulière entre ouvrages et dispositifs de protection contre les avalanches entraîne un nombre très important du nombre d'ouvrages de protection contre les avalanches. Celui-ci doit donc être relativisé (Fig. 4).

Ceci s'exprime dans une moindre mesure pour la protection contre les avalanches dans les Pyrénées-Orientales (66) (Fig. 6).

Analyse du nombre d'ouvrages et dispositifs – ce qu'il faut retenir

- + de 1900 dispositifs regroupant environ 21000 ouvrages gérés en forêts domaniales RTM sont inventoriés.
- Les dispositifs et ouvrages gérés en forêts domaniales RTM ont principalement pour objectifs de protéger contre les phénomènes torrentiels (15085 ouvrages), auxquels sont liés les dispositifs de protection contre l'érosion (2030 ouvrages). En ajoutant les 3027 ouvrages de protection contre les avalanches, les ouvrages de protection contre les glissements (512) et contre les chutes de blocs (339) peuvent être considérés comme en nombre limité.
- La décomposition des ouvrages dans les dispositifs selon les phénomènes et les départements peut entraîner une non homogénéité pour l'analyse comparative entre départements (sur-représentation par exemple du nombre d'ouvrages paravalanches dans le 65 par rapport aux autres départements).
- Les départements avec le plus grand nombre de protection torrentielle sont le 04, le 05, le 38 et le 73, suivis du 66 et du 06.
- La protection contre l'érosion s'exprime principalement dans les Alpes du Sud (06, 04 et 05) suivis du 66.

II. Analyse des ouvrages par classes

Selon ce qui précède, on tient compte des dispositifs et ouvrages de protection contre les torrents, l'érosion et les avalanches dans ce paragraphe. L'analyse détaillée se limite aux ouvrages de protection contre les phénomènes torrentiels et d'érosion.

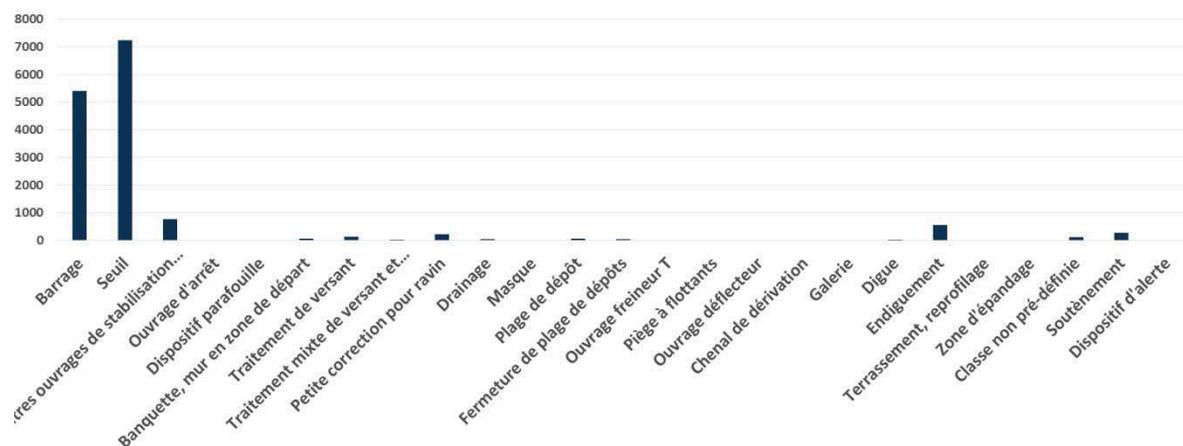


Fig. 7 : Répartition par classes d'ouvrages des 15085 ouvrages de protection torrentiels gérés en domanial RTM

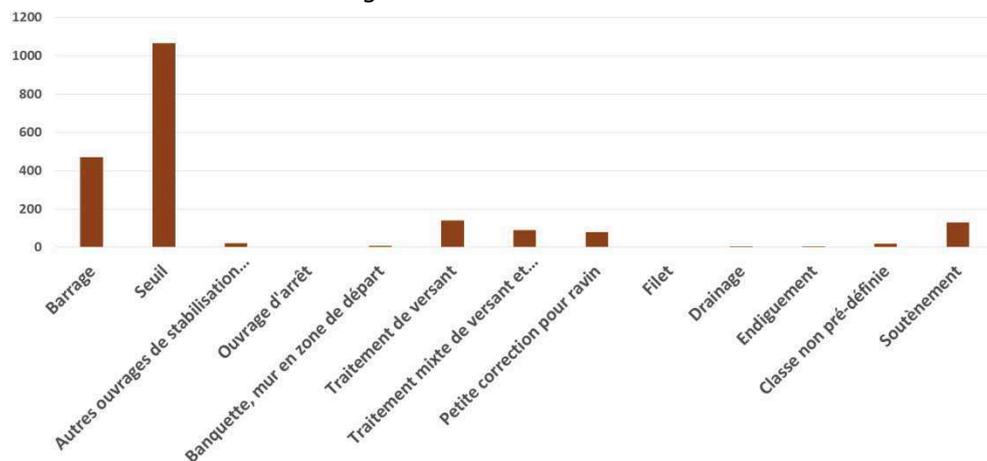


Fig. 8 : Répartition par classes d'ouvrages des 2030 ouvrages de protection contre l'érosion gérés en domanial RTM

84% des ouvrages de protection torrentielle et 75 % des ouvrages de protection contre l'érosion gérés en forêts domaniales RTM sont des barrages ou des seuils de correction (Fig. 7 et 8). **Au final, 67,5% des ouvrages gérés en domanial RTM (14180 sur 20998), sont des barrages ou des seuils de correction.**

Selon le guide de la BD-RTM, les seuils sont les ouvrages d'une hauteur de moins de 2 m et les barrages sont ceux d'une hauteur supérieure.

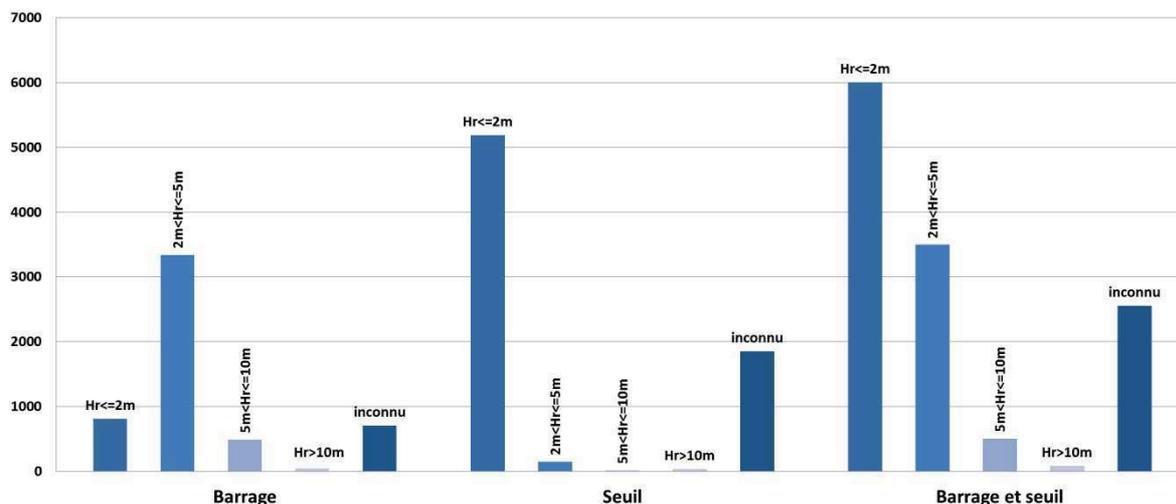


Fig. 9 : Répartition par classes de hauteurs des 12644 barrages et seuils de correction torrentiels gérés en domanial RTM

De manière générale, la classification entre barrages et seuils suit la recommandation générale du guide technique de la BD-RTM. Cependant, parmi les 5399 barrages, 815 ont une hauteur sous cuvette inférieure à 2 m et 707 ont une hauteur inconnus. Ceci peut être lié à des hauteurs sous cuvettes réduites ou invisibles du fait de l'atterrissement aval. Parmi les 7245 seuils, au moins 206 sont mal classés car de hauteur sous cuvette supérieure à 2 m et 1850 ont une hauteur inconnus (Fig. 9).

La différenciation entre barrages et seuils n'est donc pas parfaite lors du remplissage de la BD-RTM. Etant donné que ces ouvrages ont des fonctions similaires de stabilisation, ils peuvent être regroupés. L'analyse groupée montre alors que le nombre d'ouvrage diminue avec leur hauteur sous cuvette. Ainsi environ 6000 ouvrages de correction sont répertoriés avec une hauteur inférieure à 2 m et seulement environ 80 sont inventoriés avec une hauteur supérieure à 10 m. A noter que 20% des barrages et seuils de correction n'ont pas de hauteur inventoriée (Fig. 9).

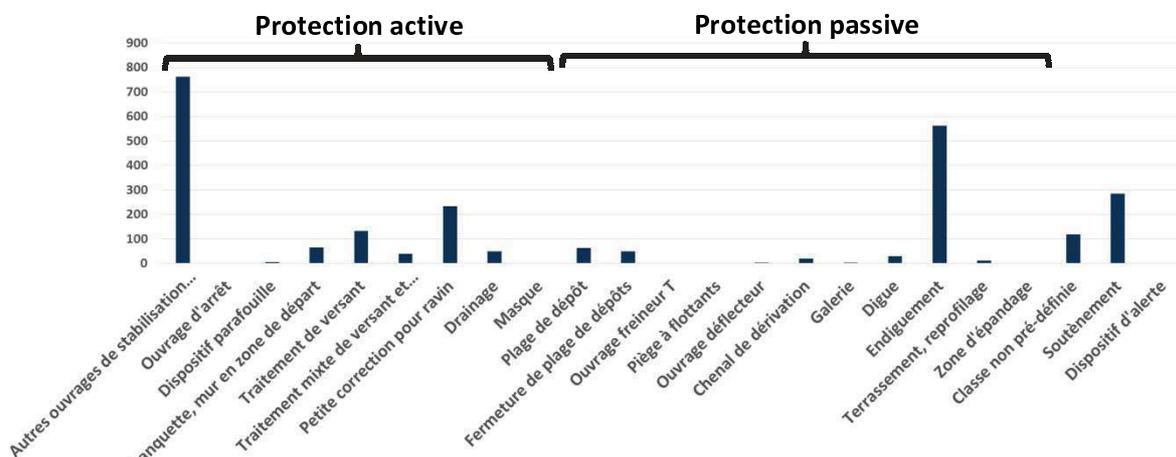


Fig. 10 : Répartition par classes d'ouvrages des 2441 ouvrages de protection torrentiels (hors barrages et seuils) gérés en domanial RTM

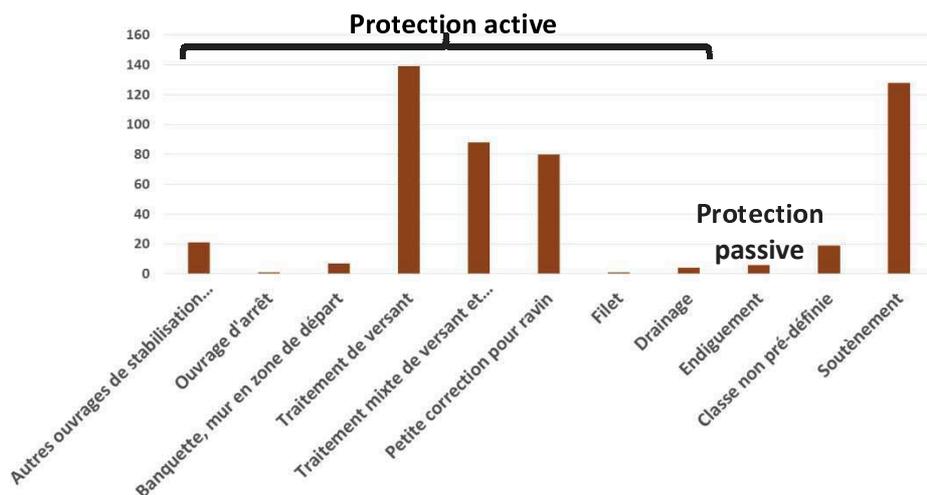


Fig. 11 : Répartition par classes d'ouvrages des 494 ouvrages de protection contre l'érosion (hors barrages et seuils) gérés en domanial RTM

Notons dans un premier temps que les classes d'ouvrages non-prédéfinies sont généralement des ouvrages liés au fonctionnement des pistes. Les ouvrages de soutènement sont également en grande majorité des ouvrages de soutènement de pistes.

Pour protéger contre l'érosion, à 6 exceptions près d'endiguement inventoriés, seuls des ouvrages de protection active sont mis en place (Fig. 11). Les ouvrages de protection torrentiels peuvent être répartis entre ouvrages de protection active (qui inclut également les barrages et seuils de correction) et les ouvrages de protection passive (Fig. 10).

En résumé, sur 17115 ouvrages de protection torrentielle et contre l'érosion gérés en domanial RTM, 93 % sont des ouvrages de protection active (préférentiellement des barrages et seuils de stabilisation), 4 % des ouvrages de protection passive (préférentiellement des endiguements) et 3 % des ouvrages liés aux pistes d'accès aux ouvrages.

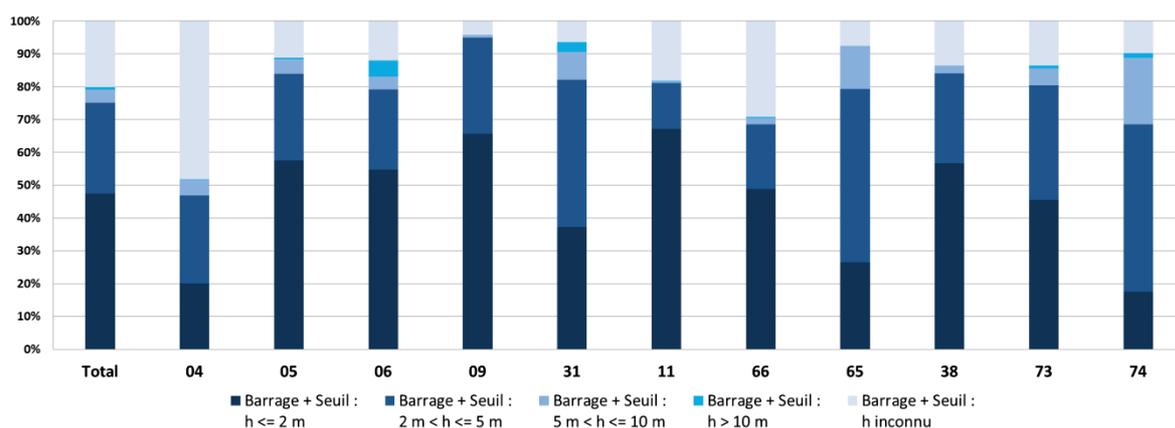


Fig. 12 : Comparaison par département de la répartition par classe de hauteurs des 12644 barrages et seuils de protection torrentiels gérés en domanial RTM

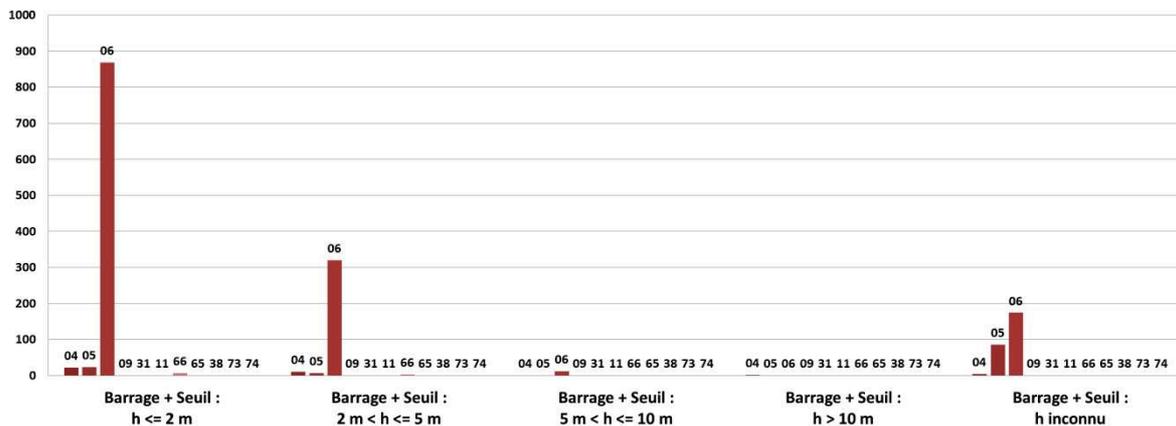


Fig. 13 : Répartition départementale et par classes de hauteurs des 1596 barrages et seuils de protection contre l'érosion gérés en domanial RTM

Le nombre de barrages et seuils diminue avec leur hauteur : un peu moins de 50% font moins de 2 m, 25 % font une hauteur comprise entre 2 m et 5 m et seulement 5 % ont une hauteur supérieure à 5 m (pour rappel, 20% ont leur hauteur qui n'est pas renseignée) (Fig. 12).

Les départements d'Ariège (09) et de l'Aude (11) se différencient de ce comportement moyen par un taux de petits ouvrages ($h \leq 2$ m) plus important (Fig. 12). Si les ouvrages de protection contre l'érosion sont ajoutés, le département des Alpes-Maritimes (06) rentrerait dans cette catégorie (Fig.13).

Les départements de Haute-Savoie (74), des Hautes-Pyrénées (65), de Haute-Garonne (31) et de Savoie (73), se différencient eux par une proportion plus importante de gros barrages et seuils. Pour le premier, 50 % du parc de barrages et seuils ont une hauteur comprise entre 2 m et 5 m et plus de 20 % ont une hauteur supérieure à 5 m. Pour le second et le troisième, la répartition est équivalente avec 10 % du parc avec une hauteur supérieure à 5 m. Pour le quatrième, 40% du parc ont une hauteur supérieure à 2 m (Fig. 12).

Pour les Alpes de Haute-Provence (04), l'analyse n'est pas pertinente du fait du nombre important d'ouvrages pour lesquels la hauteur n'est pas renseignée (Fig. 12).

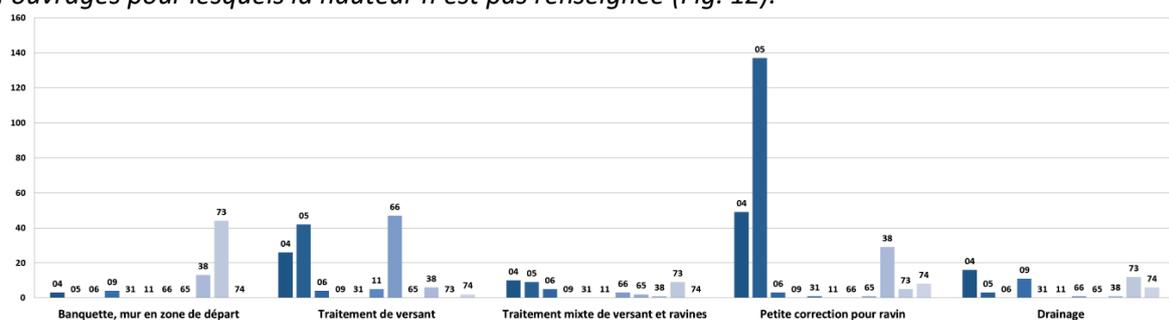


Fig. 14 : Comparaison par département de la répartition par classe des principaux ouvrages de protection torrentielle « active » (hors barrages et seuils) gérés en domanial RTM.

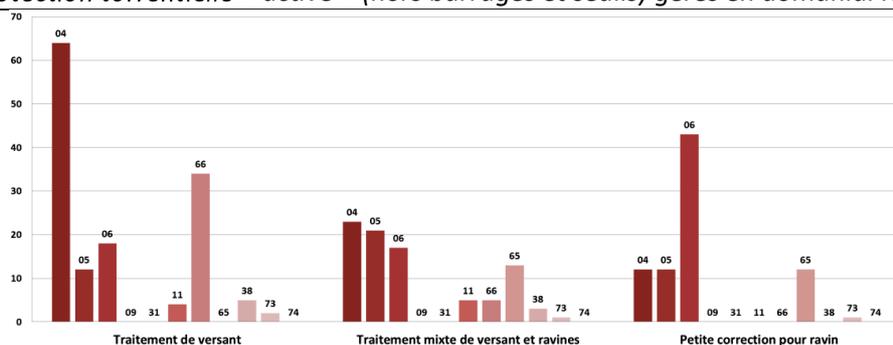


Fig. 15 : Comparaison par département de la répartition par classe des principaux ouvrages de protection contre l'érosion « active » (hors barrages et seuils) gérés en domanial RTM.

Pour les autres ouvrages de protection active contre les torrents et l'érosion, la répartition entre départements n'est pas homogène.

Par exemple, le « traitement de versant » est principalement associé dans le 04 à de la protection contre l'érosion. Dans le 05 et le 66, cette tendance s'inverse pour l'associer à la protection torrentielle (Fig. 14 et 15).

Pour le 04, le 05 et le 38, la « petite correction pour ravin » est associée préférentiellement à la protection torrentielle alors que pour le 06 et le 65, c'est préférentiellement associé à l'érosion (Fig. 14 et 15). Ceci corrobore les premiers éléments indiquant que la part d'ouvrages de protection contre l'érosion était plus importante dans le 06 notamment (Fig. 4).

Dans le 38 et le 73, les « Banquettes, murs en zone de départ » sont considérés comme des ouvrages de protection contre les crues torrentielles (Fig. 14).

Le « traitement mixte de versant et ravines » est lui principalement associé à la protection contre l'érosion et ce de manière uniforme sur les différents départements (Fig. 14 et 15).

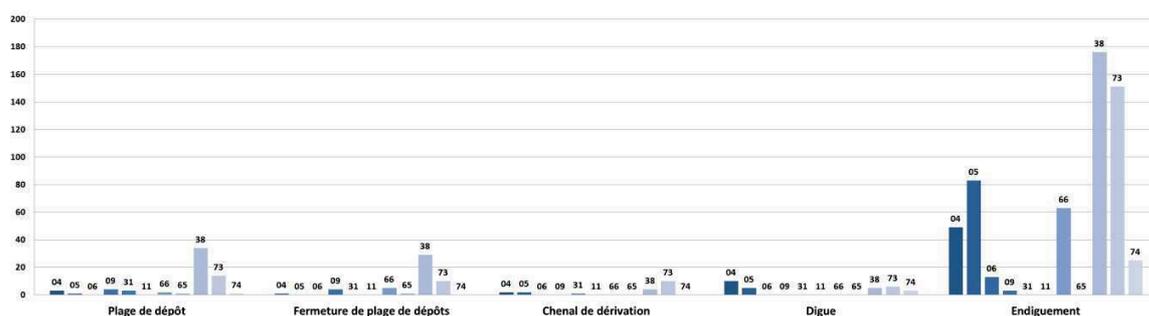


Fig. 16 : Comparaison par département de la répartition par classe des principaux ouvrages de protection contre l'érosion « active » (hors barrages et seuils) gérés en domanial RTM.

Parmi les 753 ouvrages de protection torrentiels « passifs », la grande majorité sont des endiguements (Fig. 16).

Les ouvrages passifs, endiguements et plages de dépôts (PDD), sont situés préférentiellement dans le 38 et le 73. Quelques PDD se situent dans le 04, le 05, le 09, le 31, le 66 et le 65 mais cela reste marginal. Des endiguements sont également à gérer dans le 04, le 05, le 66 et le 74 (Fig. 16).

Analyse des ouvrages par classes et par phénomènes – ce qu'il faut retenir

- 93 % des ouvrages gérés en domanial RTM sont des ouvrages de protection « active ». 4 % sont « passifs ». 3 % sont liés aux pistes d'accès ou à l'alerte.
- L'attribution des classes de protection aux phénomènes dépend des définitions données aux phénomènes par départements. Spécifiquement au 06, les barrages et seuils sont considérés comme protégeant contre l'érosion et les chutes de blocs. Dans les autres départements, ce n'est que peu le cas et ces ouvrages, qui ont la même fonction, sont liés à des sites torrentiels : limiter l'érosion et les chutes de blocs limite l'apport solide dans le torrent.
- Les classes d'ouvrages liées au torrentiel, à l'érosion, au glissement et à l'érosion (banquette, murs en zone de départ ; traitement de versant ; traitement mixte de versants et ravines ; petite correction pour ravin) sont peu discriminantes. Les classements dans ces catégories dépendent des départements.
- 68% de l'ensemble des ouvrages gérés en domanial RTM sont des barrages ou des seuils de stabilisation (60 % torrentiel + 7,3 % érosion + 0,5 % glissement + 0,3 % chutes de blocs). Selon les départements, la hauteur moyenne d'ouvrage varie : les ouvrages sont de petite taille en moyenne dans le 09 et le 11, et de taille plus importante dans le 74, 65, 31 et 73.
- Les ouvrages de protection passive torrentiels (PPD et endiguements) sont principalement situés dans le 38 et le 73.

III. Analyse du parc de barrages et seuils de protection torrentielle

Selon ce qui précède, 72 % des ouvrages gérés en domanial ont pour vocation de protéger contre les phénomènes torrentiels dont 84 % sont des barrages et seuils de stabilisation. Cela représente 60 % du parc total d'ouvrages auxquels on peut ajouter 8 % des barrages et seuils de protection contre l'érosion, les glissements et les chutes de blocs.

Les analyses qui suivent dans ce paragraphe se focalisent donc sur les 12644 barrages et seuils identifiés comme de protection torrentielle.

1. Analyse selon les types de barrages et de seuils

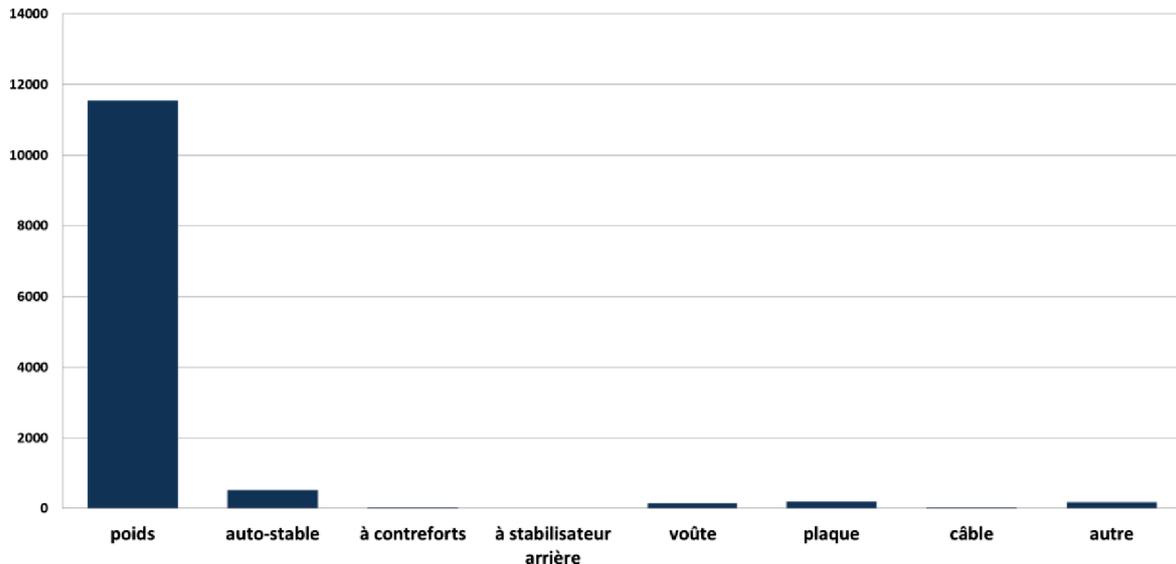


Fig. 25 : Répartition par types de construction des 12644 barrages et seuils de protection torrentiels gérés en domanial RTM

91 % des barrages et seuils de protection torrentiels gérés en domanial RTM sont de type poids. 4 % sont de type auto-stable (Fig. 25).

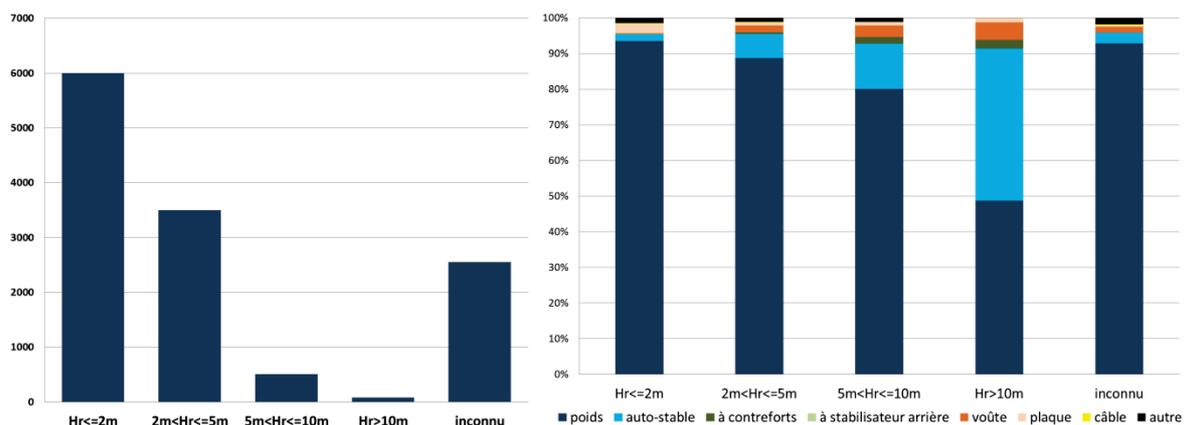


Fig. 26 : Répartition des 12644 barrages et seuils de protection torrentiels gérés en domanial RTM par classes de hauteur (gauche) et analyse tenant compte des types d'ouvrages (droite).

Plus la hauteur des barrages et seuils augmente, plus les ouvrages sont de type auto-stable en comparaison aux ouvrages poids (Fig. 26). Cependant, étant donné que la plupart des ouvrages sont de petite taille, le nombre d'ouvrages poids est le plus important (Fig. 25 et 26).

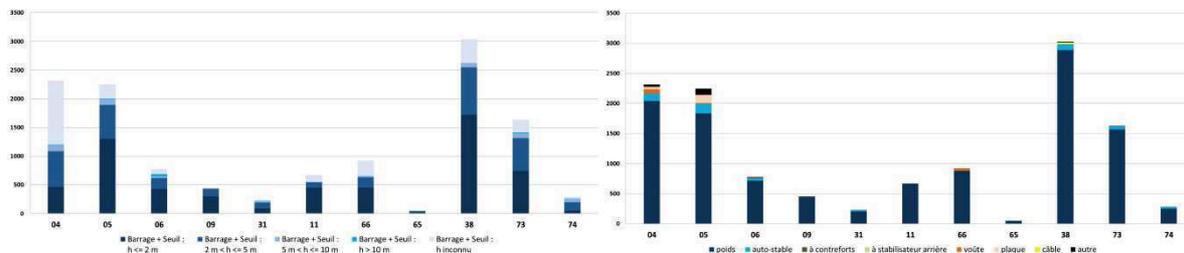


Fig. 27 : Comparaison départementale de la répartition des barrages et seuils de protection torrentiels gérés en domanial RTM par classes de hauteur (gauche) et analyse tenant compte des types d'ouvrages (droite).

Les ouvrages autostables sont principalement implantés dans le 04, le 05 et le 38.

2. Analyse selon les classes de matériaux

Seulement 142 ouvrages n'ont pas de classe de matériaux définie. Par contre, il y a une très grande diversité : 192 classes de matériaux sont identifiées pour ce type d'ouvrages.

En ne retenant que les classes pour lesquelles plus de 100 ouvrages ont été retenus, 70 % de ces ouvrages sont représentés. 12 classes de matériaux ont été retenues car englobent les autres.

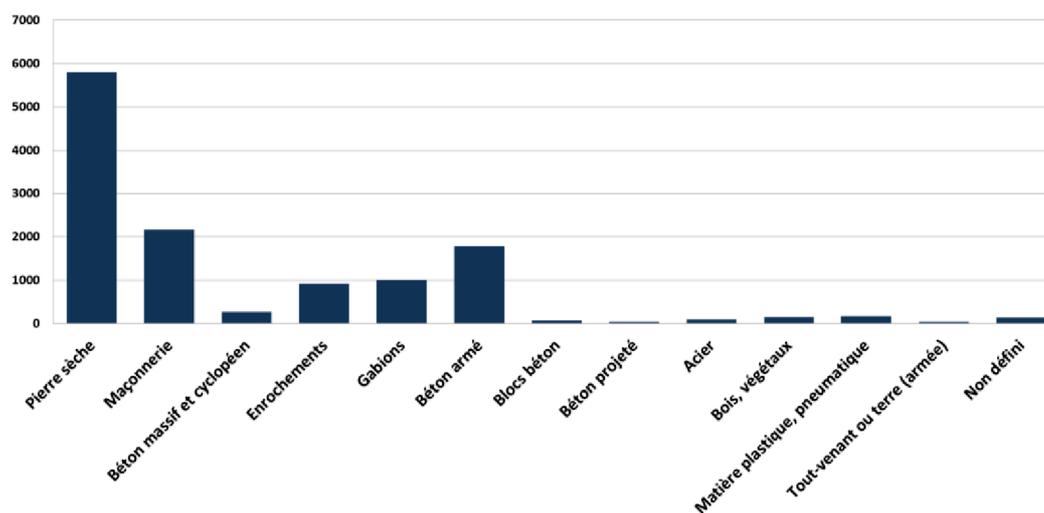


Fig. 28 : Répartition des barrages et seuils de protection torrentielle gérés en domanial RTM selon les classes de matériaux les composant.

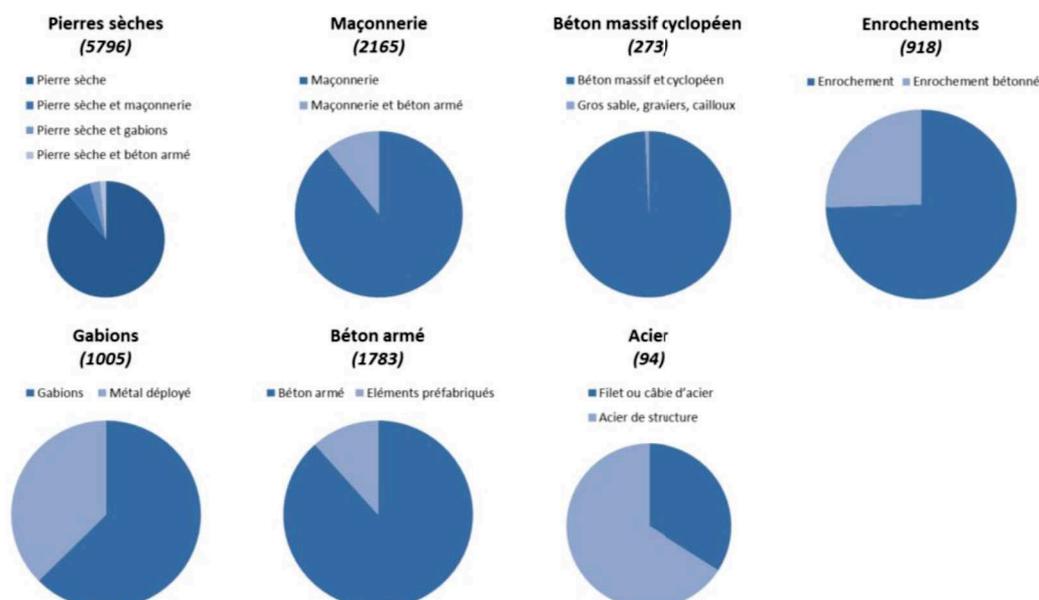


Fig. 29 : Détail de la répartition des barrages et seuils de protection torrentielle gérés en domanial RTM selon les classes de matériaux les composant.

46 % des barrages et seuils de protection torrentielle gérés en domanial RTM sont en pierres sèches. Les ouvrages en maçonnerie et en béton armé représentent environ 15 % chacun des barrages et seuils de correction torrentielle.

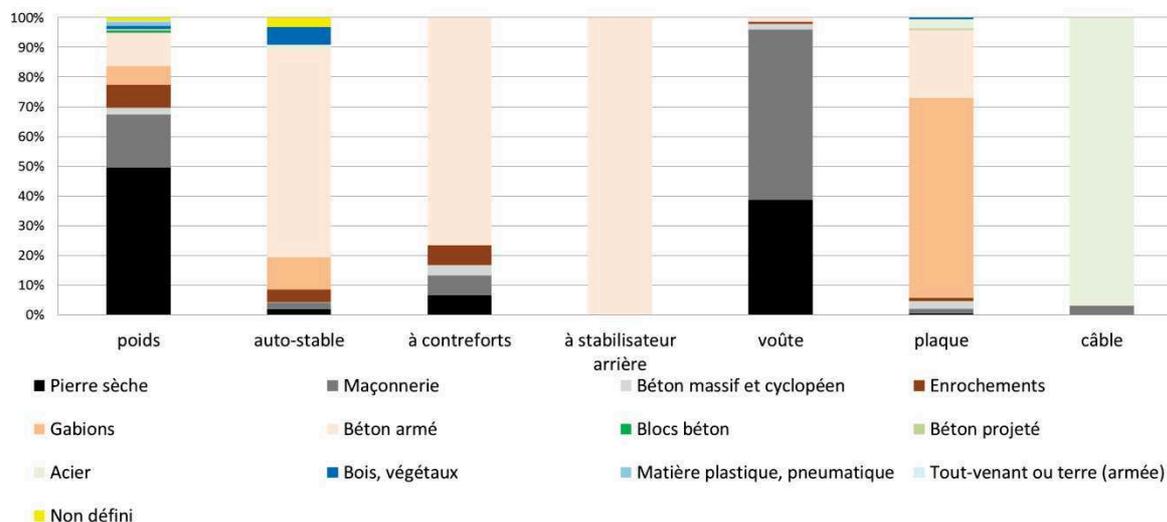


Fig. 30 : Relation entre type et matériaux des barrages et seuils de protection torrentielle gérés en domanial RTM.

Les ouvrages poids sont principalement en pierres sèches mais sont en matériaux diversifiés. Les ouvrages auto-stables à contreforts et à stabilisateur sont très majoritairement en béton armé. Les ouvrages plaque sont eux notés comme en gabions.

Analyse des ouvrages par classes et par phénomènes – ce qu'il faut retenir

- 91 % des barrages et seuils de protection torrentiels gérés en domanial RTM sont de type poids et 4 % de type autostable.
- Plus la hauteur des ouvrages est importante, même s'ils sont moins nombreux en nombre, plus la part (en proportion) des ouvrages autostables est importante par rapport aux ouvrages poids.
- 46 % des barrages et seuils sont en pierres sèches.
- Les ouvrages poids sont principalement en pierres sèches mais en matériaux diversifiés. Les ouvrages autostables sont en béton armé et principalement implantés dans le 04, le 05 et le 38.

Synthèse : représentation du parc d'ouvrages gérés en domanial RTM

Le parc d'ouvrages gérés en domanial peut être représenté à 88 % par les grandes catégories d'ouvrages suivantes, dont 85 % sont des ouvrages de protection active.

20998	Torrentiel	72%	Barrage et seuil poids en pierres sèches	27%
			Barrage et seuil poids en maçonnerie	10%
			Barrage et seuil poids en béton armé	6%
			Barrage et seuil poids en enrochements libres et bétonnés	4%
			Barrage et seuil poids en gabions	3%
			Barrage et seuil auto-stable en béton armé	2%
			Radier	2%
			<i>Endiguement mur/muret (passif)</i>	2%
			Barrage et seuil poids en béton massif et cyclopéen	1%
			Seuil de petite correction pour ravin	1%
			Soutènement (généralement de piste d'accès)	1%
			Banquettes, Murets en zone de départ, Traitement de versant et traitement mixte de versant et ravines	1%
			Série d'épis	0,9%
			Barrage et seuil plaque en gabions et béton armé	0,8%
			Barrage et seuil autre en gabions et béton armé	0,8%
			Barrage et seuil voûte en pierres sèches et maçonneries	0,7%
	<i>Endiguement ouvrage composite (passif)</i>	0,5%		
	Erosion	10%	Barrage et seuil	7%
			Petite correction pour ravin, Traitement de versant et traitement mixte de versant et ravines	2%
	Glissement	2%	Drainages	0,8%
			Barrage et seuil	0,5%
	Avalanches	14%	Râtelier	8%
			Banquette, mur en zone de départ	2%
			Claie	2%
			Filet	1%
	Chutes de blocs	2%	Barrage et seuil	0,6%
<i>Ouvrage d'arrêt (passif)</i>			0,6%	

Annexe B : Analyse de l'évolution du contexte de gestion des risques torrentiels en France

Cette annexe détaille l'analyse historique thématique menée pour décrire l'évolution du contexte de gestion des risques torrentiels en France. L'ambition de cette démarche est d'extraire les objectifs donnés aux mesures de protection torrentielle. Elle repose sur une analyse détaillée d'archives et la collecte de données enregistrées dans une base adaptée.

B.1. Données analysées

La collecte des archives a été organisée selon les trois thèmes à traiter : l'évolution des connaissances scientifiques et techniques, l'évolution du contexte réglementaire et l'évolution de la structure de gestion.

B.1.1. Analyse d'archives

Pour analyser l'évolution des objectifs, ceux-ci doivent être identifiés pour pouvoir organiser l'analyse. Par exemple, les mesures de protection contre les risques torrentiels ont pour objectif de réduire le risque. Le risque est le croisement entre l'aléa et la taux d'endommagement potentiel sur le territoire analysé, lié aux enjeux. L'évolution des objectifs de protection est donc liée à celle des aléas ou des enjeux qui seront les éléments à analyser pour comprendre l'évolution des objectifs donnés à la protection sur un territoire.

En parallèle, les textes réglementaires, comme les lois, décrets et codes, s'ils peuvent être considérés comme des contraintes, sont également le reflet des choix réalisés, en raisonnement avec l'évolution de la société. Leur analyse permet une meilleure compréhension des objectifs à l'échelle nationale. Par exemple, depuis la première Loi de 28/07/1860 sur la RTM (Empereur Napoléon III 1860), de nouvelles réglementations ont impacté la mise en œuvre des mesures de protection contre les phénomènes torrentiels en intégrant la prise en compte de l'environnement ou de la sécurité par exemples.

Les bilans des actions réalisées sont des éléments objectifs d'identification des décisions prises. Ils ne prennent pas en compte tous les éléments de contexte ayant conduit à cette décision, liée à des contraintes financières ou des choix politiques. Cependant, l'orientation générale des objectifs à atteindre ressort de ces bilans. Pour réaliser une comparaison dans le temps et dans l'espace, la collecte des données issues de ces bilans doit être organisée. L'enregistrement dans une base de données de type système d'informations géographiques (SIG) facilite la représentation spatiale des évolutions.

L'analyse des connaissances scientifiques et des outils techniques disponibles pour réaliser les

objectifs fixés permet d'identifier les fonctions potentielles attribuées aux systèmes à évaluer. Par exemple, les mesures de protection doivent agir sur les phénomènes. Cette fonction est dépendante de la connaissance sur les phénomènes d'une part et des compétences scientifiques et techniques à disposition pour réaliser ces fonctions.

Dans le cadre de la gestion patrimoniale des infrastructures (GPI), le décideur est la structure de gestion. Pour les ouvrages en forêts domaniales RTM, il s'agit du ministère en charge de la forêt (MAAF), accompagné techniquement par le service RTM de l'ONF. La création de l'ONF à partir de l'ancienne administration des eaux et forêts puis l'évolution des missions ont modifié l'organisation de cette structure. L'analyse des documents réglementaires à l'origine de sa création puis des notes d'organisation interne permet d'identifier l'impact de cette évolution sur les conditions de gestion des ouvrages.

B.1.2. Création d'une base d'enregistrement des données

Les trois documents de l'École Forestière (1911a,b,c) sont le premier bilan détaillé des actions menées en forêts domaniales RTM dans l'ensemble des massifs français. Ces actions avaient pour but 1) d'acquérir les terrains par l'Etat pour 2) mettre en place des mesures de protection. 3) Des travaux forestiers de protection pouvaient également être menés par les collectivités ou des particuliers subventionnés par l'Etat. 4) Des mesures privées d'amélioration pastorale étaient également subventionnées. Ces données sont accessibles dans les bilans de Mougin (1931) limité aux Alpes (du Nord et du Sud) et de l'enquête de Messines du Sourbier (1964) à l'échelle nationale. La base d'enregistrement créée, dont les données sont fournies ensuite, a été organisée comme suit, sur le principe des éléments du bilan de 1911.

1. Travaux réalisés par l'Etat dans le domaine public :
 - (a) aspects techniques :
 - surfaces (ha) : acquises dans le domaine public, à acquérir, reboisées artificiellement, boisées naturellement, impossibles à reboiser, à reboiser ;
 - travaux de protection torrentielle : types, nombre d'ouvrages, canaux (en km), clayonnages et fascines (km), drains (km) ;
 - structures de protection contre les avalanches de neige : types, murs de soutènement (m), banquettes (m), digues de dérivation (m) ;
 - (b) aspects financiers (en francs courant) :
 - coût des acquisitions ;
 - coût des travaux de protection torrentielle ;
 - coût des travaux de protection contre les avalanches de neige ;
 - (c) aspects de contexte :
 - éléments exposés : type et nombre ;
 - objectifs spécifiques affectés aux travaux ;
 - type de phénomènes sur lesquels doivent agir les mesures.
2. Travaux forestiers réalisés par les communes ou les particuliers :
 - (a) aspects techniques : surface reboisées artificiellement (ha) ;
 - (b) aspects financiers (en francs courant) :
 - frais pour la commune ;
 - subventions des départements ;
 - subventions d'Etat au titre de l'action RTM.
3. Subventions aux travaux d'amélioration pastorale (en francs courant).

B.1.3. Analyse de la Base de données RTM existante

Le parc d'ouvrages à gérer aujourd'hui est enregistré dans la BD-RTM. Son analyse statistique permet de comparer spatialement la répartition des mesures de protection pour la période actuelle. Le détail de cette analyse est fourni en Annexe A (données extraites le 17/04/2014).

B.2. Évolution du contexte de gestion de la protection torrentielle en France

Sur la base des données collectées, l'évolution du contexte de gestion des mesures de protection torrentielle en montagne a pu être décrite selon les trois dimensions, de l'échelle nationale à l'échelle départementale. Les aspects scientifiques et techniques sont d'abord décrits, puis les objectifs et, finalement, la structure de gestion.

B.2.1. Développement des connaissances scientifiques et techniques

Cette section a fait l'objet de la publication de Piton et al. (2016) qui traite l'évolution des connaissances scientifiques dans le domaine de l'hydraulique torrentielle. L'évolution des techniques de protection torrentielles y a été analysée.

B.2.1.1. Les étapes principales de la compréhension des phénomènes torrentiels en France

La communauté scientifique hydraulique européenne est née au XV^{ème} siècle, en Italie. De Vinci, Castelli (1628) et leurs successeurs ont ainsi influencé les auteurs français. Parmi ces derniers, un groupe, appelé plus tard les « Forestiers » (Kalaora et Savoye 1986), s'est formé au début du XIX^{ème} siècle. Ils alertaient sur l'augmentation des processus d'érosion du fait de la déforestation massive des versants de montagne (Fabre 1797 ; Surell 1841). Selon eux, ces versants dénudés produisaient plus de matériaux que sous conditions « naturelles », provoquant une activité torrentielle importante et le débordement régulier des rivières de plaine. Même si ce dernier point fut débattu (Champion 1856 ; Jouyne 1850), ils ont assuré le développement de la géomorphologie torrentielle, en considérant la continuité sédimentaire depuis le départ des matériaux au niveau des zones sources jusqu'à leur dépôt.

- Pour une compréhension des phénomènes liés à un apport trop important de matériaux solides

Fabre (1797) différenciait ainsi les rivières des torrents : les pentes des lits des premières sont un équilibre entre l'énergie du courant et la résistance du lit, liée à sa rugosité ; cet équilibre n'est pas atteint dans les seconds, faute de temps pour l'atteindre. Surell (1841) décomposait le bassin versant torrentiel en trois parties physiques (figure I.2, p. 7). Gras (1848) leur accordait que l'activité torrentielle était liée au ravinement des zones sources mais ajoutait à celles-ci les falaises et glissements qui pouvaient aussi soutenir cette activité.

Gras (1850) a ensuite étudié les mécanismes hydrauliques de prélèvement, de transport et de dépôt des matériaux solides. Il différenciait les phénomènes de transport en masse et partiel, renvoyant à la différenciation actuelle entre laves torrentielles et charriage. Dans la continuité, Gras (1857) et Breton (1867) ont établi la possibilité d'un manque de continuité sédimentaire

entre le cône de déjection, où les matériaux se déposent, et la rivière principale (figure I.2, p. 7).

Demontzey (1882) proposait une typologie des torrents selon la nature des sources de matériaux : les torrents à affouillements avec des zones de ravinement, les torrents à claptes avec des falaises et les torrents glaciaires avec des glaciers et des moraines. Kuss (1900a,b) se focalisait ensuite sur les laves torrentielles dans les torrents proglaciaires et dans ceux caractérisés par la présence de glissements et de chutes de blocs dans les zones d'accumulation.

Au début du XX^{ème} siècle, les ingénieurs forestiers ont identifié que l'analyse de l'aléa torrentiel nécessitait une étude détaillée basée sur la connaissance des événements précédents. Par exemples, Mougin (1900, 1914) et Bernard (1900) ont ainsi publié des rapports détaillés d'événements historiques ayant occasionné des dommages. Bernard (1927) est une synthèse de l'ensemble de ces connaissances forestières, géomorphologiques, hydrologiques et de calculs hydrauliques à utiliser pour mener une étude de bassin versant torrentiel.

- **De la prise de conscience des problèmes liés au déficit sédimentaire à la quantification de l'aléa**

Depuis les années 70, le processus de continuité sédimentaire a été progressivement révélé par les problèmes d'incision longitudinale des lits des torrents et rivières (Petit et al. 1996). Par la suite, les dommages occasionnés par cette incision sur les infrastructures et les écosystèmes fluviaux ont été considérés (Braud et Alber 2013 ; Brochot et al. 2003), ne devenant un problème opérationnel de gestion que récemment. Ainsi, le risque peut être lié à un apport excessif de sédiment mais aussi à un manque de transport sédimentaire dépendant de l'échelle d'analyse : échelle locale du bassin versant torrentiel, échelle régionale d'un bassin versant de la rivière.

En parallèle, la quantification du risque en zones de montagne est devenue un objet d'intérêt scientifique à partir des années 70. La compréhension des phénomènes et la quantification de l'aléa étaient alors nécessaires à la réalisation de cartes d'aléas à intégrer dans les plans de gestion de l'occupation des sols (Besson 1985). Des travaux scientifiques ont été engagés en ce sens au début des années 90 pour différencier et caractériser les différents processus hydraulique de transport de matériaux (Coussot 1992 ; Koulinski 1993 ; Meunier 1991). Ils sont encore poursuivis aujourd'hui.

B.2.1.2. Le développement des techniques de protection torrentielle en France

Fabre (1797) proposait de construire des digues et des protections de berges en aval et de reboiser les versants. Des petits ouvrages en bois implantés dans les zones de ravines pourraient aider à atteindre ce dernier objectif. Selon le même principe, Surell (1841) proposait de stabiliser les torrents pour aider à planter leurs berges.

- **Des ouvrages conçus et construits selon différentes fonctions, dès le XIX^{ème} siècle**

Gras (1850, 1857) et Breton (1867) ont développé la conception de plus gros barrages. Retenant l'efficacité à long terme du reboisement des versants, ils promouvaient aussi l'action à court terme des gros ouvrages pour le compléter dans les zones très instables et réguler le transport sédimentaire lors de l'écoulement dans le lit. Ils ont ainsi théorisé trois fonctions de ces ouvrages : les ouvrages de rétention définitive des sédiments, notamment dans les gorges ou en zone aval des bassins versants ; les ouvrages de consolidation pour créer un dépôt sédimentaire sur une épaisseur

importante protégeant les pieds de falaise ; les ouvrages de régulation du transport solide pour doser le transport sédimentaire et limiter les phénomènes de transport en masse. Gras (1850) identifiait aussi l'effet de dosage attendu par des barrages avec des fentes d'ouverture.

En accord avec les propositions de Surell (1841) et en application des deux premières lois RTM (Empereur Napoléon III 1860, 1864), les agents forestiers ont réalisé des tests entre 1860 et 1882 (Brugnot et Cassayre 2002), en construisant les premiers ouvrages dans les torrents en appui au reboisement. Il s'agissait de constructions selon des initiatives locales. Rustiques, elles faisaient moins de 2 m de haut et étaient en matériaux divers : pierres sèches, clayonnages et fascinages, garnissages, tas de gazon avec ou sans pierres, ou bois. Quelques ouvrages de hauteur plus importante, en maçonnerie ou pierres taillées, ont également été construits durant cette période mais en faible nombre, comme dans le torrent de Saint-Marthe (05) (École Forestière 1911b).

Le guide technique de Demontzey (1882) a rassemblé ces expériences et constitué le point de départ de l'« Âge d'Or » des travaux RTM (Brugnot et Cassayre 2002).

Dans les torrents à affouillement, l'objectif était de limiter l'incision du fond du lit et la déstabilisation associée des pentes latérales. Pour cela, les fonctions des barrages étaient de stabiliser les torrents, diminuer leur pente et éviter leur divagation latérale. Les gros ouvrages étaient construits dans les torrents, avec des plus petits à leur aval pour protéger leur pied. Des ouvrages en bois, de petites tailles étaient construits à leur amont. Les ouvrages de moins de 4 m de haut étaient généralement en pierres sèches, lorsque des pierres de taille suffisante était disponibles. La maçonnerie étaient utilisée lorsque les pierres étaient trop petites ou pour les plus gros ouvrages (École Forestière 1911b). Une fois le reboisement établi, certaines de ces structures pourraient être abandonnées (Demontzey 1894).

Dans les torrents à clappes et glaciaires, les ouvrages de rétention étaient proposés comme un dernier recours, à implanter près de l'apex du cône de déjection, si les constructions réalisées en amont n'étaient pas suffisantes. Par ailleurs, Demontzey (1882) détaillait les techniques de drainage à mettre en place pour aider à stabiliser les glissements à l'origine des laves torrentielles.

Thiéry (1891) a ensuite transposé les formules de calcul hydraulique et de transport sédimentaire à ceux de stabilité des constructions. Pendant cette période, d'autres types d'ouvrages ont été construits : les tunnels d'évacuation pour drainer les glaciers (Mougin 1931), les barrages de rétention en aval direct des moraines et des zones de stockage de matériaux colluvionnaires (Kuss 1900b), les canaux et tunnels de dérivation des pieds de glissement (Mougin 1900), des barrages de consolidation de pieds de glissement et de falaises (Kuss 1900a). Certains couloirs d'avalanche pouvant être sources de matériaux (figure I.2, p. 7) ont également été traités par la réalisation de murs de soutènement en pierres sèches ou de banquettes dans les zones de départ.

Durant cette période, les nombreux travaux de protection torrentielle réalisés dans les domaines acquis par l'Etat ont pu se distinguer entre ceux forestiers, de correction (en génie civil et rustiques), auxiliaires (pistes, sentiers, etc.) et les études (École Forestière 1911b). La figure 1, à travers le critère de leur coût et selon les données collectées, synthétise leur répartition, en forêts domaniales RTM, durant cette période (1860-1909). Les ouvrages de correction ont été la priorité dans les Alpes du Nord. Dans les Cévennes, les travaux de reboisement extensif ont été privilégiés. Les travaux de correction et forestiers étaient plus équitablement répartis dans les Alpes du Sud et les Pyrénées.

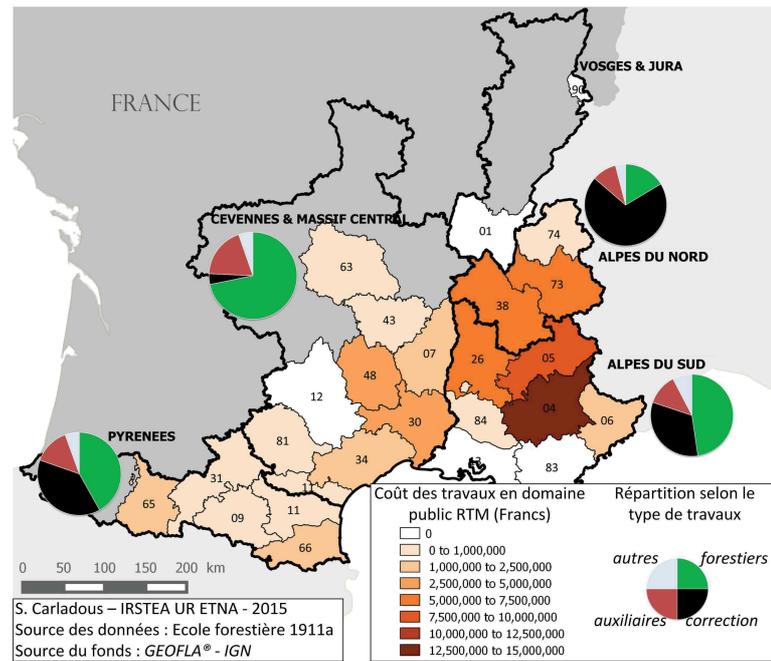


FIGURE 1 – Répartition géographique des coûts des travaux menés en forêts domaniales RTM dans 25 départements, entre 1860 et 1909.

- De nouvelles techniques de protection, après la 2^{nde} Guerre Mondiale

Après la 2^{nde} Guerre Mondiale, la population rurale qui réalisait les travaux au début du XX^{ème} siècle a quitté les zones de montagne (Van Effenterre 1982). Les conditions très difficiles de construction, qui étaient acceptées, ne le sont plus. La diversification des techniques de construction et la mécanisation des travaux a alors accompagné le développement de nouvelles mesures de protection. Dès les années 40, les fondations en béton ont protégé celles des ouvrages poids en pierres sèches et maçonneries de leur affouillement. À partir des années 50, les calculs de béton armé ont permis la conception des premiers ouvrages autostables (figure I.17, p. 22) (Poncet 1995) sur la base d'hypothèses conservatives. Les nouvelles normes sur les constructions en béton et le retour d'expérience sur une pratique de plus de 30 ans ont aidé le développement de nouvelles règles de construction des barrages de protection torrentielle en France (Deymier et al. 1995).

En parallèle, de nouvelles solutions techniques ont été développées avec des barrages « ouverts ». Après les premiers tests dans les années 50-60 (Ferro 2013), leur nombre a explosé dans les années 70-80 (Deymier et al. 1995 ; Poncet 1995). Situés près de l'apex des cônes, leur construction est moins chère que celle des dispositifs de stabilisation actifs et ont un effet perceptible au cours d'un événement, à proximité des enjeux. Ils ont alors été privilégiés dans les zones où les enjeux étaient importants. En France, les plages de dépôts ont pour fonction de stocker temporairement les sédiments transportés au cours d'un événement. Dans d'autres pays, d'autres fonctions leur sont attribuées comme celles de tri des matériaux et bois flottants, de réduction du débit solide et de réduction de l'énergie d'une lave (Piton et Recking 2016a,b).

Des dispositifs passifs de chenalisation et d'endigements ont également été construits sur les cônes de déjection pour limiter la divagation du torrent et permettre leur urbanisation. Cependant, des exemples montrent qu'ils peuvent avoir des conséquences dommageables s'ils sont construits avec une hauteur trop élevée sur le profil en long du torrent, juste à l'amont de l'apex du cône, et sans aucune protection aval (Piton et al. 2016).

• Synthèse : des fonctions différentes de protection torrentielle réparties sur le territoire

Les techniques de protection torrentielle ont évolué dans le temps avec celles des connaissances scientifiques, des contraintes techniques et de main d'œuvre disponibles.

Les figures 1, 2 et I.21 (p. 29) présentent l'évolution dans le temps (1860-1909, 1865, 2014) et la répartition dans l'espace (échelles des massifs et départements) du parc d'ouvrages à gérer en forêts domaniales RTM. Dans le domaine public RTM, plus de 100 000 ouvrages de correction, 28 km de canaux et tunnels (exclusivement dans les Alpes du Nord), 663 km de drains et 68 km de structures de protection contre les avalanches (principalement dans les Alpes) étaient construits en 1965 (Messines du Sourbier 1964).

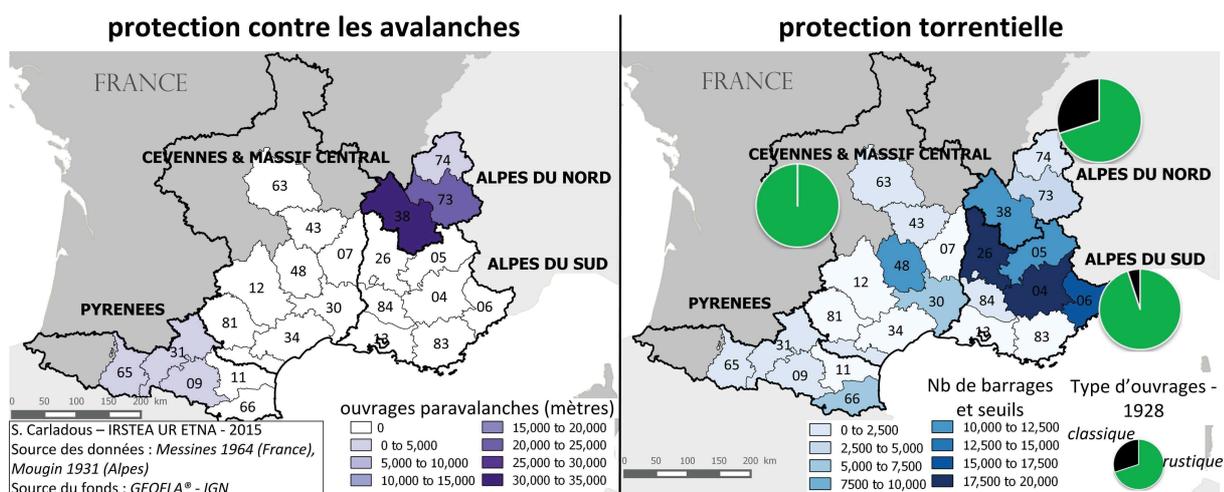


FIGURE 2 – Répartition spatiale des ouvrages de protection paravalanches et torrentielle gérés en forêts domaniales RTM dans 25 départements, en 1964.

B.2.2. Des objectifs de protection nationaux évolutifs

Cette section a fait l'objet de la publication de Carladous et al. (2016b) qui se focalise sur l'analyse des bases de données pour une représentation spatiale.

B.2.2.1. L'évolution du risque naturel dans les zones de montagne en France

Les mesures de protection ont pour objectif de réduire le risque. De fait, comme schématisé sur la figure 3, l'analyse de l'évolution des objectifs nécessite d'analyser celle des composantes du risque que sont l'aléa et les dommages potentiels .

• Évolution des dommages potentiels

En France, le pic de population dans les zones de montagne a été atteint au cours du XIX^{ème} siècle. La première révolution industrielle a conduit à l'implantation d'industries en fond de vallées, près des rivières et des torrents. Dans la continuité, les réseaux routiers et ferrés ont été développés le long des rivières principales, en traversant de nombreux torrents (Kalaora et Savoie 1986).

Des années 1880 au début du XX^{ème} siècle, la seconde révolution industrielle s'est caractérisée par l'utilisation de nouvelles sources d'énergie comme l'électricité, le gaz et le pétrole. Les réseaux de transport d'énergie, de production hydroélectrique et les nouvelles routes et voies ferrées ont

alors été fortement développés dans les vallées de montagne. Par contre, les industries restaient localisées dans les vallées de plaine. La dépopulation rurale a alors commencé à partir de la crise agricole des années 1880 (Kalaora et Savoye 1986).

La 1^{ère} Guerre Mondiale a accéléré cette tendance et a provoqué l'exode rural (de Crécy 1983) qui s'est poursuivi après la 2^{nde} Guerre Mondiale (Van Effenterre 1982). A l'échelle locale du bassin d'enjeux, la pression agricole sur l'utilisation des sols a ainsi diminué. Cela a permis la revégétalisation naturelle des versants de montagne et a conduit à une diminution des surfaces cultivées près des torrents. À l'inverse, à l'échelle régionale, la population et les industries ont continué de s'implanter le long des rivières de plaine.

À partir des années 60, la population exposée aux risques en montagne a fortement changé. Le « Plan Neige » national a démarré en 1964 pour promouvoir le développement massif du tourisme hivernal. En même temps, la population agricole traditionnelle partait, provoquant une chute brutale de la démographie dans certaines vallées comme dans les pré-Alpes du Sud (Liébault et Taillefumier 2000). Dans d'autres vallées, comme celles des Alpes du Nord, le tourisme hivernal, mais aussi estival, a permis le développement économique et de l'urbanisation. De nouvelles populations, y compris retraitées, sont ainsi venues vivre en zone péri-urbaine (Flez et Lahousse 2014). Leur conscience du risque étant plus limitée que celle des populations traditionnelles, des habitations et des industries ont été construites sur les cônes de déjection des torrents (Flez et Lahousse 2014 ; ONF-RTM 38 2014). Combiné avec une plus grande vulnérabilité de ces nouvelles populations, ceci a conduit à l'augmentation du taux d'endommagement potentiel dans de nombreuses vallées de montagne (Brugnot et Cassayre 2002). Les coupures de réseaux de transport sont devenues de plus en plus dommageables avec l'augmentation des déplacements des populations touristiques mais aussi péri-urbaines vers les villes (PARN 2011).

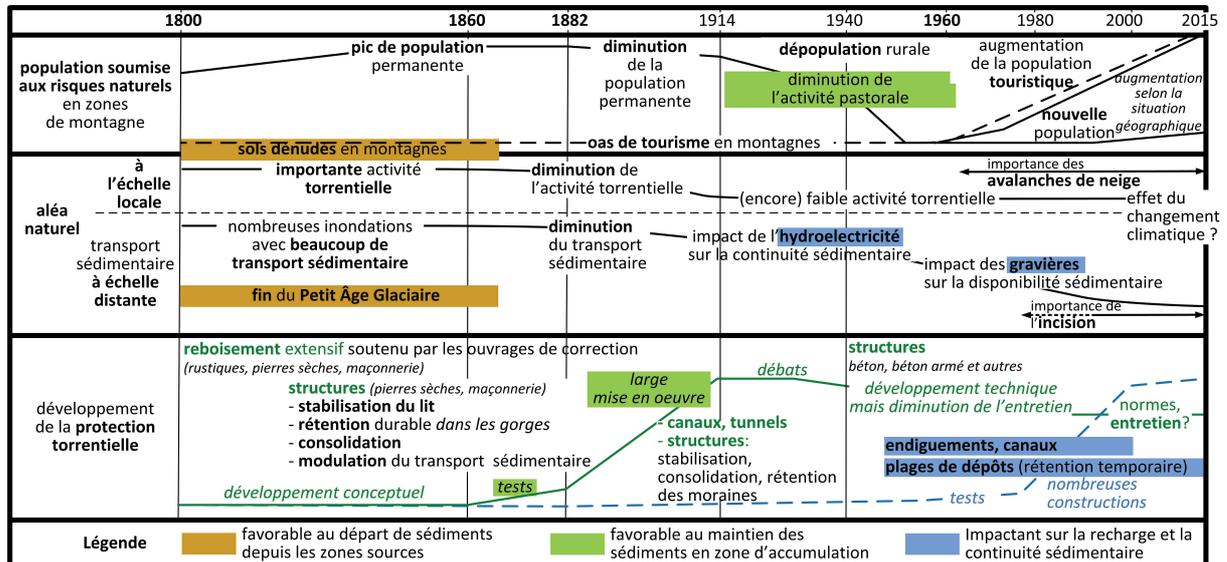


FIGURE 3 – Évolution du risque torrentiel et des techniques de protection en zones de montagne.

• Évolution de l'aléa naturel

Le début du XIX^{ème} siècle correspond à la fin du « Petit Âge Glaciaire », période accompagnée d'une forte activité sédimentaire et hydrologique (Comiti 2012). L'augmentation du niveau du lit des rivières et leur divagation ont été observées (Gras 1857), avec des lits actifs plus larges

qu'aujourd'hui. Les inondations provoquaient alors régulièrement des dommages sur les enjeux trop proches (Valles 1857).

Les forêts françaises étaient intensivement exploitées pour produire du bois d'œuvre (habitations, marine, et mines) et du bois de chauffage pour un usage local. Sur les versants, les terres étaient dédiées à l'agriculture sous forme de pastoralisme ou de cultures de subsistance locale, provoquant leur déboisement. Les sols étaient alors dénudés et plus sensibles à l'érosion (Kalaora et Savoye 1986). Finalement, l'aléa torrentiel était lié à un excès de production sédimentaire ce qui a provoqué l'intérêt scientifique de l'époque dans ce domaine.

L'effet du « Petit Âge Glaciaire » a ensuite diminué à partir de la deuxième partie du XIX^{ème} siècle (Liébault et al. 2005). L'activité torrentielle naturelle a chuté de manière générale dans les différentes zones de montagne. La revégétalisation et le reboisement ont également permis de diminuer la production sédimentaire depuis les versants. Le transfert sédimentaire vers les rivières de plaine aval a alors diminué.

Au cours du XX^{ème} siècle, le développement de l'hydroélectricité a été permis grâce à la création de barrages en travers des rivières mais aussi de dérivation dans les torrents et rivières torrentielles. Ils ont inévitablement stocké des matériaux transitant dans ces cours d'eau.

En parallèle, l'activité pastorale a fortement diminué dans les versants de montagne avec la dépopulation rurale, favorisant la revégétalisation naturelle.

Les gravières ont commencé à prélever des matériaux dans les cours d'eau à partir des années 50 pour soutenir le développement des constructions en béton et des réseaux routiers. Leur nombre a explosé pendant les années 70-80 (Bravard et al. 1997).

Dans le même temps, des protections de berges et des endiguements ont été construits sur les cônes de déjection pour protéger les nouvelles habitations, provoquant une diminution de la recharge sédimentaire par des apports latéraux.

En conséquence de ces modifications naturelles et humaines, la pression sur la production et la continuité sédimentaire a explosé durant le XX^{ème} siècle (Liébault et al. 2005). À l'échelle locale du bassin d'enjeux, des dommages liés aux incisions du lit sont apparus par endroit, les crues torrentielles, dont les laves torrentielles, étant toujours dangereuses pour les éléments exposés près des torrents.

À partir des années 60 et le développement du tourisme hivernal, les avalanches de neige sont devenues un phénomène naturel majeur à prendre en compte dans la gestion du risque en montagne (Brugnot et Cassayre 2002 ; de Crécy 1983). De nos jours, l'impact du changement climatique sur les aléas naturels en montagne (avalanche, torrents, glissements, etc.) est un problème majeur dans leur compréhension et leur analyse.

B.2.2.2. L'évolution réglementaire accompagne l'évolution des objectifs techniques

Les objectifs de protection ont évolué avec le risque faisant évoluer les textes réglementaires pour appuyer l'aménagement du territoire en montagne (figure III.19).

- **Du XIX^{ème} siècle aux années 60 : des lois RTM en évolution avec le risque en montagne**

Au début du XIX^{ème} siècle, les aléas et les dommages potentiels sont importants entraînant un niveau de risque élevé. Dans ce contexte, le lobbying des « Forestiers » promouvait le reboisement extensif de l'ensemble des massifs en France (Surell 1841). Un premier objectif local était de protéger les enjeux situés dans les vallées de montagne. Un autre, à une échelle qu'on définit comme régionale, était de réduire les dommages le long des rivières de plaine (Kalaora et Savoye 1986). Après les inondations majeures des années 1840 et 1850, l'Empereur Napoléon III a décidé que le reboisement des montagnes était une des mesures administratives majeures pour assurer la prospérité publique sur le territoire national (Bravard 2002).

Les deux lois consécutives de 1860 et 1864 (Empereur Napoléon III 1860, 1864) avaient alors des objectifs extensifs. Elles définissaient les moyens pour consolider des terrains en montagne. Trop ambitieuses et conflictuelles avec les intérêts du pastoralisme encore présent, leur application a été limitée aux massifs du Massif Central et des Alpes du Sud (École Forestière 1911b).

La loi de 1882 les a abrogées et remplacées (MAD 1882). Les travaux de restauration étaient déclarés d'intérêt public par voie législative sur un territoire géographique appelé « périmètre de restauration », qu'on appellera ensuite périmètres RTM. Les sols y étaient particulièrement dégradés et des travaux rendus obligatoires. Contrairement aux deux premières lois, elle n'imposait pas les moyens techniques. En-dehors des périmètres RTM, les collectivités locales et les particuliers pouvaient être financés pour réaliser des travaux facultatifs de restauration des sols et d'améliorations pastorales. Dans les zones où la dégradation des sols n'était pas visible mais attendue du fait des conditions géologiques et topographiques locales, des mesures de conservation des sols et des pâturages étaient décrétées pour 10 ans.

Dès le début du XX^{ème} siècle, l'aléa et les enjeux diminuaient en zone de montagne. L'action publique en application des lois RTM a alors été débattue.

Tout d'abord, au sein de l'Administration des Eaux et Forêts, on considérait que l'objectif de reboisement pouvait être atteint par une approche sociale (l'objectif principal était de limiter la dépopulation rurale) ou autoritaire (l'objectif prioritaire était de reboiser pour protéger) (Kalaora et Savoye 1986). Le bilan de l'activité RTM par l'École Forestière (1911a,b,c) a alors été commandité. La loi du 16/08/1913 amendait une première fois celle de 1882 en étendant l'emprise des périmètres RTM à la restauration et la conservation des sols mais aussi à la régulation du régime des eaux (MA 1913). Ceci était d'ailleurs appliqué par endroits, comme montré par l'exemple du reboisement extensif du Mont Aigoual dans les Cévennes (Fesquet 1997).

Ensuite, le point de vue du début du XIX^{ème} siècle selon lequel la déforestation des versants de montagne était d'origine anthropique était discuté dans la « Revue de Géographie Alpine » par le géographe Lenoble (1923). L'ingénieur forestier Mougins (1931) y répondait en détail pour le massif des Alpes. Ce débat est révélateur de la remise en cause de la protection par la puissance publique, dans un contexte où le risque diminuait. L'opposition locale étant par contre moins forte, la loi du 06/01/1933 (MA 1933) amendait une seconde fois celle de 1882 en permettant la création d'un périmètre RTM par simple décret.

- **Des actions représentatives des différents objectifs de protection répartis sur le territoire**

Quatre types d'actions ont été menées pour appliquer ces lois RTM.

La première, très limitée aujourd'hui, était la constitution des dossiers de déclaration d'utilité publique des périmètres RTM et l'acquisition des terrains par l'Etat. En 1964, 131 périmètres

étaient créés, le dernier datant de 1947 dans les Pyrénées-Orientales (66), pour environ 522 000 ha répartis dans 25 départements de montagne. Les 380 000 ha acquis en 1964 (figure 4), correspondent à peu de chose près à la surface actuelle. Plus de la moitié de cette surface était déjà acquise en 1909 (figure 5). Elle était très limitée (environ 13 000 ha) dans les Vosges, le Jura et le Massif Central. Pour 140 800 ha des 8 départements de la région méditerranéenne, l'érosion était considérée comme fortement réduite par rapport à l'état en 1860. Pour 226 500 ha des 10 départements des Alpes et des Pyrénées, les phénomènes naturels étaient encore actifs (Messines du Sourbier 1970). Dans les Alpes du Nord et les Pyrénées, la surface acquise a été limitée du fait, respectivement, du poids économique de l'élevage bovin pour l'industrie laitière locale et d'un contexte social en opposition au contrôle des terrains par l'Etat (Fesquet 1997).

La seconde a consisté à réaliser les nouveaux travaux obligatoires dans les périmètres RTM (figure 1). Leur répartition géographique est illustrée par la comparaison des Figures 1, 2 et I.21 (p. 29).

La troisième, action principale actuelle, consiste dans l'entretien de la forêt et des structures de génie civil. Dans l'Administration des Eaux et Forêts, les services classiques géraient la forêt tandis que des services, dits « spéciaux », s'occupaient des structures (Messines du Sourbier 1970).

La quatrième est le financement des travaux facultatifs en-dehors des périmètres publics. Ils ont été réalisés dans 35 départements. En 1909, parmi 247 000 ha de surfaces reboisées artificiellement, 40% l'avaient été par les collectivités locales et les particuliers, ces dernières représentant 50% dans le Massif Central et seulement 25% dans les Alpes. Les travaux d'améliorations pastorales ont été privilégiés dans les Pyrénées (09, 31) et en Savoie (73).

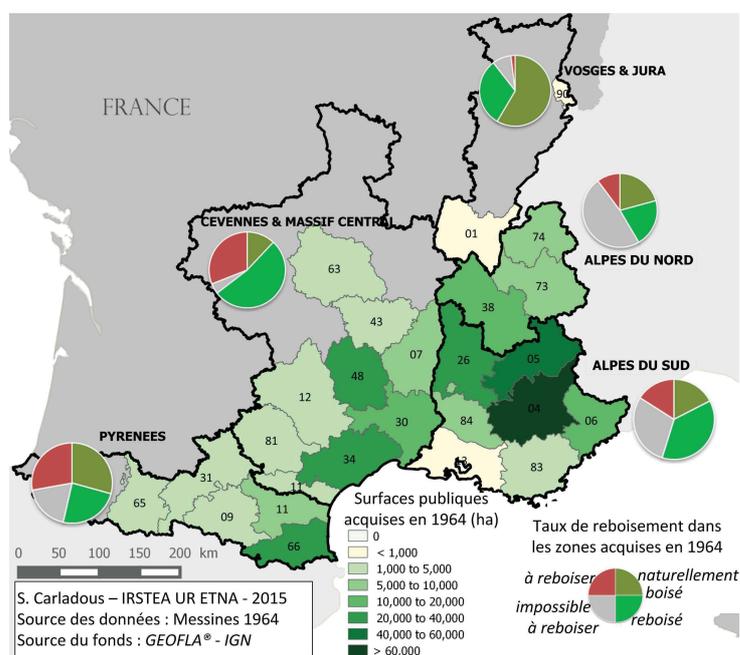


FIGURE 4 – Répartition géographique des surfaces de forêts domaniales RTM en 1965, dans 25 départements.

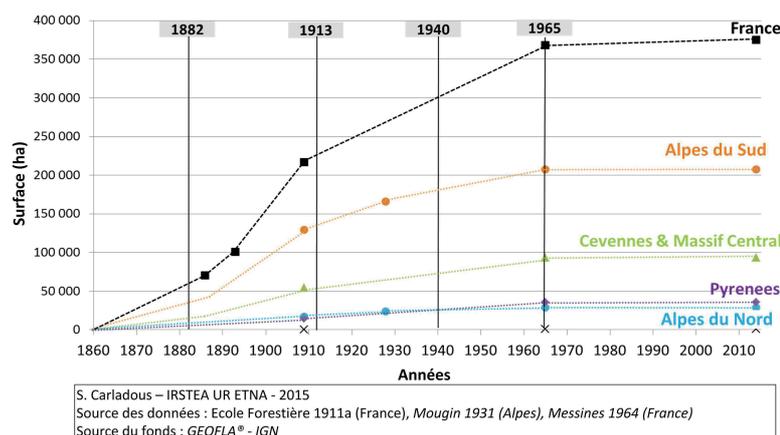


FIGURE 5 – Évolution des surfaces acquises en application des lois RTM en France

- Depuis les années 60 : de la politique de prévention à la sécurité des populations

Le décret du 30/11/1961 intègre pour la première fois le conditionnement des nouvelles constructions à la prise en compte des risques naturels (JORF 1961). Les premières cartes d'aléas naturels ont alors été établies en Isère entre 1967 et 1973 (Besson 1985). À la suite des événements de Val d'Isère et du Plateau d'Assy en 1970 ayant fait 111 morts, les plans de zonage des risques naturels (PZRN) ont été créés en 1971 pour être intégrés aux plans de gestion de l'urbanisme. Dans la continuité du décret de 1961, les articles R111-2 et R111-3 ont été introduit au Code de l'Urbanisme dans les années 70 : en absence d'un plan de gestion de l'urbanisme, les projets de construction doivent tenir compte de la connaissance sur les aléas naturels.

Avec l'augmentation du risque sur les cônes de déjection, les ouvrages de protection passives, généralement construits par les collectivités locales, se sont multipliés. La gestion du risque d'avalanche étant un nouvel enjeu, les travaux obligatoires et facultatifs en application des lois RTM ont été développés pour protéger contre ce phénomène (MI et MA 1979). En conséquence, pendant cette période (années 60-80), les travaux d'entretien des ouvrages actifs de protection torrentielle existants ont été négligés (Messines du Sourbier 1970) et les premiers besoins de définition de priorités d'actions en application des lois RTM sont apparus (Commandeur 1979).

La politique nationale de prévention des risques a ensuite évolué dans les années 80 impactant celle de gestion des mesures de protection. Les PZRN évoluent avec la création des plans d'exposition aux risques (PER) par la loi du 13/07/1982 (JORF 1982) puis celle des plans de prévention contre les risques naturels (PPRn) par la loi du 02/02/1995 (JORF 1995). Dans le même temps, le nouveau système d'assurance national contre les catastrophes naturelles est créé par la loi de 1982 pour compenser les pertes individuelles après un événement catastrophique. Selon la loi montagne du 09/01/1985 (JORF 1985), les aléas de montagne doivent être spécifiquement intégrés à n'importe quel projet d'urbanisme. Finalement, le fonds de prévention contre les risques naturels est créé par la loi de 1995.

Dès les années 60, l'environnement est devenu un enjeu d'importance pour la société civile, comme en attestent les lois sur l'Eau des 16/12/1964, 04/01/1992 et 30/12/2006. La dernière est la transposition de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau du 23/10/2000 qui a, pour la première fois, intégré la problématique de la continuité sédimentaire (Brochot et al. 2003) et celle de l'amélioration de l'habitat pour la faune (Braud et Alber 2013).

Depuis les années 80, les actions RTM se sont recentrées sur l'objectif de la réduction du risque à l'échelle locale (Brugnot et Cassayre 2002). Des études ont été menées pour définir les priorités d'actions comme les premières analyse coûts bénéfiques (ACB) testées, sans succès (p. 30). Les bénéfices locaux attendus par le rôle de protection de la forêt ont été étudiés lors de l'enquête de Sonnier (1991).

En conséquence de cette gestion locale des mesures de protection, deux nouvelles lois ont amendé la loi RTM de 1882. La loi montagne de 1985 permet aux collectivités locales de déclarer des périmètres RTM. La loi du 09/07/2001 permet de financer des travaux facultatifs de protection passive (JORF 2001).

Depuis 2007, la réglementation a évolué pour prendre en compte la sécurité, l'efficacité et la sûreté de fonctionnement des mesures de protection dans leur protocole de gestion.

D'un côté, selon les lois du 27/01/2014 et du 07/08/2015, les collectivités locales peuvent devenir la structure gestionnaire des mesures protection passive, quel que soit leur propriétaire. D'un autre côté, les mesures de protection active en forêts domaniales RTM sont toujours gérées sous la responsabilité du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF).

L'effet sur la continuité sédimentaire et les risques d'incision sont devenus un enjeu important à l'échelle régionale. Selon le décret du 11/12/2007, les mesures de protection passives doivent faire l'objet d'une étude de danger et, selon le décret du 12/05/2015, mises en conformité si nécessaire. Si elles ne sont pas obligatoires pour les mesures de protection active, elles ont initié la question de l'évaluation de leur efficacité. Une mise à niveau de l'étude de 1991 sur le rôle de protection de la forêt a par ailleurs été engagée depuis 2012. L'ensemble de ces évolutions montrent une tendance pour quantifier une évaluation du risque pour une protection locale en tenant compte des effets à l'échelle régionale et des défaillances potentielles.

B.2.3. D'une structure de gestion unique à une décision partitionnée

Cette section a fait l'objet de la publication de Carlados et al. (2016a) qui introduit l'analyse des textes règlementaires et de la structure de gestion aux éléments précédemment décrits.

Les lois RTM ont été les seules à régir l'aménagement du territoire en montagne jusque dans les années 60. L'unique Administration des Eaux et Forêts était chargée de les appliquer à travers les quatre types d'actions définis précédemment.

L'organisation a ensuite évolué pour permettre l'appui à l'évolution des politiques publiques, déclinées spécifiquement pour les territoires de montagne (figure 6).

La loi du 23/12/1964 a créé l'Office National des Forêts (ONF), le séparant de l'administration du ministère de l'agriculture. Elle est chargée de l'application du régime forestier dans les forêts publiques. Après une période d'ajustement et de réduction des personnels affectés aux actions RTM, le service ONF/RTM a été créé en 1971 (MA 1971). Depuis, une nouvelle organisation publique permet de mettre en œuvre les quatre types d'actions en application des lois RTM :

1. ONF : gestion des forêts existantes en tenant compte de leur rôle de protection ; suivi de l'activité des phénomènes naturels dans les 15 départements où des périmètres RTM ont été créés (figure 4) mais sans service ONF/RTM implanté (figure I.1, p. 6).
2. Directions départementales de l'agriculture et de la forêt (DDAF) : subvention des travaux d'amélioration pastorale et représentant local du MAAF pour la maîtrise d'ouvrage des travaux obligatoires et facultatifs ;
3. ONF/RTM : interlocuteur technique des DDAF dans les 10 départements où un service

est présent ; suivi de l'activité des phénomènes naturels ; inspection, entretien, conception et suivi de la construction des structures en génie civil ; appui technique à la politique de prévention des risques en zones de montagne et pour la construction d'ouvrages de protection passive par les collectivités publiques.

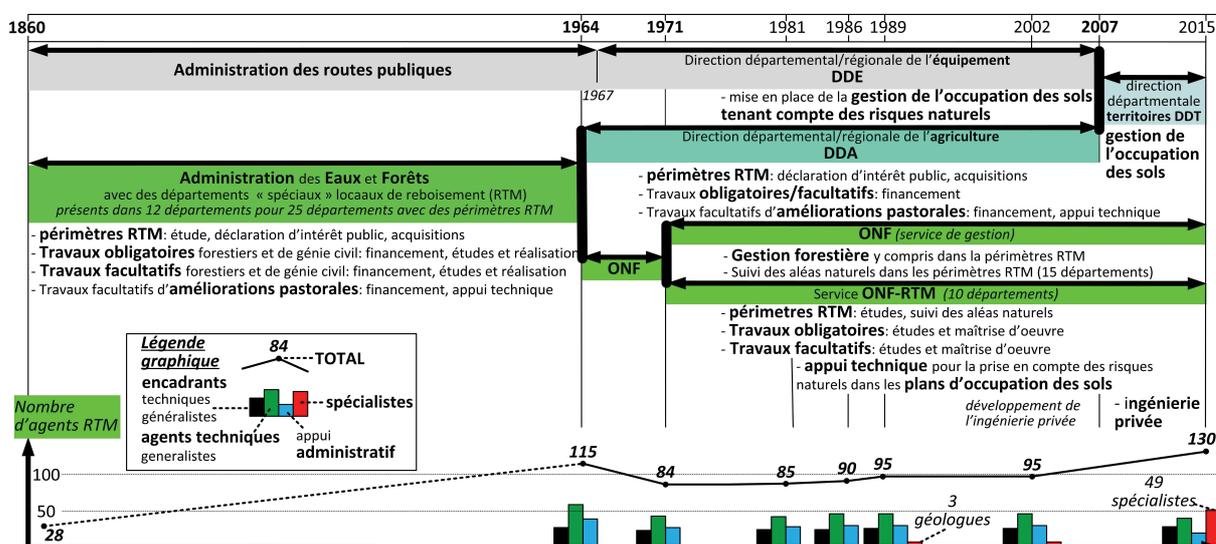


FIGURE 6 – Évolution de l'organisation de la gestion des risques naturels en montagne.

Les besoins associés au développement des politiques publiques pour la prévention des risques localisés, la prise en compte de l'environnement et celle de l'effet à une échelle régionalisée se sont traduits par des besoins de spécialisation des services de l'ONF/RTM (figure 6).

En outre, les mesures de protection mises en œuvre par les collectivités locales font partie intégrante de la protection contre les risques naturels dans un bassin d'enjeux. Développées depuis les années 70, leur conception peut s'appuyer sur l'ingénierie des services de l'ONF/RTM mais également sur celle d'experts et bureaux d'études privés.

Le système global de protection dans un bassin d'enjeux peut donc être constitué de dispositifs de protection active gérés par l'ONF/RTM pour le compte du MAAF et de dispositifs de protection passive dont la gestion est à la charge des collectivités publiques, appuyées par des experts publics ou privés. Pour protéger des mêmes enjeux, le rôle de décideur a donc évolué pour être, aujourd'hui, partagé entre plusieurs structures.

Concernant la protection torrentielle, les ouvrages de correction rustiques ont été réalisés pour soutenir le reboisement (figures 1 - 2). Dans le massif des Cévennes et du Massif Central, ils ont été peu nombreux et le reboisement a pu être réalisé sans leur appui. Dans les Alpes du Sud, ils ont été privilégiés et nécessaires en plus grand nombre pour appuyer les travaux forestiers. Dans les Alpes du Nord, la correction a été privilégiée aux travaux forestiers avec une part plus importante des gros ouvrages en maçonnerie que dans les autres massifs.

Les ouvrages rustiques construits avant la 1^{ère} Guerre Mondiale n'ont pas été entretenus ensuite, comme prévu par Demontzey (1882). Après 1965, le nombre d'ouvrages enregistrés a fortement diminué (Annexe A), ne retenant que les structures de génie civil de taille suffisamment importante et encore en état (barrages et seuils). Les quelques ouvrages rustiques de Cévennes et du Massif Central ne sont plus suivis. Les ouvrages sont majoritairement de taille inférieure à 2 m de haut avec une part plus importante des gros ouvrages dans les Alpes du Nord.

Annexe C : Comparaison des indicateurs d'efficacité des ouvrages de stabilisation (France et Autriche)

Le tableau 1 détaille les indicateurs pris en compte pour évaluer l'efficacité des ouvrages de stabilisation torrentielle, en pierres maçonnées, pierres sèches et béton, qui constituent la majorité des ouvrages en forêts domaniales RTM en France. En Autriche, les indicateurs sont identifiés selon leur apport à l'évaluation de la sécurité structurale, de l'aptitude au service et de la durabilité (Suda 2013). Ce tableau divise la première en stabilité externe et interne aux ELU et la seconde en stabilité aux ELS et en aptitude fonctionnelle.

ANNEXE C

	Indicateurs	RTM 1	Autriche						
			2	3	4	5	6	7	
Dégradations fonctionnelles	Section d'écoulement réduite		X						
	Dimensionnement hydrologique et hydraulique		X						
	Obstruction, embâcles		X						
	Recouvrement non prévu de l'ouvrage		X						
	Absence non prévue de dépôt à l'amont de l'ouvrage		X						
Dégradations structurales générales	Affouillement régressif de la fondation par le lit	X		X					
	Réduction de la résistance latérale	X		X					
	Affouillement / contournement latéral			X	X				
	Infiltrations amont sous fondation			X	X				
	Mouvements de pente inattendus dans les sens transversaux et/ou longitudinaux de l'ouvrage	X		X					
	Mouvement général de l'ouvrage			X					
	Intervention anthropique/vandalisme				X				
	Érosion / abrasion de certains composants	X						X	
Dégradations spécifiques aux ouvrages maçonnerie / pierres sèches	Perte de résistance mécanique de certains composants	X						X	
	Composants manquants		X		X			X	
	Érosion / écaillage / perte de pierres / perte de parties de mur entières					X		X	
	Humidification / percolation	X						X	
	Déformation /fissures /ruptures					X			
Dégradations spécifiques aux ouvrages béton	Joints de maçonnerie endommagés					X		X	
	Présence de végétation et profondeur des racines					X	X	X	
	Érosion, écaillage après construction					X	X	X	
	Érosion, écaillage au cours du fonctionnement de l'ouvrage					X	X	X	
	Humidification / percolation							X	
	Fissures dues à des charges statiques non prévues	X				X		X	
	Fissures dues à des contraintes de traction interne					X		X	
	Fissures dues à des forces provenant d'efforts transmis par le sol					X		X	
	Fissures dues à des discontinuités dans les matériaux ou à des matériaux différents							X	
Fissures le long des barres en acier					X		X		
Fissures de propagation (réaction Alkali)					X		X		
Présence de végétation et profondeur des racines							X		

TABLE 1 – Indicateurs pris en compte pour l'évaluation de l'efficacité d'un ouvrage de stabilisation torrentielle en Autriche (Suda 2013), comparé avec la BD-RTM (DTRTM 2007). 1 = Convergence avec la BD-RTM; 2 = Aptitude fonctionnelle; 3 = Stabilité externe aux ELU; 4 = Stabilité externe aux ELS; 5 = Stabilité interne aux ELU; 6 = Stabilité interne aux ELS; 7 = Durabilité.

Annexe D : Composantes de la sûreté de fonctionnement

D.1. Probabilités des défaillances et des conséquences

Pour chacun des scénarios de défaillance, la probabilité de défaillance du système $P_f(t)$ dépend du temps t , selon une fonction croissante liée au vieillissement : plus le système vieillit, plus elle augmente. Selon le nœud papillon, $P_f(t)$ est définie pour l'événement redouté central. Elle peut être établie à partir des probabilités des événements initiateurs et permet d'identifier la probabilité de chaque conséquence.

Sur la base de données statistiques, des indicateurs (figure 1) peuvent aider à évaluer $P_f(t)$ (Mortureux 2001).

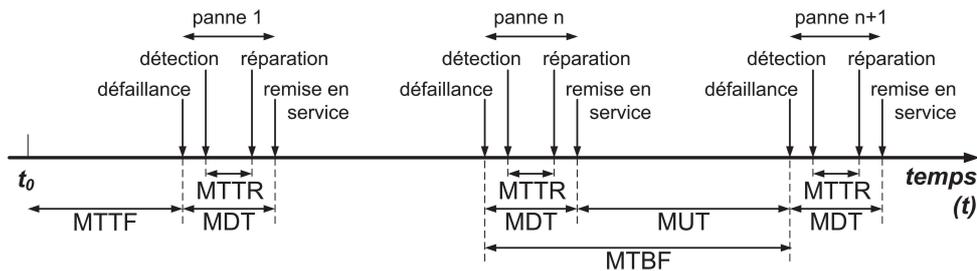


FIGURE 1 – Indicateurs de sûreté de fonctionnement, adapté de Mortureux (2001).

- Le taux de défaillance $\lambda(t)$ représente l'intensité de défaillance au cours du temps.
- Le temps moyen d'indisponibilité après défaillance (MDT) dépend du temps moyen entre deux défaillances consécutives (MTBF) et du temps moyen de fonctionnement entre la réparation et la défaillance suivante (MUT).
- Le temps moyen de réparation (MTTR) est celui entre la détection et la réparation. Il conditionne le temps MDT.

D.2. Évaluation dans la durée : fiabilité, maintenabilité, disponibilité

Soit t_0 le moment de mise en service du système, $\Delta t = [t_0, t]$ est un intervalle de temps de fonctionnement. La durée de l'intervalle $[t_0, t_f]$ est celle d'exploitation souhaitée. Pour ces périodes, des conditions d'utilisation normales sont établies, comme celles environnementales (type de sol, fréquence des cas de charges, etc.) pour un ouvrage de protection.

La *fiabilité*, notée $R(t)$, est la probabilité de non défaillance pendant Δt : $R(t) = 1 - P_f(t)$ (AFNOR 2003a). Elle est la capacité intrinsèque du système à assurer sa fonction pendant Δt (AFNOR 2001). Par extension, elle est évaluée par la part du temps où le système reste en service (Magne et Vasseur 2006). Les indicateurs de MTTF, de MUT et de MTBF sont utilisés pour l'évaluer (Mortureux 2001).

L'effet de la défaillance d'un composant pouvant être une cause de défaillance du système. L'*importance* des composants est la part qu'ils jouent dans la fiabilité du système (Birnbaum 1968), c'est à dire le rapport entre la probabilité de défaillance du composant et celle du système.

La *maintenabilité*, notée $M(t)$, est la probabilité que le système soit réparé pendant Δt . Elle dépend de l'aptitude au rétablissement après défaillance, évaluée par l'inverse de MDT (Mortureux 2001), et l'aptitude à être maintenu, évaluée par la durée pendant laquelle les actions de maintenance requises sont assurées par rapport à Δt (AFNOR 2001 ; Magne et Vasseur 2006).

La *disponibilité*, notée $A(t)$, est la probabilité que le système ne soit pas défaillant à l'instant t . Elle est évaluée à partir de $R(t)$ et de $M(t)$ (AFNOR 2001).

D.3. Analyse de la sécurité, en relation avec celle du risque résiduel

La *sécurité* est l'aptitude du système à ne pas produire de conséquences critiques pour lui-même et son environnement pendant Δt (Magne et Vasseur 2006). La probabilité des conséquences qui dépendent de $P_f(t)$ sont donc analysées ainsi que leur gravité.

Si la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité n'intègrent que les aspects structural et fonctionnel, la sécurité ajoute celui de la gravité des conséquences d'une défaillance.

Annexe E : Aide à la décision classique

E.1. La structure de préférences d'un décideur

E.1.1. Le formalisme de la structure de préférence

E.1.1.1. Relation binaire

Soit a et b deux éléments à comparer dans l'ensemble \mathcal{A} , la relation binaire notée T qui permet cette comparaison est définie par $(a, b) \in T$ ou aTb . Le complément de T est noté T^c , défini par $(a, b) \in T^c \Leftrightarrow (a, b) \notin T$.

Toute relation T est caractérisée par différentes propriétés (Teghem 2013) :

- relation fortement complète : aTb ou bTa $\forall a, b \in \mathcal{A}$
- réflexivité : aTa $\forall a \in \mathcal{A}$
- irreflexivité : $aT^c a$ $\forall a \in \mathcal{A}$
- symétrie : $aTb \Rightarrow bTa$ $\forall a, b \in \mathcal{A}$
- antisymétrie : $aTb, bTa \Rightarrow a = b$ $\forall a, b \in \mathcal{A}$
- asymétrie : $aTb, bT^c a$ $\forall a, b \in \mathcal{A}$
- transitivité : $aTb, bTa \Rightarrow aTc$ $\forall a, b, c \in \mathcal{A}$

La relation T permet de définir plusieurs relations d'ordre telles que (Vincke 1985) :

- T est un ordre total $\Leftrightarrow T$ est fortement complète, antisymétrique et transitive
 \Rightarrow tous les éléments de \mathcal{A} sont rangés, sans qu'il n'y ait d'ex aequo ;
- T est un préordre total $\Leftrightarrow T$ est fortement complète et transitive
 \Rightarrow tous les éléments de \mathcal{A} sont rangés, avec possibilité d'ex aequo ;
- T est un ordre partiel $\Leftrightarrow T$ est réflexive, antisymétrique et transitive
 \Rightarrow les éléments de certains sous-ensembles de \mathcal{A} sont rangés, sans ex aequo ;
- T est un préordre partiel $\Leftrightarrow T$ est réflexive et transitive
 \Rightarrow les éléments de certains sous-ensembles de \mathcal{A} sont rangés, avec des ex aequo.

E.1.1.2. La relation de préférence

La relation de préférence est une relation de préordre qui permet de formaliser l'utilité associée aux réactions d'un individu pour comparer a et b par trois relations différentes (Schärlig 1985) :

- l'indifférence aIb : le décideur est indifférent entre a et b (symétrique et réflexive) ;
- la préférence aPb : le décideur préfère a à b (asymétrique) ;
- l'incomparabilité aRb : le décideur ne peut pas comparer a et b (symétrique et irreflexive).

Une relation de préférence faible, notée Q , peut également être introduite, en complément de la relation de préférence stricte P . Comme cette dernière, Q est asymétrique.

La structure de préférences est spécifique à chaque décideur et est modélisée par le triplet $\{I, P, R\}$ ou le quadruplet $\{I, P, Q, R\}$.

E.1.2. La structure de préférences traditionnelle est un préordre total

E.1.2.1. Le formalisme de la structure de préférences traditionnelle

Etant données les propriétés respectives des relations I , P et R , faire l'hypothèse que la structure $\{I, P, R\}$ est un préordre total revient à considérer qu'il n'y a pas d'incomparabilité ($R = \emptyset$) et que I et P sont transitives. $\{I, P, R\}$ est un préordre total si et seulement si il existe une fonction (ou critère) $g : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ tel que l'équation (1) soit respectée. Un tel critère g , appelé « vrai critère », est la représentation traditionnellement utilisée, représentée sur la figure 2 (Vincke 1989).

$$\forall a, b \in \mathcal{A} \begin{cases} aPb & \Leftrightarrow g(a) > g(b) \\ aIb & \Leftrightarrow g(a) = g(b) \end{cases} \quad (1)$$

Ce terme de représentation traditionnelle renvoie aux problèmes de décision posés sous la forme de problèmes d'optimisation mono objectif dans la recherche opérationnelle (RO). Les problèmes d'optimisation sont multiples et peuvent être classés selon le domaine des variables (continues, entières), le type de fonction « objectif » (linéaire, quadratique, non linéaire), l'existence et le type de fonctions contraintes (linéaires, convexes) (Mimoux 1983). On distingue, entre autres, la programmation linéaire (programmation linéaire (PL)) en variables continues, en variables entières et les problèmes d'optimisation combinatoire pour des variables binaires (Teghem 2012). Pour trouver la solution optimale, de très nombreuses méthodes, et algorithmes associés, ont été développées dans le domaine de la RO depuis les années 1950 en commençant par l'algorithme du simplexe pour la PL en variables continues (Dantzig et al. 1955).

E.1.2.2. Fonction d'utilité : préordre total

Le paradoxe de l'eau et du diamant énoncé par Bernoulli (1738, 1954) a différencié pour la première fois valeur objective et valeur subjective. La valeur objective d'échange d'un bien renvoie au prix comme unité de valeur alors que sa valeur subjective d'usage renvoie à la valeur-utilité.

Sur ce principe, la théorie classique de la valeur-travail a d'abord été développée au cours du XIX^{ème} siècle (Marx 1919; Negishi 1989). La théorie néo-classique de la valeur-utilité a ensuite défini la valeur, quantifiée en monnaie, comme la mesure du consentement à payer d'un individu (Dupuit et De Bernardi 1933), correspondant à l'utilité marginale individuelle (Garrabé 1994).

La théorie microéconomique de la valeur a été développée entre la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle et le début du XX^{ème} siècle. D'un côté, la théorie classique de la valeur-travail, portée notamment par A. Smith (1723-1790), D. Ricardo (1772-1823), J. Stuart Mill (1806-1873) et finalement K. Marx (1818-1883), modélisait la valeur d'échange sur la base des coûts de production d'un bien (Marx 1919; Negishi 1989). D'un autre côté, la théorie néo-classique de la valeur-utilité, basée sur les travaux de D. Bernoulli (1700-1782) en 1738 et J. Dupuit (1804-1866) en 1853, définit la valeur, quantifiée en monnaie, comme la mesure du consentement à payer d'un individu (Dupuit et De Bernardi 1933), correspondant à l'utilité marginale individuelle (Garrabé 1994). Dès les années 1870, la théorie de l'équilibre général a ouvert la voie vers la recherche d'un « bien-être collectif » basé sur ce concept d'utilité (Negishi 1989).

La Révolution de l'utilité marginale a permis de développer non seulement la mesure du bien être individuel du consommateur sur une fonction d'utilité cardinale par laquelle chaque individu peut définir un niveau absolu d'utilité mais aussi une théorie de l'équilibre général ouvrant la voie vers la recherche d'un « bien-être collectif » (Negishi 1989). Cette révolution a été portée par C. Menger (1840-1921), W. S. Jevons (1835-1882) et L. Walras (1834-1910), même si certaines différences sont à noter dans leurs approches (Jaffé 2007), que nous ne détaillerons pas ici.

La fonction d'utilité $u : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ permet de comparer les alternatives de l'ensemble \mathcal{A} selon une échelle ordinale, c'est à dire où seul l'ordre compte. Elle a été conceptualisée selon l'hypothèse qu'un individu ne peut pas évaluer l'utilité de manière absolue mais qu'il est capable de hiérarchiser rationnellement ses préférences (Pareto 1896). L'utilité marginale, fonction dérivée de l'utilité totale, décroissante, correspond à la satisfaction que procure une variation de la quantité du bien consommée. Elle est établie à partir des courbes d'indifférences (ou d'iso-utilité) de Edgeworth (1881) qui respectent les propriétés de complétude et de transitivité. La fonction d'utilité est une relation de préordre total (Vincke 1982).

À partir des années 1930, les travaux d'axiomatisation ont conduit à la représentation mathématique par von Neumann et Morgenstern (1944) du comportement rationnel d'un décideur en univers risqué, justifiant l'existence d'une fonction d'utilité $g = u$. Pour représenter les différentes attitudes possibles, plusieurs formes de courbes d'utilité sont utilisées pour permettre de représenter la préférence du décideur selon le score du critère établi sur l'échelle X (figure 1) : une forme concave pour l'aversion au risque, droite pour la neutralité et convexe pour un comportement risqué (Arrow 1965 ; Pratt 1964). Sur cette base, il existe différentes méthodes d'élicitation de la fonction d'utilité d'un décideur (Mousseau 2009). Par exemples :

- les méthodes des loteries sont des séquences de question/réponse sur des choix binaires probabilisés : chaque réponse du décideur est un point de la fonction d'utilité ;
- les méthodes analytiques font l'hypothèse d'une forme paramétrée de la courbe d'utilité pour ensuite établir les valeurs des paramètres sur la base des réponses du décideur.

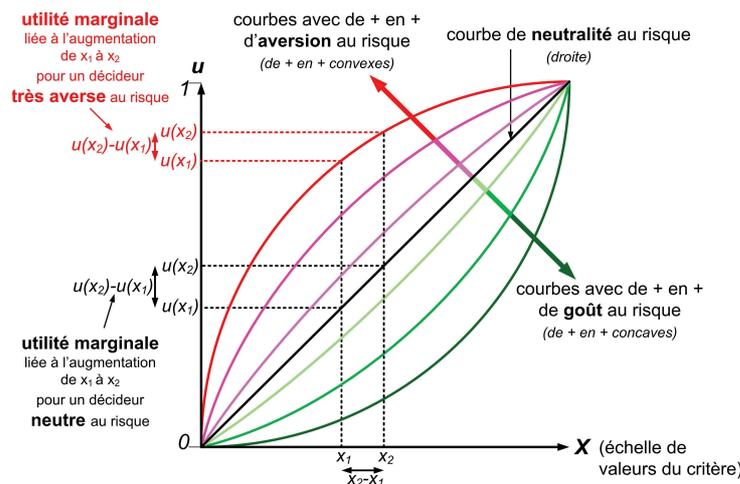


FIGURE 1 – La fonction d'utilité $g = u$ représente les préférences et l'attitude du décideur face au risque selon un préordre total.

E.1.2.3. Fonction de monétarisation : préordre total

La fonction de monétarisation $g : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{€}$ établit la valeur de la variable $a \in \mathcal{A}$ sur une échelle cardinale et continue monétaire. Elle peut être établie sur la base de nombreuses méthodes. Un marché lié au bien considéré aide à représenter directement les préférences : la valeur du bien, en tant que prix (ou coût), en est directement déduite. Il s'agit d'une relation de préordre total obtenue directement. En l'absence d'un tel marché, les préférences du décideur doivent être révélées. On peut distinguer (Grelot 2004) :

- les méthodes basées sur les coûts (coûts de remplacement, coûts évités, etc.) qui récoltent directement les données issues du marché réel ;
- les méthodes basées sur les préférences déclarées (évaluation contingente, etc.) qui s'appuient sur des enquêtes auprès des acteurs concernés par la décision et sur l'établissement d'un marché fictif dans lequel les individus peuvent révéler la valeur qu'ils accordent à un bien ;
- les méthodes basées sur les préférences révélées (coûts de transport, prix hédoniques, etc.) qui s'appuient sur l'observation des caractéristiques qui différencient les biens d'un marché existant pour établir le prix lié à ces caractéristiques.

E.1.3. Une autre structure de préférences : la relation de surclassement

Faire l'hypothèse que la structure $\{I, P, R\}$ est un préordre partiel permet d'envisager l'incomparabilité entre certains éléments de \mathcal{A} ($R \neq \emptyset$), en conservant néanmoins l'hypothèse de la transitivité de P et I . Faire l'hypothèse que $\{I, P, R\}$ est un quasi-ordre total permet de relaxer l'hypothèse de la transitivité de I mais impose $R = \emptyset$ (Vincke 1985).

Pour permettre à la fois $R \neq \emptyset$ et la non transitivité de I , Roy (1974) a introduit la relation de surclassement S , avec $aSb = a(PUQUI)b$, ou $aSb = a(PUI)b$ si $Q = \emptyset$ ($a(PUI)b \Leftrightarrow aPb$ ou $aIb, \forall a, b \in \mathcal{A}$). La décision finale s'exprime selon une structure de préférences globale $\{I, P, R\}$. Elle s'appuie sur des structures de préférence partielles $\{P_j, Q_j, I_j\}, j = 1, \dots, N$ pour chaque critère g_j . Une représentation en est donnée par la figure 2 pour un critère g_j donné.

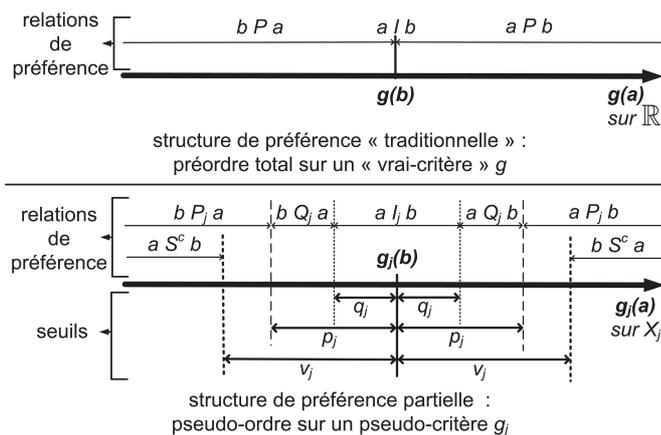


FIGURE 2 – De la structure de préférence traditionnelle à celle partielle pour chaque critère g_j .

Deux seuils d'indifférence q_j et de préférence p_j sont définis en respectant $p_j \geq q_j$: selon g_j , q_j est la plus grande valeur en-dessous de laquelle il y a indifférence et p_j est la plus petite valeur au-dessus de laquelle il y a préférence. La structure $\{P_j, Q_j, I_j\}$ est un pseudo-ordre, si et seulement

si le « pseudo-critère » g_j respecte l'équation (2). p_j et q_j sont des constantes (cf figure 2) ou des fonctions de X_j sur X_j , $p_j(\cdot)$ et $q_j(\cdot)$. Si $p_j(\cdot) = q_j(\cdot)$, g_j est un « quasi-critère » et la structure $\{P_j, I_j\}$ est un préordre partiel. Si $q_j(\cdot) = 0$, g_j est un « pré-critère » et la structure $\{P_j, Q_j, I_j\}$ est un préordre partiel orienté (Teghem 2013).

$$\forall a, b \in \mathcal{A} \begin{cases} aP_j b & \Leftrightarrow g_j(a) - g_j(b) > p_j(g_j(b)) \\ aQ_j b & \Leftrightarrow p_j(g_j(b)) \geq g_j(a) - g_j(b) \geq q_j(g_j(b)) \\ aI_j b & \Leftrightarrow q_j(g_j(b)) \geq g_j(a) - g_j(b) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Comme montré sur la figure 2 en faisant l'hypothèse que p_j et q_j sont des constantes, l'autre seuil de veto v_j est introduit tel que $v_j \geq p_j \geq q_j$. La relation globale aSb n'est alors vérifiée que si l'équation 3 l'est (Teghem 2013).

$$g_j(b) - g_j(a) \leq v_j, \forall a, b \in \mathcal{A} \text{ et } \forall j | bP_j a \quad (3)$$

E.2. Les méthodes d'optimisation multicritère

La *Théorie de l'utilité multi-attribut (théorie de l'utilité multi-attribut (Multi Attribute Utility Theory en anglais) (MAUT))* s'appuie sur l'agrégation, selon un modèle d'utilité, de N fonctions d'utilité individuelles $g_j = u_j$, pour représenter la structure de préférence globale du décideur (Keeney et Raiffa 1976). Une échelle de valeur X_j est établie pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, permettant d'établir une courbe d'utilité, pour chaque critère, sur le principe de la figure 1. Le modèle d'agrégation le plus utilisé est l'addition des N fonctions d'utilité. D'autres modèles, notamment ceux basés sur leur multiplication, peuvent être utilisés. Le problème multicritère est ainsi ramené à un problème d'optimisation monocritère. Les sous-ensembles de critères doivent être préférentiellement indépendants, ce qui est une condition très restrictive (Teghem 2013). Les critiques portent sur les difficultés d'application de cette méthode (Schärli 1985) et sur l'agrégation de fonctions d'utilité individuelles selon le théorème d'impossibilité d'Arrow (1951).

Pour l'*optimisation hiérarchique*, le décideur définit un ordre d'importance entre les N fonctions « objectif ». Les problèmes d'optimisation monocritère sont ensuite traités successivement.

Dans la *programmation par objectifs* (Charnes et al. 1955), un poids d'importance et un niveau de référence sont attribués à chaque fonction « objectif ». Pour chacune, les contraintes sont définies par des variables de déviations, représentant l'écart acceptable avec chaque référence. Leur somme pondérée est la fonction « objectif » à optimiser.

La *programmation multicritère en variables entières* optimise une fonction « objectif » globale, somme pondérée des fonctions individuelles. Une de ses limites est de fournir un ensemble de solutions efficaces limitées à celles « supportées ». Pour ces solutions, il existe un jeu de poids qui en font la solution optimale au problème. Les solutions efficaces non supportées, qui existent, ne sont donc pas considérées (Teghem 2013).

L'*optimisation combinatoire multicritère* est un outil puissant en développement actif. Elle aide à résoudre des problèmes à variable binaire et à structure particulière. Cependant, comme précédemment, seules les solutions efficaces supportées sont identifiées. Des contraintes additionnelles sont introduites pour traiter successivement chaque problème multicritère. Il peut y avoir rapidement des problèmes d'explosion calculatoire avec ce type de méthodes (Teghem 2013).

E.3. TOPSIS : une aide multicritère (AMC) pour un préordre total

La technique pour un ordonnancement par similitude avec la solution idéale (*technique for order preference by similarity to ideal solution* en anglais) (TOPSIS) est une méthode d'aide multicritère à la décision (AMC) qui peut être décomposée en cinq étapes selon Jahanshahloo et al. (2006). Elle permet d'obtenir la proximité relative de chaque alternative $A_i \in \mathcal{A}$ avec une solution idéalement la meilleure notée A^{best} . Une solution idéalement la pire, notée A^{worst} est également considérée dans le processus.

E.3.1. Les cinq étapes de la méthode TOPSIS

◇ *TOPSIS-1* : pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ et chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, la valeur x_{ij} est normalisée et pondérée par le poids ω_j du critère g_j selon l'équation (4) permettant d'obtenir v_{ij} .

$$v_{ij} \triangleq \omega_j \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M x_{ij}^2}} \quad (4)$$

◇ *TOPSIS-2* : A^{best} et A^{worst} sont identifiées par les vecteurs $A^{\text{best}} = \{v_1^+, \dots, v_j^+, \dots, v_N^+\}$ et $A^{\text{worst}} = \{v_1^-, \dots, v_j^-, \dots, v_N^-\}$. Notons J^+ l'ensemble des critères g_j « croissants », pour lesquels une augmentation de l'évaluation signifie celle de la préférence du décideur, et J^- l'ensemble des critères « décroissants », pour lesquels la plus grande préférence correspond à l'évaluation la plus petite. Pour chaque g_j , v_j^+ et v_j^- sont donnés par les équations (5-6).

$$v_j^+ \triangleq \begin{cases} \max_i v_{ij} & \text{si } g_j \in J^+ \\ \min_i v_{ij} & \text{si } g_j \in J^- \end{cases} \quad (5)$$

$$v_j^- \triangleq \begin{cases} \min_i v_{ij} & \text{si } g_j \in J^+ \\ \max_i v_{ij} & \text{si } g_j \in J^- \end{cases} \quad (6)$$

◇ *TOPSIS-3* : la distance euclidienne de dimension N de chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ avec A^{best} et A^{worst} est notée $d_i^{\text{best}} \in [0, 1]$ et $d_i^{\text{worst}} \in [0, 1]$ et calculée, respectivement, par les équations (7-8).

$$d_i^{\text{best}} \triangleq \left\{ \sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$d_i^{\text{worst}} \triangleq \left\{ \sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

◇ *TOPSIS-4* : pour chaque A_i , $i = 1, \dots, M$, la proximité relative avec la solution idéale A^{best} est notée $C(A_i, A^{\text{best}}) \in [0, 1]$ et calculée par l'équation (II.14).

$$C(A_i, A^{\text{best}}) \triangleq \frac{d_i^{\text{worst}}}{d_i^{\text{best}} + d_i^{\text{worst}}} \quad (9)$$

◇ *TOPSIS-5* : les M alternatives A_i sont classées dans l'ordre décroissant des valeurs de $C(A_i, A^{\text{best}})$. La meilleure solution A_{i^*} est définie par $i^* = \arg \max_i C(A_i, A^{\text{best}})$.

E.3.2. Exemple simplifié d'illustration de TOPSIS

Le problème de décision est formalisé par :

- deux alternatives à comparer : A_1 et A_2 ;
- trois critères de décision : g_1, g_2 et g_3 ;
- les trois échelles d'évaluation des critères, dans le sens de préférence croissant (plus l'évaluation de l'alternative est élevée pour le critère, plus elle est préférée) : $X_1 = [0, 10000]$, $X_2 = [0, 1]$, $X_3 = [1; 2; 3; 4; 5]$;
- le vecteur d'importance des trois critères : $\mathbf{w} = \{0.2, 0.5, 0.3\}$;
- la matrice de valeurs $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, $i = 1, 2$, $j = 1, 2, 3$ de l'équation 10.

$$\mathbf{S} = \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 10000 & 0.4 & 5 \\ 70000 & 0.4 & 2 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

◇ *TOPSIS-1* :

Avec un arrondi à la 6^{ème} décimale, la matrice des valeurs normalisées v_{ij} est donnée par :

$$\begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.028571 & 0.353553 & 0.278543 \\ 0.200000 & 0.353553 & 0.111417 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

◇ *TOPSIS-2* :

Les vecteurs des solutions idéalement la meilleure A^{best} et la pire A^{worst} sont donnés par :

- $A^{\text{best}} = \{0.2000000, 0.353553, 0.278543\}$
- $A^{\text{worst}} = \{0.028571, 0.353553, 0.111417\}$

◇ *TOPSIS-3* :

La matrice des valeurs des distances euclidiennes $d_i^{\text{best}} \in [0, 1]$ est donnée par :

$$\begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.029388 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.027931 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

On obtient $d_1^{\text{best}} = 0.171428$ (pour A_1) et $d_2^{\text{best}} = 0.167126$ (pour A_2).

La matrice des valeurs des distances euclidiennes $d_i^{\text{worst}} \in [0, 1]$ est donnée par :

$$\begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.027931 \\ 0.29388 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (13)$$

On obtient $d_1^{\text{worst}} = 0.167126$ (pour A_1) et $d_2^{\text{worst}} = 0.171428$ (pour A_2).

◇ *TOPSIS-4* :

La proximité relative est donnée par :

$$C(A_1, A^{\text{best}}) = 0.493646 \text{ (pour } A_1) \text{ et } C(A_2, A^{\text{best}}) = 0.506354 \text{ (pour } A_2).$$

◇ *TOPSIS-5* : Le classement des alternatives est $A_2 \succ A_1$ car $C(A_2, A^{\text{best}}) > C(A_1, A^{\text{best}})$.

La meilleure alternative est $A_{i^*} = A_2$.

E.4. Electre Tri (ET) : une AMC pour surclassement

Dezert et Tacnet (2012b) décrivent la méthode Electre Tri (ET) en reprenant Yu (1992) selon quatre étapes, nommées ET-1 à ET-4, pour une affectation finale de chaque A_i à une classe C_h ($A_i \rightarrow C_h$).

E.4.1. Les quatre étapes de la méthode Electre Tri

◇ *ET-1* : les indices de concordance et de discordance partielles selon g_j sont calculés par les équations (14-17).

$$c_j(A_i, b_h) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{si } x_{hj} - x_{ij} \geq p_j(b_h) \\ 1 & \text{si } x_{hj} - x_{ij} < q_j(b_h) \\ \frac{x_{ij} + p_j(b_h) - x_{hj}}{p_j(b_h) - q_j(b_h)} & \text{sinon} \end{cases} \quad c_j(b_h, A_i) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{si } x_{ij} - x_{hj} \geq p_j(b_h) \\ 1 & \text{si } x_{ij} - x_{hj} < q_j(b_h) \\ \frac{x_{hj} + p_j(b_h) - x_{ij}}{p_j(b_h) - q_j(b_h)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (14) \quad (15)$$

$$d_j(A_i, b_h) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{si } x_{hj} - x_{ij} < p_j(b_h) \\ 1 & \text{si } x_{hj} - x_{ij} \geq v_j(b_h) \\ \frac{x_{hj} - p_j(b_h) - x_{ij}}{v_j(b_h) - p_j(b_h)} & \text{sinon} \end{cases} \quad d_j(b_h, A_i) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{si } x_{ij} - x_{hj} \leq p_j(b_h) \\ 1 & \text{si } x_{ij} - x_{hj} > v_j(b_h) \\ \frac{x_{ij} - p_j(b_h) - x_{hj}}{v_j(b_h) - p_j(b_h)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (16) \quad (17)$$

◇ *ET-2* : les indices de concordance globale sont calculés par les équations (18-19).

$$c(A_i, b_h) \triangleq \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot c_j(A_i, b_h) \quad (18) \quad c(b_h, A_i) \triangleq \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot c_j(b_h, A_i) \quad (19)$$

Un facteur de réduction $\alpha(A_i, b_h)$ est donné par l'équation (22). Il dépend de l'ensemble \mathbf{V}_1 de l'équation (20) qui regroupe les indices $j \in \mathbf{J} = \{1, \dots, N\}$ pour lesquels $d_j(A_i, b_h) > c(A_i, b_h)$. De même, $\alpha(b_h, A_i)$ est défini par l'équation (23) selon \mathbf{V}_2 de l'équation (21).

$$\mathbf{V}_1 \triangleq \{j \in \mathbf{J} | d_j(A_i, b_h) > c(A_i, b_h)\} \quad (20) \quad \mathbf{V}_2 \triangleq \{j \in \mathbf{J} | d_j(b_h, A_i) > c(b_h, A_i)\} \quad (21)$$

$$\alpha(A_i, b_h) \triangleq \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{V}_1 = \emptyset \\ \prod_{j \in \mathbf{V}_1} \frac{1 - d_j(A_i, b_h)}{1 - c(A_i, b_h)} & \text{si } \mathbf{V}_1 \neq \emptyset \end{cases} \quad (22) \quad \alpha(b_h, A_i) \triangleq \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{V}_2 = \emptyset \\ \prod_{j \in \mathbf{V}_2} \frac{1 - d_j(b_h, A_i)}{1 - c(b_h, A_i)} & \text{si } \mathbf{V}_2 \neq \emptyset \end{cases} \quad (23)$$

L'indice de crédibilité $\rho(A_i, b_h)$ associé à l'hypothèse « A_i surclasse b_h » est calculé par l'équation (24) en affaiblissant l'indice de concordance global $c(A_i, b_h)$ par le facteur $\alpha(A_i, b_h)$. De même, $\rho(b_h, A_i)$ est calculé par l'équation (25).

$$\rho(A_i, b_h) \triangleq c(A_i, b_h) \cdot \alpha(A_i, b_h) \quad (24) \quad \rho(b_h, A_i) \triangleq c(b_h, A_i) \cdot \alpha(b_h, A_i) \quad (25)$$

◇ *ET-3* : selon l'équation (26), un seuil de coupe λ , défini arbitrairement, représente la plus petite valeur de l'indice de crédibilité $\rho(A_i, b_h)$ pour accepter l'hypothèse « A_i surclasse b_h ».

$$\begin{cases} \rho(A_i, b_h) \geq \lambda \implies A_i S b_h \\ \rho(b_h, A_i) \geq \lambda \implies b_h S A_i \end{cases} \quad (26)$$

Sur cette base, les relations de préférence stricte (\succ), d'indifférence (I) et d'incomparabilité (R) sont identifiées par l'équation (27).

$$\begin{cases} A_i I b_h & \iff A_i S b_h \text{ et } b_h S A_i \\ A_i \succ b_h & \iff A_i S b_h \text{ et pas } b_h S A_i \\ b_h \succ A_i & \iff \text{pas } A_i S b_h \text{ et } b_h S A_i \\ A_i R b_h & \iff \text{pas } A_i S b_h \text{ et pas } b_h S A_i \end{cases} \quad (27)$$

◇ *ET-4* : pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$, les relations avec chaque profil b_h sont établies selon l'équation (27). Pour affecter chaque A_i à une et une seule classe C_h ($A_i \rightarrow C_h$), deux attitudes sont possibles pour réaliser le tri :

- attitude optimiste : A_i est comparée successivement à b_1, b_2, \dots, b_h jusqu'à ce que $b_h \succ A_i$;
- attitude pessimiste : A_i est comparée successivement à $b_{k-1}, b_{k-2}, \dots, b_h$ (avec $h \leq k$) jusqu'à ce que $A_i \succ b_h$.

E.4.2. Exemple simplifié d'illustration de Electre Tri

Le problème de décision est formalisé par :

- deux alternatives à trier : A_1 et A_2 ;
- trois critères de décision : g_1, g_2 et g_3 ;
- les trois échelles d'évaluation des critères, dans le sens de préférence croissant : $X_1 = [0, 10]$, $X_2 = [0, 100]$, $X_3 = [0, 2]$;
- le vecteur d'importance des trois critères : $\mathbf{w} = \{0.2, 0.5, 0.3\}$;
- la matrice de valeurs $\mathbf{S} = [x_{ij}]$, $i = 1, 2$, $j = 1, 2, 3$ de l'équation 28 ;
- trois classes d'affectation : C_1, C_2 et C_3 ,
- les scores des quatre profils associés b_0, b_1, b_2 et b_3 du tableau 1 ;
- pour chaque critère, les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$ sont considérés comme identiques pour les cinq profils b_h , du tableau 2.

critères	Profils de décision			
	b_0	b_1	b_2	b_3
g_1	0	3	6	10
g_2	0	35	70	100
g_3	0	0.6	1.4	2

TABLE 1 – Données d'entrées : scores des profils b_h selon trois critères g_j .

critères	seuils		
	q_j	p_j	v_j
g_1	0.5	1.5	5
g_2	5	20	50
g_3	0.1	0.4	1

TABLE 2 – Données d'entrées : seuils d'indifférence, de préférence, et de veto selon les trois critères.

$$\mathbf{S} = \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 5 & 10 & 0.2 \\ 3 & 50 & 1.5 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (28)$$

◇ ET-1 :

Les indices de concordance et de discordance partielles calculés pour les trois critères sont donnés dans les tableaux 3 et 4.

Alternatives A_i	Critères g_j					
	g_1	g_2	g_3	g_1	g_2	g_3
	paire (A_i, b_1)			paire (b_1, A_i)		
A_1	1	0	1	0	1	0
A_2	1	1	1	1	0.3333	0
	paire (A_i, b_2)			paire (b_2, A_i)		
A_1	1	0	0	0	1	0
A_2	0	0	1	1	1	1

TABLE 3 – ET-1 : indices de concordance $c_j(A_i, b_h)$ pour chaque critère g_j et chaque paire (A_i, b_h) et (b_h, A_i) .

Alternatives A_i	Critères g_j					
	g_1	g_2	g_3	g_1	g_2	g_3
	paire (A_i, b_1)			paire (b_1, A_i)		
A_1	0	0.1667	0	1	0	0
A_2	0	0	0	0	0	0.8333
	paire (A_i, b_2)			paire (b_2, A_i)		
A_1	0	1	0	0.1483	0	0
A_2	0.4286	0	0	0	0	0

TABLE 4 – ET-1 : indices de discordance $d_j(A_i, b_h)$ pour chaque critère g_j et chaque paire (A_i, b_h) et (b_h, A_i) .

◇ ET-2 :

Les indices de concordance globale $c(A_i, b_h)$, les facteurs de réduction $\alpha(A_i, b_h)$ et les indices de crédibilité $\rho(A_i, b_h)$ sont établis dans le tableau 5.

A_i	$c(A_i, b_h)$		$\alpha(A_i, b_h)$		$\rho(A_i, b_h)$	
	paire (A_i, b_1)	paire (b_1, A_i)	paire (A_i, b_1)	paire (b_1, A_i)	paire (A_i, b_1)	paire (b_1, A_i)
A_1	0.5	0.5	1	0	0.5	0
A_2	1	0.3667	1	0.1632	1	0.0965
A_i	$c(A_i, b_2)$		$\alpha(A_i, b_2)$		$\rho(A_i, b_2)$	
	paire (A_i, b_2)	paire (b_2, A_i)	paire (A_i, b_2)	paire (b_2, A_i)	paire (A_i, b_2)	paire (b_2, A_i)
A_1	0.2	0.8	0	1	0	0.8
A_2	0.3	1	0.8163	1	0.2449	1

TABLE 5 – ET-2 : indices de concordance globale $c(A_i, b_h)$, facteurs de réduction $\alpha(A_i, b_h)$ et indices de crédibilité $\rho(A_i, b_h)$ pour chaque paire (A_i, b_h) et (b_h, A_i) .

◇ ET-3 :

Le seuil de coupe λ choisi est égal à **0.8**. Le tableau 6 donne les relations de chaque alternative A_i avec chaque profil b_h .

Alternatives A_i	profils b_h			
	b_0	b_1	b_2	b_3
A_1	\succ	R	\prec	\prec
A_2	\succ	\succ	\prec	\prec

TABLE 6 – ET-3 : tableau des relations de chaque A_i par rapport à chaque b_h .

◇ ET-4 :

Selon l'attitude pessimiste, $A_1 \rightarrow C_1$ et $A_2 \rightarrow C_2$.

Selon l'attitude optimiste, $A_1 \rightarrow C_2$ et $A_2 \rightarrow C_2$.

Annexe F : Aide à la décision basée sur le Raisonement Évidentiel

F.1. Le Raisonement Évidentiel : théories de Dempster-Shafer (DST) et du raisonnement plausible et paradoxal (DSmT)

Shafer (1976) a introduit la théorie des fonctions de croyance, aussi appelée théorie de Dempster-Shafer (théorie de Dempster-Shafer (DST)). Elle repose sur l'hypothèse d'exhaustivité et d'exclusivité mutuelle des éléments du cadre de discernement $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ (avec $n > 1$) pour définir l'ensemble 2^Θ , appelé « power-set ». En pratique, ces deux hypothèses peuvent être considérées comme trop strictes. Cela a conduit au développement d'autres théories dans le cadre du Raisonement Évidentiel (*Evidential Reasoning* en anglais) (ER).

La théorie de Dezert-Smarandache du raisonnement plausible et paradoxal (théorie de Dezert-Smarandache du raisonnement plausible et paradoxal (DSmT)) relaxe l'hypothèse d'exclusivité mutuelle (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015). Son modèle libre construit un ensemble $D^\Theta \triangleq \{\Theta, \cup, \cap\}$, appelé « hyper-power set » ou aussi treillis de Dedekind alors que, dans la DST, $2^\Theta \triangleq \{\Theta, \cup\}$. Dès lors $|D^\Theta| \geq |2^\Theta| = 2^n$, avec, pour $n = 3$, $|D^\Theta| = 19$ et $|2^\Theta| = 8$ (figure 1).

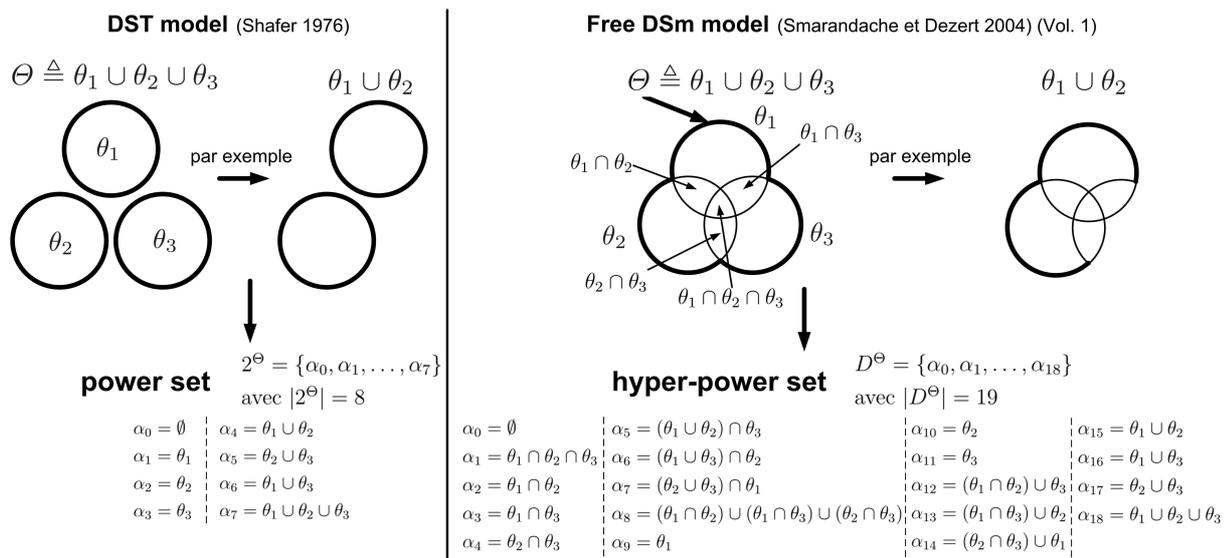


FIGURE 1 – Comparaison du modèle classique de la théorie des fonctions de croyance (DST) (Shafer 1976) avec le modèle libre de la DSmT (Smarandache et Dezert 2004, 2006, 2009, 2015).

F.2. Méthodologie ER-MCDA

La méthodologie basée sur le Raisonnement Évidentiel (ER) pour une aide multicritère à la décision (AMC) (*Evidential Reasoning for Multi Criteria Decision Analysis* en anglais) (ER-MCDA) a été formalisée par Tacnet et al. (2011b) après les premiers développements proposés dans la thèse de Tacnet (2009). Elle s'appuie sur six étapes illustrées sur la figure 2.

F.2.1. Étapes de la méthodologie ER-MCDA

◇ *ER-MCDA-1* : formalisation du problème

L'analyse multicritère hiérarchique (analyse multicritère hiérarchique (*Analytic Hierarchy Process* en anglais) (AHP)) produit la liste de critères g_j , $j = 1, \dots, N$ en établissant un arbre hiérarchique (figure II.2, p.65).

Le vecteur d'importance des critères correspondant $\mathbf{w} = \{\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_N\}$, à chaque niveau de l'arbre, est établi par le calcul du vecteur propre de la matrice de préférence entre critères \mathbf{P}_g de l'équation (II.11) (p.63), selon la méthode de Saaty (1980).

Pour chaque critère g_j , l'échelle d'évaluation quantitative ou qualitative X_j est définie comme le cadre de discernement (FoD) $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_e, \dots, \theta_n\}$ permettant l'évaluation finale.

◇ *ER-MCDA-2* : établissement du « modèle de transposition »

Pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, les sous-ensembles flous $\mu_{j,\theta_e} : X_j \rightarrow [0, 1]$, $e = 1, \dots, n$, sont établis. Ce modèle peut être considéré comme une fonction d'utilité floue (Tacnet 2009).

◇ *ER-MCDA-3* : transformation d'une évaluation imprécise en une BBA

Pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$, chaque source s_q , $q = 1, \dots, Q$ produit l'évaluation de chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ selon une distribution de possibilité $\pi_{q,ij} : X_j \rightarrow [0, 1]$.

La méthode de transposition développée par Tacnet (2009) permet d'obtenir une BBA $m_{q,ij}^\Theta(\cdot)$ pour chacune de ces évaluations (figure II.11, p.85).

◇ *ER-MCDA-4 et 5* : deux étapes de combinaison successives, décrites en section II.3.2.4 (p. 89)

L'étape 4 combine les BBAs produites par plusieurs sources inégalement fiables. Pour chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ et chaque g_j , $j = 1, \dots, N$, les Q BBAs $m_{q,ij}^\Theta(\cdot)$ sont combinées selon la règle de fusion PCR6 pour obtenir la BBA $m_{ij}^\Theta(\cdot)$ et par là-même la matrice de BBAs $\mathbf{M}^\Theta = [m_{ij}^\Theta(\cdot)]$.

$$\mathbf{M}^\Theta \triangleq \begin{matrix} & & g_1, \omega_1 & \dots & g_j, \omega_j & \dots & g_N, \omega_N \\ A_1 & \left(\begin{array}{cccc} m_{11}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{1j}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{1N}^\Theta(\cdot) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_i & \begin{array}{cccc} m_{i1}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{ij}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{iN}^\Theta(\cdot) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_M & \begin{array}{cccc} m_{M1}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{Mj}^\Theta(\cdot) & \dots & m_{MN}^\Theta(\cdot) \end{array} \end{array} \right) \end{matrix} \quad (1)$$

L'étape 5 combine les BBAs produites pour chaque critère n'ayant pas la même importance. Pour chaque A_i , $i = 1, \dots, M$, les N BBAs $m_{ij}^\Theta(\cdot)$ sont combinées selon la règle de fusion PCR6₀ pour obtenir la BBA $m_i^\Theta(\cdot)$.

◇ *ER-MCDA-6* : décision

Étant donnés $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ et $m_i^\Theta(\cdot)$, un élément $\hat{\theta}(A_i)$ doit être choisi. Pour cela, une règle de décision est choisie parmi l'analyse du maximum de crédibilité, de plausibilité ou de probabilité subjective obtenue après transformation de la BBA (p.91).

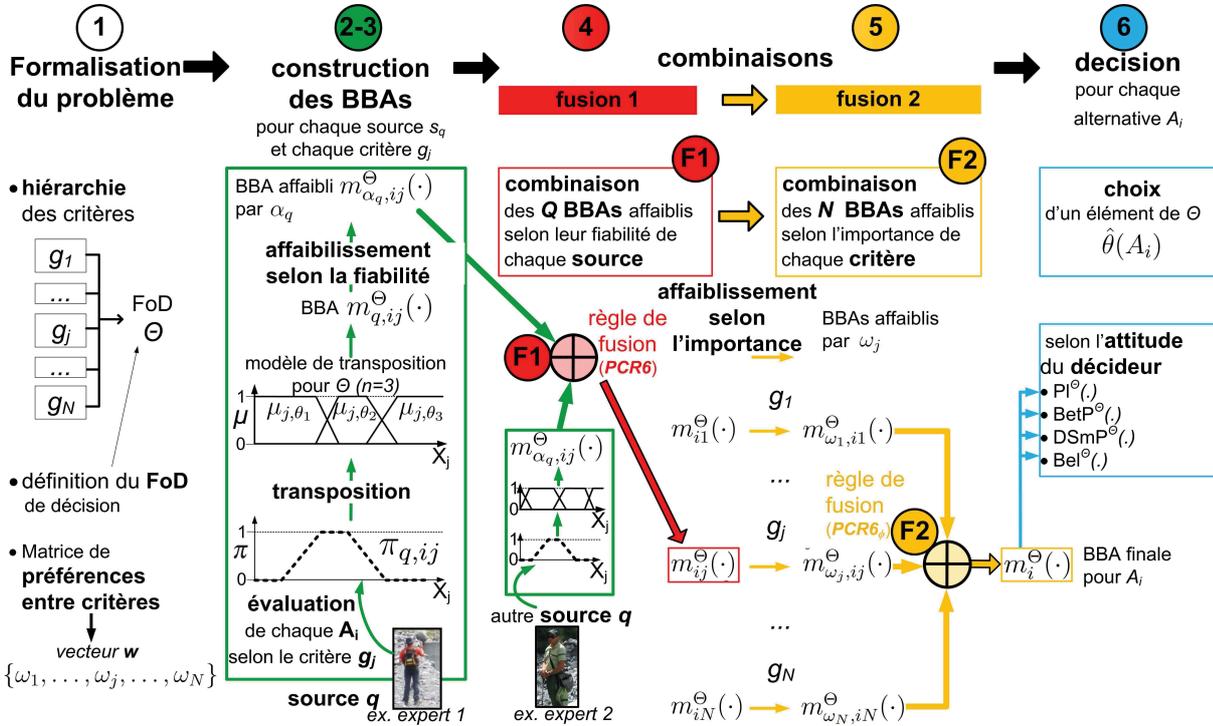


FIGURE 2 – Les étapes de la méthodologie ER-MCDA (Tacnet 2009).

F.2.2. Exemple simplifié d'application de la méthode ER-MCDA

La méthode ER-MCDA consiste à choisir le label $\hat{\theta}(A_i)$ pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$, étant donné le FoD Θ . Cet exemple ne détaille alors l'application que pour une seule alternative A_i pour illustrer la démarche.

◇ *ER-MCDA-1* :

L'objet de la décision est d'évaluer la performance d'une voiture automobile selon trois niveaux : $\theta_1 =$ faible, $\theta_2 =$ moyen, $\theta_3 =$ élevée. Le FoD est alors $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$.

Dans cet exemple, on ne considère un arbre hiérarchique qu'à un seul niveau. Trois critères d'évaluation g_j sont retenus avec leur échelle d'évaluation :

- g_1 - vitesse maximale atteinte ($X_1 = [0 \text{ km/h}, 400 \text{ km/h}]$) : préférence croissante ;
- g_2 - consommation moyenne de carburant ($X_2 = [0 \text{ l/100 km}, 30 \text{ l/100 km}]$) : préférence décroissante ;
- g_3 - coût d'entretien annuel ($X_3 = [0 \text{ €}, 10000 \text{ €}]$) : préférence décroissante.

Les experts en charge de l'évaluation de la performance établie la matrice préférences \mathbf{P}_g entre les trois critères. Le vecteur d'importance obtenu est alors le suivant : $\mathbf{w} = \{0.66, 0.17, 0.17\}$.

$$\mathbf{P}_g \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 \\ g_1 & \begin{pmatrix} 1 & 4 & 4 \\ 1/4 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

◇ ER-MCDA-2 :

Les trois « modèles de transposition » permettant le passage de l'évaluation de chaque critère dans le FoD sont donnés par la figure 3.

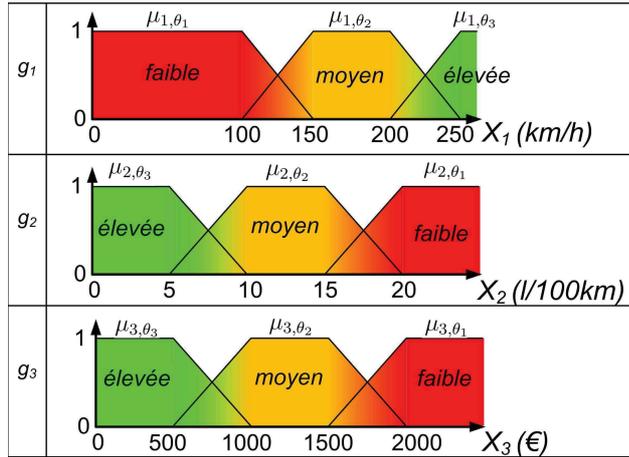


FIGURE 3 – ER-MCDA-2 : pour les trois critères, définition des « modèles de transposition ».

◇ ER-MCDA-3 :

Deux sources s_q fournissent leur évaluation imprécise et incertain de chacun des trois critères pour A_i . Pour chacune de ces évaluations, l'application de la méthode de transposition de Tacnet (2009) (p.85) permet d'obtenir une BBA $m_{q,ij}^\ominus(\cdot)$. Elles sont fournies sur la figure 4.

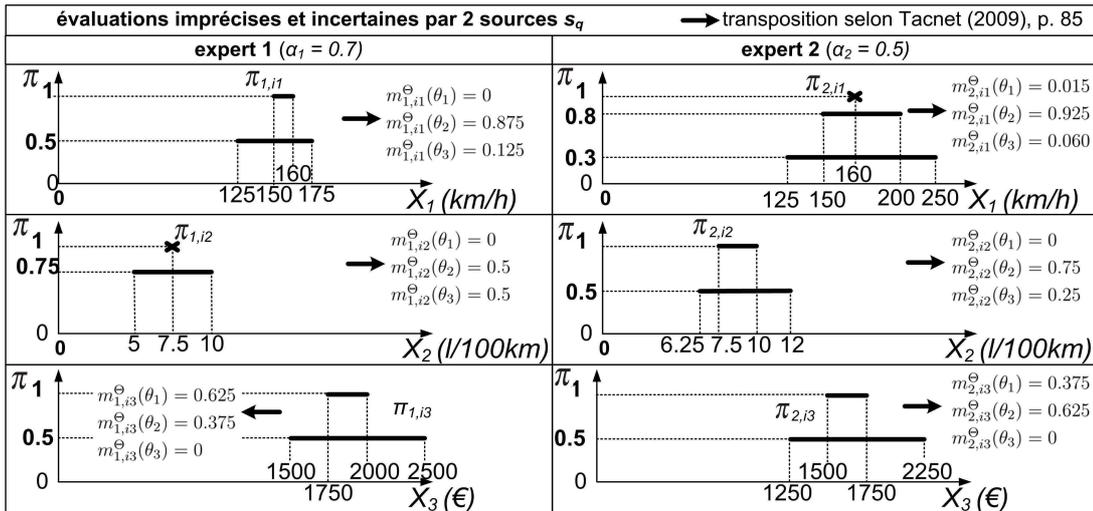


FIGURE 4 – ER-MCDA-3 : pour les trois critères, évaluations imprécises et incertaines fournies par deux sources s_q et transposition pour extraction des BBAs $m_{q,ij}^\ominus(\cdot)$ correspondantes.

◇ *ER-MCDA-4* : fusion des BBAs provenant des sources pour chaque critère

Les coefficients de fiabilité des sources s_1 (expert 1) et s_2 (expert 2) sont définis respectivement par $\alpha_1 = 0.7$ et $\alpha_2 = 0.5$. En appliquant l'équation (II.31) (p.89) de l'affaiblissement des BBAs selon leur fiabilité (Shafer 1976), chaque BBA de la figure 4 est affaiblie selon le coefficient de fiabilité pour obtenir les BBAs $m_{\alpha_1,ij}^\ominus(\cdot)$ (expert s_1) et $m_{\alpha_2,ij}^\ominus(\cdot)$ (expert s_2) du tableau 1.

éléments focaux	$m_{\alpha_1,ij}^\ominus(\cdot)$ (expert s_1)			$m_{\alpha_2,ij}^\ominus(\cdot)$ (expert s_2)		
	g_1	g_2	g_3	g_1	g_2	g_3
θ_1	0.0000	0.0000	0.4375	0.0075	0.0000	0.1875
θ_2	0.6125	0.3500	0.2625	0.4625	0.3750	0.3125
θ_3	0.0875	0.3500	0.0000	0.0300	0.1250	0.0000
Θ	0.3000	0.3000	0.3000	0.5000	0.5000	0.5000

TABLE 1 – ER-MCDA-4 : BBAs $m_{\alpha_1,ij}^\ominus(\cdot)$ et $m_{\alpha_2,ij}^\ominus(\cdot)$ après affaiblissement par les coefficients de fiabilité $\alpha_1 = 0.7$ et $\alpha_2 = 0.5$, selon la règle de Shafer.

Pour chaque critère g_j , les $Q = 2$ BBAs $m_{\alpha_1,ij}^\ominus(\cdot)$ et $m_{\alpha_2,ij}^\ominus(\cdot)$ sont combinées selon la règle de fusion PCR6. Les $N = 6$ BBAs obtenues sont données dans le tableau 2.

éléments focaux	g_1	g_2	g_3
θ_1	0.000000	0.000000	0.457292
θ_2	0.784367	0.518875	0.392708
θ_3	0.063276	0.331125	0.000000
Θ	0.150000	0.150000	0.150000

TABLE 2 – ER-MCDA-4 : BBAs $m_{ij}^\ominus(\cdot)$ après la première fusion selon la règle PCR6.

◇ *ER-MCDA-5* : fusion des BBAs provenant des différents critères

L'équation (II.32) (p.89) est appliquée à chaque BBA $m_{ij}^\ominus(\cdot)$ du tableau 2. Le vecteur des coefficients d'importance $\mathbf{w} = [0.66, 0.17, 0.17]$ permet d'obtenir les BBAs $m_{\omega_j,ij}^\ominus(\cdot)$ du tableau 3.

La combinaison des $N = 6$ BBAs $m_{\omega_j,ij}^\ominus(\cdot)$ du tableau 3 par la règle de fusion PCR6 $_\emptyset$ et l'étape de normalisation qui suit fournissent les BBAs $m_{PCR6_\emptyset,i}^\ominus(\cdot)$ puis $m_i^\ominus(\cdot)$ du tableau 4.

La BBA $m_i^\ominus(\cdot)$ finalement obtenue peut être représentée sous forme graphique sur la figure 5.

éléments focaux	g_1	g_2	g_3
\emptyset	0.340000	0.830000	0.830000
θ_1	0.001556	0.000000	0.077740
θ_2	0.517682	0.088209	0.066760
θ_3	0.041762	0.056291	0.000000
Θ	0.099000	0.025500	0.025500

TABLE 3 – ER-MCDA-5 : BBAs $m_{\omega_j,ij}^\ominus(\cdot)$ après affaiblissement par le coefficient d'importance ω_j .

◇ ER-MCDA-6 : décision

Pour l'ouvrage A_i , $\hat{\theta}(A_i)$ doit être choisie à partir de la BBA finale $m_i^\Theta(\cdot)$ du tableau 4. Pour cela, les fonctions de crédibilité $\text{Bel}^\Theta(\cdot)$ et de plausibilité $\text{Pl}^\Theta(\cdot)$, et les transformations en probabilités subjectives $\text{BetP}^\Theta(\cdot)$ et $\text{DSmP}_{\epsilon=0}^\Theta(\cdot)$ (équations II.25-II.28, p.91).

Cependant, la méthodologie implique qu'une masse non nulle ne peut finalement être affectée qu'aux singletons du FoD Θ et à l'ignorance totale $\Theta = \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$. L'élément $\hat{\theta}(A_i)$ peut donc être directement choisi comme celui ayant la masse la plus élevée. Dans ce cas, il s'agit de θ_2 . La voiture A_i évaluée est de performance « moyenne » avec une masse importante de 0.89 environ.

éléments focaux	$m_{PCR6\theta,i}^\Theta(\cdot)$	$m_i^\Theta(\cdot)$
\emptyset	0.817297	0.000000
θ_1	0.006221	0.034052
θ_2	0.163063	0.892504
θ_3	0.004962	0.027158
Θ	0.008457	0.046286

TABLE 4 – ER-MCDA-5 : BBA finale $m_i^\Theta(\cdot)$ après la seconde étape de fusion selon la règle PCR6 θ .

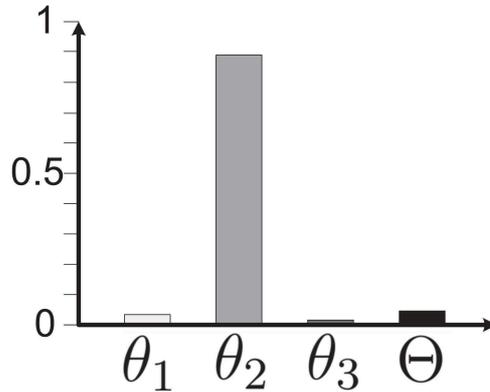


FIGURE 5 – ER-MCDA-5 : représentation graphique de la BBA finale $m_i^\Theta(\cdot)$ dans le tableau 4.

F.3. Méthode Soft Electre Tri (SET)

La méthode Soft Electre Tri (Soft Electre Tri (SET)) a été développée par Dezert et Tacnet (2012b) pour améliorer la méthode Electre Tri (ET). Comme cette dernière, l'objectif est d'affecter chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ à une catégorie (ou classe) C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$. Cette méthode se divise en cinq étapes illustrées sur la figure 7.

F.3.1. Étapes de la méthode Soft Electre Tri (SET)

◇ *SET-1* : formalisation du problème

Cette première étape consiste à définir les classes d'affectation finales C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$ pour le tri, les alternatives $A_i \in \mathcal{A}$ et les critères de décision $g_j \in \mathcal{G}$. Le vecteur \mathbf{w} des coefficients d'importance ω_j de chaque critère g_j représente les préférences du décideur entre les différents critères. Les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$ modélisent les préférences du décideur entre chaque A_i et chaque b_h , selon chaque critère g_j .

◇ *SET-2* : construction des indices locaux de concordance, discordance et incertitude

Electre Tri (ET) s'appuie sur la relation de surclassement (Annexe C.1) pour classer chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ d'un ensemble \mathcal{A} dans une des classes C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$ de l'ensemble \mathcal{C} . Chaque classe est bornée par sa limite basse b_{h-1} et sa limite haute b_h . Les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$ sont préalablement définis pour chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$ de la décision. Sur cette base, pour comparer les éléments de chaque paire (A_i, b_h) , Dezert et Tacnet (2012a) ont proposé de créer une BBA sur le FoD binaire $\Theta = \{c, \bar{c}\}$, avec c qui signifie que l'alternative A_i à classer dans une catégorie C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$, est concordante avec l'hypothèse « A_i est au moins aussi bonne que le profil b_h » (figure II.3, p. 68).

Pour chaque g_j , deux fonctions sigmoïdales sont établies :

$$f_{s_c, t_c}(x_j) \text{ et } f_{-s_{\bar{c}}, t_{\bar{c}}}(x_j), x_j \in X_j, \text{ avec } f_{s, t}(x_j) \triangleq \frac{1}{1 + e^{-s(x_j - t)}}$$

Leurs paramètres (t_c, s_c) et $(t_{\bar{c}}, s_{\bar{c}})$ sont calculés à partir de $p_j(b_h)$, $q_j(b_h)$ et $v_j(b_h)$:

$$t_c = x_{h_j} - \frac{1}{2}(p_j(b_h) + q_j(b_h)) \text{ et } t_{\bar{c}} = x_{h_j} - \frac{1}{2}(p_j(b_h) + v_j(b_h))$$

$$s_c = \frac{4}{p_j(b_h) - q_j(b_h)} \text{ et } s_{\bar{c}} = \frac{4}{v_j(b_h) - p_j(b_h)}$$

Pour chaque critère g_j et chaque paire de comparaison (A_i, b_h) , deux BBAs $m_{1,i}^\Theta(\cdot)$ et $m_{2,i}^\Theta(\cdot)$ sont extraites (tableau 5). Leur combinaison par une règle de fusion comme la PCR6 (Martin et Osswald 2006) permet d'obtenir la BBA $m_{j,ih}^\Theta(\cdot)$.

focal element	$m_{1,i}^\Theta(\cdot)$	$m_{2,i}^\Theta(\cdot)$
c	$f_{s_c, t_c}(x_{ij})$	0
\bar{c}	0	$f_{-s_{\bar{c}}, t_{\bar{c}}}(x_{ij})$
$c \cup \bar{c}$	$1 - f_{s_c, t_c}(x_{ij})$	$1 - f_{-s_{\bar{c}}, t_{\bar{c}}}(x_{ij})$

TABLE 5 – Pour chaque g_j et chaque paire (A_i, b_h) , construction de deux BBAs $m_{1,i}^\Theta(\cdot)$ et $m_{2,i}^\Theta(\cdot)$ (Dezert et Tacnet 2012a).

Pour chaque critère g_j et chaque paire (A_i, b_h) , les indices locaux de concordance $c_j(A_i, b_h)$, de discordance $d_j(A_i, b_h)$, et d'incertitude $u_j(A_i, b_h)$, représentés sur la figure 6, sont donnés par :

$$\begin{cases} c_j(A_i, b_h) \triangleq m_{j,ih}^\Theta(c) \in [0, 1] \\ d_j(A_i, b_h) \triangleq m_{j,ih}^\Theta(\bar{c}) \in [0, 1] \\ u_j(A_i, b_h) \triangleq m_{j,ih}^\Theta(c \cup \bar{c}) \in [0, 1]. \end{cases} \quad (3)$$

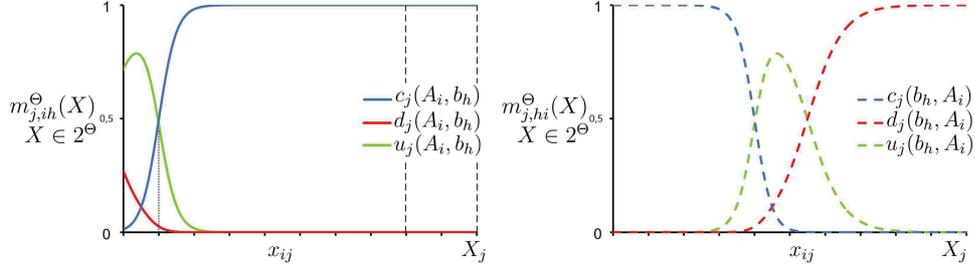


FIGURE 6 – La BBA $m_{j,ih}^\Theta(\cdot)$ représente l'information disponible sur la préférence du décideur, selon un critère g_j et pour l'hypothèse $A_i \succ b_h$ ($m_{j,hi}^\Theta(\cdot)$ étant pour l'hypothèse entre $b_h \succ A_i$).

De la même manière, pour chaque paire (b_h, A_i) , les indices locaux $c_j(b_h, A_i) = m_{j,hi}^\Theta(c)$, $d_j(b_h, A_i) = m_{j,hi}^\Theta(\bar{c})$ et $u_j(b_h, A_i) = m_{j,hi}^\Theta(c \cup \bar{c})$ sont calculés et représentés sur la figure 6. Dans ce cas, les paramètres initiaux des fonctions sigmoïdales (t_c, s_c) et $(t_{\bar{c}}, s_{\bar{c}})$ sont donnés par :

$$t_c = x_{hj} + \frac{1}{2}(p_j(b_h) + q_j(b_h)) \text{ et } t_{\bar{c}} = x_{hj} + \frac{1}{2}(p_j(b_h) + v_j(b_h))$$

$$s_c = \frac{4}{q_j(b_h) - p_j(b_h)} \text{ et } s_{\bar{c}} = \frac{4}{p_j(b_h) - v_j(b_h)}$$

Les indices locaux de concordance $c_j(A_i, b_h)$ (resp. $c_j(b_h, A_i)$), de discordance $d_j(A_i, b_h)$ (resp. $d_j(b_h, A_i)$) et d'incertitude $u_j(A_i, b_h)$ (resp. $u_j(b_h, A_i)$) sont ainsi établis. Ils correspondent à la BBA $m_{j,ih}^\Theta(\cdot)$ (resp. $m_{j,hi}^\Theta(\cdot)$) qui sont une représentation des préférences du décideur, pour le critère g_j , entre l'alternative A_i et la borne b_h . Elle dépend des seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$ donnés au préalable.

◇ SET-3 : construction des indices globaux de concordance, discordance et incertitude

La représentation, pour chaque g_j , $j = 1, \dots, N$, de la relation de préférence pour chaque couple (A_i, b_h) par la BBA $m_{j,ih}^\Theta(\cdot)$, avec $\Theta = \{c, \bar{c}\}$ (c étant la concordance avec l'hypothèse « A_i est préférée à b_h selon g_j ») s'appuie sur la combinaison des deux BBAs $m_{1,i}^\Theta(\cdot)$ et $m_{2,i}^\Theta(\cdot)$ du tableau 5 en utilisant la règle de fusion PCR6.

Une fois $m_{j,ih}^\Theta(\cdot)$ obtenue pour chaque g_j , $j = 1, \dots, N$, sur la base des indices partiels de concordance, discordance et d'incertitude (figure 6), la construction des indices globaux correspondant $c(A_i, b_h)$ et $c(b_h, A_i)$, $d(A_i, b_h)$ et $d(b_h, A_i)$, $u(A_i, b_h)$ et $u(b_h, A_i)$, s'appuie également sur la règle de fusion PCR6 comme suit (Dezert et Tacnet 2012b).

Pour chaque paire (A_i, b_h) , $i = 1, \dots, M$, $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$ et (A_i, b_0) , la BBA $m_{ih}^{\ominus}(\cdot)$ est établie par combinaison des N BBAs $m_{j,ih}^{\ominus}(\cdot)$, $j = 1, \dots, N$, selon la règle PCR6 $_{\emptyset}$ qui tient compte d'un affaiblissement par ω_j . Ensuite, les facteurs d'affaiblissement $\alpha(A_i, b_h)$ et $\beta(A_i, b_h)$ sont définis à partir des équations (4-6).

$$\alpha(A_i, b_h) \triangleq \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{V}_\alpha = \emptyset \\ \prod_{j \in \mathbf{V}_\alpha} \frac{1-d_j(A_i, b_h)}{1-m_{ih}^{\ominus}(c)} & \text{si } \mathbf{V}_\alpha \neq \emptyset \end{cases} \quad \beta(A_i, b_h) \triangleq \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{V}_\beta = \emptyset \\ \prod_{j \in \mathbf{V}_\beta} \frac{1-c_j(A_i, b_h)}{1-m_{ih}^{\ominus}(\bar{c})} & \text{si } \mathbf{V}_\beta \neq \emptyset \end{cases} \quad (4) \quad (5)$$

$$\text{with} \quad \begin{cases} \mathbf{V}_\alpha \triangleq \{j \in \mathbf{J} | d_j(A_i, b_h) > m_{ih}^{\ominus}(c)\} \\ \mathbf{V}_\beta \triangleq \{j \in \mathbf{J} | c_j(b_h, A_i) > m_{ih}^{\ominus}(\bar{c})\} \end{cases} \quad (6)$$

Une fois la BBA $m_{ih}^{\ominus}(\cdot)$, et les coefficients $\alpha(A_i, b_h)$ et $\beta(A_i, b_h)$ établis, les indices globaux sont définis par l'équation (7).

$$\begin{cases} c(A_i, b_h) \triangleq m_{ih}^{\ominus}(c) \cdot \alpha(A_i, b_h) \\ d(A_i, b_h) \triangleq m_{ih}^{\ominus}(\bar{c}) \cdot \beta(A_i, b_h) \\ u(A_i, b_h) \triangleq 1 - c(A_i, b_h) - d(A_i, b_h) \end{cases} \quad (7)$$

De la même manière, pour chaque paire (b_h, A_i) , la BBA $m_{hi}^{\ominus}(\cdot)$ est obtenue en combinant les N BBAs $m_{j,hi}^{\ominus}(\cdot)$ par la règle de fusion PCR6 $_{\emptyset}$. Les facteurs d'affaiblissement correspondant $\alpha(b_h, A_i)$ et $\beta(b_h, A_i)$ sont également calculés, permettant d'obtenir les indices globaux de concordance $c(b_h, A_i)$, de discordance $d(b_h, A_i)$ et d'incertitude $u(b_h, A_i)$.

◇ *SET-4* : définition des probabilités de surclassement

L'hypothèse de surclassement « A_i surclasse b_h » est notée $X = "A_i \succ b_h"$ tandis que celle « b_h surclasse A_i » est notée $Y = "b_h \succ A_i"$. Leur crédibilité et plausibilité respectives sont données par les équations (8-9) :

$$\begin{cases} \text{Bel}(X) = c(A_i, b_h) \\ \text{Bel}(Y) = c(b_h, A_i) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{et} \quad \begin{cases} \text{Pl}(X) = 1 - d(A_i, b_h) = c(A_i, b_h) + u(A_i, b_h) \\ \text{Pl}(Y) = 1 - d(b_h, A_i) = c(b_h, A_i) + u(b_h, A_i) \end{cases} \quad (9)$$

La connaissance sur chaque hypothèse de surclassement est alors caractérisée par son intervalle de confiance, dans lequel se trouve la probabilité inconnue associée : $P(X) \in \text{BI}(X) = [\text{Bel}(X); \text{Pl}(X)]$ et $P(Y) \in \text{BI}(Y) = [\text{Bel}(Y); \text{Pl}(Y)]$.

Pour chaque paire (A_i, b_h) et (b_h, A_i) , le problème de surclassement consiste à décider si X surclasse finalement Y ($X \succ Y$, X étant alors l'hypothèse de surclassement choisie), ou si Y surclasse X ($Y \succ X$). L'hypothèse d'une distribution uniforme des probabilités inconnues $P(X)$ et $P(Y)$ dans les intervalles de confiance correspondant $\text{BI}(X)$ et $\text{BI}(Y)$ permet de calculer les probabilités $P_{X \succ Y} \triangleq P(P(X) \succ P(Y))$ et $P_{Y \succ X} \triangleq P(P(Y) \succ P(X))$ comme les surfaces relatives de deux polygones $A(X)$ et $A(Y)$ déduits de $\text{BI}(X)$ et $\text{BI}(Y)$ (Dezert et Tacnet 2012b) (figure 4, p. 612). Pour améliorer la clarté, la probabilité de surclassement final pour la paire (A_i, b_h) est notée $P_{ih} \triangleq P_{X \succ Y}$ avec $X = "A_i \succ b_h"$ et $Y = "b_h \succ A_i"$. Pour la paire (b_h, A_i) , elle est établie réciproquement par $P_{hi} \triangleq P_{Y \succ X} = 1 - P_{ih}$.

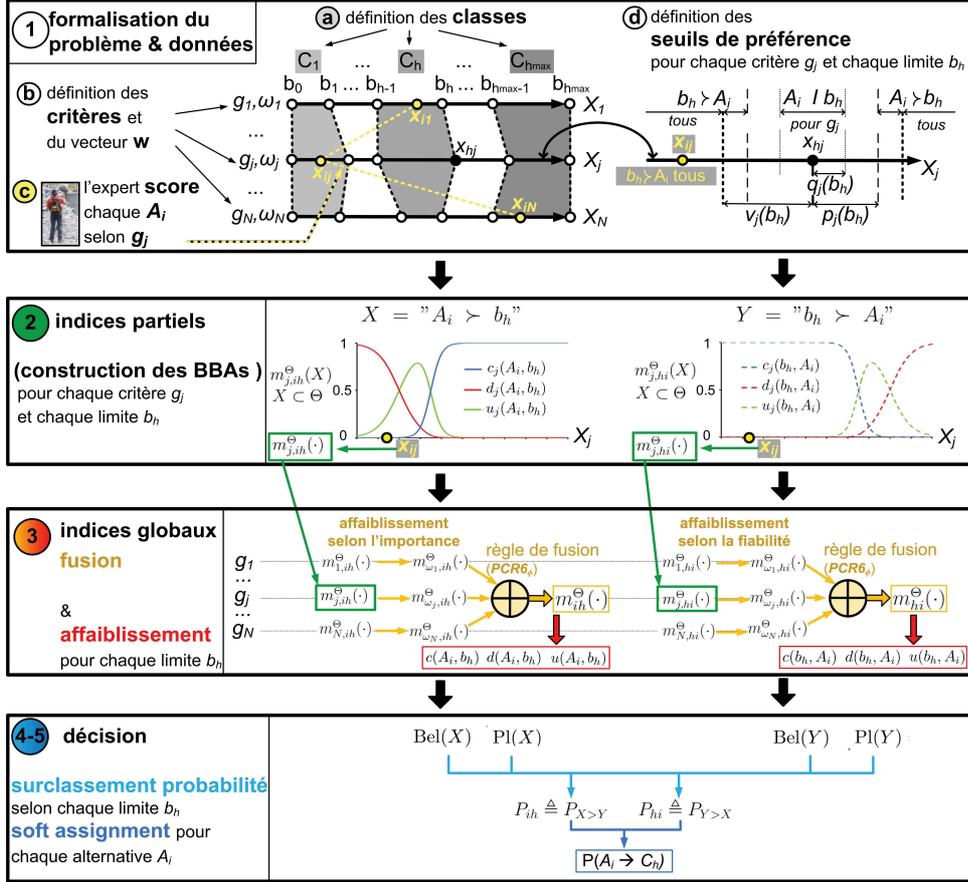


FIGURE 7 – Les étapes de la méthode Soft Electre Tri (SET), pour une amélioration de ET.

◇ SET-5 : un tri probabilisé

L'affectation finale probabilisée de chaque A_i , $i = 1, \dots, M$ dans chaque classe C_h , $h = 1, \dots, h_{\text{tot}}$ est donnée par la combinaison des probabilités des différentes séquences de surclassements possibles notées $Se_o(A_i)$, $o = 1, \dots, o_{\text{tot}}$. Ces dernières sont définies de manière logique, en considérant b_0 comme la limite la plus basse et $b_{h_{\text{tot}}}$ comme la plus haute. Par exemple, soit quatre classes C_h , le nombre de séquences de surclassement possibles est de sept (tableau 6).

Classes C_h	C_1	C_2	C_3	C_4	
Profils de décision	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
$Se_1(A_i)$	>	>	>	>	>
$Se_2(A_i)$	>	>	>	>	>
$Se_3(A_i)$	>	>	>	>	>
$Se_4(A_i)$	>	>	>	>	>
$Se_5(A_i)$	>	>	>	>	>
$Se_6(A_i)$	>	>	>	>	>
$Se_7(A_i)$	>	>	>	>	>

 TABLE 6 – Séquences de surclassement possibles $Se_o(A_i)$ pour 4 classes C_h (> signifie « A_i surclasse b_h »).

La probabilité de chaque séquence est notée $P(Se_o(A_i))$. Elle est calculée par la multiplication des probabilités de surclassement de chaque profil b_h par A_i . Par exemple, la probabilité de la séquence $Se_2(A_i)$ du tableau 6 est calculée par : $P(Se_2(A_i)) = P_{i0} \times P_{i1} \times P_{i2} \times (1 - P_{i3}) \times (1 - P_{i4})$.

De plus, cette procédure d'affectation produit la probabilité $\delta_i \triangleq P(A_i \rightarrow \emptyset)$, qui correspond à l'impossibilité de faire un choix cohérent de surclassement. En effet, dans le tableau 6, $Se_4(A_i)$, $Se_5(A_i)$, and $Se_6(A_i)$ ne sont pas des séquences cohérentes de surclassement. On a alors $\delta_i = P(Se_4(A_i)) \times P(Se_5(A_i)) \times P(Se_6(A_i))$ pour 4 classes d'affectation.

F.3.2. Exemple simplifié d'application de Soft Electre Tri (SET)

◇ *SET-1* : formalisation du problème

Le problème de décision est formalisé par :

- une alternative à trier : A_i ;
- cinq critères de décision : g_1, g_2, g_3, g_4 et g_5 ;
- les cinq critères sont évalués sur l'échelle des réels positifs \mathbb{R}^+ ; par contre, le sens de préférence est décroissant pour g_1 et g_2 et croissant pour les trois autres ;
- le vecteur d'importance des cinq critères : $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$;
- la matrice de valeurs $\mathbf{S} = [x_{ij}]$ de l'équation 10, transformée dans la matrice \mathbf{S}^{pref} de l'équation 11 pour tenir compte du sens de préférence décroissant pour g_1 et g_2 ;
- quatre classes d'affectation : $C_1 = \text{nul}, C_2 = \text{faible}, C_3 = \text{moyen}, C_4 = \text{fort}$;
- les scores des cinq profils associés b_0, b_1, b_2, b_3 et b_4 du tableau 7 ;
- pour chaque critère, les seuils de préférence $p_j(b_h)$, d'indifférence $q_j(b_h)$ et de veto $v_j(b_h)$ sont considérés comme identiques pour les cinq profils b_h , du tableau 7.

$$\mathbf{S} = A_i \begin{pmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ 300000 & 6000 & 5 & 0.007 & 0.02 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{S}^{\text{pref}} = A_i \begin{pmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ -300000 & -6000 & 5 & 0.007 & 0.02 \end{pmatrix} \quad (11)$$

critères g_j	Scores x_{hj} pour chaque profil b_h					Seuils		
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	q_j	p_j	v_j
g_1	-10^7	-10^6	$-5 \cdot 10^5$	$-2 \cdot 10^5$	0	10^5	$2 \cdot 10^5$	10^6
g_2	-10^5	-10^4	-5000	-2000	0	500	1000	10^4
g_3	0	2	5	10	20	0.5	1	5
g_4	0	0.002	0.005	0.010	1	0.001	0.002	0.010
g_5	0	0.01	0.05	0.1	1	0.005	0.01	0.1

TABLE 7 – Données d'entrée de SET pour les profils de décision $b_h, h = 0, \dots, 4$ et les critères $g_j, j = 1, \dots, 5$: scores x_{hj} ; seuils de préférence p_j , indifférence q_j , et veto v_j .

◇ *SET-2* : construction des indices locaux de concordance, discordance et incertitude

Pour chaque critère g_j et chaque paire (A_i, b_h) , les seuils q_j, p_j , et v_j sont utilisés pour construire les deux fonctions sigmoïdales $f_{s_c, t_c}(x_j)$ et $f_{s_{\bar{c}}, t_{\bar{c}}}(x_j)$, $x_j \in X_j$. Soit le FoD $\Theta = \{c, \bar{c}\}$, les deux BBAs $m_{1,i}^{\Theta}(\cdot)$ et $m_{2,i}^{\Theta}(\cdot)$ sont calculées à partir de ces deux fonctions. Leur combinaison selon la règle de fusion PCR6 produit $m_{j,ih}^{\Theta}(\cdot)$. L'équation (3) permet d'obtenir les indices locaux de concordance $c_j(A_i, b_h)$, de discordance $d_j(A_i, b_h)$, et d'incertitude $u_j(A_i, b_h)$. De la même manière, pour chaque paire (b_h, A_i) , les indices locaux $c_j(b_h, A_i)$, $d_j(b_h, A_i)$ et $u_j(b_h, A_i)$ sont établis.

Le tableau 8 rassemble toutes les BBAs $m_{j,1h}^\ominus(\cdot)$ et $m_{j,h1}^\ominus(\cdot)$ extraites des indices locaux calculés à partir des scores x_{ij} , $j = 1, \dots, 5$. Par exemple, pour le critère g_1 et la paire (A_i, b_3) , le triplet $m_{1,i3}^\ominus(c) = c_1(A_i, b_3) = 0.8805$, $m_{1,i3}^\ominus(\bar{c}) = d_1(A_i, b_3) = 0.0025$, et $m_{1,i3}^\ominus(c \cup \bar{c}) = u_1(A_i, b_3) = 0.1170$ fournissent la BBA $m_{1,i3}^\ominus(\cdot)$.

éléments focaux	Critères g_j				
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
	$m_{j,i1}^\ominus(\cdot)$ - paire (A_i, b_1)				
c	1.0000	0.9998	1.0000	1.0000	0.9974
\bar{c}	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0026
$c \cup \bar{c}$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	$m_{j,i2}^\ominus(\cdot)$ - paire (A_i, b_2)				
c	0.9997	0.1121	0.9954	0.9997	0.0000
\bar{c}	0.0003	0.1121	0.0023	0.0003	0.2477
$c \cup \bar{c}$	0.0000	0.7758	0.0024	0.0000	0.7523
	$m_{j,i3}^\ominus(\cdot)$ - paire (A_i, b_3)				
c	0.8755	0.0000	0.0000	0.0020	0.0000
\bar{c}	0.0143	0.3392	0.8808	0.1824	0.7523
$c \cup \bar{c}$	0.1102	0.6608	0.1192	0.8156	0.2477
	$m_{j,1i}^\ominus(\cdot)$ - paire (b_1, A_i)				
c	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1121
\bar{c}	0.6225	0.3392	0.5000	0.3775	0.1121
$c \cup \bar{c}$	0.3775	0.6608	0.5000	0.6225	0.7758
	$m_{j,2i}^\ominus(\cdot)$ - paire (b_2, A_i)				
c	0.1121	0.9974	0.9954	0.1121	0.9995
\bar{c}	0.1121	0.0026	0.0023	0.1121	0.0005
$c \cup \bar{c}$	0.7758	0.0000	0.0024	0.7758	0.0000
	$m_{j,3i}^\ominus(\cdot)$ - paire (b_3, A_i)				
c	0.9991	0.9998	1.0000	0.9999	1.0000
\bar{c}	0.0008	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000
$c \cup \bar{c}$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

TABLE 8 – SET-2 : BBAs $m_{j,1h}^\ominus(\cdot)$ et $m_{j,h1}^\ominus(\cdot)$ pour l'alternative A_i .

◇ *SET-3* : construction des indices globaux de concordance, discordance et incertitude

Lors de l'étape SET-3, chaque BBA $m_{j,ih}^\ominus(\cdot)$ et $m_{j,hi}^\ominus(\cdot)$ du tableau 8 est affaiblie par le coefficient d'importance ω_j de $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$. Ces BBAs affaiblies $m_{\omega_j,ih}^\ominus(\cdot)$ et $m_{\omega_j,hi}^\ominus(\cdot)$ sont données dans le tableau 9.

Pour chaque profil b_h , les $N = 7$ BBAs $m_{\omega_j,ih}^\ominus(\cdot)$ et $N = 7$ BBAs $m_{\omega_j,hi}^\ominus(\cdot)$ sont combinées selon la règle de fusion PCR6₀ pour produire, après une étape de normalisation, les BBAs respectives $m_{ih}^\ominus(\cdot)$ et $m_{hi}^\ominus(\cdot)$ du tableau 10.

Pour chaque profil b_h , les équations (4-6) produisent les coefficients d'affaiblissement $\alpha(A_i, b_h)$ (resp. $\alpha(b_h, A_i)$) et $\beta(A_i, b_h)$ (resp. $\beta(b_h, A_i)$) du tableau 11. Étant données les BBAs $m_{ih}^\ominus(\cdot)$ et $m_{hi}^\ominus(\cdot)$, les indices globaux de concordance $c(A_i, b_h)$ (resp. $c(b_h, A_i)$), de discordance $d(A_i, b_h)$ (resp. $d(b_h, A_i)$), et d'incertitude $u(A_i, b_h)$ (resp. $u(b_h, A_i)$) sont calculés par l'équation (7) dans le tableau 11.

ANNEXE F

éléments focaux	Critères g_j				
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
	$m_{\omega_j, i1}^\ominus(\cdot)$ - paire (A_i, b_1)				
\emptyset	0.9200	0.9600	0.9000	0.5400	0.6800
c	0.0800	0.0400	0.1000	0.4600	0.3192
\bar{c}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008
$c \cup \bar{c}$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	$m_{\omega_j, i2}^\ominus(\cdot)$ - paire (A_i, b_2)				
\emptyset	0.9200	0.9600	0.9000	0.5400	0.6800
c	0.0800	0.0045	0.1000	0.4600	0.0000
\bar{c}	0.0000	0.0045	0.0000	0.0000	0.0793
$c \cup \bar{c}$	0.0000	0.0310	0.0000	0.0000	0.2407
	$m_{\omega_j, i3}^\ominus(\cdot)$ - paire (A_i, b_3)				
\emptyset	0.9200	0.9600	0.9000	0.5400	0.6800
c	0.0090	0.0400	0.1000	0.0516	0.3198
\bar{c}	0.0090	0.0000	0.0000	0.0516	0.0002
$c \cup \bar{c}$	0.0620	0.0000	0.0000	0.3568	0.0000
	$m_{\omega_j, 1i}^\ominus(\cdot)$ - paire (b_1, A_i)				
\emptyset	0.9200	0.9600	0.9000	0.5400	0.6800
c	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0359
\bar{c}	0.0498	0.0136	0.0500	0.1737	0.0359
$c \cup \bar{c}$	0.0302	0.0264	0.0500	0.2863	0.2482
	$m_{\omega_j, 2i}^\ominus(\cdot)$ - paire (b_2, A_i)				
\emptyset	0.9200	0.9600	0.9000	0.5400	0.6800
c	0.0090	0.0045	0.0995	0.0516	0.3198
\bar{c}	0.0090	0.0045	0.0002	0.0516	0.0002
$c \cup \bar{c}$	0.0620	0.0310	0.0002	0.3568	0.0000
	$m_{\omega_j, 3i}^\ominus(\cdot)$ - paire (b_3, A_i)				
\emptyset	0.9200	0.9600	0.9000	0.5400	0.6800
c	0.0799	0.0400	0.1000	0.4600	0.3200
\bar{c}	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$c \cup \bar{c}$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

TABLE 9 – SET-3 : BBAs $m_{\omega_j, ih}^\ominus(\cdot)$ et $m_{\omega_j, hi}^\ominus(\cdot)$ pour l'alternative A_i après affaiblissement par l'importance $\omega_j, j = 1, \dots, 5$.

éléments focaux	paires pour l'alternative A_i					
	(A_i, b_h)			(b_h, A_i)		
	$m_{11}^\ominus(\cdot)$	$m_{12}^\ominus(\cdot)$	$m_{13}^\ominus(\cdot)$	$m_{11}^\ominus(\cdot)$	$m_{21}^\ominus(\cdot)$	$m_{31}^\ominus(\cdot)$
c	1.0000	0.7671	0.0265	0.0076	0.4811	0.0000
\bar{c}	0.0000	0.0235	0.3387	0.2041	0.0116	1.0000
$c \cup \bar{c}$	0.0000	0.2094	0.6348	0.7883	0.5073	0.0000

TABLE 10 – SET-3 : BBAs $m_{ih}^\ominus(\cdot)$ et $m_{hi}^\ominus(\cdot)$ pour l'alternative A_i après combinaison par la règle de fusion PCR6 $_\emptyset$ et normalisation.

	paires pour l'alternative A_i					
	A_i, b_1	A_i, b_2	A_i, b_3	b_1, A_i	b_2, A_i	b_3, A_i
$\alpha(\text{pair})$	1.0000	1.0000	0.0178	0.0716	1.0000	1.0000
$\beta(\text{pair})$	0.0000	0.0000	0.1883	1.0000	0.0000	0.0000
$c(\text{pair})$	1.0000	0.7671	0.0005	0.0006	0.4811	1.0000
$d(\text{pair})$	0.0000	0.0000	0.0637	0.2041	0.0000	0.0000
$u(\text{pair})$	0.0000	0.2329	0.9358	0.7953	0.5189	0.0000

TABLE 11 – SET-3 : facteurs d'affaiblissement et indices globaux de concordance, discordance, et d'incertitude pour l'alternative A_i .

◇ SET-4 : définition des probabilités de surclassement

Les résultats présentés dans le tableau 12 sont directement issus des équations (8-9).

A_i	Bel($A_i \succ b_h$)			Pl($A_i \succ b_h$)			Bel($b_h \succ A_i$)			Pl($b_h \succ A_i$)		
	b_1	b_2	b_3	b_1	b_2	b_3	b_1	b_2	b_3	b_1	b_2	b_3
A_i	1.000	0.767	0.001	1.000	1.000	0.9362	0.001	0.481	1.000	0.796	1.000	1.000

TABLE 12 – SET-4 : crédibilité et plausibilité des hypothèses de surclassement $A_i \succ b_h$ et $b_h \succ A_i$.

◇ SET-5 : un tri probabilisé

Les probabilités de surclassement P_{ih} données dans le tableau 13 sont calculées à partir des intervalles de croyance [Bel($A_i \succ b_h$), Pl($A_i \succ b_h$)] et [Bel($b_h \succ A_i$), Pl($b_h \succ A_i$)].

Probabilités de surclassement	profils b_h				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
P_{ih}	1.000	1.000	0.776	0.000	0.000

TABLE 13 – SET-5 : probabilités P_{ih} des relations de surclassement.

Pour les quatre classes C_h , les sept séquences de surclassement $Se_o(A_i)$ à prendre en compte sont données dans le tableau 6. Leurs probabilités, établies dans le tableau 14, sont calculées à partir de celles du tableau 13.

A_i	séquences de surclassement $Se_o(A_i)$						
	$Se_1(A_i)$	$Se_2(A_i)$	$Se_3(A_i)$	$Se_4(A_i)$	$Se_5(A_i)$	$Se_6(A_i)$	$Se_7(A_i)$
A_i	0.000	0.776	0.224	0.000	0.000	0.000	0.000

TABLE 14 – SET-5 : probabilités $P(Se_o(A_i))$ des séquences de surclassement fournies dans le tableau 6.

L'affectation probabilisée finale est calculée à partir de l'ensemble des probabilités d'affecter A_i à chaque classe C_h ($P(A_i \rightarrow C_h)$) et à l'ensemble vide \emptyset ($\delta_i = P(A_i \rightarrow \emptyset)$). Ces résultats finaux sont donnés dans le tableau 15.

A_i	classes C_h				
	C_1	C_2	C_3	C_4	\emptyset
A_i	0.000	0.224	0.776	0.000	$\delta_2 = 0.000$

TABLE 15 – SET-5 : affectations probabilisées $[P(A_i \rightarrow C_h)]$.

L'alternative A_i est plus probablement de classe moyenne (probabilité de 0.776) que de classe faible (probabilité de 0.224). Il est certain qu'elle n'est ni de classe nulle, ni de classe forte.

F.4. Méthodes BF-TOPSIS

Les quatre méthodes TOPSIS basées sur les fonctions de croyance (*Belief function-based TOPSIS* en anglais) (TOPSIS basées sur les fonctions de croyance (*Belief function-based TOPSIS* en anglais) (BF-TOPSIS)) ont été développées par Dezert et al. (2016c). Elles améliorent les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMC) permettant le classement des alternatives. Elles sont appelées BF-TOPSIS1 à BF-TOPSIS4.

F.4.1. Étapes des méthodes BF-TOPSIS

Les quatre méthodes BF-TOPSIS reposent sur une étape préalable commune d'établissement d'une matrice de BBAs \mathbf{M}^A . Le cadre de discernement de la décision (FoD) est l'ensemble \mathcal{A} des alternatives ($\Theta = \mathcal{A}$). Les quatre méthodes se différencient ensuite dans les techniques de traitement de cette matrice.

F.4.1.1. Étape préalable commune

Le problème de décision est de classer toutes les alternatives d'un ensemble \mathcal{A} pour, finalement, choisir la meilleure alternative $A_{i^*} \in \mathcal{A}$.

L'étape préalable commune consiste à construire la matrice de BBAs $\mathbf{M}^A = [m_{ij}^A(\cdot)]$ à partir de la matrice $\mathbf{S} = [x_{ij}]$ (p. 51). Cette dernière formalise un problème multicritère, x_{ij} étant le score de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque critère g_j , $j = 1, \dots, N$.

$$\mathbf{M}^A \triangleq \begin{matrix} & \begin{matrix} g_1, \omega_1 & \dots & g_j, \omega_j & \dots & g_N, \omega_N \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_M \end{matrix} & \begin{pmatrix} m_{11}^A(\cdot) & \dots & m_{1j}^A(\cdot) & \dots & m_{1N}^A(\cdot) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{i1}^A(\cdot) & \dots & m_{ij}^A(\cdot) & \dots & m_{iN}^A(\cdot) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{M1}^A(\cdot) & \dots & m_{Mj}^A(\cdot) & \dots & m_{MN}^A(\cdot) \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

Pour chaque A_i et chaque g_j , deux supports sont d'abord établis :

- le support positif $Sup_j(A_i) \triangleq \sum_{k \in \{1, \dots, M\} | S_{kj} \leq S_{ij}} |S_{ij} - S_{kj}|$ mesure de combien A_i est meilleure que les autres alternatives de \mathcal{A} selon g_j ;
- le support négatif $Inf_j(A_i) \triangleq -\sum_{k \in \{1, \dots, M\} | S_{kj} \geq S_{ij}} |S_{ij} - S_{kj}|$ mesure de combien elle est pire.

Soit $A_{\max}^j \triangleq \max_i Sup_j(A_i)$ et $A_{\min}^j \triangleq \min_i Inf_j(A_i)$, chaque BBA $m_{ij}^A(\cdot)$ est défini de manière consistante à partir des équations (13-15).

$$m_{ij}^A(A_i) \triangleq \begin{cases} \frac{Sup_j(A_i)}{A_{\max}^j} & \text{si } A_{\max}^j \neq 0 \\ 0 & \text{si } A_{\max}^j = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$m_{ij}^A(\bar{A}_i) \triangleq \begin{cases} \frac{Inf_j(A_i)}{A_{\min}^j} & \text{si } A_{\min}^j \neq 0 \\ 0 & \text{si } A_{\min}^j = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$m_{ij}^A(A_i \cup \bar{A}_i) \triangleq m_{ij}^A(\Theta) \triangleq 1 - (m_{ij}^A(\bar{A}_i) + m_{ij}^A(A_i)) \quad (15)$$

Les quatre méthodes BF-TOPSIS diffèrent ensuite par le traitement de \mathbf{M}^A . Leur objectif commun est de calculer la proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$ de chaque A_i avec la meilleure solution A^{best} . Selon le principe de la méthode technique pour un ordonnancement par similitude avec la solution idéale (*technique for order preference by similarity to ideal solution* en anglais) (TOPSIS) (Annexe C.3), toutes les alternatives de \mathcal{A} peuvent alors être classées selon un ordre de préférence.

F.4.1.2. BF-TOPSIS1

1. Pour chaque A_i et chaque g_j , les BBAs la meilleure et la pire sont respectivement définies par $m_{ij}^{\text{best}}(A_i) \triangleq 1$ et $m_{ij}^{\text{worst}}(A_i) \triangleq 1$. L'équation (II.33) (p. 88) permet de calculer les distances $d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{\text{best}})$ et $d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{\text{worst}})$. Le principe est rappelé ci-dessous par la première. Le même principe est utilisé pour établir la seconde.

Soit, pour $X \subseteq \mathcal{A}$:

- $[a_1, b_1] \triangleq \text{BI}_{ij}^A(X) \triangleq [\text{Bel}_{ij}^A(X), \text{Pl}_{ij}^A(X)]$;
- $[a_2, b_2] \triangleq \text{BI}_{ij}^{A, \text{best}}(X) \triangleq [\text{Bel}_{ij}^{A, \text{best}}(X), \text{Pl}_{ij}^{A, \text{best}}(X)]$;

la distance de Wasserstein de Irpino et Verde (2008) est calculé par :

$$d_W([a_1, b_1], [a_2, b_2]) \triangleq \sqrt{\left[\frac{a_1 + b_1}{2} - \frac{a_2 + b_2}{2}\right]^2 + \frac{1}{3} \left[\frac{b_1 - a_1}{2} - \frac{b_2 - a_2}{2}\right]^2} \quad (16)$$

Sur cette base, la distance de la BBA m_{ij}^A avec la BBA de la solution idéalement la meilleure $m_{ij}^{A, \text{best}}$ est donnée par :

$$d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{best}}) \triangleq \sqrt{\frac{1}{2^{|\mathcal{A}|-1}} \cdot \sum_{A \in 2^{\mathcal{A}}} d_W^2(\text{BI}_{ij}^A(A), \text{BI}_{ij}^{A, \text{best}}(A))} \quad (17)$$

2. Les distances moyennées respectives $d^{\text{best}}(A_i)$ et $d^{\text{worst}}(A_i)$ sont établies en pondérant les distances précédentes par le poids ω_j de chaque g_j comme suit :

$$d^{\text{best}}(A_i) \triangleq \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{best}}) \quad (18) \quad d^{\text{worst}}(A_i) \triangleq \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{worst}}) \quad (19)$$

3. Pour chaque A_i , la proximité relative est alors calculée par l'équation (20).

$$C(A_i, A^{\text{best}}) \triangleq \frac{d_i^{\text{worst}}}{d_i^{\text{best}} + d_i^{\text{worst}}} \quad (20)$$

F.4.1.3. BF-TOPSIS2

1. Cette étape est identique à celle de BF-TOPSIS1.
2. Pour chaque A_i et chaque g_j , la proximité relative est définie par l'équation (21).

$$C_j(A_i, A^{\text{best}}) \triangleq \frac{d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{worst}})}{d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{worst}}) + d_{\text{BI}}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{best}})} \quad (21)$$

3. La proximité relative moyenne $C(A_i, A^{\text{best}})$ est calculée en pondérant chaque $C_j(A_i, A^{\text{best}})$ par le poids ω_j de chaque g_j comme suit :

$$C(A_i, A^{\text{best}}) \triangleq \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot C_j(A_i, A^{\text{best}}) \quad (22)$$

F.4.1.4. BF-TOPSIS3

1. Pour chaque A_i , les N BBAs $m_{ij}^A(\cdot)$ sont combinées selon la règle de fusion PCR6 $_{\phi}$, ce qui permet d'obtenir la BBA $m_i^A(\cdot)$ sur 2^A en tenant compte de l'importance w_j de chaque g_j (Smarandache et al. 2010).
2. Pour chaque A_i , les BBAs la meilleure et la pire sont définies par $m_i^{A,best}(A_i) \triangleq 1$ and $m_i^{A,worst}(\bar{A}_i) \triangleq 1$. Comme dans BF-TOPSIS1, l'équation (II.33) (p. 88) permet de calculer $d^{best}(A_i) = d_{BI}(m_i^A, m_i^{A,best})$ et $d^{worst}(A_i) = d_{BI}(m_i^A, m_i^{A,worst})$.
3. Comme pour BF-TOPSIS1, la proximité relative $C(A_i, A^{best})$ est établie selon l'équation (20).

F.4.1.5. BF-TOPSIS4

La méthode BF-TOPSIS4 ne diffère de BF-TOPSIS3 que par le choix de la règle de fusion en première étape. Celle plus compliquée ZPCR6 $_{\phi}$ est utilisée. Il s'agit d'une version modifiée de la règle de fusion PCR6 $_{\phi}$ qui tient compte du degré d'intersection entre éléments focaux de Zhang par un opérateur conjonctif de consensus (Smarandache et Dezert 2015).

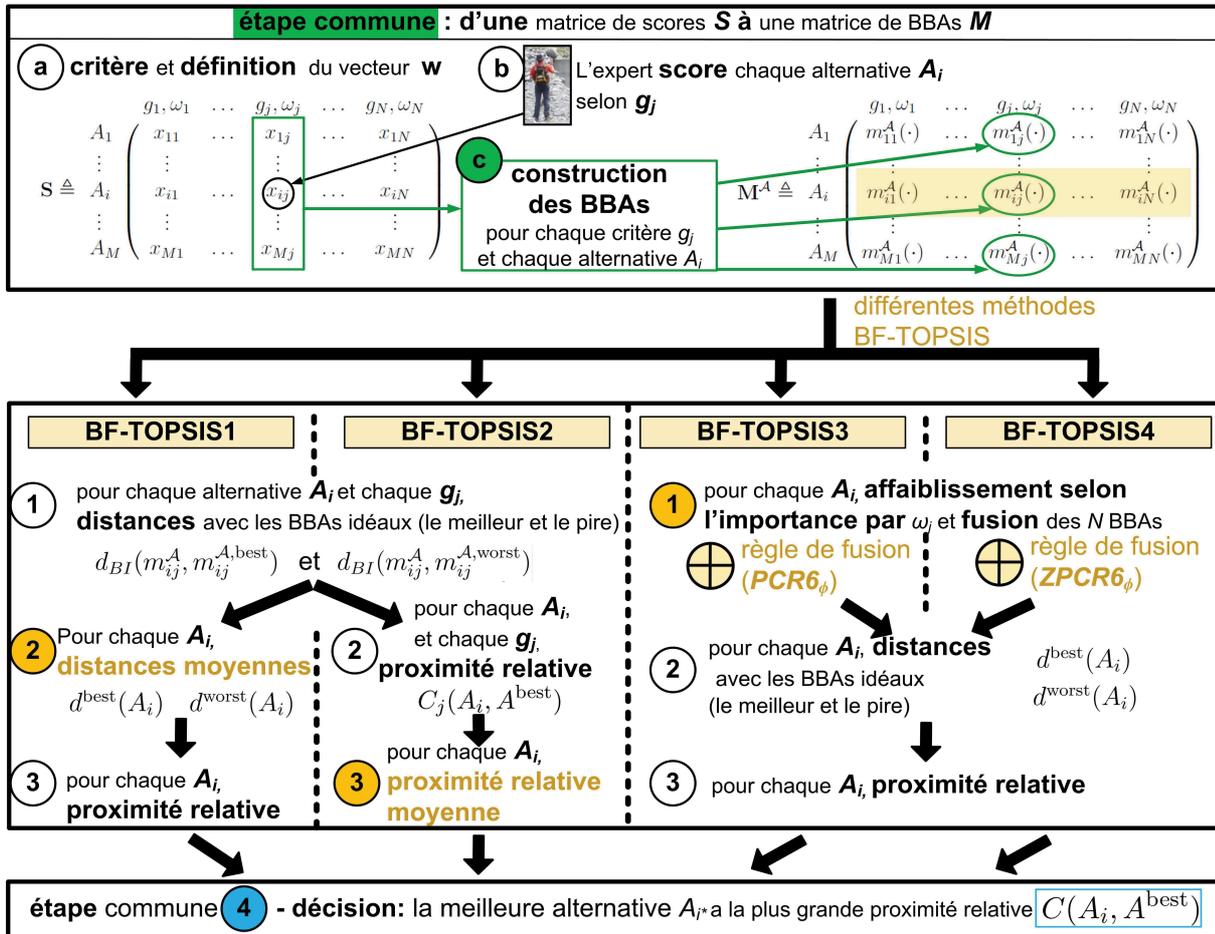


FIGURE 8 – Les étapes des quatre méthodes BF-TOPSIS.

F.4.2. Exemple simplifié d'application des méthodes BF-TOPSIS

Quatre alternatives A_i ($M = 4$) doivent être comparées : $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$. Cinq critères g_j ($N = 5$) sont considérés. Le vecteur de leur importance est donné par $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$. Les alternatives sont évaluées selon une échelle d'évaluation X_j propre à chaque critère g_j . La matrice \mathbf{S} est ainsi fournie par l'équation (23).

$$\mathbf{S} \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 300000 & 6000 & 5 & 0.007 & 0.02 \\ 300000 & 1500 & 5 & 0.008 & 0.04 \\ 600000 & 7500 & 7 & 0.008 & 0.05 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (23)$$

La préférence sur les critères g_1 et g_2 est décroissante : plus le score est élevé, moins l'alternative est préférée. À l'inverse, la préférence sur les critères g_3, g_4 et g_5 est croissante. Pour tenir compte de la décroissance sur g_1 et g_2 , les scores initiaux x_{i1} et x_{i2} , $i = 1, \dots, 4$ de la matrice \mathbf{S} sont multipliés par -1 pour obtenir la matrice \mathbf{S}^{pref} de l'équation (24).

$$\mathbf{S}^{\text{pref}} \triangleq \begin{matrix} & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -300000 & -6000 & 5 & 0.007 & 0.02 \\ -300000 & -1500 & 5 & 0.008 & 0.04 \\ -600000 & -7500 & 7 & 0.008 & 0.05 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (24)$$

F.4.2.1. Étape préalable commune

Cette étape consiste à établir la BBA $m_{ij}^A(\cdot)$ pour chaque alternative A_i et chaque critère g_j . La succession de calculs intermédiaires est donnée ci-dessous.

◇ Calcul des supports

Les supports positifs $Sup_j(A_i)$ calculés pour chaque alternative A_i et chaque critère g_j sont donnés dans le tableau 16. La valeur maximale A_{\max}^j correspondante pour chaque critère g_j est également fournie dans ce tableau.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
A_1	1 200 000	15 000	0	0	0
A_2	300 000	1 500	5	0.007	0.02
A_3	300 000	10 500	5	0.009	0.06
A_4	0	0	9	0.009	0.09
A_{\max}^j	1 200 000	15 000	9	0.009	0.09

TABLE 16 – Supports positifs $Sup_j(A_i)$ calculés pour chaque A_i et chaque g_j .

Les supports négatifs $Inf_j(A_i)$ calculés pour chaque alternative A_i et chaque critère g_j sont donnés dans le tableau 17. La valeur minimale A_{\min}^j correspondante pour chaque critère g_j est également fournie dans ce tableau.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
A_1	0	0	- 17	- 0.023	- 0.11
A_2	- 300 000	- 10 500	- 2	- 0.002	- 0.05
A_3	- 300 000	- 1 500	- 2	0	- 0.01
A_4	- 1 200 000	- 15 000	0	0	0
A_{\min}^j	- 1 200 000	- 15 000	- 17	- 0.023	- 0.11

TABLE 17 – Supports négatifs $Inf_j(A_i)$ calculés pour chaque A_i et chaque g_j .

◇ Fonctions de masse

Sur la base des deux tableaux précédents, les fonctions de masses $m_{ij}^A(\cdot)$ sont établies pour chaque alternative A_i et chaque critère g_j dans le tableau 18. Cela correspond à la matrice de BBAs M^A .

Par exemple, pour A_2 et g_1 , on calcule les trois masses de croyance suivantes :

- sur l’alternative A_2 à partir du tableau 16 : $m^A(A_2) = \frac{Sup_1(A_2)}{A_{\max}^1} = \frac{300000}{1200000} = 0.25$
- sur $\bar{A}_2 = A_1 \cup A_3 \cup A_4$ à partir du tableau 17 : $m^A(\bar{A}_2) = \frac{Inf_1(A_2)}{A_{\min}^1} = \frac{-300000}{-1200000} = 0.25$
- sur $\mathcal{A} = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4$ à partir du tableau 17 : $m^A(\mathcal{A}) = 1 - (m^A(A_2) + m^A(\bar{A}_2)) = 0.50$

alternative		g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
A_1	$m^A(A_1)$	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
	$m^A(A_2 \cup A_3 \cup A_4)$	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000
	$m^A(\mathcal{A})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A_2	$m^A(A_2)$	0.250	0.100	0.454	0.778	0.222
	$m^A(A_1 \cup A_3 \cup A_4)$	0.250	0.700	0.118	0.087	0.455
	$m^A(\mathcal{A})$	0.500	0.200	0.428	0.135	0.323
A_3	$m^A(A_3)$	0.250	0.700	0.454	1.000	0.667
	$m^A(A_1 \cup A_2 \cup A_4)$	0.250	0.100	0.118	0.000	0.091
	$m^A(\mathcal{A})$	0.500	0.200	0.428	0.000	0.242
A_4	$m^A(A_4)$	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000
	$m^A(A_1 \cup A_2 \cup A_3)$	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
	$m^A(\mathcal{A})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

TABLE 18 – Matrice de BBAs $m_{ij}^A(\cdot)$, avec le FoD $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$.

F.4.2.2. BF-TOPSIS1

1. Cette première étape calcule, pour chaque A_i et chaque g_j la distance d_{BI} de chaque BBA $m_{ij}^A(\cdot)$ issue du tableau 18 avec la BBA $m_{ij}^{best}(\cdot)$ de la solution A^{best} idéalement la meilleure pour laquelle $m_{ij}^{best}(A_i) = 1$. De même, la distance avec la BBA $m_{ij}^{worst}(\cdot)$ de la solution A^{worst} idéalement la pire pour laquelle $m_{ij}^{worst}(\bar{A}_i) = 1$ est calculée. Ces distances sont consignées dans le tableau 19.
2. Pour chaque alternative A_i , les distances $d^{best}(A_i)$ et $d^{worst}(A_i)$ sont calculées comme la moyenne pondérée des distances $d_{BI}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A,best})$ pour la première et $d_{BI}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A,worst})$ pour la seconde, avec $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$. Elles sont données dans le tableau 20.
3. Finalement, pour chaque A_i , la proximité relative $C(A_i, A^{best})$ avec la solution idéalement la meilleure est directement calculée à partir de la connaissance de $d^{best}(A_i)$ et $d^{worst}(A_i)$. Les résultats sont consignés dans le tableau 20.
4. Le classement final est directement déduit dans le tableau 20. La meilleure solution A_{i^*} est celle avec la valeur de proximité relative $C(A_i, A^{best})$ la plus élevée : il s’agit de A_4 .

distances	alternative	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
$d_{BI}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{best}})$	A_1	0.000	0.000	0.866	0.866	0.866
	A_2	0.591	0.752	0.424	0.176	0.632
	A_3	0.591	0.236	0.424	0.000	0.261
	A_4	0.866	0.866	0.000	0.000	0.000
$d_{BI}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{worst}})$	A_1	0.866	0.866	0.000	0.000	0.000
	A_2	0.315	0.126	0.468	0.694	0.252
	A_3	0.315	0.637	0.468	0.866	0.615
	A_4	0.000	0.000	0.866	0.866	0.866

TABLE 19 – Distances $d_{BI}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{best}})$ et $d_{BI}(m_{ij}^A, m_{ij}^{A, \text{worst}})$ calculées à partir des BBAs du tableau 18.

A_i	distances moyennées		proximité relative	classement
	$d^{\text{best}}(A_i)$	$d^{\text{worst}}(A_i)$	$C(A_i, A^{\text{best}})$	
A_1	0.762	0.104	0.120	4
A_2	0.403	0.477	0.542	3
A_3	0.183	0.693	0.791	2
A_4	0.104	0.762	0.880	1

TABLE 20 – BF-TOPSIS1 : distances moyennes pondérées (étape 2) et proximité relative (étape 3) calculées à partir des distances du tableau 19 puis classement final (étape 4).

F.4.2.3. BF-TOPSIS2

1. Il s'agit de la même étape que pour BF-TOPSIS1. De fait, le même tableau 19 est établi.
2. Pour chaque A_i et chaque g_j , la proximité relative $C_j(A_i, A^{\text{best}})$ est calculée (tableau 21).

alternative	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
A_1	0.080	0.120	0.120	0.120	0.120
A_2	0.028	0.034	0.086	0.543	0.544
A_3	0.028	0.057	0.109	0.569	0.794
A_4	0	0	0.100	0.560	0.880

TABLE 21 – Proximités relatives $C_j(A_i, A^{\text{best}})$ calculées à partir des distances du tableau 19.

3. Pour chaque alternative A_i , la proximité relative pondérée $C(A_i, A^{\text{best}})$ est calculée comme la moyenne pondérée des proximités relatives $C_j(A_i, A^{\text{best}})$, avec $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$.
4. Le classement final est directement déduit dans le tableau 22. La meilleure solution A_{i^*} est celle avec la valeur de proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$ la plus élevée : il s'agit de A_4 .

A_i	proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$	classement
A_1	0.117	4
A_2	0.436	3
A_3	0.531	2
A_4	0.549	1

TABLE 22 – BF-TOPSIS2 : proximités relatives moyennes pondérées (étape 3) et classement final (étape 4).

F.4.2.4. BF-TOPSIS3

1. Pour chaque A_i , les BBAs $m_{ij}^A(\cdot)$ sont combinées selon la règle de fusion PCR6 $_{\emptyset}$ en tenant compte des coefficients d'importance du vecteur $\mathbf{w} = [0.08, 0.04, 0.10, 0.46, 0.32]$.

alternative		$m_{\text{PCR6}}^A(A_i)$	$m_i^A(A_i)$
A_1	$m_1^A(\emptyset)$	0.904	0.000
	$m_1^A(A_1)$	0.003	0.030
	$m_1^A(A_2 \cup A_3 \cup A_4)$	0.093	0.970
	$m_1^A(\mathcal{A})$	0.000	0.000
A_2	$m_2^A(\emptyset)$	0.945	0.000
	$m_2^A(A_2)$	0.041	0.743
	$m_2^A(A_1 \cup A_3 \cup A_4)$	0.008	0.145
	$m_2^A(\mathcal{A})$	0.006	0.112
A_3	$m_3^A(\emptyset)$	0.920	0.000
	$m_3^A(A_3)$	0.076	0.954
	$m_3^A(A_1 \cup A_2 \cup A_4)$	0.001	0.006
	$m_3^A(\mathcal{A})$	0.003	0.040
A_4	$m_4^A(\emptyset)$	0.904	0.000
	$m_4^A(A_4)$	0.093	0.970
	$m_4^A(A_1 \cup A_2 \cup A_3)$	0.003	0.030
	$m_4^A(\mathcal{A})$	0.030	0.000

TABLE 23 – Matrices de BBAs $m_i^A(\cdot)$, avec le FoD $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$, obtenues par combinaison selon la règle PCR6 à partir des BBAs Matrices de BBAs $m_{ij}^A(\cdot)$ du tableau 18.

2. Pour chaque A_i , les deux distances de la BBA $m_i^A(\cdot)$ avec la BBA de la solution idéalement la meilleure définie par $m_i^{A,\text{best}}(A_i) = 1$ et avec la BBA de la solution idéalement la pire définie par $m_i^{A,\text{worst}}(\bar{A}_i) = 1$ sont calculées dans le tableau 24.
3. Pour chaque A_i , la proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$ en est directement déduite dans ce même tableau 24.
4. Le classement final est directement déduit dans le tableau 24. La meilleure solution A_{i^*} est celle avec la valeur de proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$ la plus élevée : il s'agit de A_4 .

A_i	distances moyennées		proximité relative $C(A_i, A^{\text{best}})$	classement
	$d^{\text{best}}(A_i)$	$d^{\text{worst}}(A_i)$		
A_1	0.840	0.026	0.030	4
A_2	0.208	0.661	0.761	3
A_3	0.036	0.832	0.959	2
A_4	0.026	0.840	0.970	1

TABLE 24 – BF-TOPSIS3 : distances avec les solutions idéalement la meilleure et la pire (étape 2) calculées à partir des BBAs du tableau 23, proximité relative (étape 3) et classement final (étape 4).

F.4.2.5. BF-TOPSIS4

Le calcul selon cette méthode n'est pas détaillée. La règle de fusion ZPCR6 $_{\emptyset}$ est utilisée lors de la première étape de BF-TOPSIS3 en remplacement de la règle PCR6. Pour ce cas, les résultats sont identiques à PCR6.

F.5. Méthode FCOWA-ER

La méthode FCOWA-ER (*Fuzzy Cautious Ordered Weighted Averaging with Evidential Reasoning* en anglais) a été développée par Han et al. (2012) après celui de la méthode COWA-ER par Tacnet et Dezert (2011), qui associait de manière prudente les principes de l'OWA de Yager (2008) et les règles de fusion. Elle repose sur quatre étapes détaillées sur la figure 9.

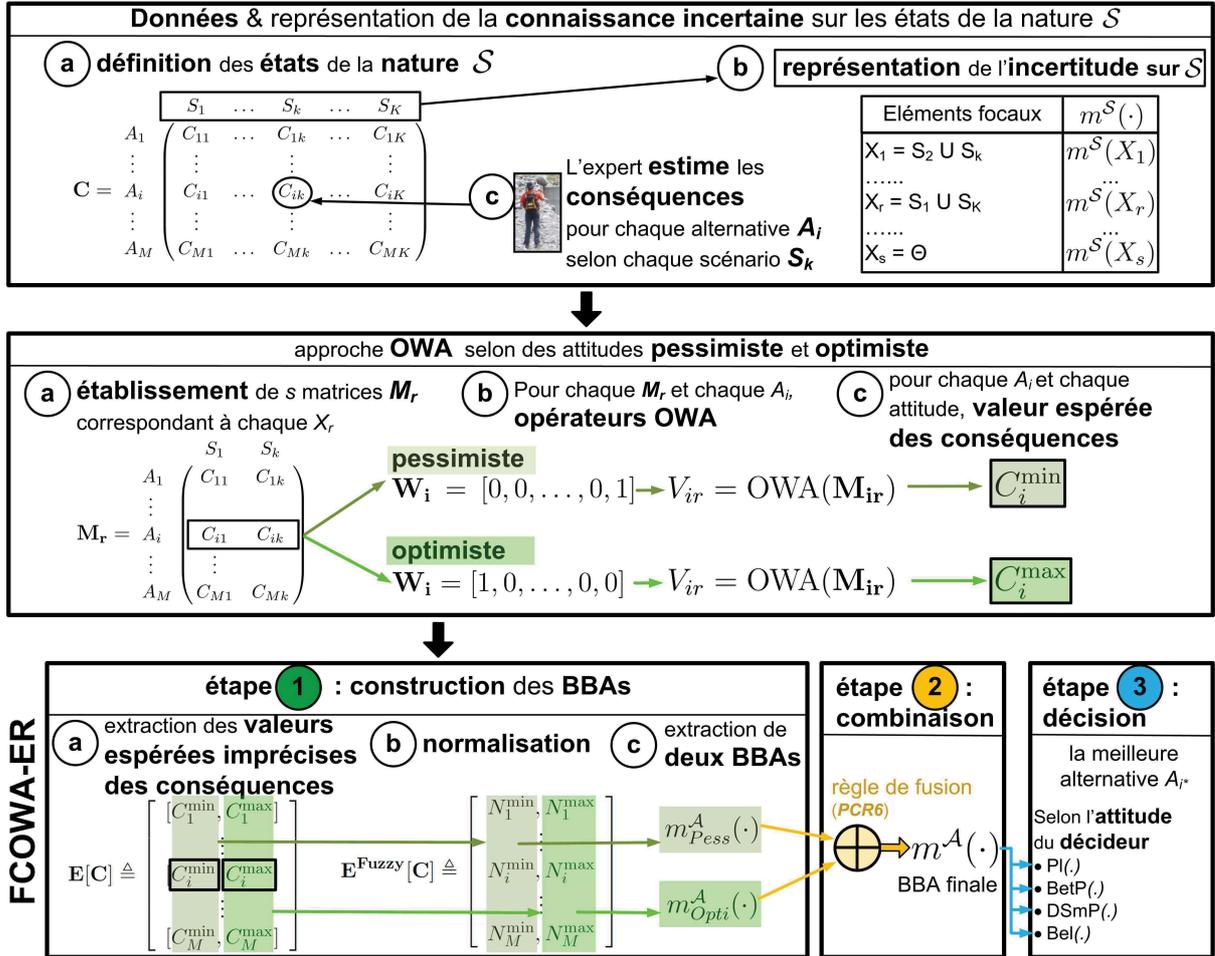


FIGURE 9 – Les étapes de la méthode FCOWA-ER pour une aide à la décision dans l'incertain.

F.5.1. Étapes de la méthode FCOWA-ER

F.5.1.1. Étape préalable commune avec COWA-ER

Étant donné l'ensemble $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_K\}$, la connaissance sur ces états de la nature est représentée par la BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$. La matrice C (p. 50) de l'évaluation des conséquences C_{ik} de chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, M$ selon chaque scénario S_k est supposée connue.

Les éléments focaux $X_r \in 2^{\mathcal{S}}$, $r = 1, \dots, s$ sont d'abord extraits. Pour chaque A_i , en ne considérant que les états de la nature $S_k \in X_r$, on a $M_{ir} \triangleq \{C_{ik} | S_k \in X_r\}$. Pour chaque A_i , s matrices $M_r = [M_{ir}]$, $r = 1, \dots, s$ sont établies.

La valeur $V_{ir} = \text{OWA}(M_{ir})$ (p. 96) est calculée pour chaque A_i selon :

- une attitude pessimiste selon le vecteur $\mathbf{W}_i^{\text{pes}} = [w_{i1}^{\text{pes}} = 0, \dots, w_{ik}^{\text{pes}} = 0, \dots, w_{iK}^{\text{pes}} = 1]$;
- une attitude optimiste selon le vecteur $\mathbf{W}_i^{\text{opt}} = [w_{i1}^{\text{opt}} = 1, \dots, w_{ik}^{\text{opt}} = 0, \dots, w_{iK}^{\text{opt}} = 0]$.

Pour chaque $A_i, i = 1, \dots, M$, l'équation (25) permet d'établir la valeur espérée généralisée des gains C_i^{min} pour l'attitude optimiste et C_i^{max} pour l'attitude pessimiste.

$$C_i = \sum_{r=1}^s m^S(X_r) V_{ir} \quad (25)$$

Le vecteur $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ de dimension M est ainsi établie.

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}] \triangleq \begin{bmatrix} [C_1^{\text{min}}, C_1^{\text{max}}] \\ \vdots \\ [C_i^{\text{min}}, C_i^{\text{max}}] \\ \vdots \\ [C_M^{\text{min}}, C_M^{\text{max}}] \end{bmatrix} \quad (26)$$

F.5.1.2. Étapes spécifiques à FCOWA-ER

◇ *FCOWA-ER-1* : normalisation à partir de la matrice de valeurs espérées imprécises $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$

Les éléments de $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ sont normalisés par la valeur maximale de la colonne à laquelle ils appartiennent. Les deux colonnes de la matrice $\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}]$ ci-dessous sont ainsi obtenues indépendamment : $N_i^{\text{min}} \in [0, 1]$ ($i = 1, \dots, M$) représente la valeur normalisée selon une attitude pessimiste, et $N_i^{\text{max}} \in [0, 1]$ représente la valeur normalisée selon une attitude optimiste.

$$\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}] \triangleq \begin{bmatrix} N_1^{\text{min}}, N_1^{\text{max}} \\ \vdots \\ N_i^{\text{min}}, N_i^{\text{max}} \\ \vdots \\ N_M^{\text{min}}, N_M^{\text{max}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Les vecteurs $\mu_1 = [N_1^{\text{min}}, \dots, N_M^{\text{min}}]$ and $\mu_2 = [N_1^{\text{max}}, \dots, N_M^{\text{max}}]$ sont considérés comme deux fonctions d'appartenance de deux ensembles flous selon $\mu : A_i \in \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$.

◇ *FCOWA-ER-2* : construction des BBAs

Soit le FoD $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, les deux fonctions μ_1 and μ_2 sont transformées en deux BBAs $m_{\text{Pess}}^{\mathcal{A}}(\cdot)$ et $m_{\text{Opti}}^{\mathcal{A}}(\cdot)$ selon l'approche par α -coupes (Florea et al. 2008). Plus précisément, pour un fonction $\mu(A_i), i = 1, \dots, M$, les niveaux α_d ($0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{d_{\text{max}}} \leq 1$), avec $d_{\text{max}} \leq |\mathcal{A}| = M$, sont utilisés pour construire la BBA correspondante $m^{\mathcal{A}}(\cdot)$. Pour simplifier, il est retenu $d_{\text{max}} = M$ définissant les éléments $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_M = 1$ comme ceux permettant d'obtenir la BBA à partir de $\mu(A_i)$ selon l'équation (28), $B_d, d = 1, \dots, M$, étant un élément focal.

$$\begin{cases} B_d = \{A_i \in \mathcal{A} | \mu(A_i) \geq \alpha_d\} \\ m^{\mathcal{A}}(B_d) = \frac{\alpha_d - \alpha_{d-1}}{\alpha_M} \end{cases} \quad (28)$$

◇ *FCOWA-ER-3* : combinaison des BBAs

Les deux BBAs $m_{\text{Pess}}^A(\cdot)$ et $m_{\text{Opti}}^A(\cdot)$ sont combinées par une règle de fusion, comme la PCR6, pour obtenir la BBA $m_{\text{PCR6}}^A(\cdot)$.

◇ *FCOWA-ER-4* : décision

Le problème de décision final est de choisir A_{i^*} in \mathcal{A} . Une règle de décision doit alors être choisie parmi les équations (II.37-II.39) (p. 91) selon l'attitude du décideur à représenter.

F.5.2. Exemple simplifié d'application de FCOWA-ER

Le problème consiste à comparer cinq alternatives $A_i \in \mathcal{A}$ ($M = 5$). Sept scénarios $S_k \in \mathcal{S}$ ($K = 7$) sont retenus. Les conséquences C_{ik} sont évaluées selon une note de 1 à 10. Le sens de préférence est croissant : plus la note de la conséquence est élevée, plus l'alternative est préférée.

La matrice de conséquences \mathbf{C} est donnée par :

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 5 & 3 & 4 & 2 & 3 & 1 & 1 \\ 7 & 4 & 6 & 3 & 4 & 2 & 1 \\ 8 & 5 & 7 & 4 & 5 & 3 & 1 \\ 10 & 7 & 10 & 6 & 7 & 5 & 2 \\ 10 & 9 & 10 & 9 & 10 & 10 & 4 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (29)$$

La connaissance sur les états de la nature est représentée par la BBA $m^{\mathcal{S}}(\cdot)$ avec :

$$m^{\mathcal{S}}(X_1) = m^{\mathcal{S}}(S_1 \cup S_3 \cup S_5) = 0.6$$

$$m^{\mathcal{S}}(X_2) = m^{\mathcal{S}}(S_2 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_6) = 0.2$$

$$m^{\mathcal{S}}(X_3) = m^{\mathcal{S}}(S_7) = 0.01$$

$$m^{\mathcal{S}}(X_4) = m^{\mathcal{S}}(S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_6 \cup S_7) = 0.19$$

On considère donc $r = 4$ éléments focaux $X_s \in 2^{\mathcal{S}}$: X_1 et X_2 représentent l'ignorance partielle et X_4 représente l'ignorance totale.

F.5.2.1. Étape préalable commune avec COWA-ER

Pour chaque X_r , $r = 1, \dots, s = 4$, une sous-matrice \mathbf{M}_r est d'abord établie. Les quatre sous-matrices correspondantes sont données ci-dessous.

$$\mathbf{M}_1 = \begin{matrix} & S_1 & S_3 & S_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 5 & 4 & 3 \\ 7 & 6 & 4 \\ 8 & 7 & 5 \\ 10 & 10 & 7 \\ 10 & 10 & 10 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{matrix} & S_2 & S_4 & S_5 & S_6 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 3 & 2 & 3 & 1 \\ 4 & 3 & 4 & 2 \\ 5 & 4 & 5 & 3 \\ 7 & 6 & 7 & 5 \\ 9 & 9 & 10 & 10 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{matrix} & S_7 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{M}_4 = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \\ A_1 & \begin{pmatrix} 5 & 3 & 4 & 2 & 3 & 1 & 1 \\ 7 & 4 & 6 & 3 & 4 & 2 & 1 \\ 8 & 5 & 7 & 4 & 5 & 3 & 1 \\ 10 & 7 & 10 & 6 & 7 & 5 & 2 \\ 10 & 9 & 10 & 9 & 10 & 10 & 4 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (33)$$

• L'opérateur OWA d'une attitude pessimiste est appliqué à chaque ligne des matrices \mathbf{M}_r , $r = 1, 2, 3, 4$. On obtient les quatre vecteurs colonnes V_1 , V_2 , V_3 et V_4 ci-dessous. Par exemple, pour chaque ligne de V_1 , la valeur V_{i1} est la valeur minimale de la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice \mathbf{M}_1 .

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \\ 5 \\ 7 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \\ 9 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{V}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\mathbf{V}_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} \quad (37)$$

• La même approche est appliquée en utilisant l'opérateur OWA d'une attitude optimiste. Dans ce cas, pour chaque ligne de V_1 , la valeur V_{i1} est la valeur maximale de la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice \mathbf{M}_1 .

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \\ 8 \\ 10 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \\ 5 \\ 7 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{V}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\mathbf{V}_4 = \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \\ 8 \\ 10 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (41)$$

• L'application de l'équation (25) pour $i = 1, 2, 3, 4, 5$ pour une attitude pessimiste permet d'obtenir les valeurs espérées généralisées de la colonne à gauche de la matrice $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$ (équation (42)). Cette même application pour une attitude optimiste permet d'obtenir les valeurs espérées généralisées de la colonne à gauche de cette matrice $\mathbf{E}[\mathbf{C}]$.

Par exemple, pour l'alternative A_1 :

— la valeur de gauche C_1^{\min} est donnée par :

$$C_1^{\min} = 3 \cdot m^S(X_1) + 1 \cdot m^S(X_2) + 1 \cdot m^S(X_3) + 1 \cdot m^S(X_4) = 3 \times 0.6 + 0.2 + 0.01 + 0.19 = 2.20;$$

— la valeur de droite C_1^{\max} est donnée par :

$$C_1^{\max} = 5 \cdot m^S(X_1) + 3 \cdot m^S(X_2) + 1 \cdot m^S(X_3) + 5 \cdot m^S(X_4) = 5 \times 0.6 + 3 \times 0.2 + 0.01 + 5 \times 0.19 = 4.55;$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} [2.20; 4.55] \\ [2.99; 6.33] \\ [3.79; 7.32] \\ [5.58; 9.30] \\ [8.56; 9.90] \end{bmatrix} \quad (42)$$

F.5.2.2. Étapes spécifiques à FCOWA-ER

◇ *FCOWA-ER-1* :

La matrice imprécise normalisée $\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}]$ de l'équation (43) est obtenue.

$$\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} [0.26; 0.46] \\ [0.35; 0.64] \\ [0.44; 0.74] \\ [0.65; 0.94] \\ [1.00; 1.00] \end{bmatrix} \quad (43)$$

◇ *FCOWA-ER-2* : En utilisant une approche d' α -coupes à $M = 5$ niveaux, la matrice $\mathbf{E}^{\text{Fuzzy}}[\mathbf{C}]$ est convertie en deux BBAs $m_{\text{Pess}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$ and $m_{\text{Opti}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$ du tableau 25.

◇ *FCOWA-ER-3* : Les deux BBAs $m_{\text{Pess}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$ and $m_{\text{Opti}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$ sont combinées selon la règle de fusion PCR6 pour fournir la BBA finale $m^{\mathbf{A}}(\cdot)$ dans le tableau 26.

éléments focaux	$m_{\text{Pess}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$	$m_{\text{Opti}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$	$m^{\mathbf{A}}(\cdot)$
A_5	0.35	0.06	0.3895
$A_4 \cup A_5$	0.21	0.20	0.2847
$A_3 \cup A_4 \cup A_5$	0.09	0.10	0.1033
$A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5$	0.09	0.18	0.1051
$A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5$	0.26	0.46	0.1174

TABLE 25 – FCOWA-ER-2 et 3 : combinaison des deux BBAs $m_{\text{Pess}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$ et $m_{\text{Opti}}^{\mathbf{A}}(\cdot)$ selon la règle de fusion PCR6.

◇ *FCOWA-ER-4* :

Selon les différentes règles de décision (p. 91), les valeurs approximatives sont établies dans le tableau 26 pour $\text{Bel}(\cdot)$, $\text{BetP}(\cdot)$, $\text{DSmP}_{\epsilon=10^{-6}}(\cdot)$ et $\text{Pl}(\cdot)$ à partir de $m^{\mathbf{A}}(\cdot)$. La meilleure alternative A_{i^*} sera celle dont la valeur est maximale selon chacune de ces règles.

A_i	$\text{Bel}^{\mathbf{A}}(A_i)$	$\text{BetP}^{\mathbf{A}}(A_i)$	$\text{DSmP}^{\mathbf{A}}(A_i)_{\epsilon=10^{-6}}$	$\text{Pl}^{\mathbf{A}}(A_i)$
A_1	0	0.023	0	0.117
A_2	0	0.050	0	0.222
A_3	0	0.084	0	0.326
A_4	0	0.227	0	0.611
A_5	0.389	0.616	1	1

TABLE 26 – FCOWA-ER-4 : crédibilité, BetP, $\text{DSmP}_{\epsilon=10^{-6}}$, et plausibilité des conséquences pour chaque alternative A_i , $i = 1, \dots, 5$.

Dans cet exemple, quelle que soit la règle de décision choisie, l'alternative $A_{i^*} = A_5$ est la meilleure.

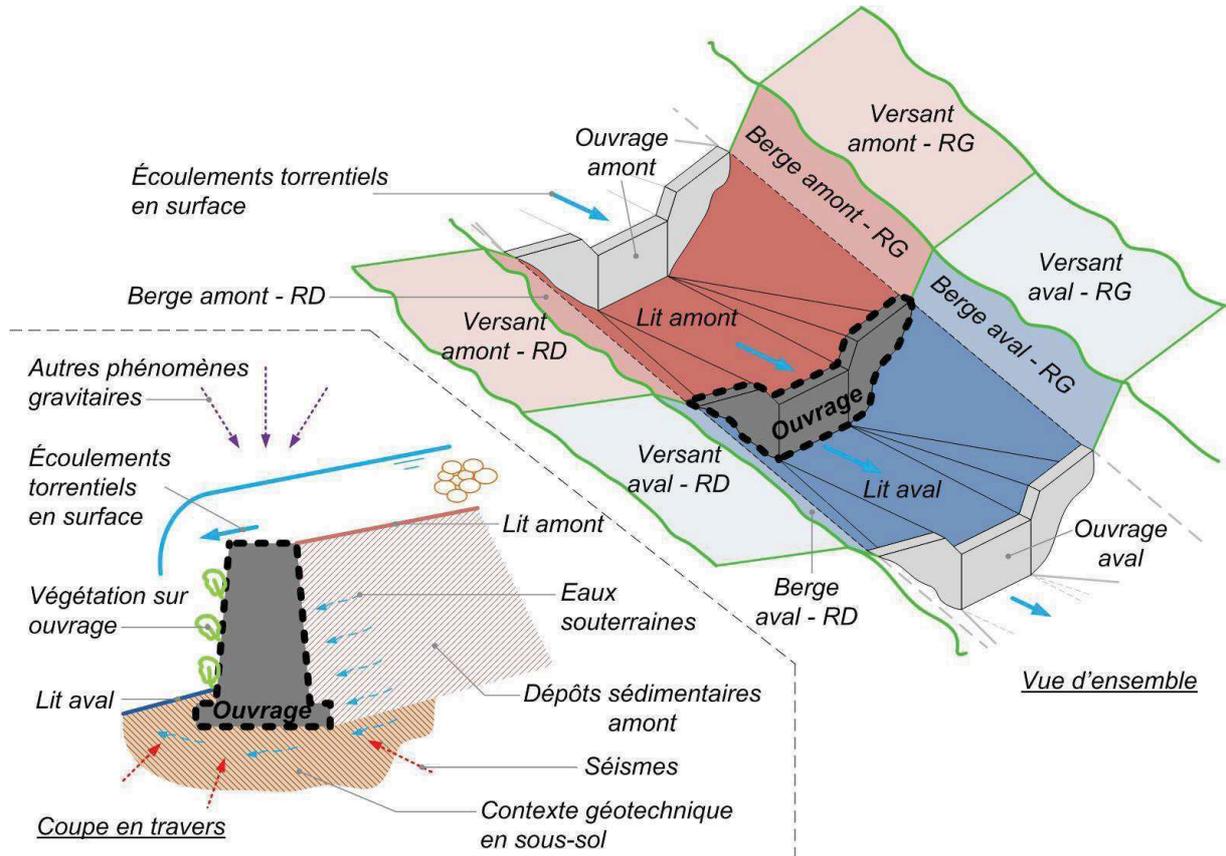
Annexe G : Analyse fonctionnelle des ouvrages et dispositifs de consolidation/stabilisation torrentielle

Analyse fonctionnelle externe d'un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle

Etape 1 : Définition du système étudié dans son environnement

Système étudié : un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle est composé de la structure de génie civil hors du sol et de sa semelle de fondation.

Les fondations (sol d'assise) ne sont pas prises en compte car intégrées comme élément extérieur (contexte géotechnique en sous-sol) dans les calculs de stabilité.



AFE – Situation du système « ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle » dans son environnement

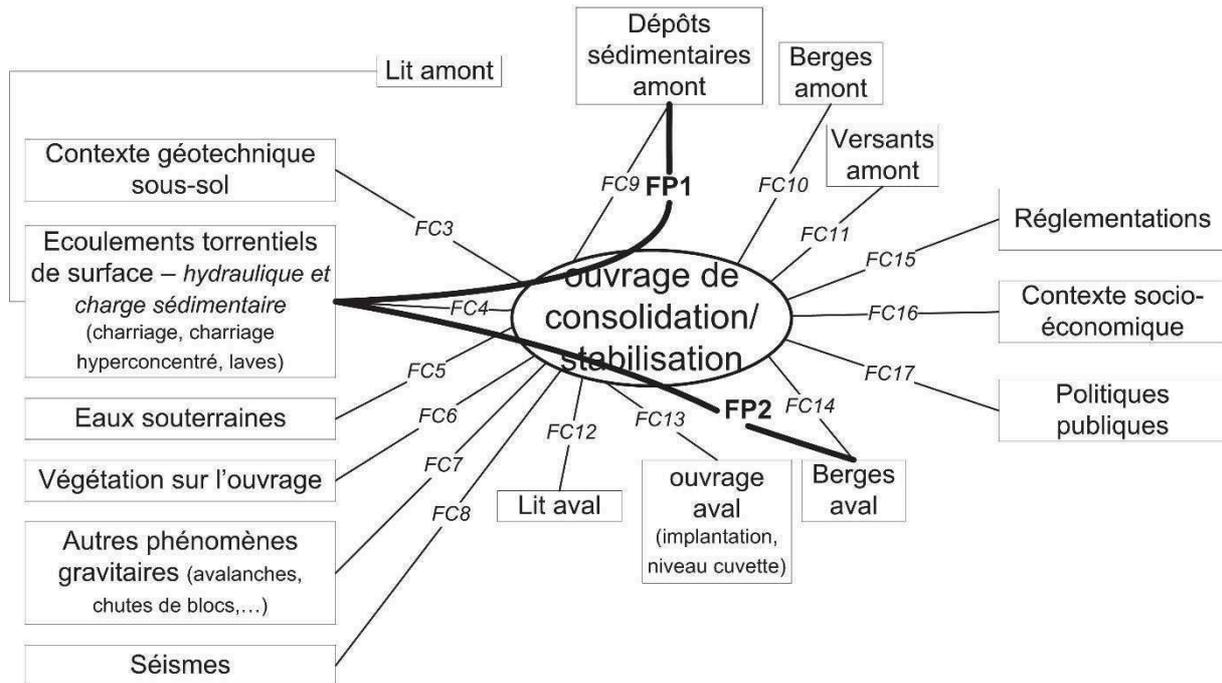
Etape 2 : Bloc diagramme Fonctionnel du système global

Objectif : Matérialiser les interactions entre le système et son environnement.

Les relations de contact sont matérialisées par des segments droits et celles de flux par des arcs. Elles représentent l'ensemble des Fonctions de service assumées par le système.

Les fonctions principales (FP) sont les fonctions essentielles pour lesquelles le système a été conçu.

Les fonctions techniques résultent de la réaction du système face aux contraintes imposées par les milieux extérieurs et sont également appelées Fonctions de contraintes (FC).



AFE - Diagramme pieuvre pour un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle (méthode APTE)

Etape 3 : Tableau des fonctions de service

Objectif : Définir les fonctions principales et de contraintes que le système « ouvrage » doit assumer.

Fonctions principales (FP)	FP1 : Modifier les écoulements torrentiels pour dépôt sédimentaire amont FP2 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant du lit amont sans impacter les berges latérales aval
Fonctions contraintes (FC)	FC3 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol FC4 : Résister aux écoulements torrentiels de surface FC5 : Tenir compte des eaux souterraines FC6 : Résister à la végétation sur l'ouvrage FC7 : Résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.) FC8 : Résister aux séismes FC9 : Résister aux charges exercées par les dépôts sédimentaires amont FC10a : a) Résister aux charges exercées par les berges amont (au niveau de l'ouvrage) et b) s'ancrer dans les berges amont (au niveau de l'ouvrage) FC11 : Résister aux charges dues au versant amont FC12 : Se fonder sur le lit aval FC13 : Tenir compte du positionnement de l'ouvrage aval en orientation et en fondation FC14 : S'appuyer sur les berges aval FC15 : Tenir compte des réglementations techniques et administratives FC16 : Tenir compte du contexte socio-économique FC17 : Tenir compte des politiques publiques

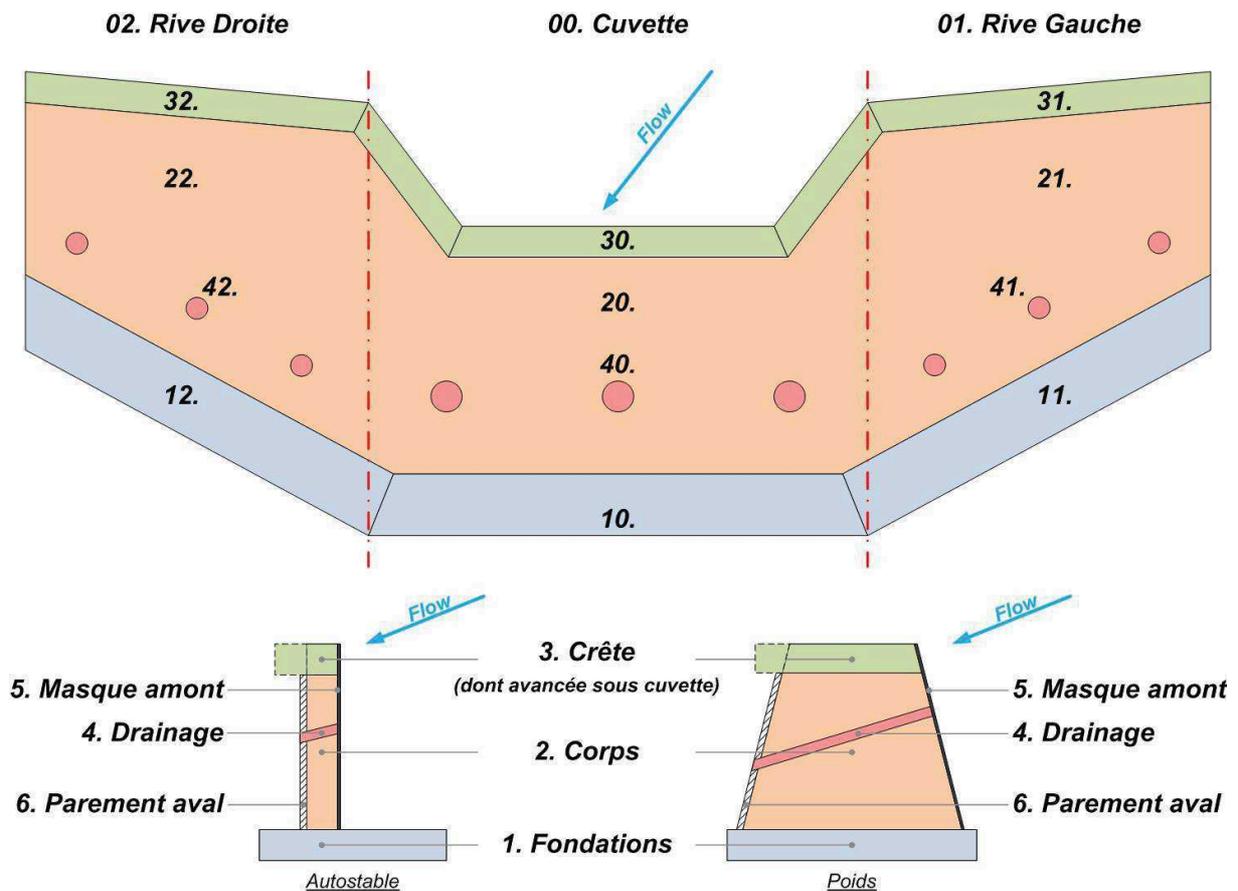
AFE - Tableau des fonctions de service pour un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle

Analyse fonctionnelle interne d'un ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle

On souhaite connaître les défaillances à l'échelle de l'ouvrage. L'analyse fonctionnelle se focalise donc sur la fonction du système dans son environnement.

Etape 1 : Analyse structurelle

Objectif : Lister la liste des composants constitutifs de l'ouvrage et de repérer leur position physique.



AFI

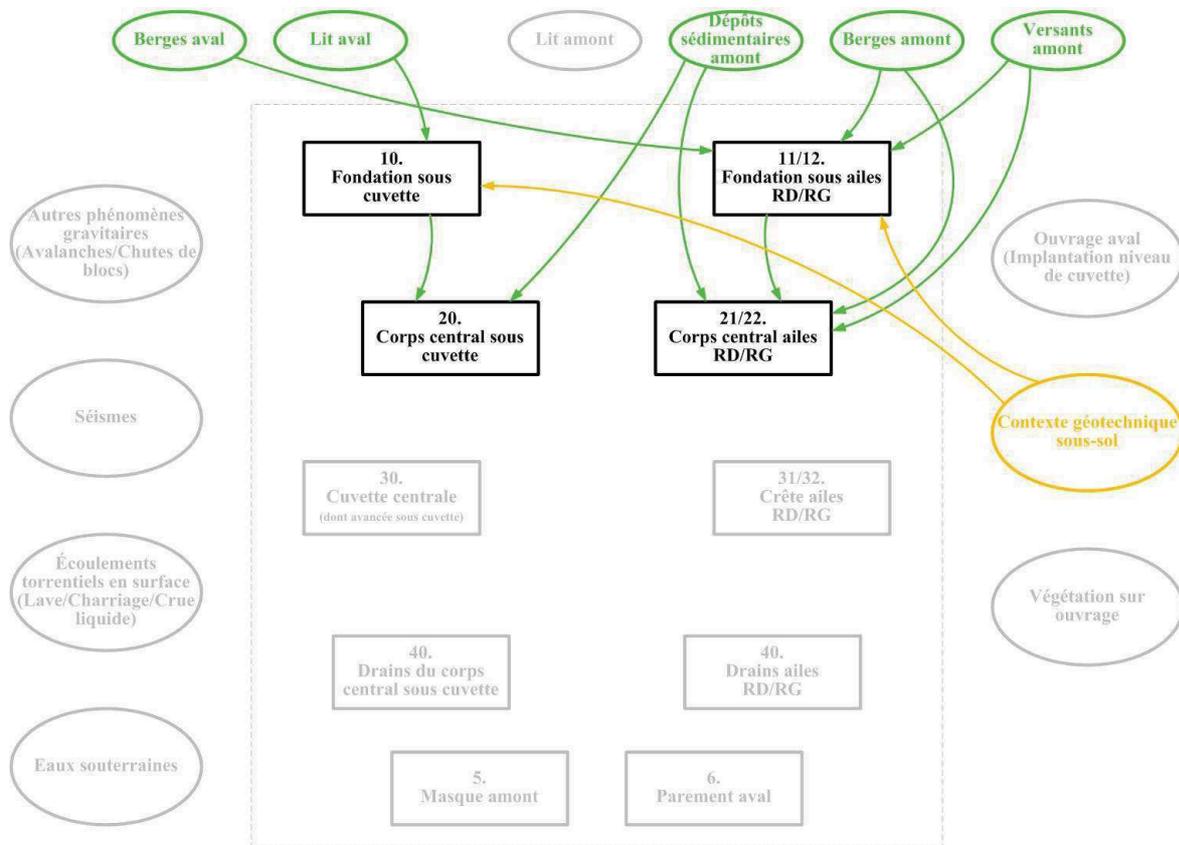
Analyse structurelle du système « ouvrage de consolidation/stabilisation torrentielle »
de type autostable ou poids

Etape 2 : Blocs diagrammes Fonctionnels

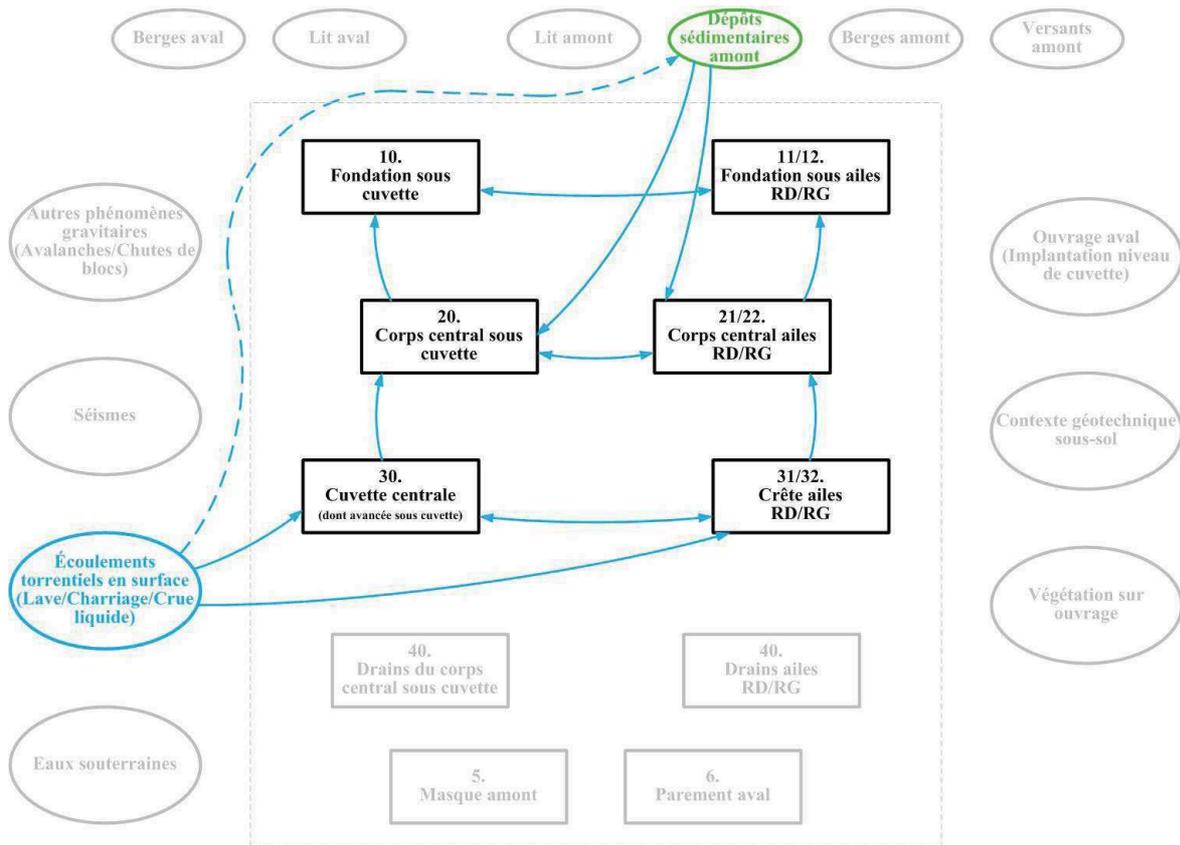
Objectif : Etablir l'interaction entre les composants et avec les milieux extérieurs.

Les interactions proposées sont les suivantes :

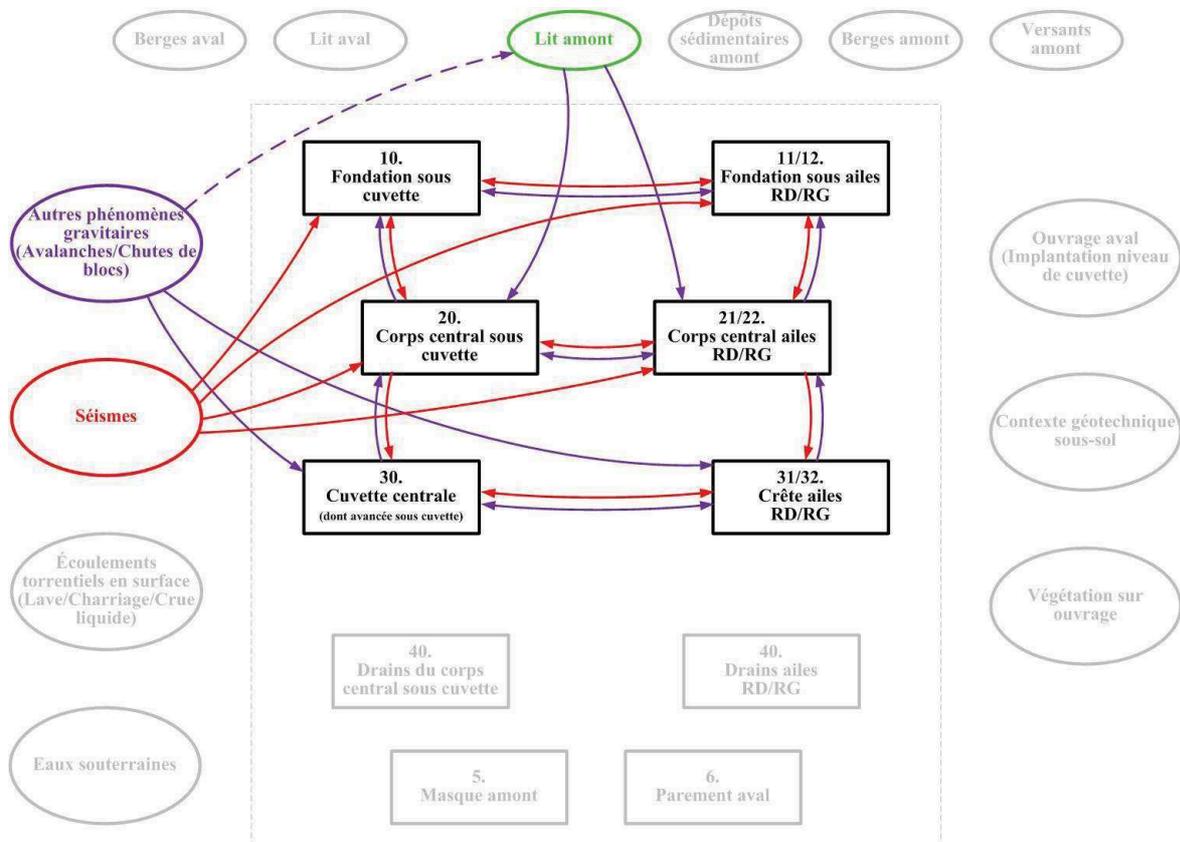
- Contacts mécaniques :
 - o Avec transfert de charges géotechniques
 - o Avec transfert de charges hydrauliques
 - o Avec transfert de charges dus à d'autres phénomènes que le torrentiel
 - o Avec végétation
- Transferts de flux :
 - o hydrauliques
 - o sédimentaires



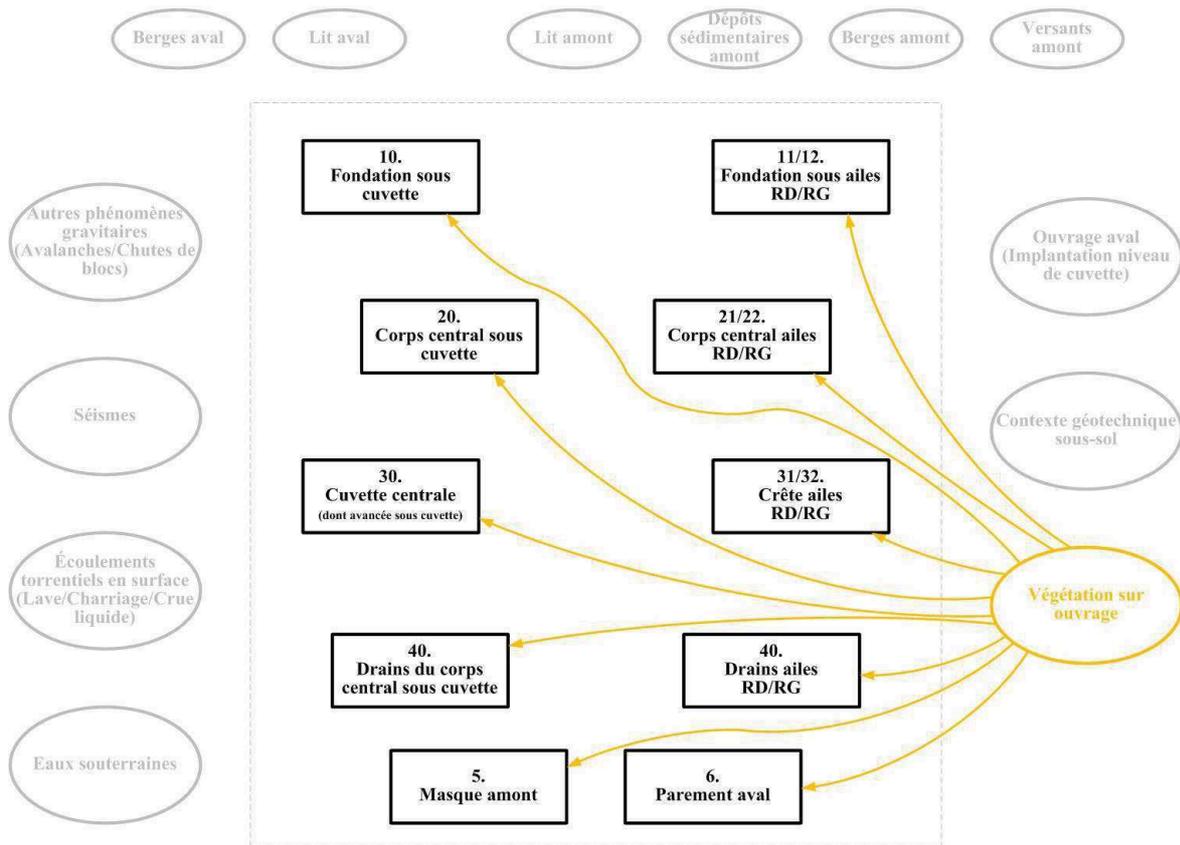
Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de charges mécaniques géotechniques



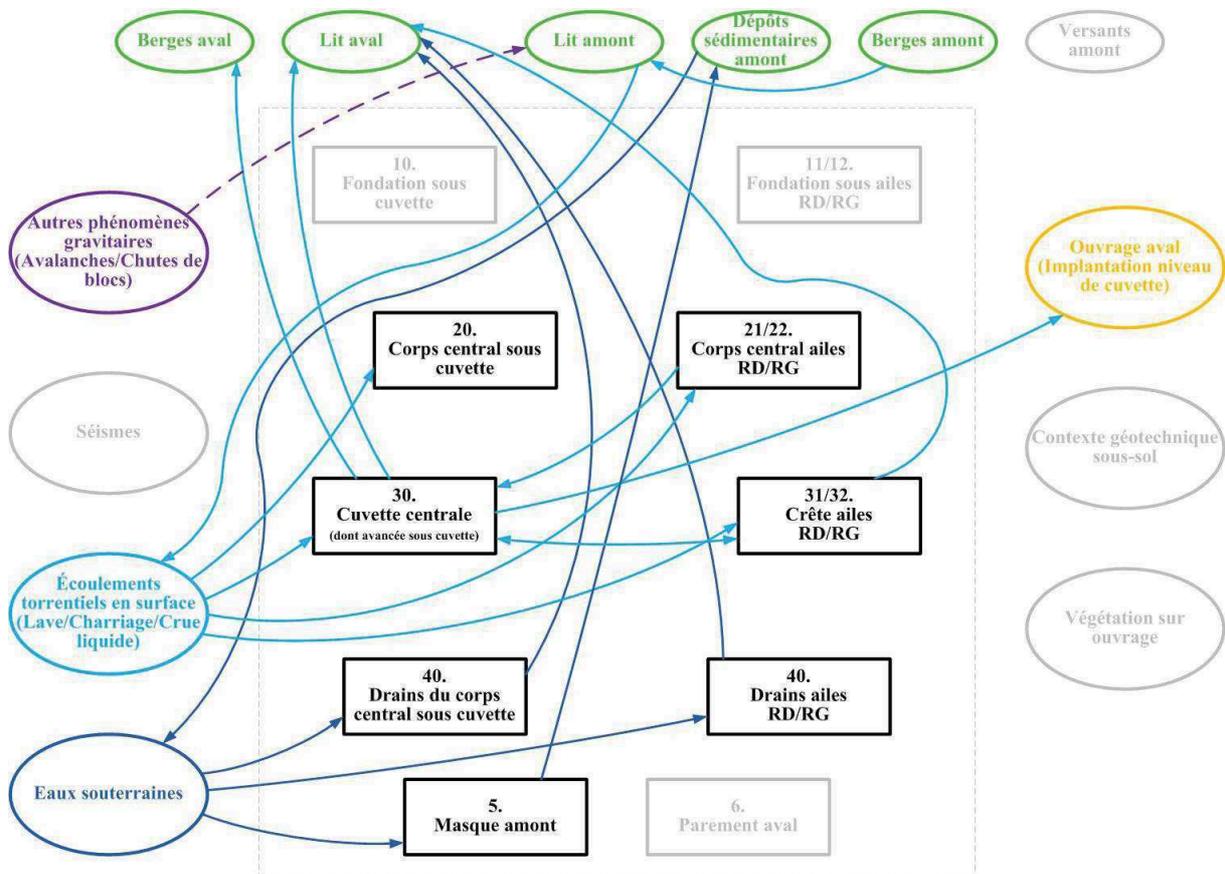
Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de charges mécaniques hydrauliques



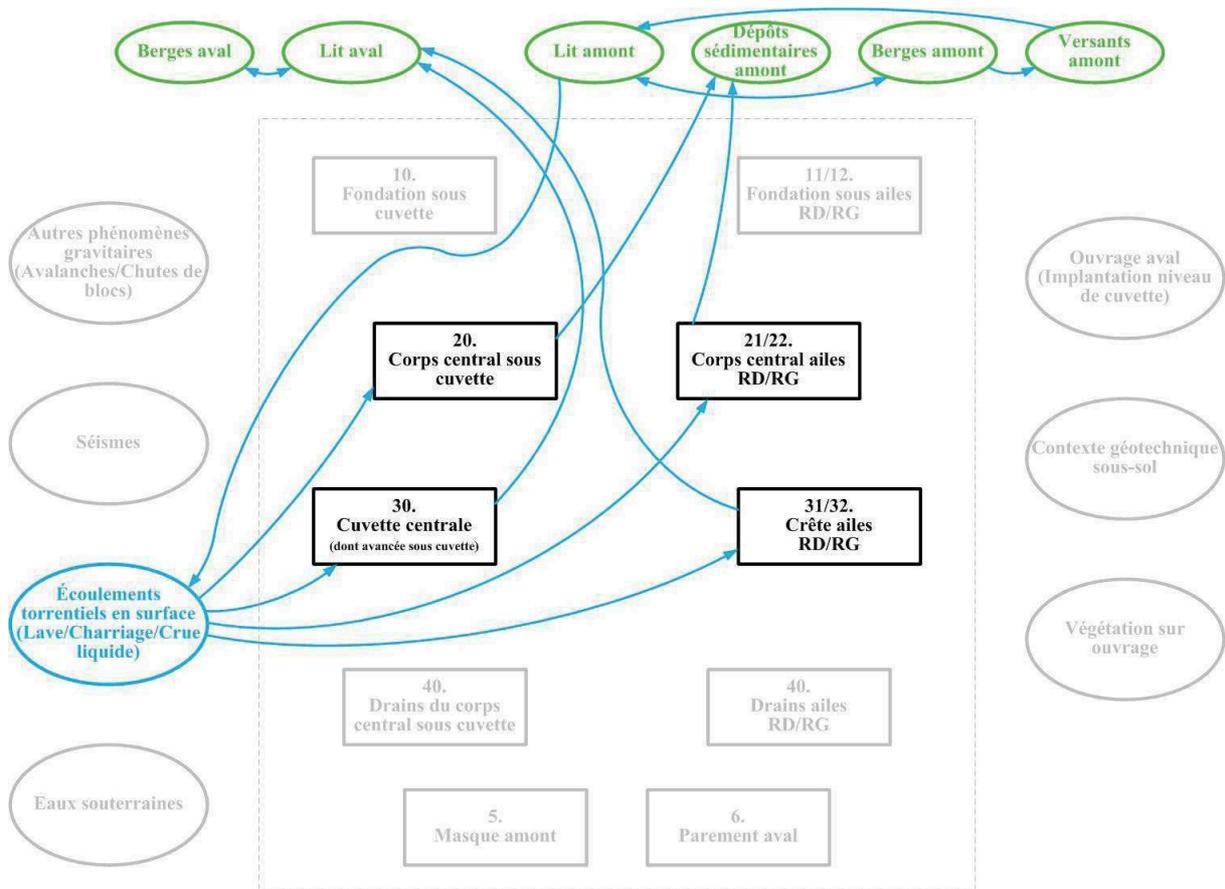
Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de charges mécaniques dues à d'autres phénomènes que le torrentiel



Bloc diagramme fonctionnel relatif aux sollicitations liées à la présence de végétation



Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de flux hydrauliques (souterrains et de surface)



Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de flux sédimentaires

Etape 3 : Tableau d'analyse fonctionnelle

Objectif : Préciser les Fonctions de Conception (ou Techniques) FT accomplies par chaque composant de l'ouvrage, permettant de répondre aux Fonctions Principales (FP) et de Contraintes (FC) auxquelles doit répondre l'ouvrage selon l'AFE.

Composant	Fonctions de conception (FT)
10. Fondation sous cuvette	<p>1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques FT1.1 : Résister en stabilité externe en tenant compte du contexte géotechnique en sous-sol (FC3) FT1.2 : S'appuyer sur le niveau topographique du lit aval (FC12)</p> <p>2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques (FC4) FT2.1 : Résister aux charges du corps central sous cuvette surchargé des écoulements torrentiels FT2.2 : Résister aux sollicitations par les fondations sous les ailes surchargées des écoulements torrentiels</p> <p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6) FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation présente</p> <p>4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles FT4.1 : Résister aux séismes (FC8) FT4.2 : Résister aux transferts de charges sismiques par le corps central sous cuvette (FC8) FT4.3 : Résister aux transferts de charges sismiques par les fondations sous les ailes (FC8) FT4.4 : Résister aux charges du corps central sous cuvette surchargé par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7) FT4.5 : Résister aux sollicitations par les fondations sous les ailes surchargées des écoulements dus à d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7)</p>

11/12. Fondation sous ailes
RG/RD

1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques

FT1.1 : Résister en stabilité externe en tenant compte du contexte géotechnique en sous-sol (*FC6*)

FT1.2 : Résister aux charges exercées par les berges amont (*FC10a*)

FT1.3 : S'ancrer dans les berges amont (au niveau de l'ouvrage) (*FC10b*)

FT1.4 : Résister aux surcharges ou mouvements généraux (glissement) des versants amont (*FC11*)

FT1.5 : S'appuyer sur les berges aval (*FC14*)

2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques (*FC4*)

FT2.1 : Résister aux charges du corps central des ailes surchargé des écoulements torrentiels

FT2.2 : Résister aux sollicitations par les fondations sous la cuvette surchargées des écoulements torrentiels

3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (*FC6*)

FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation présente

4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles

FT4.1 : Résister aux séismes (*FC8*)

FT4.2 : Résister aux transferts de charges sismiques par le corps central sous l'aile (*FC8*)

FT4.3 : Résister aux transferts de charges sismiques par la fondation sous la cuvette (*FC8*)

FT4.4 : Résister aux charges du corps central sous l'aile surchargé par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (*FC7*)

FT4.5 : Résister aux sollicitations par les fondations sous les ailes surchargées des écoulements dus à d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (*FC7*)

<p>20. Corps central sous cuvette</p>	<p>1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques FT1.1 : Résister en s'appuyant sur la fondation sous cuvette (FC3) FT1.2 : Résister aux charges géotechniques des dépôts sédimentaires amont (FC9)</p> <p>2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques (FC4) FT2.1 : Résister aux charges des dépôts sédimentaires amont surchargées des écoulements torrentiels FT2.2 : Résister aux charges de la cuvette centrale surchargée des écoulements torrentiels FT2.3 : Résister aux sollicitations par les corps centraux des ailes surchargés des écoulements torrentiels</p> <p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6) FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation présente</p> <p>4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles FT4.1 : Résister aux séismes (FC8) FT4.2 : Résister aux transferts de charges sismiques par la fondation sous cuvette (FC8) FT4.3 : Résister aux transferts de charges sismiques par les corps centraux des ailes (FC8) FT4.4 : Résister aux charges de la cuvette surchargée par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7) FT4.5 : Résister aux sollicitations par les corps centraux des ailes surchargées des écoulements dus à d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7)</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Stopper les charges sédimentaires provenant du lit amont pour former un dépôt sédimentaire amont, à partir du niveau de la cuvette (FPI)</p>
---------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

21/22. Corps central ailes
RG/RD

1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques

FT1.1 : Résister en s'appuyant sur la fondation sous l'aile (FC3)

FT1.2 : Résister aux charges géotechniques des dépôts sédimentaires amont (FC9)

FT1.3 : Résister aux charges exercées par les berges amont (FC10a)

FT1.4 : S'ancrer dans les berges amont (au niveau de l'ouvrage) (FC10b)

FT1.5 : Résister aux surcharges ou mouvements généraux (glissement) des versants amont (FC11)

FT1.6 : S'appuyer sur les berges aval (FC14)

2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques (FC4)

FT2.1 : Résister aux charges des dépôts sédimentaires amont surchargées des écoulements torrentiels

FT2.2 : Résister aux charges de la crête des ailes surchargée des écoulements torrentiels

FT2.3 : Résister aux sollicitations par le corps de la cuvette surchargées des écoulements torrentiels

3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6)

FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation présente

4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles

FT4.1 : Résister aux séismes (FC8)

FT4.2 : Résister aux transferts de charges sismiques par la fondation sous l'aile RG/RD (FC8)

FT4.3 : Résister aux transferts de charges sismiques par le corps central sous cuvette (FC8)

FT4.4 : Résister aux charges de la crête de l'aile RG/RD surchargée par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7)

FT4.5 : Résister aux sollicitations par le corps central sous cuvette surchargé des écoulements dus à d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7)

5-6. Transférer les flux hydrauliques (FP 2)

FT5-6.1 : Recentrer les écoulements torrentiels de surface provenant du lit amont vers la cuvette

7. Gérer les flux sédimentaires (FPI)

FT7.1 : Stopper les charges sédimentaires provenant du lit amont pour former un dépôt sédimentaire amont, à partir du niveau de crête des ailes RG/RD

<p>30. Cuvette centrale (dont avancée sous cuvette)</p>	<p>2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques (FC4) FT2.1 : Résister aux écoulements torrentiels fréquents (abrasion) FT2.2 : Résister aux écoulements torrentiels en crue (abrasion et impacts) FT2.3 : Résister aux sollicitations par les crêtes des ailes surchargées des écoulements torrentiels</p> <p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6) FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation présente</p> <p>4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles FT4.1 : Résister aux transferts de charges sismiques par le corps central sous cuvette (FC8) FT4.2 : Résister aux transferts de charges sismiques par les crêtes des ailes (FC8) FT4.3 : Résister aux charges des écoulements dus à d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7) FT4.4 : Résister au transfert des charges des crêtes des ailes surchargées par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7)</p> <p>5-6. Transférer les flux hydrauliques (FP2) FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements de surface provenant du lit amont vers le lit aval FT5-6.2 : Orienter les écoulements de surface provenant du lit amont vers la cuvette de l'ouvrage situé à l'aval, sans impacter les berges aval (FC13)</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires (FP1) FT7.1 : Faire transiter vers le lit aval les charges sédimentaires présentes dans le flux hydraulique provenant du lit amont.</p>
---------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

31/32. Crête ailes RG/RD

1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques (FC4)

FT1.1 : Résister aux écoulements torrentiels en crue (impacts)

FT1.2 : Résister aux sollicitations par la cuvette centrale surchargée des écoulements torrentiels

3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6)

FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation présente

4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles

FT4.1 : Résister aux transferts de charges sismiques par le corps central sous l'aile RG/RD (FC8)

FT4.2 : Résister aux transferts de charges sismiques par la cuvette centrale (FC8)

FT4.3 : Résister aux charges des écoulements dus à d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7)

FT4.4 : Résister au transfert des charges de la cuvette surchargée par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) (FC7)

5-6. Transférer les flux hydrauliques (FP2)

FT5-6.1 : Orienter les écoulements de surface provenant du lit amont vers la cuvette centrale

FT5-6.1 : Faire transiter *en cas de crue* les écoulements de surface provenant du lit amont vers la cuvette centrale

7. Gérer les flux sédimentaires (FP1)

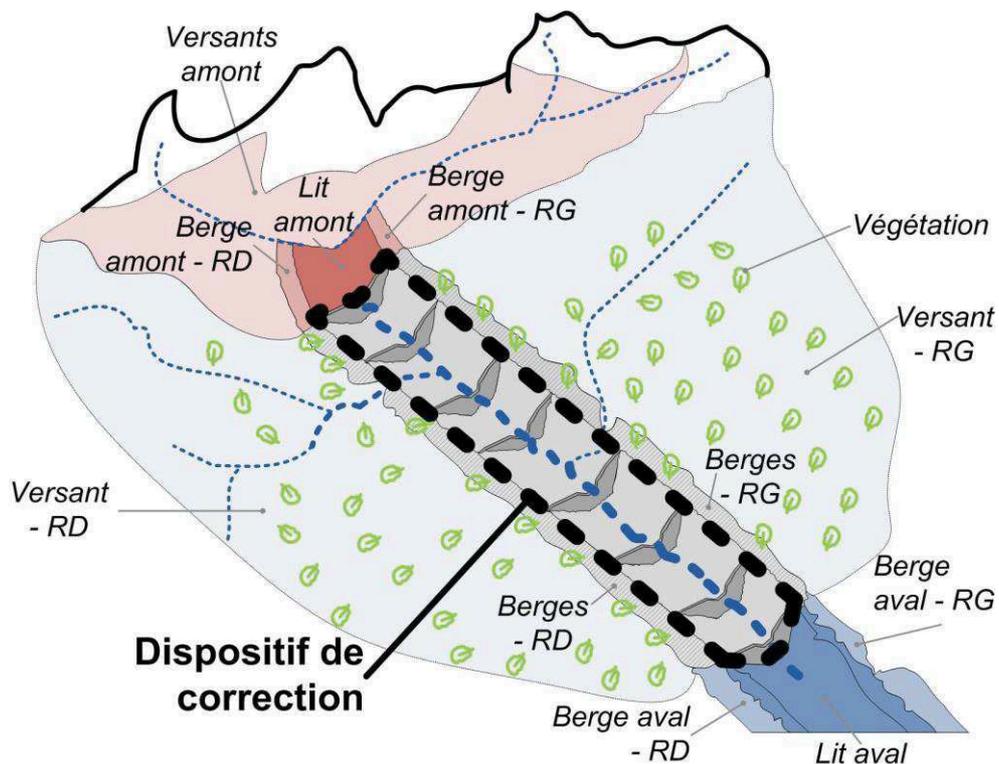
FT7.1 : Faire transiter *en cas de crue* vers le lit aval les charges sédimentaires présentes dans le flux hydraulique provenant du lit amont.

40. Drain corps central	<p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6) FT3.1 : Résister au bouchage par la végétation</p> <p>5. Transférer les flux hydrauliques (FC5) FT5.1 : Transférer les eaux souterraines présentes dans le dépôt sédimentaire amont, provenant du lit amont ou du fait d'un masque amont, vers le lit aval</p>
41/42. Drain ailes RG/RD	<p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6) FT3.1 : Résister au bouchage par la végétation</p> <p>5. Transférer les flux hydrauliques (FC5) FT5.1 : Transférer les eaux souterraines présentes dans le dépôt sédimentaire amont, provenant du lit amont ou du fait d'un masque amont, vers le lit aval</p>
5. Masque amont	<p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6) FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation</p> <p>5-6. Transférer les flux hydrauliques (FC5) FT5-6.1 : Eviter le transfert d'eaux souterraines présentes dans le dépôt sédimentaire dans le corps de l'ouvrage</p>
6. Parement aval	<p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation (FC6) FT3.1 : Résister aux sollicitations mécaniques de la végétation</p> <p>8. Tenir compte des réglementations techniques et administratives (FC15) FT8.1 : Respecter les règles d'intégration paysagère</p>

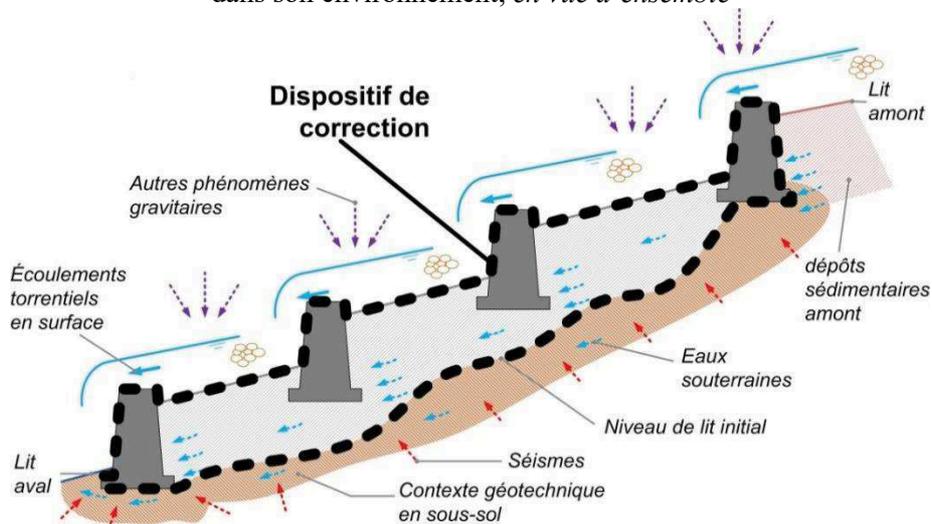
Analyse fonctionnelle externe d'un dispositif de consolidation/stabilisation selon les différentes fonctions détaillées

Etape 1 : Définition du système étudié dans son environnement

Système étudié : un dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle est composé d'une succession d'ouvrages de correction avec, entre chaque ouvrage, un tronçon composé des dépôts sédimentaires entre chaque ouvrage créés artificiellement du fait de la présence des ouvrages. Ces dépôts permettent la création d'un lit d'écoulement « artificiel » entre les ouvrages. On considère le lit « initial », potentiellement affouillable, comme un élément extérieur au système.



AFE – Situation du système « dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle » dans son environnement, *en vue d'ensemble*



AFE – Situation du système « dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle » dans son environnement, *en coupe selon le profil en long*

Fonctions potentielles des dispositifs

Après analyse historique, les différentes fonctions potentielles assurées par les dispositifs de consolidation/stabilisation existant ont été établies :

- Stabilisation
- Consolidation : de mouvements latéraux au dispositif ou de pied de versant situé à l'amont
- Réduction de pente entraînant la réduction d'énergie de l'écoulement
- Rétention
- Régulation du Transport Solide

Etant donné ces objectifs différents, mais non exclusifs, une AFE est proposée pour chacune de ces fonctions.

Les deux étapes suivantes sont donc réalisées pour chacune des fonctions potentielles des dispositifs citées ci-dessus.

Etape 2 : Bloc diagramme Fonctionnel du système global

Objectif : Matérialiser les interactions entre le système et son environnement.

Les relations de contact sont matérialisées par des segments droits et celles de flux par des arcs. Elles représentent l'ensemble des Fonctions de service assumées par le système.

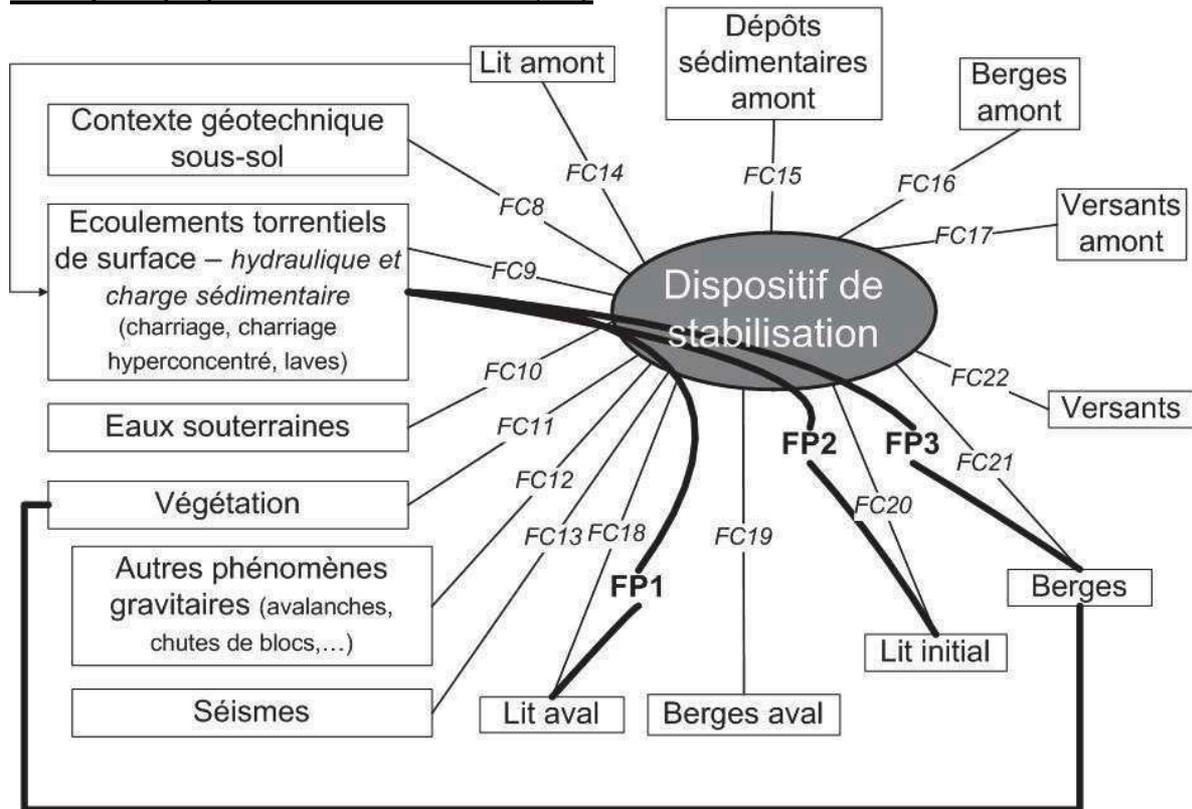
Les fonctions principales (FP) sont les fonctions essentielles pour lesquelles le système a été conçu.

Les fonctions techniques résultent de la réaction du système face aux contraintes imposées par les milieux extérieurs et sont également appelées Fonctions de contraintes (FC).

Etape 3 : Tableau des fonctions de service

Objectif : Définir les fonctions principales et de contraintes que le système « ouvrage » doit assumer.

A/ Dispositif à fonction de stabilisation (ST)



AFE - Diagramme pieuvre pour un dispositif à fonction de stabilisation

Fonctions principales (FP)	<p>FP1 : Faire transiter les écoulements torrentiels vers le lit à l'aval du dispositif</p> <p>FP2 : Gérer les écoulements torrentiels pour stabiliser le profil en long du lit initial</p> <p>FP3 : Orienter les écoulements torrentiels pour limiter les érosions latérales de berge et permettre l'implantation/le maintien de la végétation</p>
Fonctions contraintes (FC)	<p>FC8 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol</p> <p>FC9 : Résister aux écoulements torrentiels de surface</p> <p>FC10 : Tenir compte des eaux souterraines</p> <p>FC11 : Résister à la végétation</p> <p>FC12 : Résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>FC13 : Résister aux séismes</p> <p>FC14 : Assurer un lit amont stable</p> <p>FC15 : Résister aux charges exercées par le dépôt sédimentaire amont</p> <p>FC16 : a) Résister aux charges exercées, b) s'ancrer dans les berges amont,</p> <p>FC17 : Résister aux charges exercées par les versants amont</p> <p>FC18 : S'ancrer sur le lit aval</p> <p>FC19 : Orienter l'écoulement en tenant compte de la stabilité des berges aval</p> <p>FC20 : b) résister aux charges exercées par le lit créé</p> <p>FC21 : a) Résister aux charges exercées par les berges latérales, b) s'ancrer dans les berges latérales, c) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges latérales</p> <p>FC22 : a) Résister aux charges exercées par les versants latéraux, b) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des versants latéraux</p>

AFE - Tableau des fonctions de service pour un dispositif à fonction de stabilisation

BI/ Dispositif à fonction de consolidation de mouvements de pente latéraux (CL)

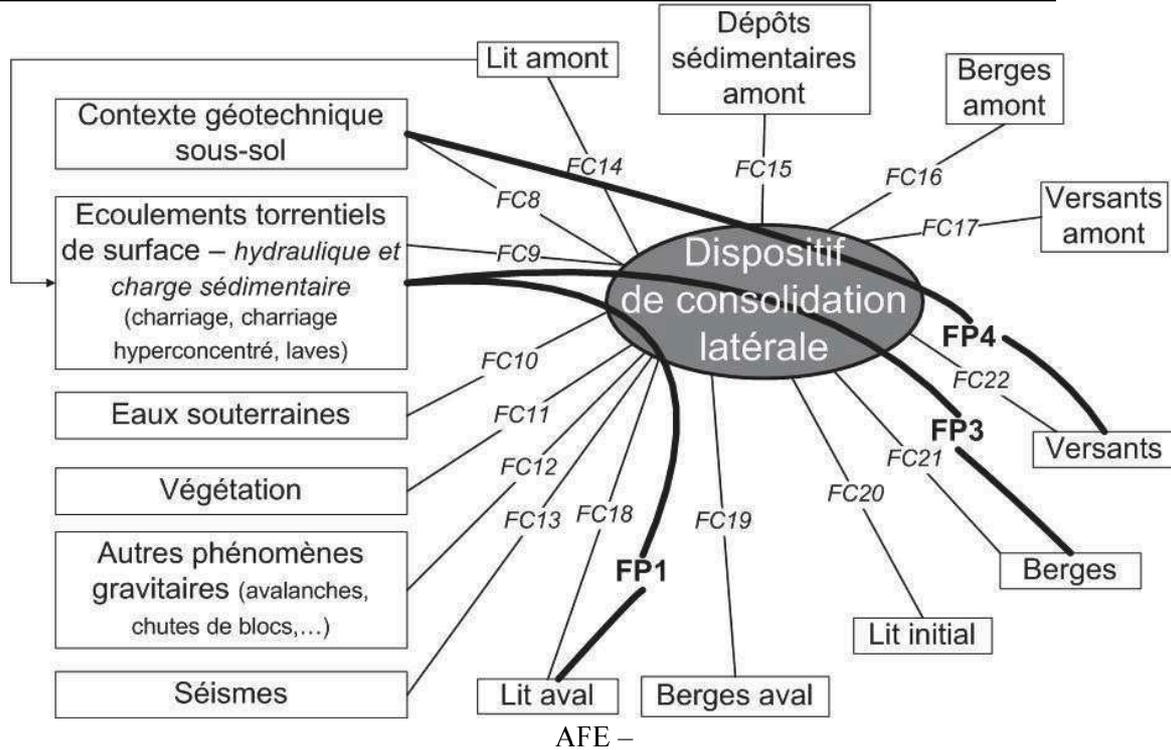
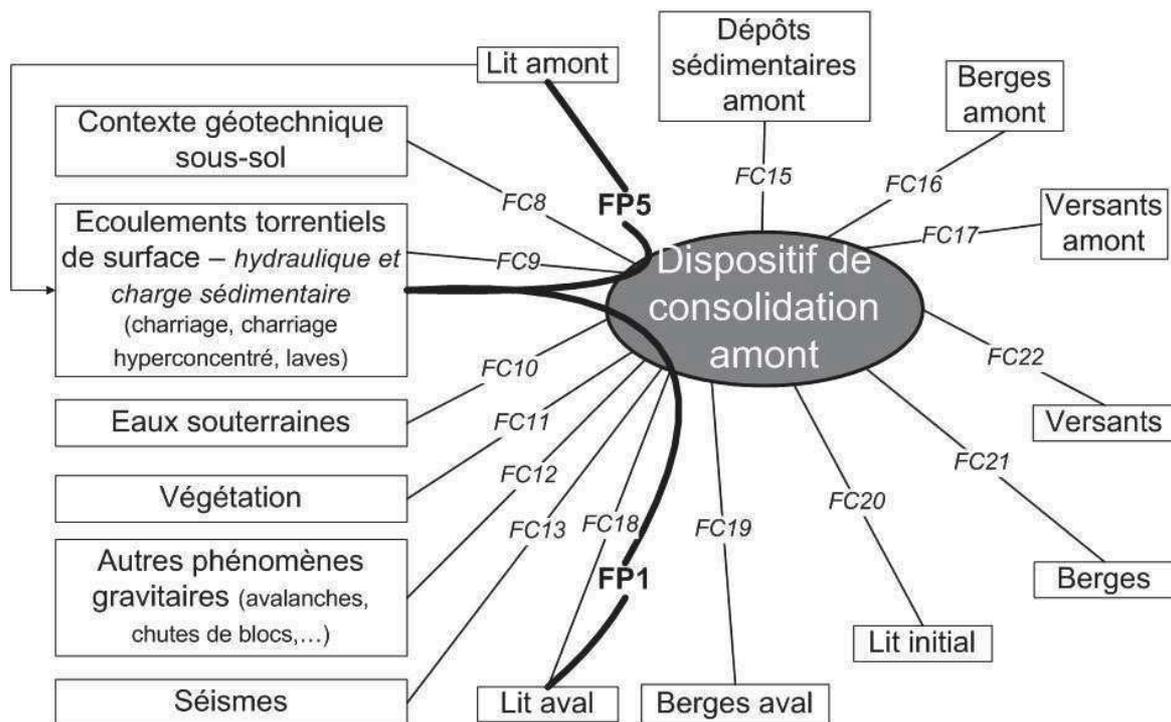


Diagramme pieuvre pour un dispositif à fonction de consolidation de mouvements de pente latéraux

Fonctions principales (FP)	<p>FP1 : Faire transiter les écoulements torrentiels vers le lit à l'aval du dispositif</p> <p>FP3 : Orienter les écoulements torrentiels pour limiter les érosions latérales de berge</p> <p>FP4 : Adapter le niveau de stabilisation de pied de versant au contexte géotechnique</p>
Fonctions contraintes (FC)	<p>FC8 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol</p> <p>FC9 : Résister aux écoulements torrentiels de surface</p> <p>FC10 : Tenir compte des eaux souterraines</p> <p>FC11 : Résister à la végétation</p> <p>FC12 : Résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>FC13 : Résister aux séismes</p> <p>FC14 : Assurer un lit amont stable</p> <p>FC15 : Résister aux charges exercées par le dépôt sédimentaire amont</p> <p>FC16 : a) Résister aux charges exercées, b) s'ancrer dans les berges amont,</p> <p>FC17 : Résister aux charges exercées par les versants amont</p> <p>FC18 : S'ancrer sur le lit aval</p> <p>FC19 : Orienter l'écoulement pour limiter l'érosion des berges aval</p> <p>FC20 : a) Assurer un lit stable et b) résister aux charges exercées par le lit créé</p> <p>FC21 : a) Résister aux charges exercées par les berges latérales, b) s'ancrer dans les berges latérales, c) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges latérales</p> <p>FC22 : a) Résister aux charges exercées par les versants latéraux, b) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des versants latéraux</p>

AFE – Tableau des fonctions de service pour un dispositif à fonction de consolidation de mouvements de pente latéraux

B2/ Dispositif à fonction de consolidation de la zone amont (CA)



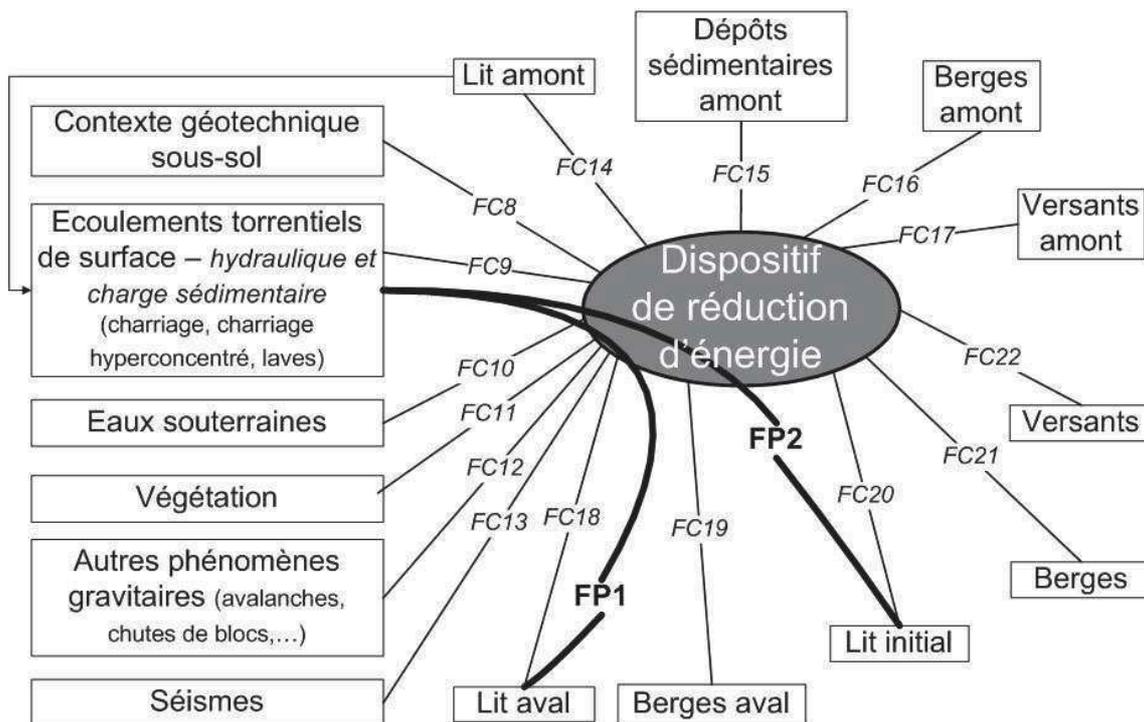
AFE – Diagramme pieuvre pour un dispositif à fonction de consolidation de la zone amont

Fonctions principales (FP)	<p>FP1 : Faire transiter les écoulements torrentiels vers le lit à l'aval du dispositif</p> <p>FP5 : Modifier les écoulements torrentiels pour stabiliser le lit amont et limiter l'érosion régressive</p>
Fonctions contraintes (FC)	<p>FC8 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol</p> <p>FC9 : Résister aux écoulements torrentiels de surface</p> <p>FC10 : Tenir compte des eaux souterraines</p> <p>FC11 : Résister à la végétation</p> <p>FC12 : Résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>FC13 : Résister aux séismes</p> <p>FC15 : Résister aux charges exercées par le dépôt sédimentaire amont</p> <p>FC16 : a) Résister aux charges exercées, b) s'ancrer dans les berges amont,</p> <p>FC17 : Résister aux charges exercées par les versants amont</p> <p>FC18 : S'ancrer sur le lit aval</p> <p>FC19 : Orienter l'écoulement pour limiter l'érosion des berges aval</p> <p>FC20 : a) Assurer un lit stable et b) résister aux charges exercées par le lit créé</p> <p>FC21 : a) Résister aux charges exercées par les berges latérales, b) s'ancrer dans les berges latérales, c) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges latérales</p> <p>FC22 : a) Résister aux charges exercées par les versants latéraux, b) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des versants latéraux</p>

AFE –

Tableau des fonctions de service pour un dispositif à fonction de consolidation de la zone amont

C/ Dispositif à fonction de réduction de pente et d'énergie (RP)

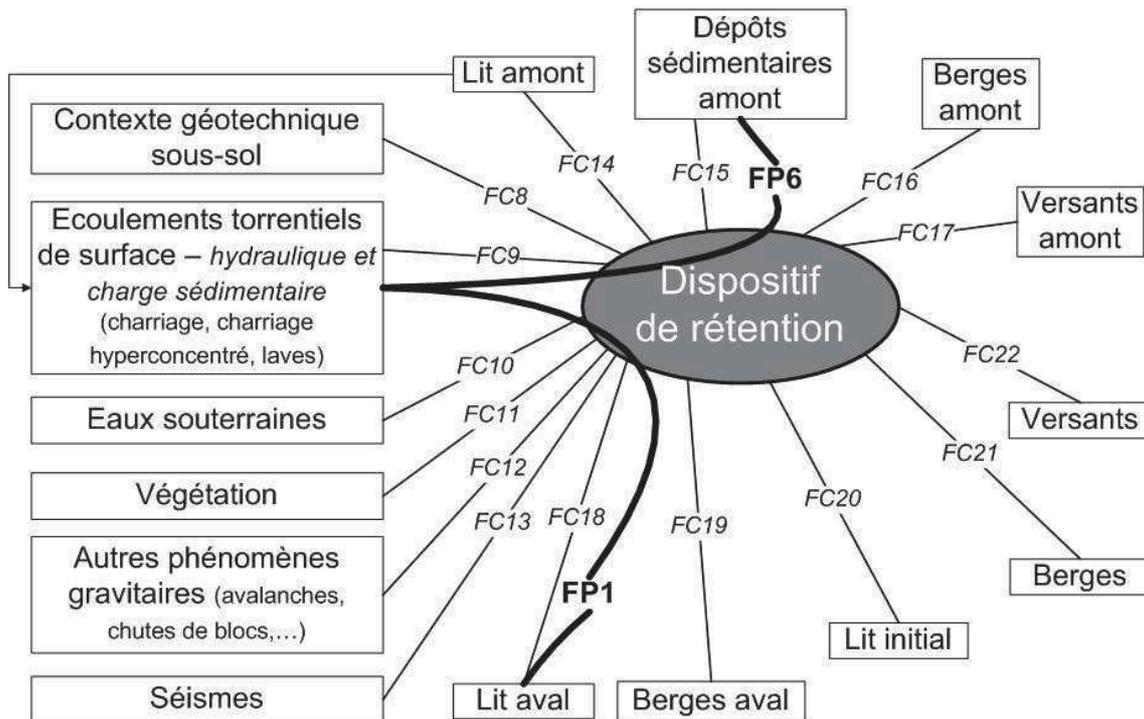


AFE - Diagramme pieuvre pour un dispositif à fonction de réduction de pente et d'énergie localement

Fonctions principales (FP)	<p>FP1 : Faire transiter les écoulements torrentiels vers le lit à l'aval du dispositif</p> <p>FP2 : Réduire l'énergie due aux écoulements torrentiels en réduisant la pente du lit initial</p>
Fonctions contraintes (FC)	<p>FC8 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol</p> <p>FC9 : Résister aux écoulements torrentiels de surface</p> <p>FC10 : Tenir compte des eaux souterraines</p> <p>FC11 : Résister à la végétation</p> <p>FC12 : Résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>FC13 : Résister aux séismes</p> <p>FC14 : Assurer un lit amont stable</p> <p>FC15 : Résister aux charges exercées par le dépôt sédimentaire amont</p> <p>FC16 : a) Résister aux charges exercées, b) s'ancrer dans les berges amont,</p> <p>FC17 : Résister aux charges exercées par les versants amont</p> <p>FC18 : S'ancrer sur le lit aval</p> <p>FC19 : Orienter l'écoulement pour limiter l'érosion des berges aval</p> <p>FC20 : a) Assurer un lit stable et b) résister aux charges exercées par le lit créé</p> <p>FC21 : a) Résister aux charges exercées par les berges latérales, b) s'ancrer dans les berges latérales, c) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges latérales</p> <p>FC22 : a) Résister aux charges exercées par les versants latéraux, b) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des versants latéraux</p>

AFE - Tableau des fonctions de service pour un dispositif à fonction de réduction de pente et d'énergie localement

D/ Dispositif à fonction de rétention de matériaux (RE)

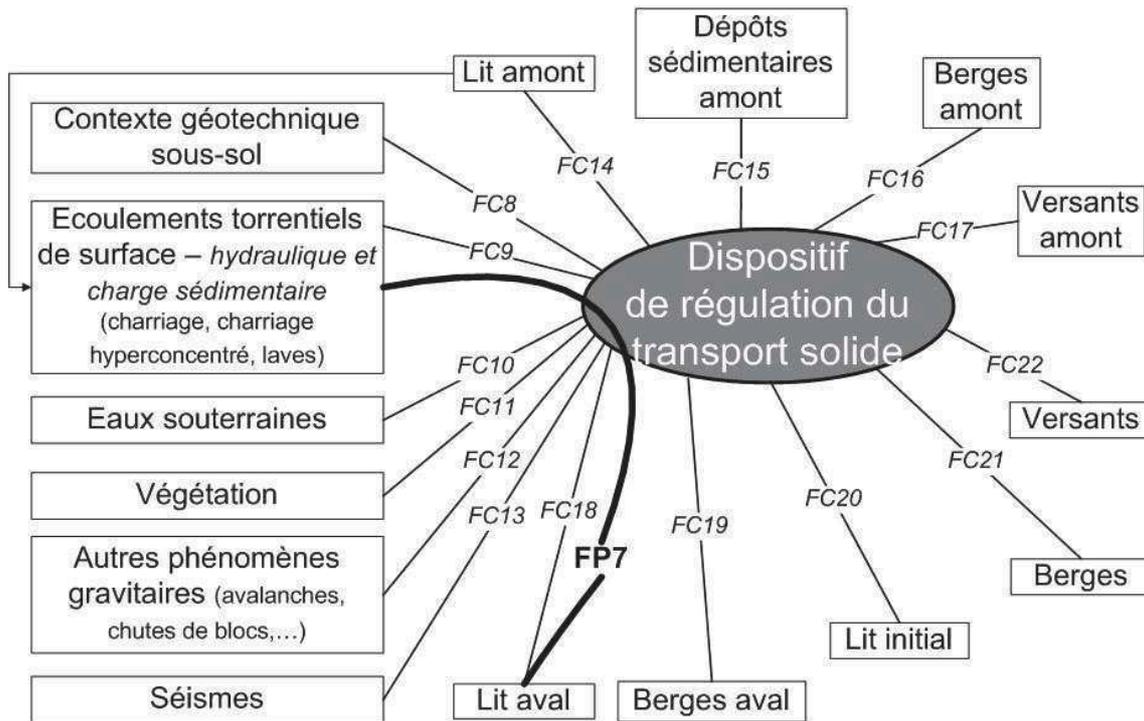


AFE - Diagramme pieuvre pour un dispositif à fonction de rétention de matériaux

Fonctions principales (FP)	<p>FP1 : Faire transiter les écoulements torrentiels vers le lit à l'aval du dispositif</p> <p>FP6 : Modifier les écoulements torrentiels en stockant les matériaux à l'amont des ouvrages</p>
Fonctions contraintes (FC)	<p>FC8 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol</p> <p>FC9 : Résister aux écoulements torrentiels de surface</p> <p>FC10 : Tenir compte des eaux souterraines</p> <p>FC11 : Résister à la végétation</p> <p>FC12 : Résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>FC13 : Résister aux séismes</p> <p>FC14 : Assurer un lit amont stable</p> <p>FC15 : Résister aux charges exercées par le dépôt sédimentaire amont</p> <p>FC16 : a) Résister aux charges exercées, b) s'ancrer dans les berges amont,</p> <p>FC17 : Résister aux charges exercées par les versants amont</p> <p>FC18 : S'ancrer sur le lit aval</p> <p>FC19 : Orienter l'écoulement pour limiter l'érosion des berges aval</p> <p>FC20 : a) Assurer un lit stable et b) résister aux charges exercées par le lit créé</p> <p>FC21 : a) Résister aux charges exercées par les berges latérales, b) s'ancrer dans les berges latérales, c) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges latérales</p> <p>FC22 : a) Résister aux charges exercées par les versants latéraux, b) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des versants latéraux</p>

AFE - Tableau des fonctions de service pour un dispositif à fonction de rétention de matériaux

E/ Dispositif à fonction de régulation du transport solide (RG)



AFE - Diagramme pieuvre pour un dispositif à fonction de régulation du transport solide

Fonctions principales (FP)	FP7 : Modifier les écoulements torrentiels en modulant le transport solide dans l'écoulement torrentiel transféré vers le lit aval
Fonctions contraintes (FC)	<p>FC8 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol</p> <p>FC9 : Résister aux écoulements torrentiels de surface</p> <p>FC10 : Tenir compte des eaux souterraines</p> <p>FC11 : Résister à la végétation</p> <p>FC12 : Résister aux autres phénomènes gravitaires (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>FC13 : Résister aux séismes</p> <p>FC14 : Assurer un lit amont stable</p> <p>FC15 : Résister aux charges exercées par le dépôt sédimentaire amont</p> <p>FC16 : a) Résister aux charges exercées, b) s'ancrer dans les berges amont,</p> <p>FC17 : Résister aux charges exercées par les versants amont</p> <p>FC18 : S'ancrer sur le lit aval</p> <p>FC19 : Orienter l'écoulement pour limiter l'érosion des berges aval</p> <p>FC20 : a) Assurer un lit stable et b) résister aux charges exercées par le lit créé</p> <p>FC21 : a) Résister aux charges exercées par les berges latérales, b) s'ancrer dans les berges latérales, c) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges latérales</p> <p>FC22 : a) Résister aux charges exercées par les versants latéraux, b) recueillir les matériaux sédimentaires provenant des versants latéraux</p>

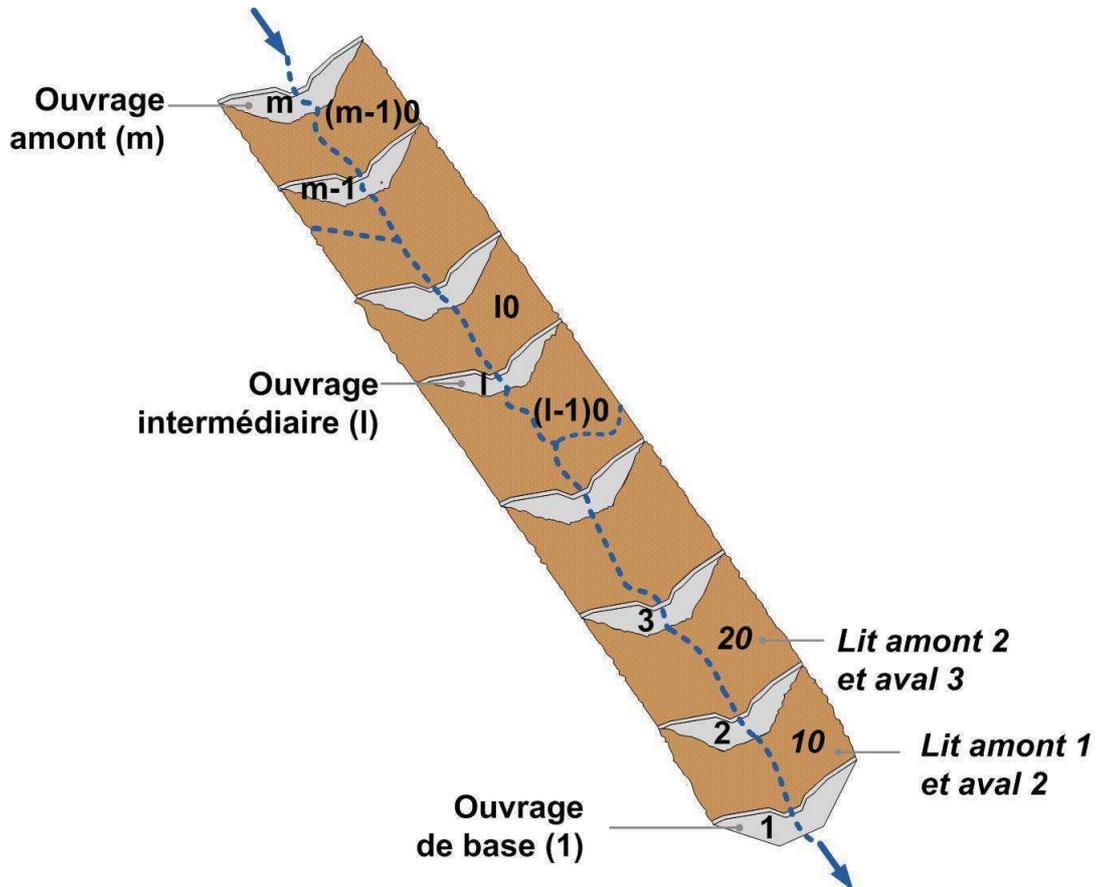
AFE - Tableau des fonctions de service pour un dispositif à fonction de régulation du transport solide

AFI d'un dispositif de consolidation/stabilisation à fonction de stabilisation (ST)

On souhaite connaître les défaillances à l'échelle du dispositif. L'analyse fonctionnelle se focalise donc sur la fonction du système dans son environnement.

Etape 1 : Analyse structurelle

Objectif : Lister la liste des composants constitutifs de l'ouvrage et de repérer leur position physique.



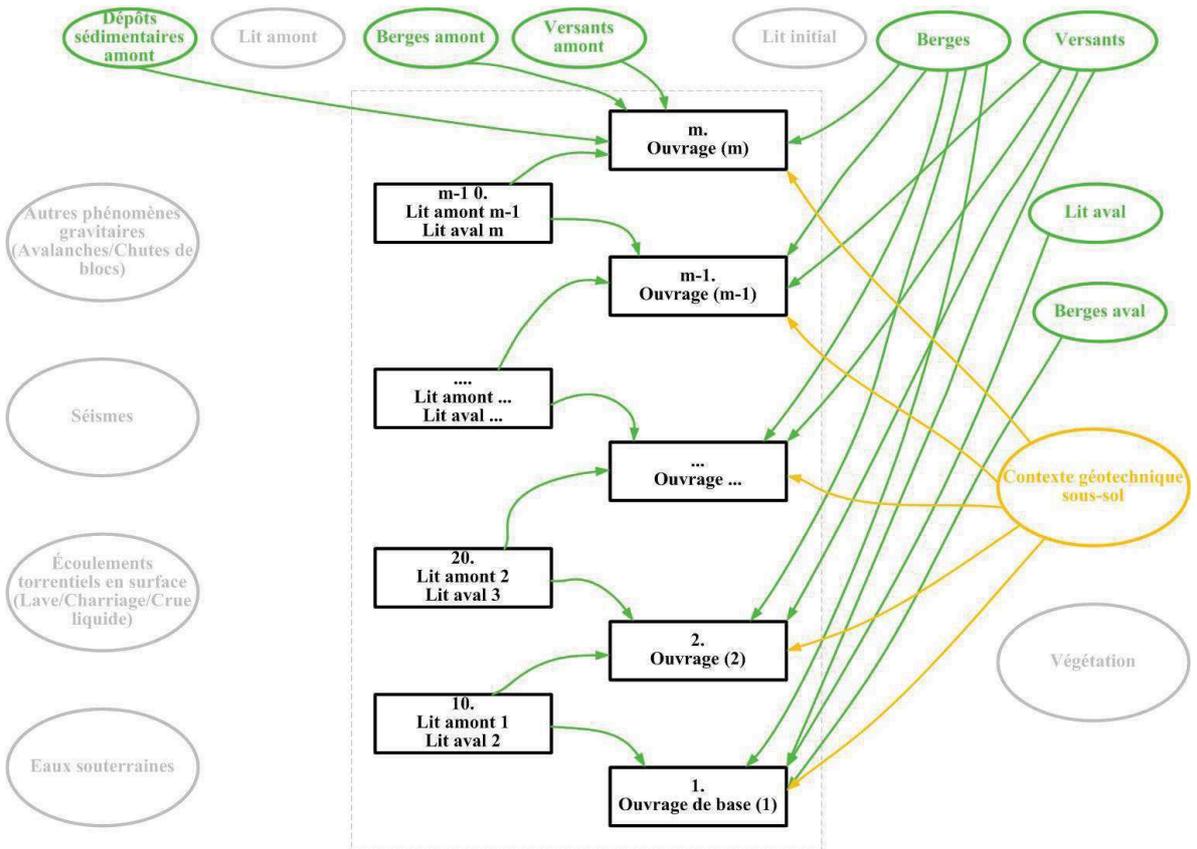
Analyse structurelle du système « dispositif de consolidation/stabilisation torrentielle »
avec fonction de stabilisation

Etape 2 : Blocs diagrammes Fonctionnels

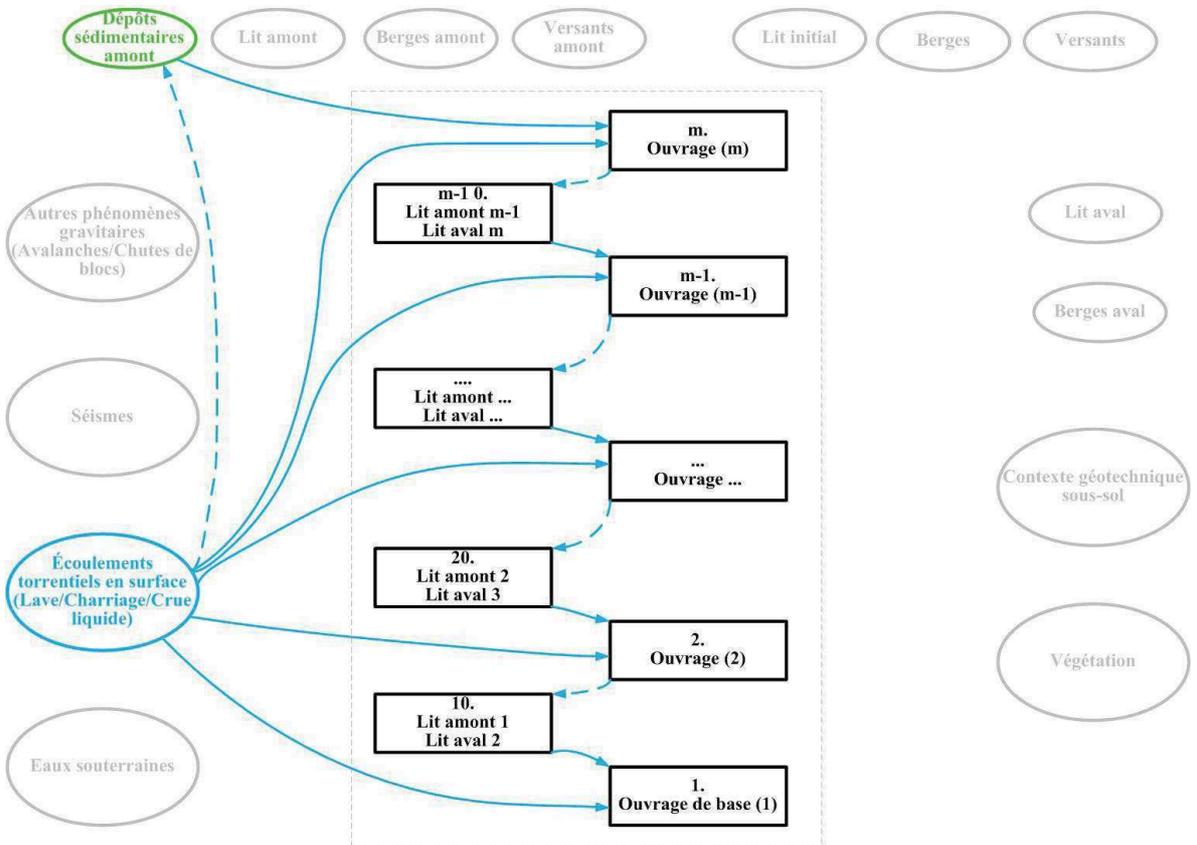
Objectif : Etablir l'interaction entre les composants et avec les milieux extérieurs.

De même que pour l'analyse du système « ouvrage », les interactions proposées sont les suivantes :

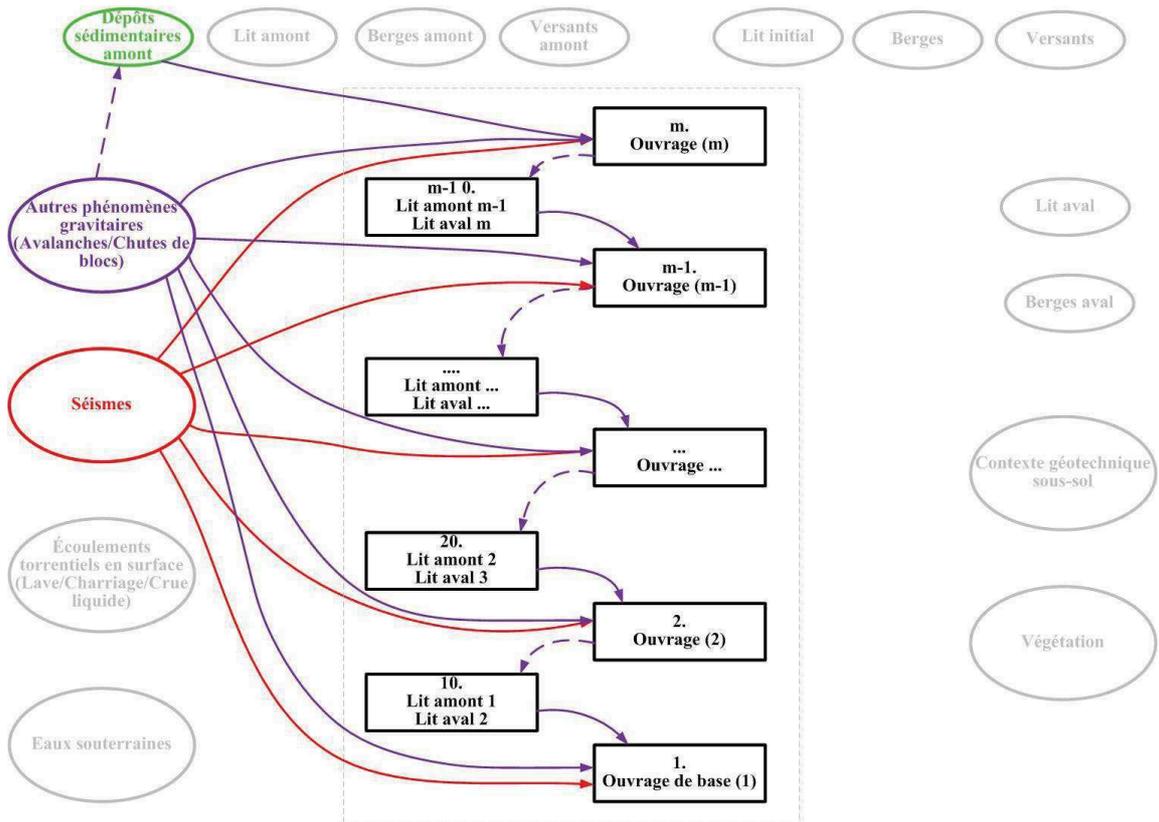
- Contacts mécaniques :
 - Avec transfert de charges géotechniques
 - Avec transfert de charges hydrauliques
 - Avec transfert de charges dus à d'autres phénomènes que le torrentiel
 - Avec végétation
- Transferts de flux :
 - hydrauliques de surface et souterrains
 - sédimentaires



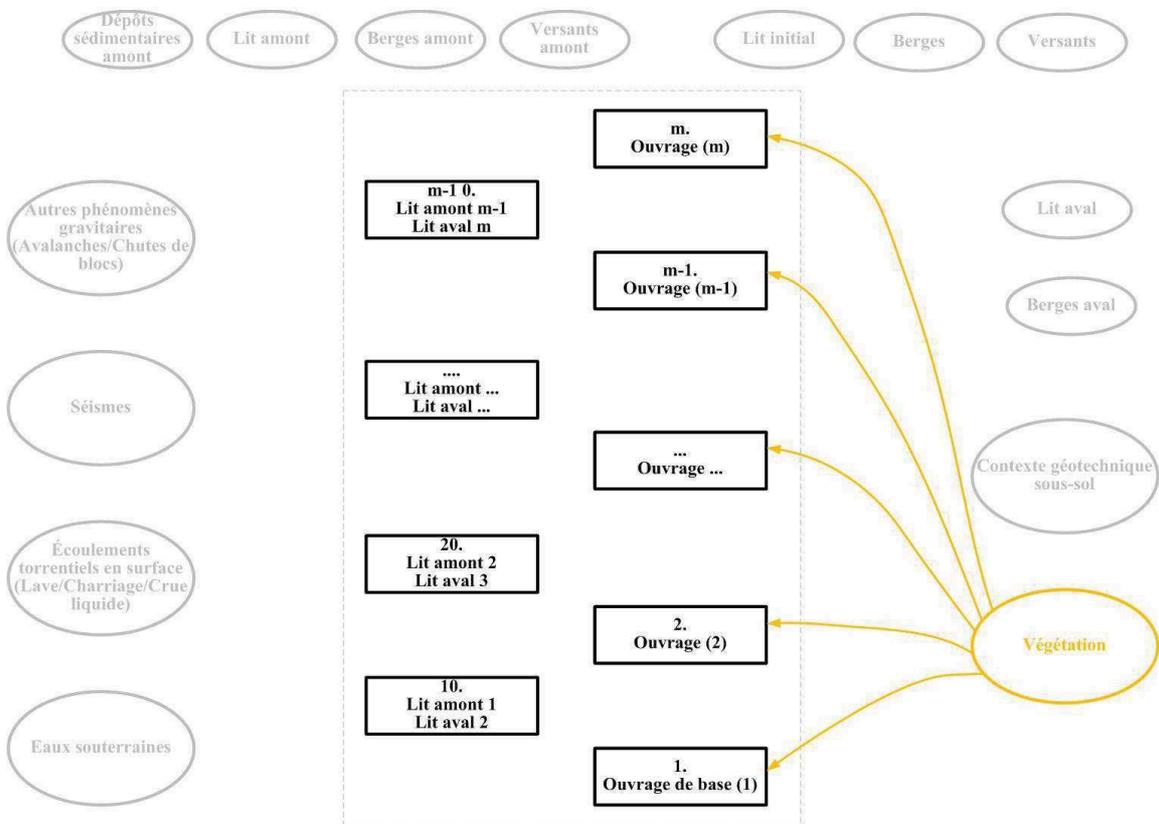
Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de charges mécaniques géotechniques



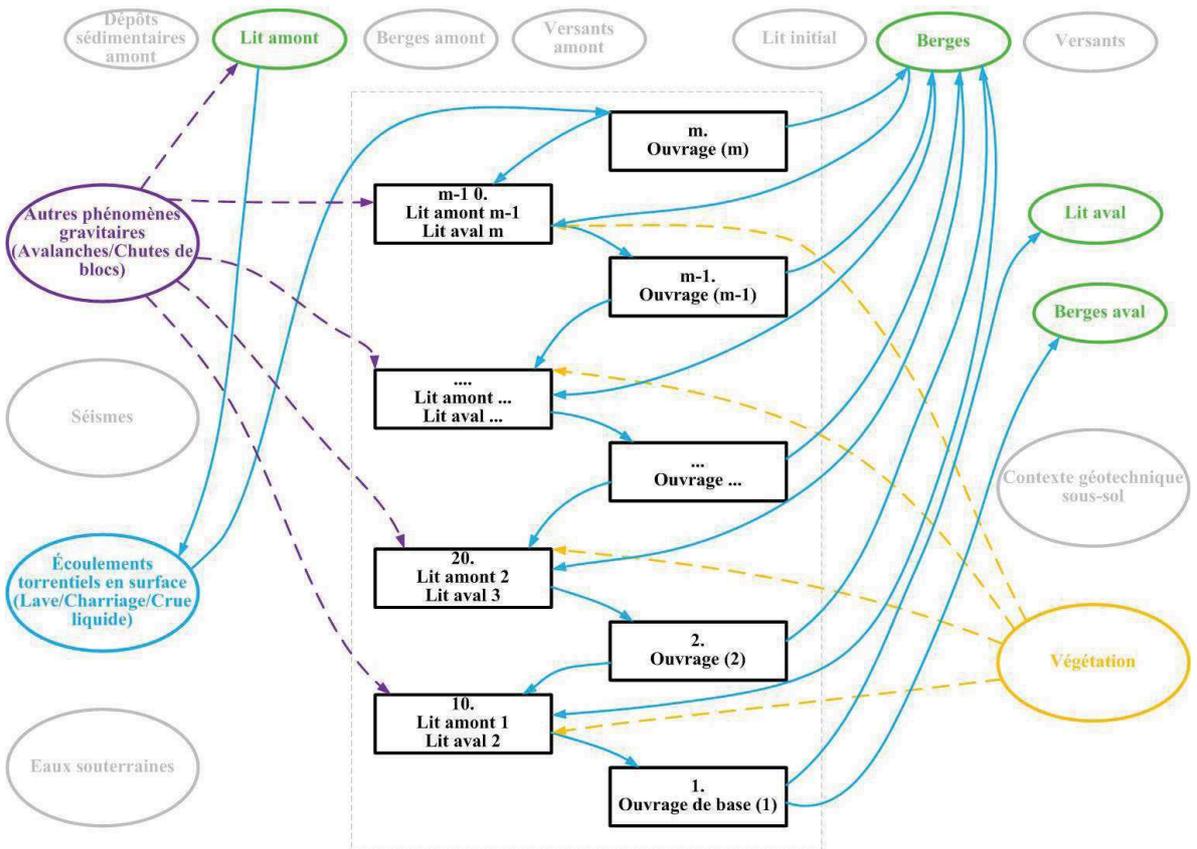
Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de charges mécaniques hydrauliques



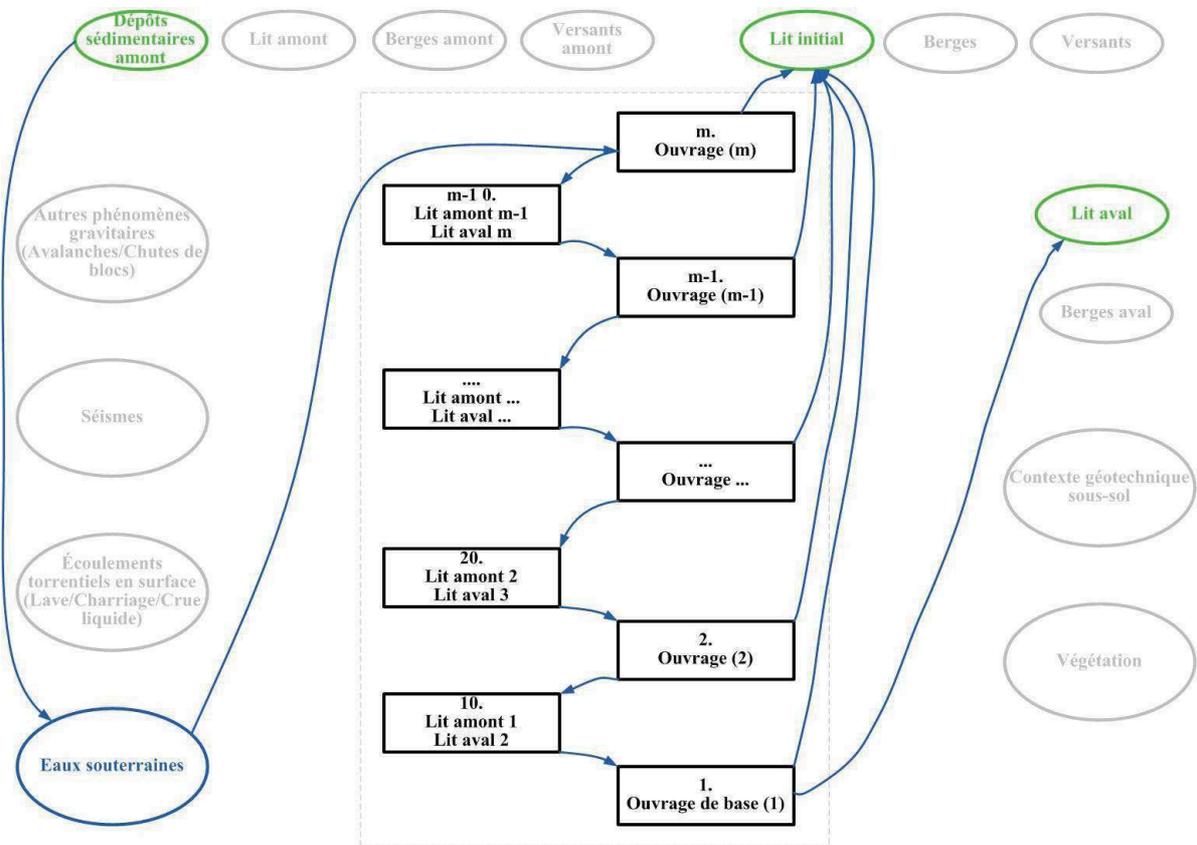
Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de charges mécaniques liées à d'autres phénomènes que le torrentiel



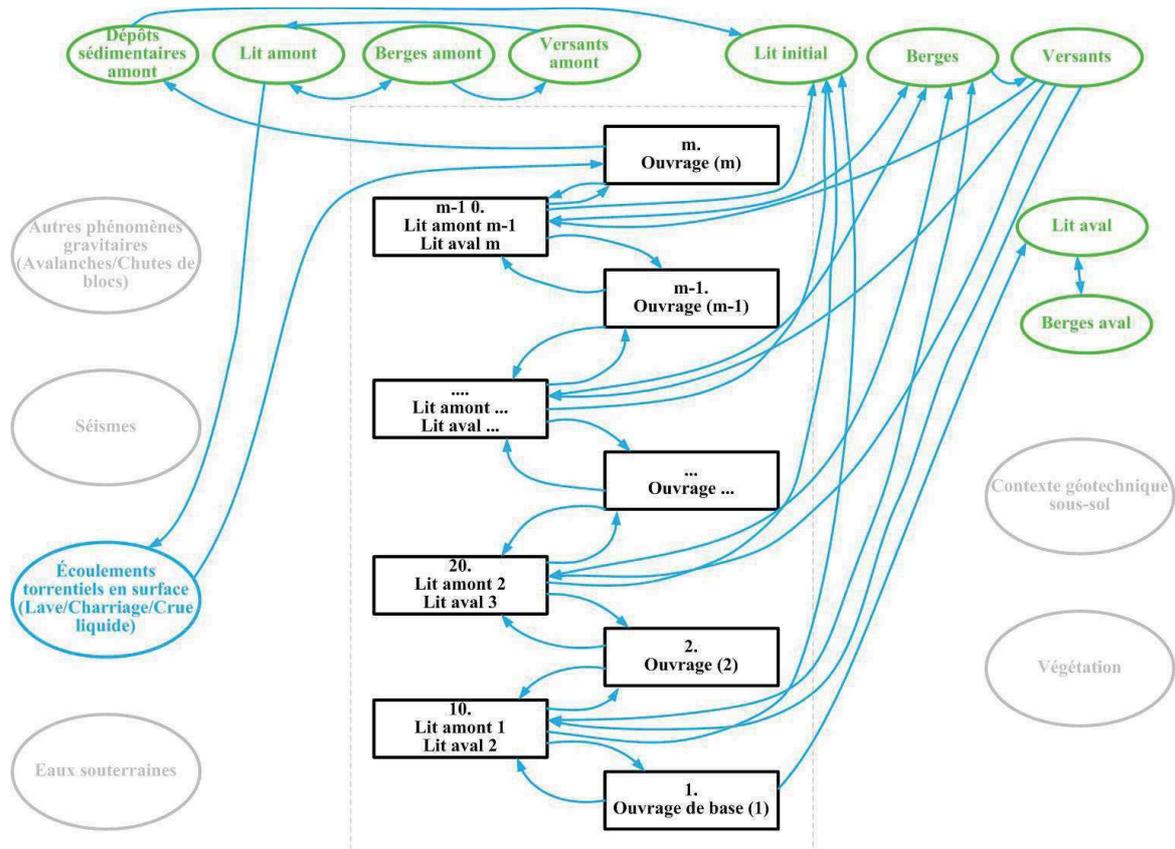
Bloc diagramme fonctionnel relatif aux sollicitations liées à la présence de végétation



Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de flux hydrauliques de surface



Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de flux hydrauliques souterrains



Bloc diagramme fonctionnel relatif aux transferts de flux sédimentaires

Etape 3 : Tableau d'analyse fonctionnelle

Objectif : Préciser les Fonctions de Conception (*ou Techniques*) FT accomplies par chaque composant de l'ouvrage, permettant de répondre aux Fonctions Principales (FP) et de Contraintes (FC) auxquelles doit répondre l'ouvrage selon l'AFE.

Pour faire le lien entre les FT et les FC/FP de l'AFE (dernière colonne du tableau), le jeu de couleurs suivant est utilisé :

- **Toutes fonctions confondues**
- **Stabilisation**
- **Consolidation versants latéraux**
- **Consolidation versants amont**
- **Réduction pente**
- **Rétention**
- **Régulation transport solide**

Composant	Fonctions de conception (FT)	Lien AFE ouvrage	Lien AFE dispositif
1. Ouvrage de base (1)	1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques		
	FT1.1 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol	FC3	FC8
	FT1.2 : Résister aux charges exercées par le lit amont 1 (dépôts sédimentaires à l'amont de l'ouvrage)	FC9	FC20b
	FT1.3 : S'ancrer dans les berges situées à l'amont immédiat	FC10b	FC21b
	FT1.4 : Résister aux charges exercées par les berges situées à l'amont immédiat	FC10a	FC21a
	FT1.5 : Résister aux charges dues aux versants amont immédiats	FC11	FC22a
	FT1.6 : S'ancrer sur le lit aval	FC12	FC18
	FT1.7 : S'appuyer sur les berges aval	FC14	FC21b
	2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques		
	FT2.1 : Résister aux dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage (Lit amont) surchargés des écoulements torrentiels	FC4	FC9
	FT2.2 : Résister aux sollicitations directes par les écoulements torrentiels de surface	FC4	FC9
	3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation		
	FT3.1 : Résister à la végétation présente sur l'ouvrage	FC6	FC11
	4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles		
	FT4.1 : Résister aux séismes	FC8	FC13
	FT4.2 : Résister aux charges des dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage surchargé par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)	FC7	FC12
	FT4.3 : Résister aux sollicitations directes par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)	FC7	FC12
	FP2	FP1	

	<p>5-6. Transférer les flux hydrauliques FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant du lit amont de l'ouvrage vers le lit aval FT5-6.2 : Orienter les écoulements sans impacter les berges latérales aval, vers l'ouvrage situé à l'aval FT5-6.3 : Faire transiter les écoulements d'eaux souterraines provenant du lit à l'amont de l'ouvrage (dépôts sédimentaires créés) vers le lit aval</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Modifier les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage pour dépôt sédimentaire amont au-dessus du lit initial FT7.2 : Faire transiter vers le lit aval une partie de la charge sédimentaire présente dans les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage</p>	<p>FP2/FC13</p> <p>FC5</p> <p>FP1</p> <p>FP1</p>	<p>FP3/FC19</p> <p>FC10</p> <p>FP2/FP4/FP2/FP6/FP7</p> <p>FP1/FP7</p>
<p>10. Lit amont 1 et aval 2</p>	<p>5-6. Transférer les flux hydrauliques FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant de l'ouvrage amont (2) vers l'ouvrage aval (1) en tenant compte des réductions de sections par d'autres phénomènes que le torrentiel ou par la présence végétation et/ou d'embâcles</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Assurer le dépôt sédimentaire à l'amont de l'ouvrage aval (1) au-dessus du lit initial pour protéger la fondation de l'ouvrage amont (2) et les pieds de berge FT7.2 : Recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges et/ou des versants situés à l'aplomb FT7.3 : Faire transiter vers l'ouvrage aval (1) une partie de la charge sédimentaire provenant du lit amont à l'ouvrage</p>		<p>FP1 /FC11 /FC12</p> <p>FP2/FP4/FP2/FP6/FP7</p> <p>FC21c/FC22b</p> <p>FP1/FP7</p>

2. Ouvrage (2)	1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques		
	FT1.1 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol	FC3	FC8
	FT1.2 : Résister aux charges exercées par le lit amont 2 (dépôts sédimentaires à l'amont de l'ouvrage)	FC9	FC20b
	FT1.3 : S'ancrer dans les berges situées à l'amont immédiat	FC10b	FC21b
	FT1.4 : Résister aux charges exercées par les berges situées à l'amont immédiat	FC10a	FC21a
	FT1.5 : Résister aux charges dues aux versants amont immédiats	FC11	FC22a
	FT1.6 : S'ancrer sur les dépôts sédimentaires créés par l'ouvrage (1) situé à l'aval (ou lit aval)	FC12	FC18
	FT1.7 : S'appuyer sur les berges aval	FC14	FC21b
	2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques		
	FT2.1 : Résister aux dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage (Lit amont) surchargés des écoulements torrentiels	FC4	FC9
	FT2.2 : Résister aux sollicitations directes par les écoulements torrentiels de surface	FC4	FC9
	3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation		
	FT3.1 : Résister à la végétation présente sur l'ouvrage	FC6	FC11
	4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles		
	FT4.1 : Résister aux séismes	FC8	FC13
	FT4.2 : Résister aux charges des dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage surchargé par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)	FC7	FC12
	FT4.3 : Résister aux sollicitations directes par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)	FC7	FC12
	5-6. Transférer les flux hydrauliques		
	FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant du lit amont de l'ouvrage vers le lit aval de l'ouvrage	FP2	FP1
	FT5-6.2 : Orienter les écoulements sans impacter les berges latérales aval, vers l'ouvrage situé à l'aval	FP2/FC13	FP3
	FT5-6.3 : Faire transiter les écoulements d'eaux souterraines provenant du lit à l'amont de l'ouvrage (dépôts sédimentaires) vers le lit créé à l'aval de l'ouvrage	FC5	FC10
	7. Gérer les flux sédimentaires		
	FT7.1 : Modifier les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage pour dépôt sédimentaire amont au-dessus du lit initial	FP1	FP2/FP4/FP2/FP6/FP7
	FT7.2 : Faire transiter vers le lit aval une partie de la charge sédimentaire présente dans les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage	FP1	FP1/FP7

<p>20. Lit amont 2 et aval 3</p>	<p>5-6. Transférer les flux hydrauliques FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant de l'ouvrage amont (3) vers l'ouvrage aval (2) en tenant compte des réductions de sections par d'autres phénomènes que le torrentiel ou par la présence végétation et/ou d'embâcles</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Assurer le dépôt sédimentaire à l'amont de l'ouvrage aval (2) au-dessus du lit initial pour protéger la fondation de l'ouvrage amont (3) et les pieds de berge FT7.2 : Recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges et/ou des versants situés à l'aplomb FT7.3 : Faire transiter vers l'ouvrage aval (2) une partie de la charge sédimentaire provenant du lit amont à l'ouvrage</p>		<p>FP1 /FC11 /FC12</p> <p>FP2/FP4/FP2/FP6/FP7</p> <p>FC21c/FC22b</p> <p>FP1/FP7</p>
<p>.... Ouvrage (...)</p>	<p>1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques FT1.1 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol FT1.2 : Résister aux charges exercées par le lit amont (dépôts sédimentaires à l'amont de l'ouvrage) FT1.3 : S'ancrer dans les berges situées à l'amont immédiat FT1.4 : Résister aux charges exercées par les berges situées à l'amont immédiat FT1.5 : Résister aux charges dues aux versants amont immédiats FT1.6 : S'ancrer sur les dépôts sédimentaires créés par l'ouvrage situé à l'aval (ou lit aval) FT1.7 : S'appuyer sur les berges aval</p> <p>2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques FT2.1 : Résister aux dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage (Lit amont) surchargés des écoulements torrentiels FT2.2 : Résister aux sollicitations directes par les écoulements torrentiels de surface</p> <p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation FT3.1 : Résister à la végétation présente sur l'ouvrage</p> <p>4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles FT4.1 : Résister aux séismes FT4.2 : Résister aux charges des dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage surchargé par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) FT4.3 : Résister aux sollicitations directes par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>5-6. Transférer les flux hydrauliques FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant du lit amont de l'ouvrage vers le lit aval de</p>	<p>FC3 FC9 FC10b FC10a FC11 FC12 FC14</p> <p>FC4 FC4 FC6 FC8 FC7 FC7 FP2</p>	<p>FC8 FC20b FC21b FC21a FC22a FC18 FC21b</p> <p>FC9 FC9 FC11 FC13 FC12 FC12 FP1</p>

	<p>l'ouvrage FT5-6.2 : Orienter les écoulements sans impacter les berges latérales aval, vers l'ouvrage situé à l'aval FT5-6.3 : Faire transiter les écoulements d'eaux souterraines provenant du lit à l'amont de l'ouvrage (dépôts sédimentaires) vers le lit créé à l'aval de l'ouvrage</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Modifier les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage pour dépôt sédimentaire amont au-dessus du lit initial FT7.2 : Faire transiter vers le lit aval une partie de la charge sédimentaire présente dans les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage</p>	<p>FP2/FC13 FC5 FP1 FP1</p>	<p>FP3 FC10 FP2/FP4/FP2/FP6/FP7 FP1/FP7</p>
<p>..... Lit amont et aval ...</p>	<p>5-6. Transférer les flux hydrauliques FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant de l'ouvrage amont vers l'ouvrage aval en tenant compte des réductions de sections par d'autres phénomènes que le torrentiel ou par la présence végétation et/ou d'embâcles</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Assurer le dépôt sédimentaire à l'amont de l'ouvrage aval au-dessus du lit initial pour protéger la fondation de l'ouvrage amont et les pieds de berge FT7.2 : Recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges et/ou des versants situés à l'aplomb FT7.3 : Faire transiter vers l'ouvrage aval une partie de la charge sédimentaire provenant du lit amont à l'ouvrage</p>		<p>FP1 /FC11 /FC12 FP2/FP4/FP2/FP6/FP7 FC21c/FC22b FP1/FP7</p>
<p>m-1. Ouvrage (m-1)</p>	<p>1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques FT1.1 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol FT1.2 : Résister aux charges exercées par le lit amont (dépôts sédimentaires à l'amont de l'ouvrage) FT1.3 : S'ancrer dans les berges situées à l'amont immédiat FT1.4 : Résister aux charges exercées par les berges situées à l'amont immédiat FT1.5 : Résister aux charges dues aux versants amont immédiats FT1.6 : S'ancrer sur les dépôts sédimentaires créés par l'ouvrage (m-2) situé à l'aval (ou lit aval) FT1.7 : S'appuyer sur les berges aval</p> <p>2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques FT2.1 : Résister aux dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage (Lit amont) surchargés des écoulements torrentiels FT2.2 : Résister aux sollicitations directes par les écoulements torrentiels de surface</p>	<p>FC3 FC9 FC10b FC10a FC11 FC12 FC14 FC4 FC4</p>	<p>FC8 FC15 FC21b FC21a FC22a FC18 FC21b FC9 FC9</p>

	<p>3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation FT3.1 : Résister à la végétation présente sur l’ouvrage</p> <p>4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles FT4.1 : Résister aux séismes FT4.2 : Résister aux charges des dépôts sédimentaires créés à l’amont de l’ouvrage surchargé par d’autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.) FT4.3 : Résister aux sollicitations directes par d’autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)</p> <p>5-6. Transférer les flux hydrauliques FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant du lit amont de l’ouvrage vers le lit aval de l’ouvrage FT5-6.2 : Orienter les écoulements sans impacter les berges latérales aval, vers l’ouvrage situé à l’aval FT5-6.3 : Faire transiter les écoulements d’eaux souterraines provenant du lit à l’amont de l’ouvrage (dépôts sédimentaires) vers le lit créé à l’aval de l’ouvrage</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Modifier les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l’ouvrage pour dépôt sédimentaire amont au-dessus du lit initial FT7.2 : Faire transiter vers le lit aval une partie de la charge sédimentaire présente dans les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l’ouvrage</p>	<p>FC6</p> <p>FC8 FC7</p> <p>FC7</p> <p>FP2</p> <p>FP2/FC13</p> <p>FC5</p> <p>FP1</p> <p>FP1</p>	<p>FC11</p> <p>FC13 FC12</p> <p>FC12</p> <p>FP1</p> <p>FP3</p> <p>FC10</p> <p>FP2/FP4/FP2/FP6/FP7</p> <p>FP1/FP7</p>
<p>m-10. Lit amont m-1 et aval m</p>	<p>5-6. Transférer les flux hydrauliques FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant de l’ouvrage amont (m) vers l’ouvrage aval (m-1) en tenant compte des réductions de sections par d’autres phénomènes que le torrentiel ou par la présence végétation et/ou d’embâcles</p> <p>7. Gérer les flux sédimentaires FT7.1 : Assurer le dépôt sédimentaire à l’amont de l’ouvrage aval (m-1) au-dessus du lit initial pour protéger la fondation de l’ouvrage amont (m) et les pieds de berge FT7.2 : Recueillir les matériaux sédimentaires provenant des berges et/ou des versants situés à l’aplomb FT7.3 : Faire transiter vers l’ouvrage aval (m-1) une partie de la charge sédimentaire provenant du lit amont à l’ouvrage</p>		<p>FP1 /FC11 /FC12</p> <p>FP2/FP4/FP2/FP6/FP7</p> <p>FC21c/FC22b</p> <p>FP1/FP7</p>
<p>m. Ouvrage (m)</p>	<p>1. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux contraintes géotechniques FT1.1 : Résister au contexte géotechnique en sous-sol FT1.2 : Résister aux charges exercées par les dépôts sédimentaires à l’amont de l’ouvrage FT1.3 : S’ancreur dans les berges situées à l’amont immédiat</p>	<p>FC3 FC9</p> <p>FC10b</p>	<p>FC8 FC15</p> <p>FC16b</p>

FT1.4 : Résister aux charges exercées par les berges situées à l'amont immédiat	FC10a	FC16a
FT1.5 : Résister aux charges dues aux versants amont immédiats	FC11	FC17
FT1.6 : S'ancrer sur les dépôts sédimentaires créés par l'ouvrage (m-1) situé à l'aval (ou lit aval)	FC12	FC18
FT1.7 : S'appuyer sur les berges aval	FC14	FC21b
2. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux charges hydrauliques		
FT2.1 : Résister aux dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage surchargés des écoulements torrentiels	FC4	FC9
FT2.2 : Résister aux sollicitations directes par les écoulements torrentiels de surface	FC4	FC9
3. Résister aux sollicitations liées à la présence de végétation		
FT3.1 : Résister à la végétation présente sur l'ouvrage	FC6	FC11
4. Résister aux sollicitations mécaniques dues aux autres phénomènes que les crues torrentielles		
FT4.1 : Résister aux séismes	FC8	FC13
FT4.2 : Résister aux charges des dépôts sédimentaires créés à l'amont de l'ouvrage surchargé par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)	FC7	FC12
FT4.3 : Résister aux sollicitations directes par d'autres phénomènes (avalanches, chutes de blocs, etc.)	FC7	FC12
5-6. Transférer les flux hydrauliques		
FT5-6.1 : Faire transiter les écoulements torrentiels provenant du lit amont vers le lit aval de l'ouvrage	FP2	FP1
FT5-6.2 : Orienter les écoulements sans impacter les berges latérales aval, vers l'ouvrage situé à l'aval	FP2/FC13	FP3
FT5-6.3 : Faire transiter les écoulements d'eaux souterraines provenant des dépôts sédimentaires amont vers le lit créé à l'aval de l'ouvrage	FC5	FC10
7. Gérer les flux sédimentaires		
FT7.1 : Modifier les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage pour dépôt sédimentaire amont au-dessus du lit initial	FP1	FP2/FP4/FP5/FP2/FP6/FP7
FT7.2 : Faire transiter vers le lit aval une partie de la charge sédimentaire présente dans les écoulements torrentiels provenant du lit amont à l'ouvrage	FP1	FP1/FP7

Tableau des fonctions techniques de conception d'un dispositif de stabilisation torrentielle

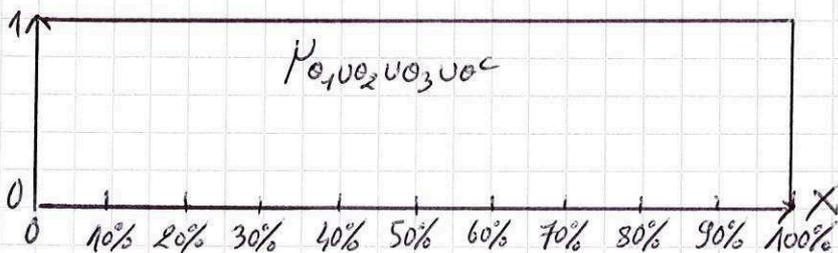
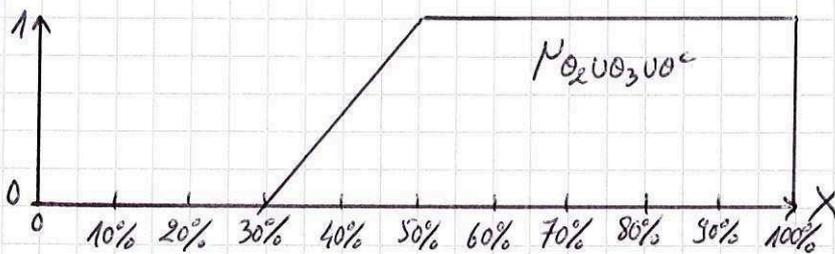
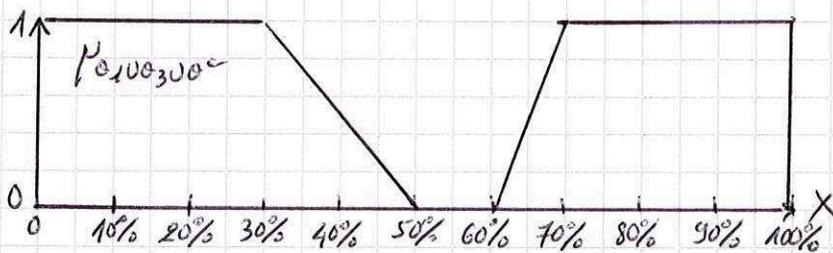
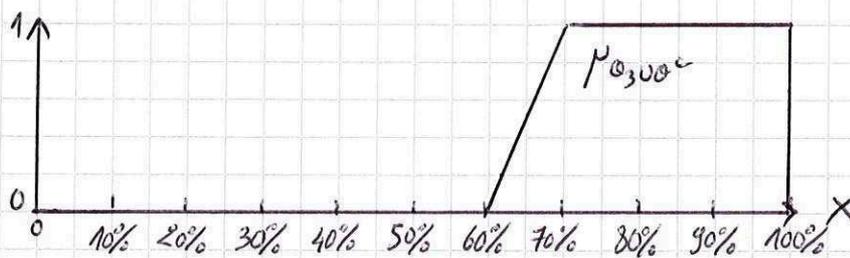
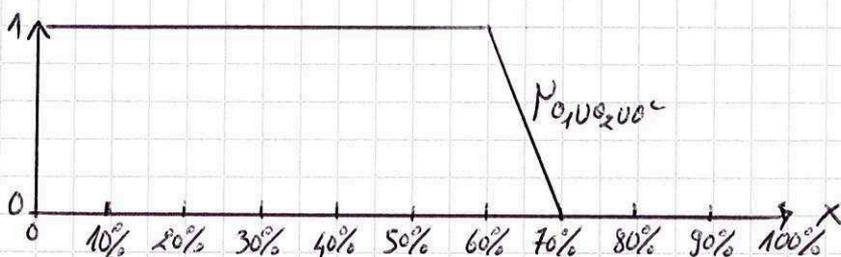
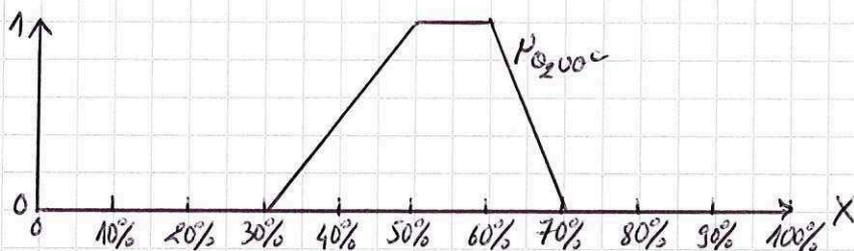
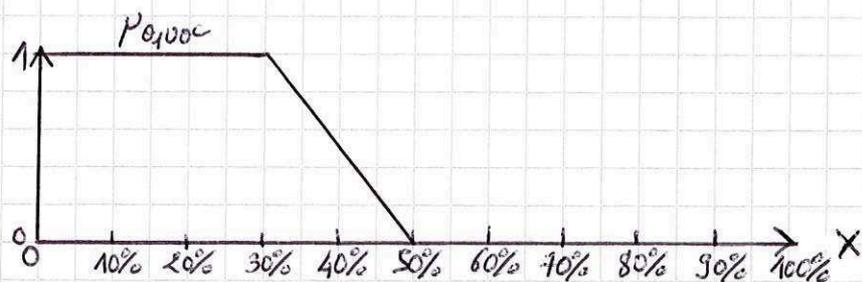
Annexe H : Application détaillée des étapes 1 à 3 de la nouvelle méthode de transposition (cf. section IV.2.2.3)

La partie A) détaille l'étape *Nouvelle transposition-1* pour le critère, le « modèle de transposition » ayant été établi pour $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$.

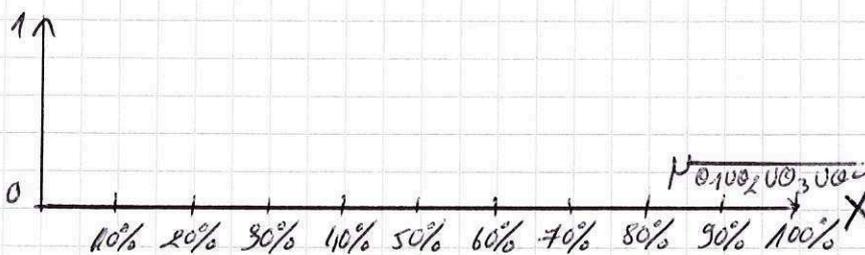
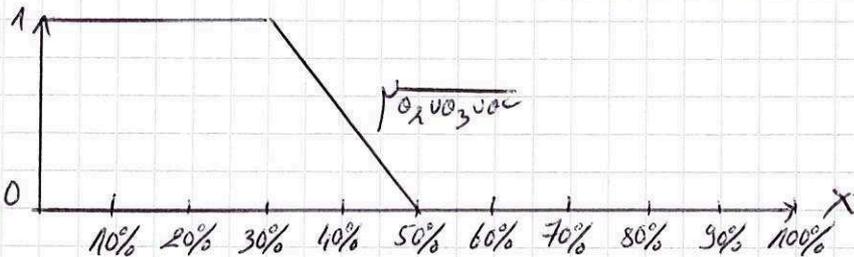
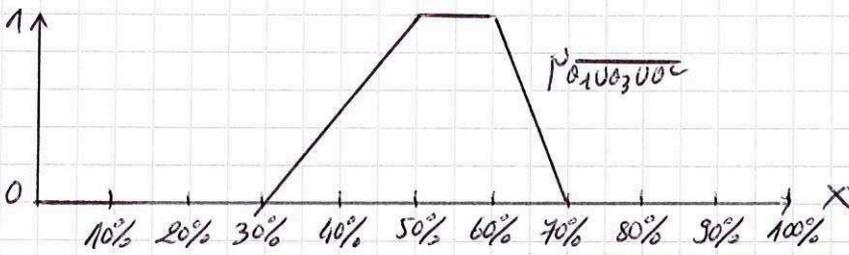
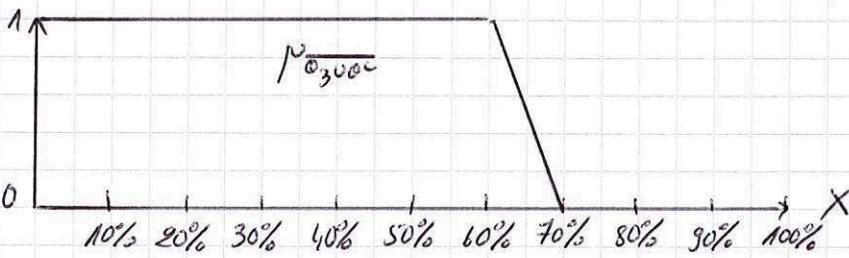
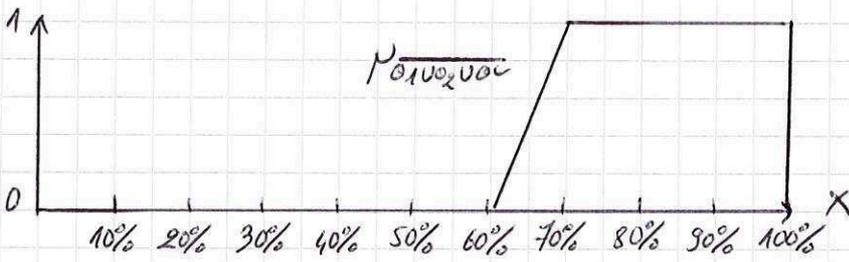
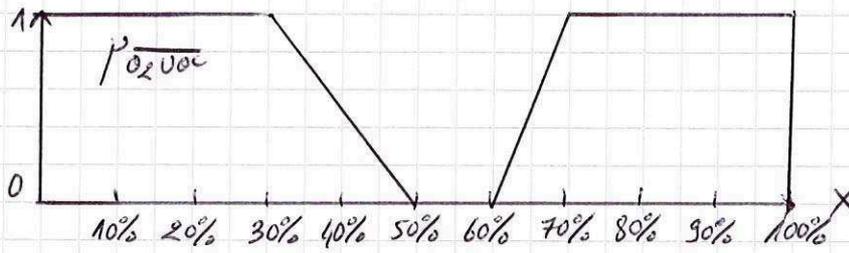
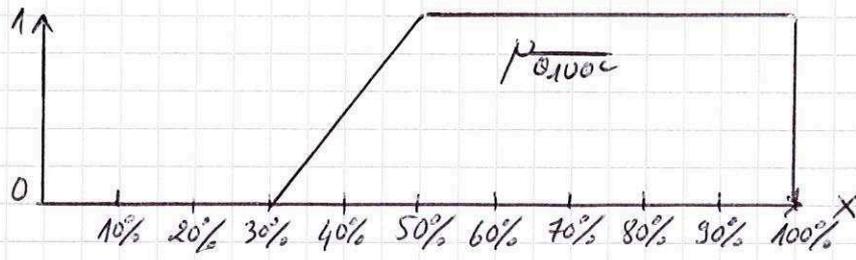
La partie B) détaille l'étape *Nouvelle transposition-2* pour ce critère. Elle établit les compléments aux sous-ensembles flous.

La partie C) détaille l'étape *Nouvelle transposition-3* pour ce critère et les six évaluations imprécises fournies par les six experts sous forme de six distributions de possibilité. Les mesures de possibilité sont extraites et notées. Elles correspondent aux mesures de plausibilité collectées dans le tableau IV.13 (p. 171).

A/ Nouvelle transposition - 1 : unions des 4 éléments de $\Theta^{c.w.}$

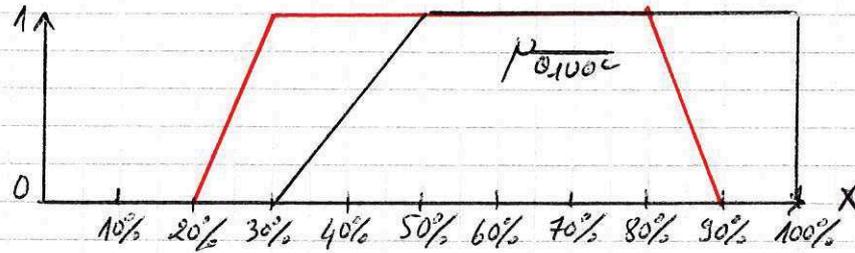


B) Nouvelle transposition - 2 : complément des unions de $\theta^{c.u.}$

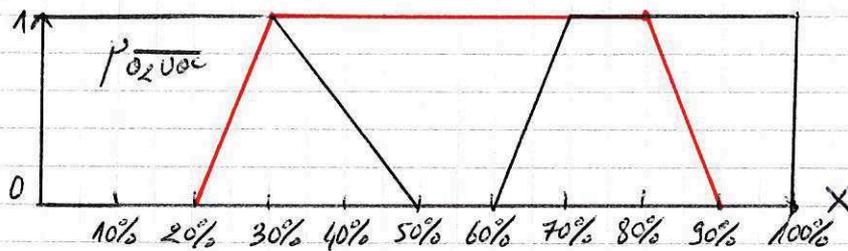


11 Nouvelle transposition - 3 : transposition de l'évaluation de l'expert 1

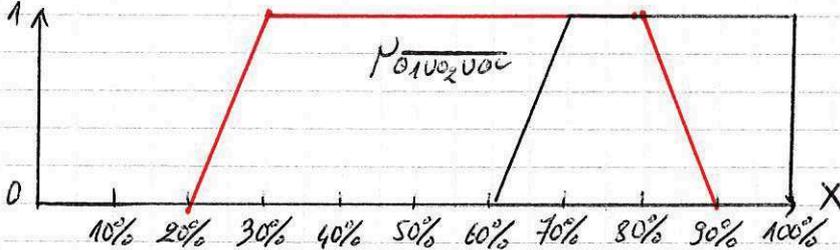
$$\pi_{\theta_{1U0c}}^{c.w.} = 1$$



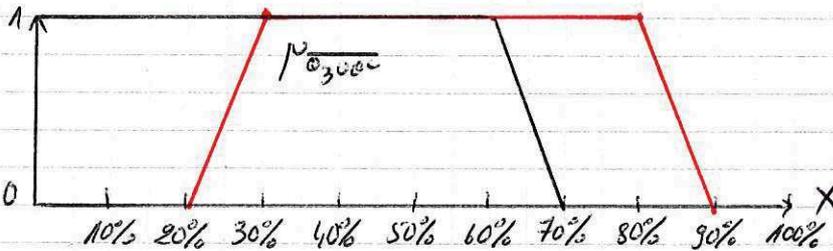
$$\pi_{\theta_{2U0c}}^{c.w.} = 1$$



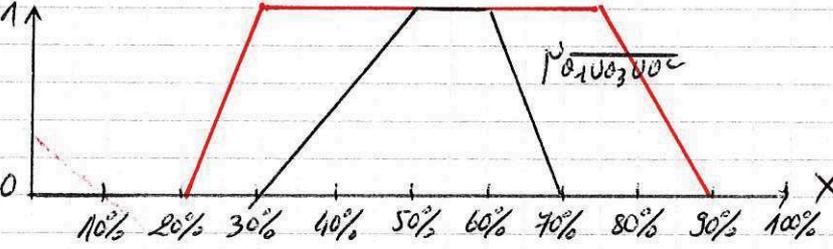
$$\pi_{\theta_{1U0_2U0c}}^{c.w.} = 1$$



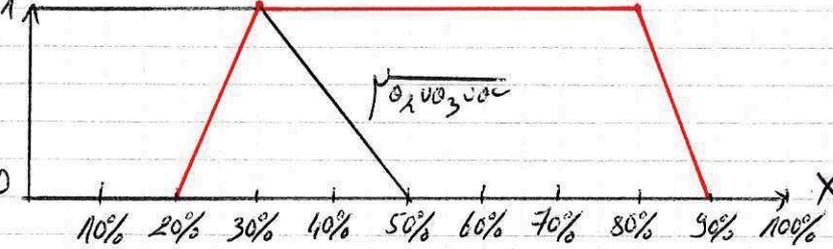
$$\pi_{\theta_{3U0c}}^{c.w.} = 1$$



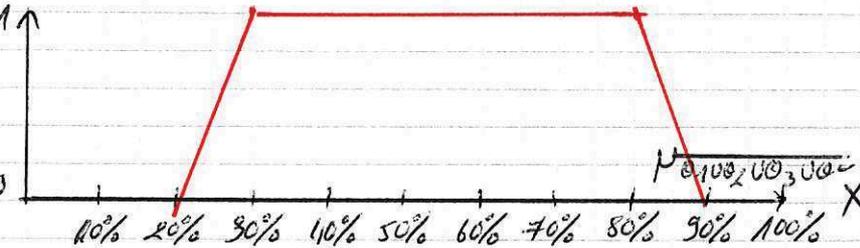
$$\pi_{\theta_{1U0_3U0c}}^{c.w.} = 1$$



$$\pi_{\theta_{2U0_3U0c}}^{c.w.} = 1$$

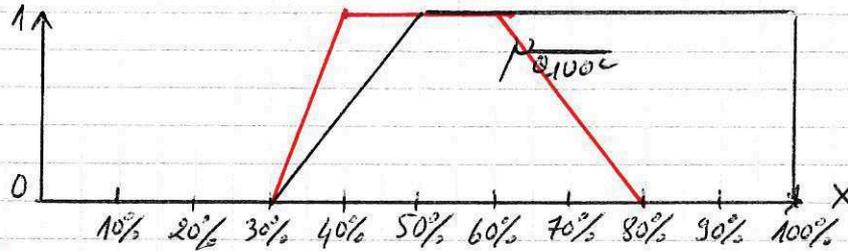


$$\pi_{\theta_{c.w.}}^{c.w.} = 0$$

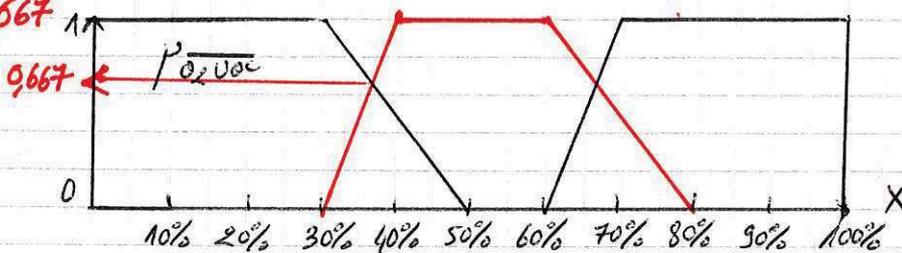


2/ Nouvelle transposition - 3 : transposition de l'évaluation de l'exercice

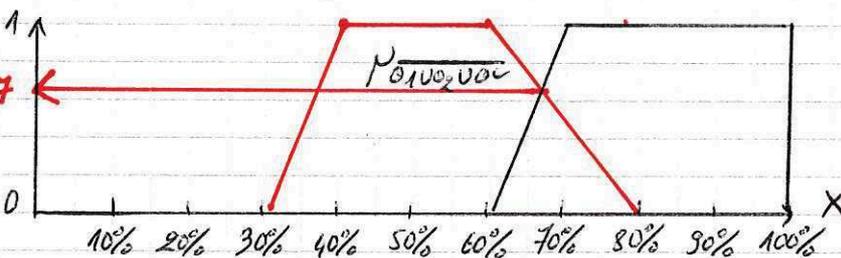
$$\frac{\pi^{c.w.}}{\theta_{1U0c}} = 1$$



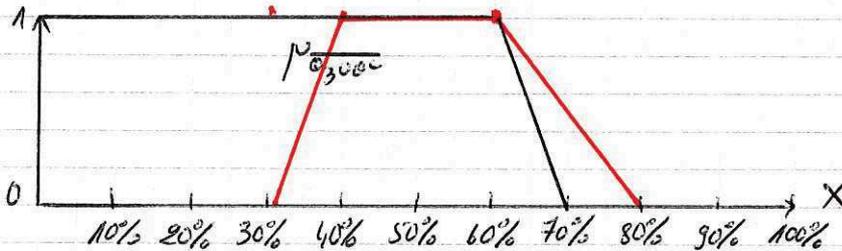
$$\frac{\pi^{c.w.}}{\theta_{2U0c}} = 0,667$$



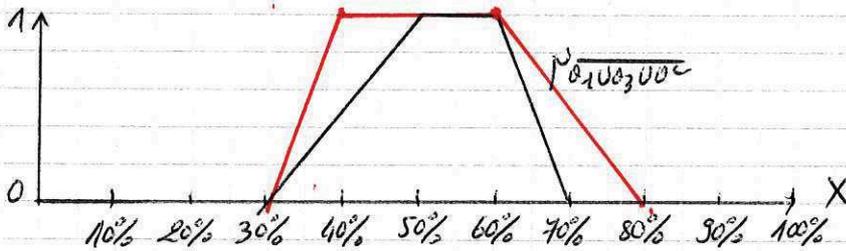
$$\frac{\pi^{c.w.}}{\theta_{1U0,2U0c}} = 0,667$$



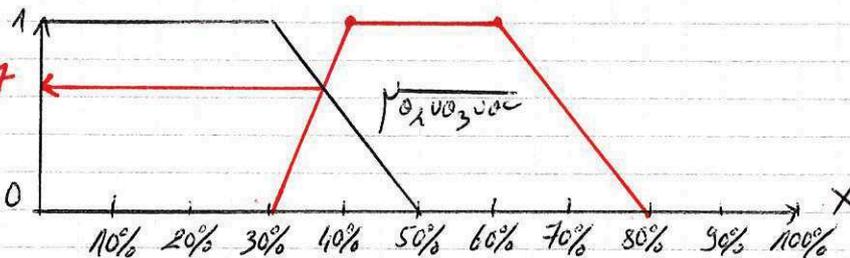
$$\frac{\pi^{c.w.}}{\theta_{3U0c}} = 1$$



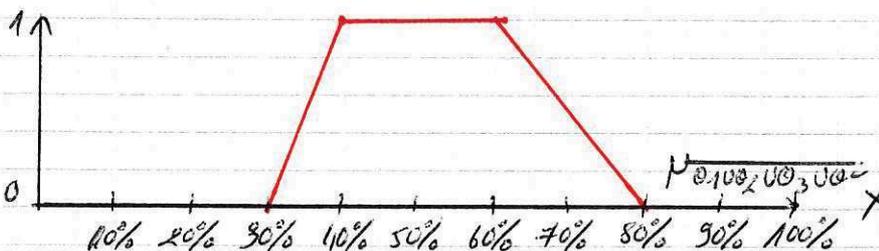
$$\frac{\pi^{c.w.}}{\theta_{1U0,3U0c}} = 1$$



$$\frac{\pi^{c.w.}}{\theta_{2U0,3U0c}} = 0,667$$

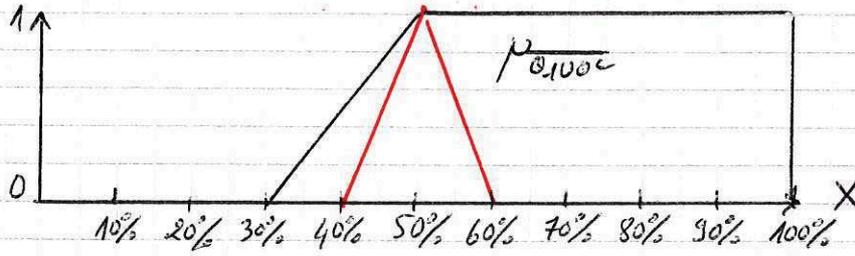


$$\frac{\pi^{c.w.}}{\theta^{c.w.}} = 0$$

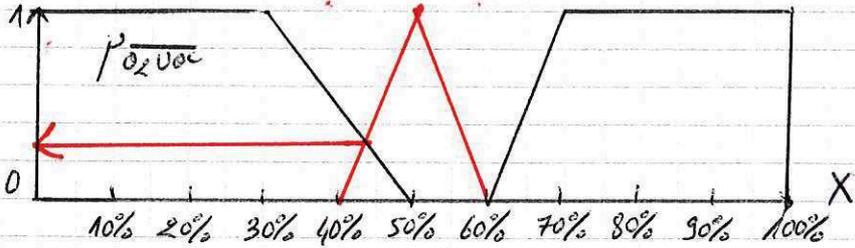


C3/ Nouvelle transposition - 3 : transposition de l'évaluation de l'expert 3

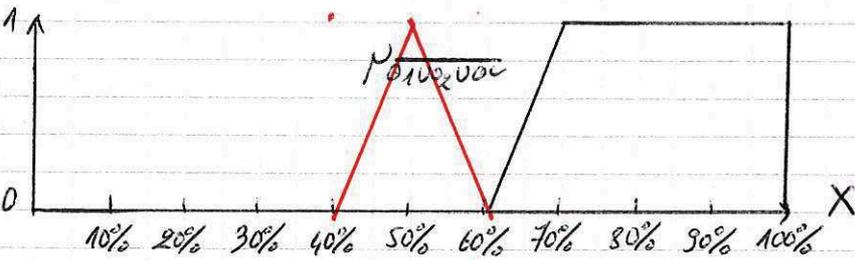
$$\pi_{\theta_{1U0C}}^{C.W.} = 1$$



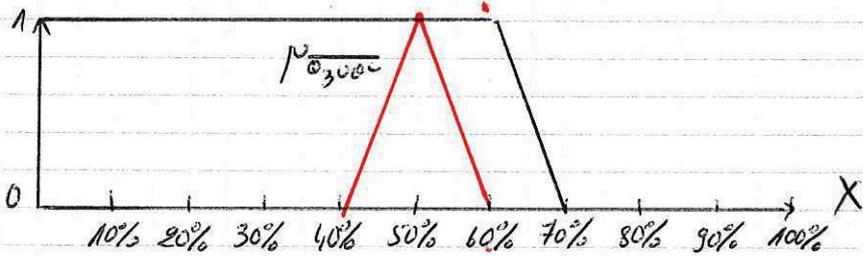
$$\pi_{\theta_{2U0C}}^{C.W.} = 0,333$$



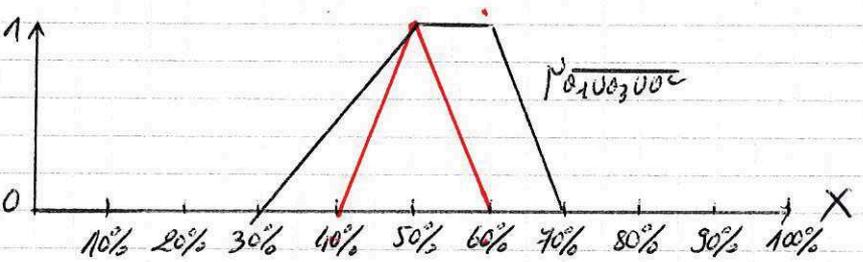
$$\pi_{\theta_{1U0_2U0C}}^{C.W.} = 0$$



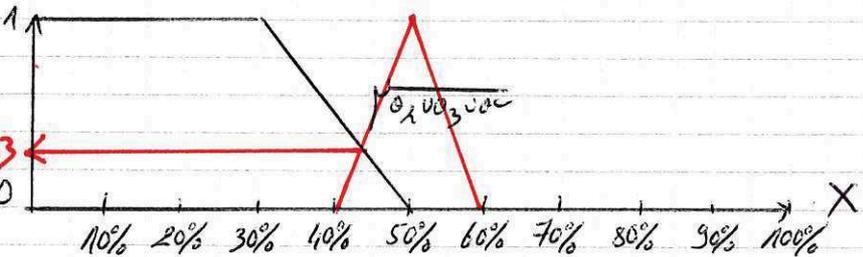
$$\pi_{\theta_{3U0C}}^{C.W.} = 1$$



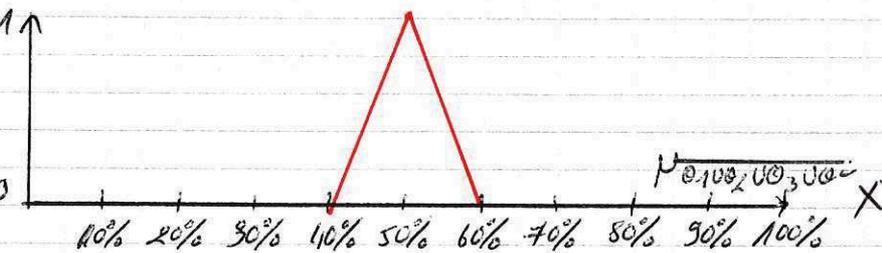
$$\pi_{\theta_{1U0_3U0C}}^{C.W.} = 1$$



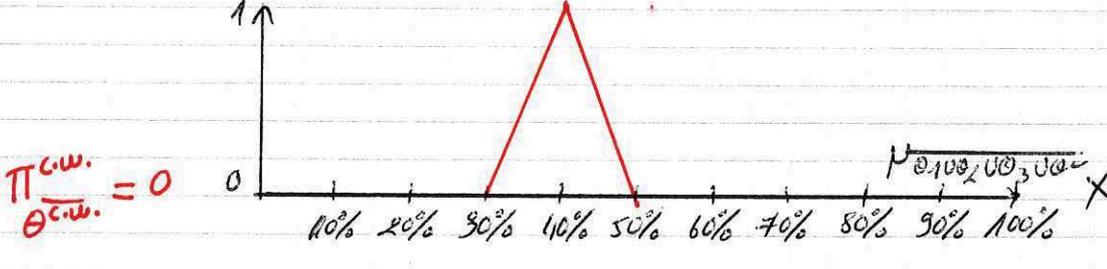
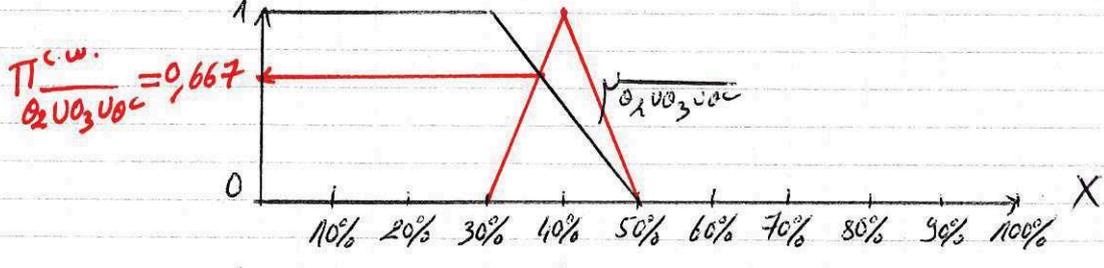
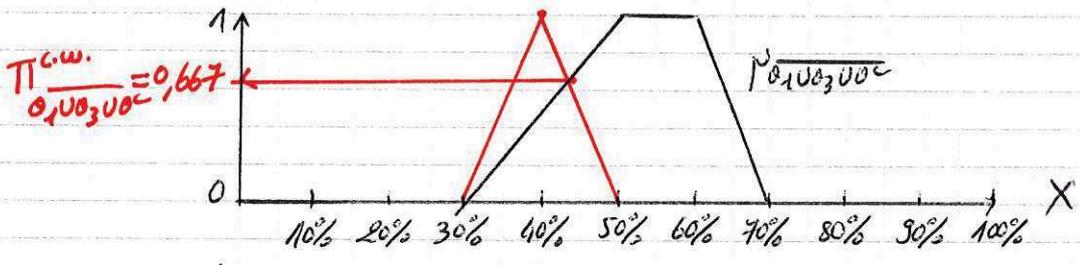
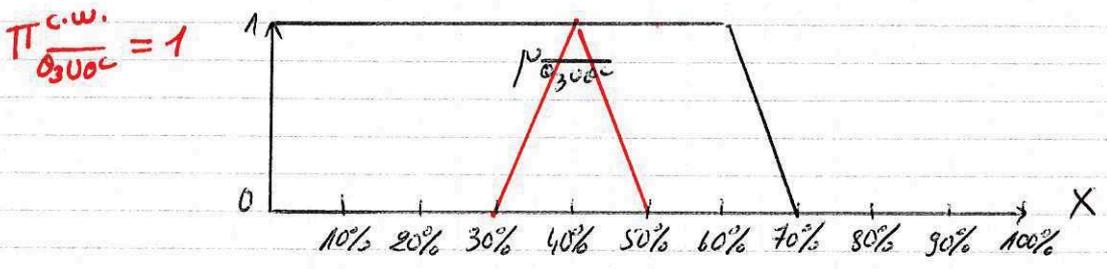
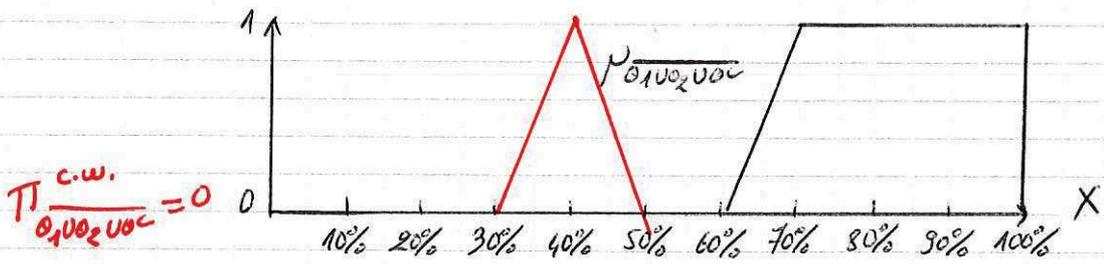
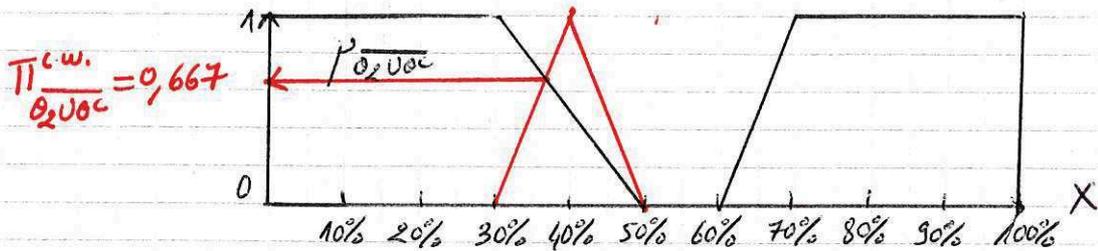
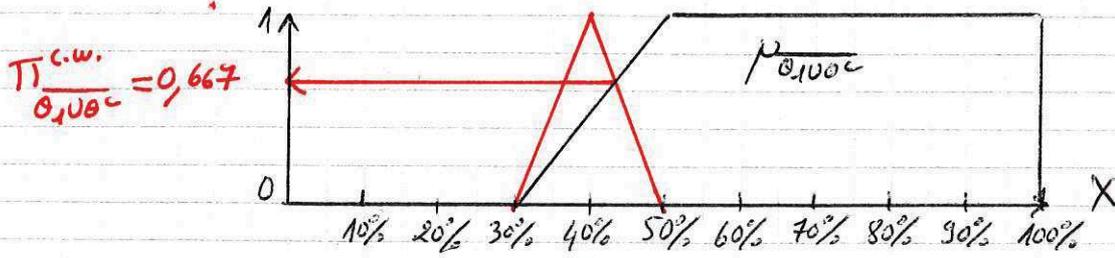
$$\pi_{\theta_{2U0_3U0C}}^{C.W.} = 0,333$$



$$\pi_{\theta_{C.W.}}^{C.W.} = 0$$

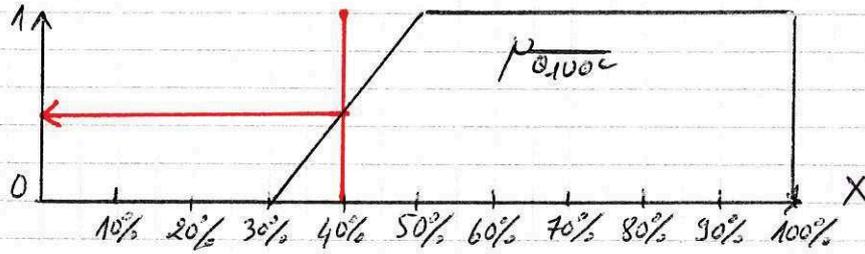


CL / Nouvelle transposition - 4 : transposition de l'évaluation de l'expert 1,

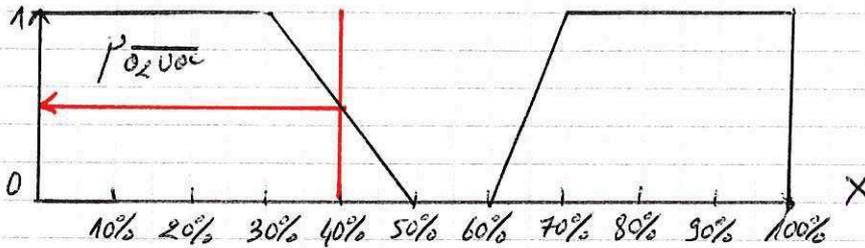


CS/ Nouvelle transposition - 5 : transposition de l'évaluation de l'expert 5

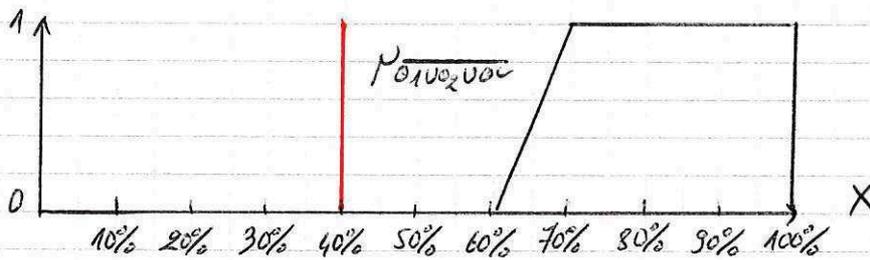
$$\pi_{\theta_{1U0c}}^{c.w.} = 0,5$$



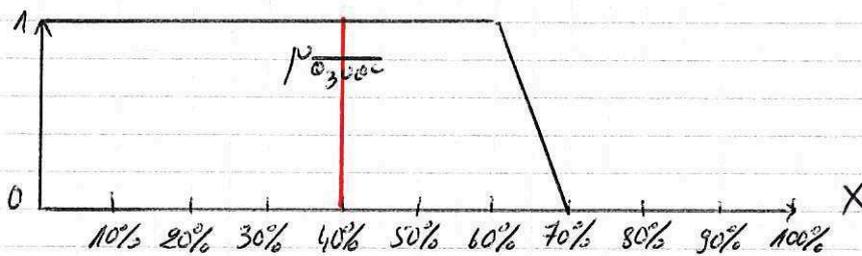
$$\pi_{\theta_{2U0c}}^{c.w.} = 0,5$$



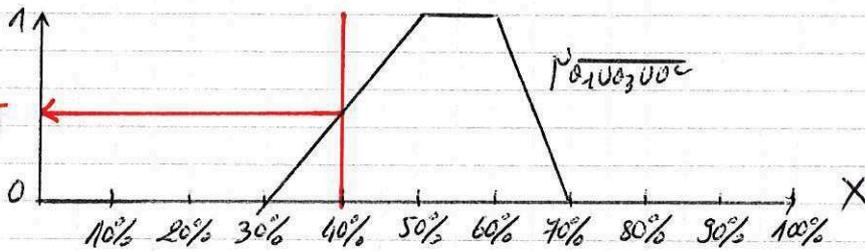
$$\pi_{\theta_{1U0_2U0c}}^{c.w.} = 0$$



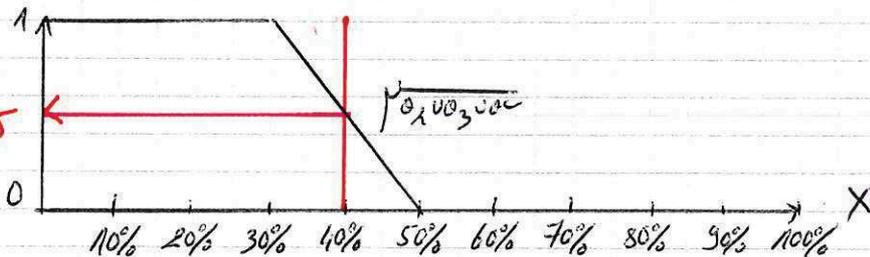
$$\pi_{\theta_{3U0c}}^{c.w.} = 1$$



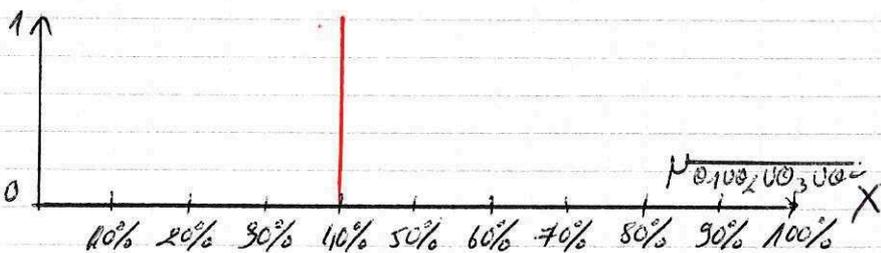
$$\pi_{\theta_{1U0_3U0c}}^{c.w.} = 0,5$$



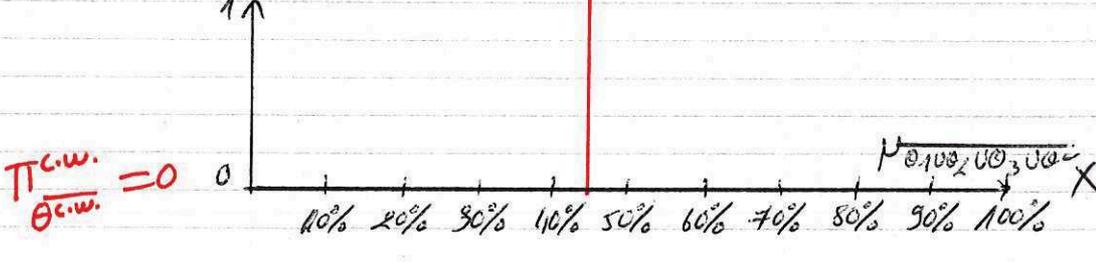
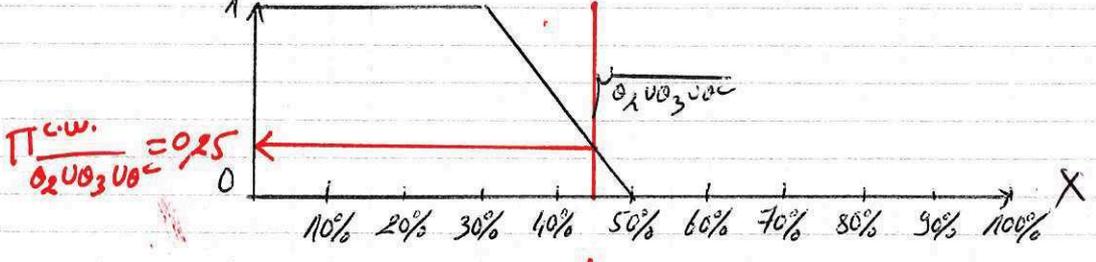
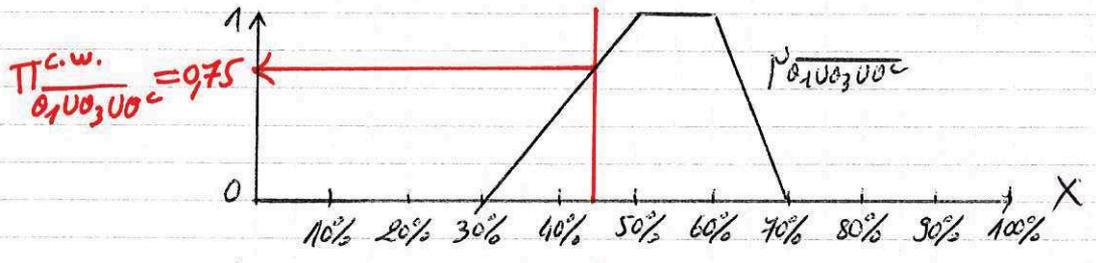
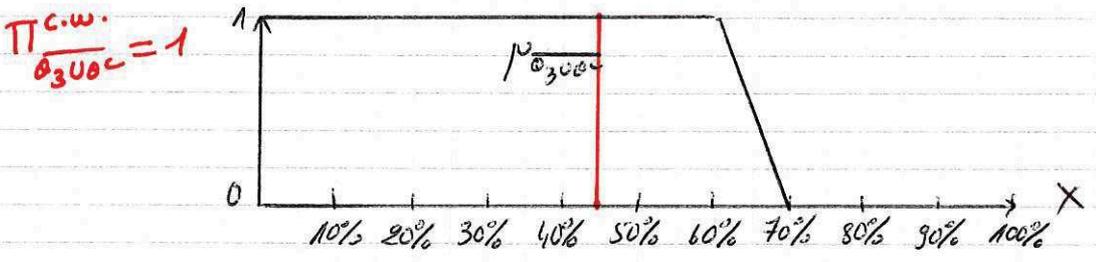
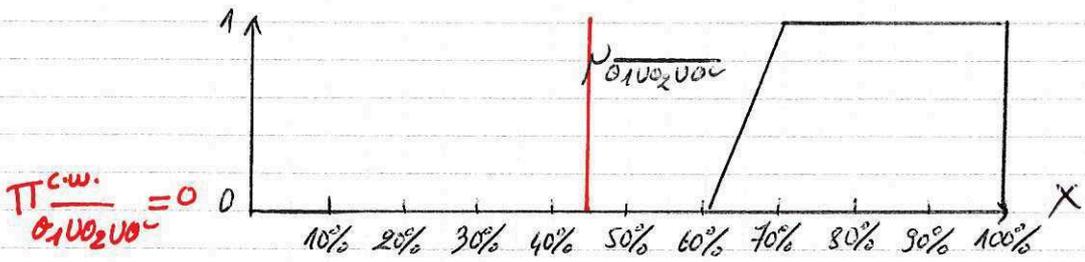
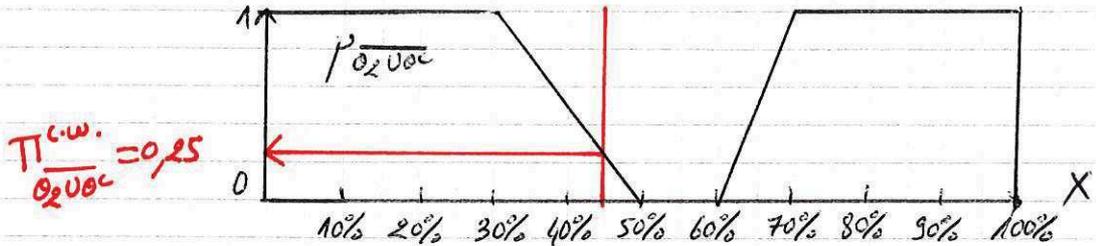
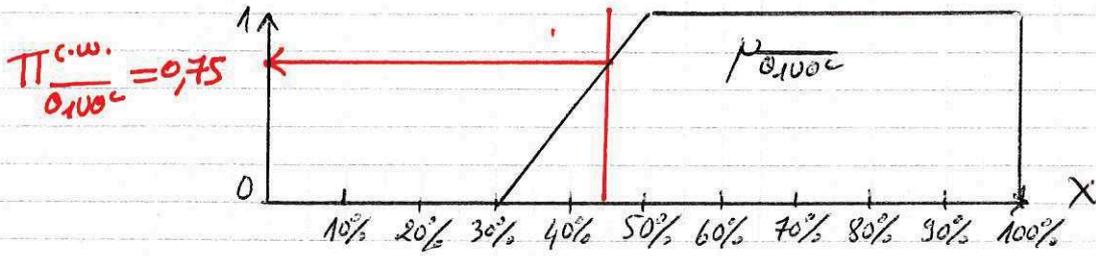
$$\pi_{\theta_{2U0_3U0c}}^{c.w.} = 0,5$$



$$\pi_{\theta_{c.w.}}^{c.w.} = 0$$



C6 / Nouvelle transposition - 6 : transposition de l'évaluation de l'expert 6



Annexe I : Sûreté de fonctionnement et propagation de l'évaluation de l'efficacité

Cette annexe présente une piste de réflexion pour transposer l'analyse des scénarios de défaillances à l'échelle d'un bassin d'enjeux équipés de dispositifs.

Un dispositif noté D peut être affecté par un ensemble de modes de défaillances $D_i, i = 1, \dots, m$. Le complément noté $\bar{D} = D_0$ correspondrait au mode sans défaillance.

Pour un mode donné, une hypothèse doit être formulée sur la relation entre l'évaluation de l'efficacité (ou performance) et la défaillance. Une première approche ferait l'hypothèse que la défaillance est le complément de l'efficacité pour ce mode. Comme l'efficacité, la défaillance de dispositif est établie pour un état de la nature noté $S_k^D \in \mathcal{S}^{\text{dispo}=D}, k = 1, \dots, P$.

Pour chaque mode et chaque scénario S_k^D , l'analyse des scénarios de défaillance permettrait d'identifier les conséquences sur le phénomène, se traduisant par un scénario aval $S_k^{D''}$ (figure 1).

L'analyse structurelle du système bassin d'enjeux le décompose en composants en parallèle ou en série (figure III.6, p. 113). La partie droite de la figure 1 schématise un bassin d'enjeux avec deux dispositifs parallèles D et D' implantés sur deux affluents indépendants, et un dispositif en série D'' , situé à l'aval de la confluence. Les scénarios considérés à leur aval sont ceux à l'échelle du bassin versant, notés $S_k \in \mathcal{S}^{\text{BV}}$.

Le schéma simplifié d'un bassin d'enjeux avec trois dispositifs (figure 1) permet d'illustrer le traitement de la propagation des scénarios pour des composants en série et en parallèle.

Tout d'abord, les défaillances des dispositifs sont conditionnées aux scénarios auxquels ils sont exposés. On peut noter les probabilités de défaillance, supposées connues à partir de l'évaluation de l'efficacité, par :

- pour le dispositif D , selon le mode de défaillance $D_i : p_i = P(D_i | S_k^D, S_k^{D'}), k = 1, \dots, P, i = 0, \dots, m$;
- pour le dispositif D' , selon le mode de défaillance $D'_j : p'_j = P(D'_j | S_k^D, S_k^{D'}), k = 1, \dots, P, j = 0, \dots, n$;
- pour le dispositif D'' , selon le mode de défaillance $D''_l : p''_l = P(D''_l | S_k^{D''}), k = 1, \dots, P, j = 0, \dots, o$.

Pour des dispositifs D et D' implantés en parallèle, sur des affluents indépendants, on peut supposer que leurs défaillances sont indépendantes. Cette condition permet d'écrire la probabilité que deux modes de défaillance D_i et D'_j surviennent en même temps par :

$$\pi_{ij} = P(D_i \cap D'_j | S_k^D, S_k^{D'}) = p_i \cdot p'_j$$

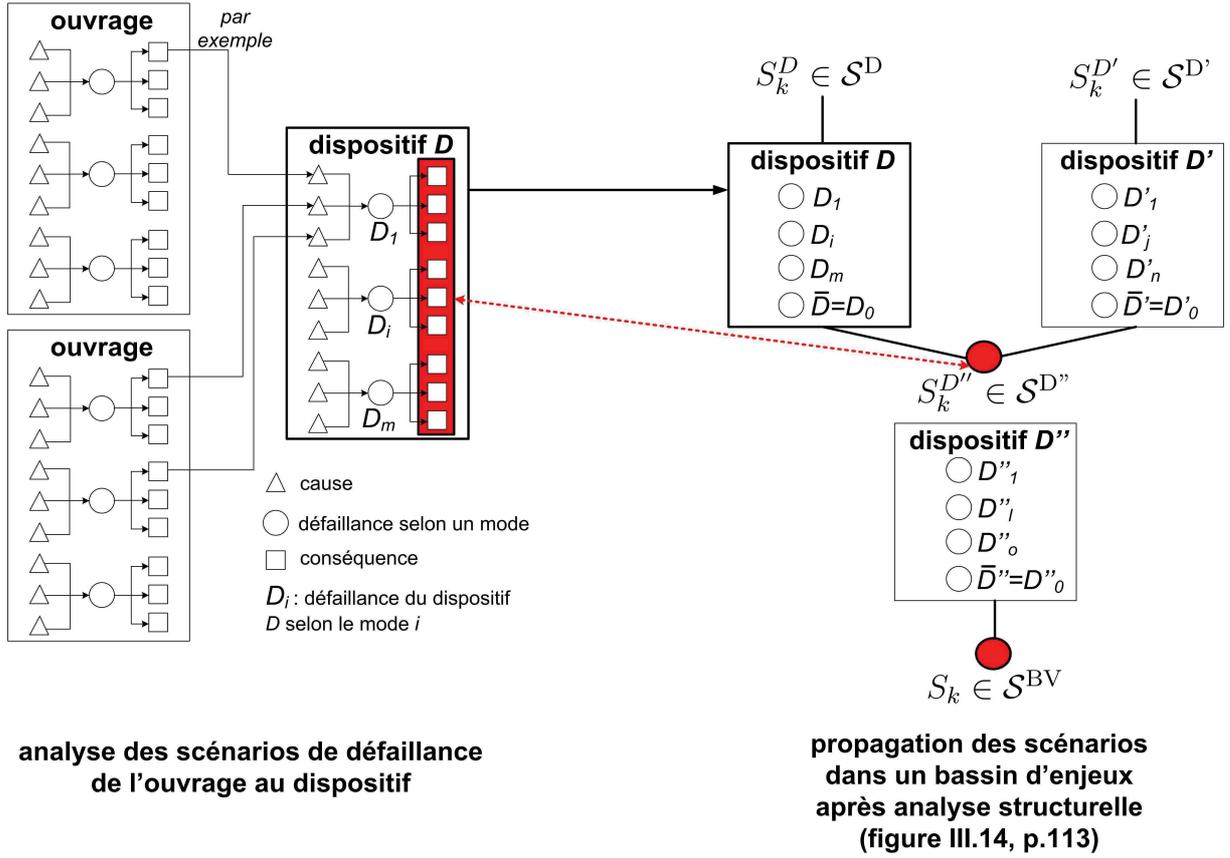


FIGURE 1 – Schématisation de l'analyse multi-échelle des scénarios de défaillance et de leur propagation dans un bassin d'enjeux.

Ensuite, le scénario $S_k^{D''} \in \mathcal{S}^{D''}$ dépend de la réalisation des défaillances D_i et D'_j . On a alors :

$$P(S_k^{D''} | S_k^D, S_k^{D'}) = \pi_{ij}, \quad i = 0, \dots, m, \quad j = 0, \dots, n.$$

Finalement, le scénario $S_k \in \mathcal{S}^{BV}$ correspond à la réalisation conjointe des défaillances D''_i, D'_j et D_i des trois dispositifs. Le théorème de la multiplication appliqué aux probabilités conditionnelles, permet d'établir :

$$P_{S_k^D, S_k^{D'}}(S_k) = P_{S_k^D, S_k^{D'}}(D''_i | D_i, D'_j) \times \pi_{ij}$$

Cette illustration simplifiée montre la possibilité de propager les défaillances dans le cadre des probabilités conditionnelles. Cependant, cela suppose de connaître :

- l'évaluation de la probabilité de défaillance de chaque dispositif, pour chaque mode, à partir de l'évaluation de l'efficacité correspondante ;
- le phénomène physique torrentiel permettent de décrire le scénario $S_k^{D''}$ associé aux différentes modes de défaillance de D et D' et de même pour le scénario S_k pour chaque mode de défaillance de D'' .

NNT : 2017LYSEM008

Simon CARLADOUS

IMPERFECT INFORMATION PROPAGATION-BASED INTEGRATED DECISION-AIDING APPROACH APPLIED TO ASSESS TORRENTIAL PROTECTIVE SYSTEMS' EFFECTIVENESS

Speciality: Environmental sciences and engineering

Keywords: natural hazards, protection, torrents, effectiveness, decision-aiding, information imperfection, Evidential Reasoning

Abstract:

Many torrential protective check dams have been built in French mountainous areas since the 19th century. They aim to reduce risk in torrential watersheds. Analysis of their effectiveness is needed to assess residual risk and to choose the best maintenance strategy in a context of reduced budgets. Chapter I introduces main issues due both to definition of effectiveness concept and also the several criteria and system scales that have to be assessed. Moreover, required expertise is based on imperfect information, provided by several sources with different reliability levels. To help such decisions, this thesis proposes to break down general assessment into several smaller decision-making problems. In chapter II, dependability analysis tools and Evidential Reasoning based-decision-aiding methods (ER-DAMs), using fuzzy sets and possibility theories, are chosen to help individual decisions. Chapters III to V then introduce new developments. Effectiveness concept is first defined. A multi-scale dependability analysis helps to describe each decision-making problem. ER-DAMs are then adapted to help effectiveness assessment at each system's scale. Technical improvements are provided to these methods for a better knowledge representation and final decision. Improved methods are then associated. Finally, individual problems and associated methods are integrated in a generic methodology to help torrential protective measures' effectiveness assessment at watershed scale. The last chapter VI focuses on discussion of integrative aspects and of ER-DAMs' specific developments. It gives some elements to improve methods but also to help operational implementation of the generic methodology.

NNT : 2017LYSEM008

Simon CARLADOUS

APPROCHE INTÉGRÉE D'AIDE À LA DÉCISION BASÉE SUR LA
PROPAGATION DE L'IMPERFECTION DE L'INFORMATION –
APPLICATION À L'EFFICACITÉ DES MESURES DE PROTECTION
TORRENTIELLE

Spécialité: Sciences et génie de l'environnement

Mots clefs : risques naturels, protection, torrents, efficacité, aide à la décision, imperfection de l'information, Raisonnement Évidentiel

Résumé :

Depuis le XIX^{ème} siècle, de nombreux dispositifs de protection ont été implantés en montagne pour réduire le risque torrentiel. L'évaluation multi-échelle de leur efficacité est nécessaire pour comparer et choisir les stratégies de maintenance et de gestion de l'occupation des sols. Le chapitre I met en évidence les ambiguïtés du concept d'efficacité évalué selon plusieurs critères dans un contexte d'information imparfaite, issue de sources multiples, inégalement fiables. Pour aider l'évaluation multidimensionnelle, le problème de décision est décomposé en plusieurs sous-problèmes formulés, modélisés, traités puis intégrés. L'état de l'art du chapitre II permet de retenir les méthodes de la sûreté de fonctionnement (SdF) et d'aide à la décision (AD) basées sur le Raisonnement Évidentiel, associant les ensembles flous, les possibilités, les fonctions de croyance et la fusion d'information pour traiter chaque problème. Le chapitre III explicite le concept d'efficacité puis propose une adaptation des méthodes de la SdF à la formulation multi-échelle des problèmes. Le chapitre IV adapte les méthodes d'AD basées sur le Raisonnement Évidentiel, les améliore pour mieux représenter la connaissance disponible et évaluer la qualité d'une décision, et les associe. Le chapitre V propose une méthodologie séquentielle qui intègre ces méthodes pour évaluer les mesures de protection, de l'échelle de l'ouvrage à celle du bassin d'enjeux. Enfin, le chapitre VI discute les résultats, identifie les apports respectifs de l'intégration et des nouvelles méthodes, puis décrit les perspectives de déploiement opérationnel de la méthodologie développée.