



HAL
open science

Traitement ordinal de l'information d'expertise pour le risque en génie civil : apport des sciences de la décision à la gestion des risques

Jean-Baptiste Toret

► To cite this version:

Jean-Baptiste Toret. Traitement ordinal de l'information d'expertise pour le risque en génie civil : apport des sciences de la décision à la gestion des risques. Gestion et management. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2014. Français. NNT : 2014PA010012 . tel-02089172

HAL Id: tel-02089172

<https://theses.hal.science/tel-02089172>

Submitted on 3 Apr 2019

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.

UNIVERSITE PARIS I- PANTHEON SORBONNE
Institut d'Administration des Entreprises de Paris

École doctorale de Management Panthéon-Sorbonne - ED 559
Equipe de Recherche GREGOR - EA 2474

**Traitement ordinal de l'information
d'expertise pour le risque en génie civil**
Apport des sciences de la décision à la gestion des risques

THESE
présentée et soutenue publiquement le **24 octobre 2014**
en vue de l'obtention du
DOCTORAT EN SCIENCES DE GESTION
par

Jean-Baptiste TORET

JURY

- Directeur de recherche : **Pr. Bertrand Munier**
GRID/GREGOR, IAE de Paris, Université de Paris1
- Rapporteurs : **Pr. André Lapied**
GREQAM-AMSE, Université d'Aix Marseille
- Pr. Jacques Thépot**
LARGE, Université Louis Pasteur, Strasbourg
- Suffragants : **M. François Beaudouin**
Ingénieur-Chercheur, EDF R&D, cotuteur
- Dr. Marc Lassagne**
MCF, GRID/GREGOR, ENSAM & IAE Paris
- M. Christian Meuwisse**
Ingénieur-Chercheur, EDF R&D, cotuteur
- Pr. Lorenzo Peccati**
Pro-recteur, Università Commerciale Luigi Bocconi

L'université de PARIS I – Panthéon Sorbonne n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu François Beaudouin et Christian Meuwisse qui ont encadré cette thèse au sein d'EDF, dans le département Management des Risques Industriels. Durant ces trois années, leur soutien quotidien inébranlable, en dépit de circonstances changeantes, et la confiance qu'ils m'ont accordée ont été des clés de la réussite de la thèse. Leur aide et leur expertise scientifique et technique m'ont en outre été très précieuses pour mener à bien les travaux présentés dans ce mémoire.

Je remercie également le Professeur Bertrand Munier qui a dirigé cette thèse, pour son soutien, son aide et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ces trois années. Son expertise scientifique a notamment permis le développement de certaines idées de la thèse, et nos différents échanges ont participé à mieux cerner leur orientation.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Jacques Thépot et à André Lapiéd, rapporteurs de la thèse, pour leurs remarques et retours sur le présent mémoire.

Ma gratitude va également aux experts de la Division Technique Générale d'EDF, en particulier à Jérôme Sausse ainsi qu'à Florian Mauris, pour leurs explications, leurs remarques et appréciations, ainsi que pour leur disponibilité.

Cette thèse a pu être enrichie grâce aux remarques et recommandations, notamment des Pr. Pascale Zaraté et Adiel Teixeira de Almeida, que je remercie.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toute l'équipe du département Management des Risques Industriels de la R&D d'EDF, à Guillaume Damblin, Jeanne Demigné et tous les autres, grâce à qui j'ai pu passer trois excellentes années dans une ambiance très propice à la recherche scientifique.

Résumé

Lorsque des systèmes, tels les barrages, sont soumis à un haut degré d'incertitude et que l'heuristique des experts prend une place très importante, les outils habituels de gestion des risques ne sont pas toujours efficaces pour rendre compte du jugement des experts. Les sciences de la décision proposent alors des outils pour aider à la compréhension, voire à l'élicitation de l'avis des experts. Dans le cas des barrages, nous disposons d'un retour d'expérience encore peu formalisé et de peu d'événements significatifs. En outre, les mécanismes phénoménologiques à l'œuvre sont mal connus. Il est alors nécessaire d'invoquer des outils qui sortent des habitudes pratiquées dans la gestion des risques.

Cette étude propose une méthode qui permet à l'expert de mieux éliciter son jugement, et de révéler les risques sur les barrages par un traitement ordinal de l'information d'expertise. En outre, nous montrerons que cet outil est un estimateur du maximum de vraisemblance, et promet donc une information de première importance pour un décisionnaire. Pour parvenir à ce résultat, nous utiliserons une méthode articulée autour des bases de règles logiques, dont la construction est enrichie par des outils issus des théories du vote, des jeux coopératifs et des bases de données. De cette façon, nous montrerons qu'il est possible de gérer les risques sans utiliser les outils issus des approches probabilistes, tout en prenant en compte les heuristiques des experts.

Mots-clés : science de la décision, management des risques, incertitude, heuristique, règles logiques, théorie du vote, théorie des jeux

Abstract

When facing high uncertainty systems, such as dams, where experts heuristics becomes too much important, usual tools are not satisfying enough to reveal experts' opinion in order to manage the risks associated with the system. Decision science then brings tools to sharpen our understanding, or even help the elicitation, of what the expert wants best to express. Concerning dams, we have only very little feedback, and no to few significant events. In addition to the lack of knowledge when it comes to the phenomenological mechanisms, these issues lead us to use unusual tools for risk management.

This study brings an innovative tool to help on the elicitation of experts' opinion, allowing risk management on dams based on an ordering approach. Furthermore, we will show this tool is an estimation of the maximum likelihood, which is invaluable information for any decision maker. We will show this result is obtainable through a method using rule-based assignments, developing the rules thanks to tools like votes, games and database theories. Doing so, we will show how it is possible to process risks without using usual probabilistic tools, while taking experts' heuristics into account.

Keywords: decision science, risk management, uncertainty, heuristics, logical rules, vote theory, game theory

Sommaire

Introduction 13

I] Contexte de l'étude et problématique..... 15

A. Le risque en génie civil..... 15

B. Le contexte industriel 17

C. L'incertitude et les heuristiques dans le risque 18

a. Généralités : l'heuristique des experts 18

b. Les biais cognitifs des experts 20

c. L'incertitude knightienne 25

D. Le projet d'étude 28

**II] Les méthodes d'analyse de risques pour le génie
civil 31**

A. Généralités..... 31

B. Les propositions théoriques..... 32

a. Les méthodes probabilistes et multiattributs 33

b. Les méthodes issues des sciences de la décision 37

<i>C. Les pratiques dans le domaine du Génie Civil.....</i>	<i>41</i>
<i>a. Le diagramme de Farmer</i>	<i>42</i>
<i>b. Les méthodes de sûreté de fonctionnement.....</i>	<i>45</i>
<i>c. Les indices de condition</i>	<i>48</i>
<i>d. Les études de danger EDF pour les ouvrages de génie de civil.....</i>	<i>52</i>
<i>D. Vers une représentation alternative du risque.....</i>	<i>59</i>
<i>III] Présentation des outils utilisés.....</i>	<i>64</i>
<i>A. Les règles logiques pour agréger des arbres de causes</i>	<i>64</i>
<i>a. Les arbres de causes.....</i>	<i>64</i>
<i>b. Généralités sur les règles logiques</i>	<i>67</i>
<i>c. Application des règles logiques aux arbres de causes.....</i>	<i>71</i>
<i>B. De l'intérêt de la théorie du vote et de la théorie des jeux pour les règles logiques</i>	<i>75</i>
<i>a. Des analogies intuitives.....</i>	<i>77</i>
<i>b. La valeur de Shapley pour distribuer la partie décisionnelle des règles logiques.....</i>	<i>86</i>
<i>c. Le score de Kemeny pour comparer les éléments de la partie conditionnelle des règles.....</i>	<i>88</i>

<i>C. Comment la théorie des bases de données permet de simplifier la construction des règles logiques.....</i>	<i>93</i>
<i>a. Analogie entre les interactions et les dépendances fonctionnelles.....</i>	<i>93</i>
<i>b. Les axiomes d'Armstrong et la recherche de la couverture minimale.....</i>	<i>96</i>
<i>D. Récapitulatif de la méthode proposée.....</i>	<i>98</i>

IV] Cas d'application : exemple du barrage de Serre-Ponçon..... 109

<i>A. Exemple d'application : le barrage de Serre-Ponçon</i>	<i>109</i>
<i>a. Travail préliminaire sur les critères.....</i>	<i>113</i>
<i>b. Recherche des interdépendances et de leur couverture minimale.....</i>	<i>117</i>
<i>c. Comparaison des états de critères.....</i>	<i>124</i>
<i>d. Calcul des valeurs de Shapley.....</i>	<i>135</i>
<i>e. Participation des états et bases de règles primaires.....</i>	<i>140</i>
<i>f. Bases de règles secondaires et résultats.....</i>	<i>150</i>
<i>B. Discussion des résultats.....</i>	<i>158</i>

<i>V] Conclusion et perspectives de recherche</i>	<i>164</i>
A. <i>Discussion de la méthode proposée</i>	<i>164</i>
B. <i>Perspectives de recherche</i>	<i>166</i>
a. <i>Méthodes d'agrégation</i>	<i>166</i>
b. <i>Questionnaires aux experts</i>	<i>169</i>
c. <i>Programmation et opérationnalisation</i>	<i>171</i>
C. <i>Conclusion générale</i>	<i>173</i>
<i>Bibliographie.....</i>	<i>176</i>
<i>Annexes</i>	<i>I</i>
<i>Glossaire</i>	<i>XXVIII</i>
<i>Table des matières</i>	<i>XXXI</i>

Introduction

Dans le domaine du génie civil, la gestion des risques prend une part de plus en plus importante, voire critique. En effet, les événements redoutés sur de telles structures ont souvent des conséquences catastrophiques, parfois même en termes de vies humaines. Pourtant, le décideur se trouve souvent dépourvu face aux difficultés inhérentes à ces systèmes particulièrement complexes et aux mécanismes parfois mal connus. L'information d'expertise est souvent rendue délicate à exploiter à causes des phénomènes cognitifs à l'œuvre.

Face à ces difficultés, la réponse la plus courante de l'ingénieur gestionnaire des risques est la construction d'une cartographie des risques de type « gravité x fréquence ». Malheureusement, cette vision trop frustrée et trop peu robuste ne peut permettre de gérer les risques de façon discriminante. L'alternative observée habituellement est l'utilisation de modèles probabilistes construits sur la base du retour d'expérience des phénomènes physiques. Fondés sur l'existence d'une distribution unique et « objective », ces modèles occultent certaines difficultés propres au génie civil, comme l'attitude des experts dans des situations d'incertitude ou la diversité de leurs jugements. En effet, il n'est pas rare d'obtenir des jugements divergents de la part d'experts, sur un système unique à un moment identique, ce qui rend caduque la représentation d'une distribution supposée unique.

L'idée générale que la rationalité d'un acteur est limitée par son propre processus cognitif ainsi que par l'information à disposition a donné naissance au concept de « rationalité limitée » décrit pour la première fois par [Simon, 1955]. Ce concept s'est développé autour d'une coopération entre économistes et psychologues et a donné naissance à différentes approches comme présentées par [Munier *et al.*, 1999] dans des cadres bien identifiés. Bien que le problème de rationalité limitée ne soit pas récent et ait permis de grandes avancées en économie comportementale, sa mise en pratique reste d'autant plus

délicate que peu d'expériences viennent étayer les différentes théories qui découlent de ce concept. Ces méthodes sont globalement mal acceptées par les acteurs privés, malgré l'apparition de méthodes adaptées aux besoins industriels comme la méthode ESIC développée par [Munier, 1995].

En génie civil, l'objectif d'un décideur lorsqu'il s'agit de gérer les risques des ouvrages sous sa responsabilité sont multiples. D'une part, les études de danger sont un document servant à communiquer avec les autorités concernant la sécurité des zones, populations et environnements, exposés aux événements redoutés de chaque ouvrage. D'autre part, les études de danger peuvent constituer un argument en faveur d'un choix de répartition de ressources de maintenance. De plus, les études de danger peuvent également servir, au moins partiellement, d'information sur la fiabilité des structures étudiées. Dans tous les cas, la forme généralement utilisée pour représenter les risques est ordinaire : il s'agit pour les experts de proposer la classification des risques, entre eux et par rapport à une référence (généralement le risque quasi-nul ou l'événement redouté). A cause des objectifs décrits ci-dessus, il devient alors nécessaire pour le décideur de traiter l'information d'expertise de façon ordinaire.

Cette thèse propose de se pencher sur une aide à l'expertise, se plaçant d'un point de vue du décideur, et donc aidant à prendre en compte ses besoins et ses objectifs, tout en considérant les spécificités des ouvrages de génie civil, et surtout la nécessité d'une approche plus rigoureuse et acceptée y compris par les organismes compétents extérieurs. En considérant les experts, leur heuristique, leur rationalité limitée, dans le cadre d'un système où l'incertitude est particulièrement forte et où les pratiques actuelles ne répondent en rien aux exigences de rigueur que des ouvrages de génie civil nécessitent, nous proposerons dans cette thèse une méthode originale, relevant d'une vision alternative du risque, pour répondre aux contraintes fortes décrites ici.

I] Contexte de l'étude et problématique

A. Le risque en génie civil

Si le risque est connu depuis toujours, ce n'est que depuis le XVII^{ème} siècle que sa formalisation est étudiée. La notion est suffisamment complexe pour qu'il soit considéré de natures très différentes selon les époques et les disciplines, et encore aujourd'hui la notion de risque et sa gestion sont comprises différemment par un entrepreneur que par un financier, ou qu'un ingénieur, ou qu'un chercheur. Le monde dans lequel nous vivons tend de plus en plus à asseoir un contrôle aussi poussé que possible sur toutes les variables de notre environnement, et cela passe nécessairement par une gestion des risques toujours plus rigoureuse et efficace. Les financiers par exemple cherchent à mieux maîtriser les prises de risque sur les marchés. Les ingénieurs cherchent eux à mieux comprendre et gérer les risques sur des systèmes opérationnels, qu'ils soient associés à des moyens de production (risque qu'une machine tombe en panne, par exemple), d'exploitation ou autre.

Le risque a longtemps été perçu comme la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement donné et de ses conséquences. Cette définition réductrice a évolué, et aujourd'hui le référentiel ISO guide 73 en donne une définition différente :

« Le **risque** est l'effet de l'incertitude sur les objectifs »

Cette évolution témoigne de la volonté de voir le risque comme l'objet complexe qu'il est par nature, et qui n'est pas réductible à de simples probabilités et conséquences identifiables et quantifiables. Par nature même, le risque n'est pas maîtrisable : l'incertitude qui le définit

est totalement contraire à l'idée de pouvoir en contrôler les aspects, souvent même à pouvoir les comprendre. La « maîtrise des risques » est par conséquent un mirage, un oxymore plus adapté à la poésie qu'au réalisme qui préoccupe un gestionnaire des risques. La conséquence principale de cet état de fait est la possibilité de toujours améliorer la gestion des risques d'un système : le seul moyen de supprimer un risque est de supprimer l'incertitude du système.

Un des risques opérationnels les plus partagés à l'échelle mondiale est la gestion des risques sur le patrimoine immobilier. D'une part, lorsqu'une structure de génie civil s'effondre, les conséquences sont désastreuses, surtout si des vies humaines sont mises en danger. D'autre part, conserver un patrimoine immobilier aussi longtemps que possible en bon état permet de considérablement réduire les coûts d'exploitation d'une entreprise, les ouvrages de génie civil étant souvent très onéreux. Ainsi, on pourrait croire que la gestion des risques sur les ouvrages de génie civil, critique s'il en est, est à maturité dans ce monde de maîtrise de l'environnement. Dans la réalité, il n'en est rien : si des progrès considérables ont été faits, les systèmes étudiés sont souvent d'une complexité remarquable et plusieurs facteurs viennent handicaper le rôle du gestionnaire de risques :

- Les mécanismes de vieillissement des ouvrages de génie civil ne sont pas tous connus et compris, du fait de leur complexité et leur multiplicité, ainsi que de leur interaction forte
- Les conséquences catastrophiques d'un événement redouté sont telles que le jugement des experts mis en relation avec ces événements sont sujets à des biais cognitifs (voir I.C.b), entraînant souvent des divergences d'expertise pour un même système au même moment
- Le retour d'expérience est important pour ces systèmes (plusieurs décennies pour un nombre considérable de systèmes), mais les événements significatifs sont si rares que le gestionnaire de risques n'a que très peu de données à partir desquelles travailler

- Les coûts associés, tant à la construction qu'à la maintenance des ouvrages de génie civil, en relation avec la gestion des risques, sont tels qu'il est nécessaire d'avoir une vision aussi claire que possible de la façon dont il faut allouer les ressources.

La prise de conscience progressive de ces difficultés a permis une amélioration sensible des recherches dans ce domaine, ainsi qu'une volonté des gestionnaires de risques d'opter pour des pratiques plus rigoureuses et adaptées. Cependant, si les recherches permettent d'aboutir sur des méthodes rigoureuses, elles sont souvent difficilement applicables en pratique, tandis que les méthodes appliquées manquent encore trop cruellement de rigueur.

B. Le contexte industriel

La société EDF est résolument engagée dans la démarche actuelle d'enrichissement de ses méthodes de gestion des risques, en particulier pour les ouvrages de génie civil. En particulier, les 640 barrages en exploitation sont autant de systèmes critiques uniques qui doivent répondre à une attention particulière et constante. Ainsi, chaque barrage est l'objet d'une étude de dangers tous les 10 ans, ce qui revient à produire en moyenne plus d'une étude de dangers par semaine. En outre, chaque barrage est un système unique : l'environnement de sa construction est toujours très différent, son utilisation n'est pas toujours la même, la période de conception et de construction (et donc des méthodes utilisées) évolue et son vieillissement est propre à de nombreux facteurs dont l'environnement, mais aussi des événements de systèmes associés au barrage. En conséquence, l'étude de dangers d'un barrage n'est en aucun cas applicable à un autre barrage.

Cette difficulté supplémentaire est connue et comprise depuis longtemps, y compris par d'autres exploitants qu'EDF. Hydro-Québec, par exemple, cherche à développer depuis plusieurs décennies des moyens plus efficaces de gérer les risques sur leurs barrages. Si le problème est compris et partagé, la solution, elle, ne semble toujours pas exister. Pour illustration, Hydro-Québec a récemment abandonné le développement d'une méthode sur laquelle les espoirs étaient grands (voir II.C.c).

Compte tenu des besoins de communication d'une entreprise moderne et de la taille d'EDF, un autre aspect prend une importance non négligeable : la facilité de compréhension et de communication autour des résultats donnés par une méthode donnée. Néanmoins, cette thèse étant un travail de recherche dans le domaine du management des risques et non de la communication d'entreprise, nous avons fait le choix de nous affranchir intégralement de ce souci, laissant à l'utilisateur (EDF ou autre) le soin de réfléchir aux moyens de communiquer autour des résultats. Cependant, la vocation appliquée des travaux présentés ici nous a poussés à adopter un angle de recherche propice à la communication avec les utilisateurs de la méthode, à savoir les experts et les décideurs.

C. L'incertitude et les heuristiques dans le risque

a. Généralités : l'heuristique des experts

Par nature, le risque relève d'une connaissance non exhaustive d'un système. Cette méconnaissance, voire cette ignorance, est palliée

par les experts dans leur jugement, par leur expérience, leurs connaissances et, souvent, leur « intuition ». Que ce soit par le risque ou l'incertitude, l'expert est amené à mobiliser son heuristique afin d'exprimer son jugement.

S'il est communément considéré que l'heuristique d'un expert l'éloigne d'une solution mathématiquement optimale, elle peut également fournir des informations intéressantes au décisionnaire. Le dictionnaire de l'Académie Française donne la définition suivante de l'heuristique :

*« Une **heuristique** est une démarche relativement empirique, établissant des hypothèses provisoires dans laquelle l'imagination, l'expérience, et l'histoire personnelle ont une place non négligeable »*

Les corollaires de l'heuristique sont généralement les biais cognitifs et les erreurs en résultant. Comme l'ont montré [Gigerenzer *et al.*, 2011], la part que prend l'heuristique dans un raisonnement est proportionnelle au niveau d'incertitude du système étudié. Dans le cas où l'incertitude devient trop importante, l'heuristique devient alors le moyen utilisé par le cerveau humain pour combler les déficits causés par cette incertitude pour avoir une vision globale de l'objet d'étude.

Dans le cadre d'ouvrages de génie civil, où l'incertitude est particulièrement forte, on comprend ainsi que l'heuristique des experts qui étudient ces systèmes prend une part considérable. Les avis des chercheurs divergent quant à l'attitude à adopter pour gérer l'impact de l'heuristique des experts : certains considèrent que l'écart causé par l'heuristique entre l'information d'expertise et l'information réelle objective justifie d'en diminuer l'impact le plus possible, tandis que d'autres pensent au contraire que l'heuristique est un excellent moyen de combler l'incertitude d'un système de façon efficace (voir par exemple les travaux de [Gigerenzer, 2014]). Dans tous les cas, il est nécessaire, surtout pour des systèmes aussi complexes et critiques que les ouvrages de génie civil, de comprendre l'heuristique des experts, par extension l'incertitude du système qu'ils étudient et les biais cognitifs

auxquels ils sont soumis, afin de comprendre l'information d'expertise et d'être en mesure de la traiter.

b. Les biais cognitifs des experts

Le premier facteur influençant l'heuristique d'un expert est l'ensemble des biais cognitifs auxquels il est soumis. Ces biais, loin d'être une perversion de l'information, sont au contraire un indicateur important que le décideur doit prendre en compte. Les enjeux industriels et pratiques sont tels que les méthodes descriptives offrent de bien meilleurs résultats que les méthodes théoriques et fondamentales. [Kahneman & Tversky, 1973] définissent un biais cognitif comme un dévoiement du raisonnement rationnel constituant la contrepartie négative des modes de résolution des situations complexes. Cette vision négative a depuis été remise en question de nombreuses fois, comme par exemple par [Lebraty & Pastorelli-Negre, 2004] qui défendent l'idée de ne plus chercher à voir les biais cognitifs comme une déviation négative de la pensée rigoureuse, mais comme une façon différente de penser un problème, rapprochant l'idée de gérer les biais non plus en les supprimant mais en prenant conscience. Les sciences psychologiques nous en donne une définition plus générale suivante :

*« Un **biais cognitif** est une routine cognitive (raisonnement, jugement, décision, perception) amenant, dans des circonstances particulières, une déviation systématique de la réponse comportementale par rapport à une réponse attendue ou considérée comme correcte. »*

Des inventaires non exhaustifs des biais cognitifs ont été dressés par [Tversky & Kahneman, 1973], ainsi que par [Bazerman & Neale, 1992]. Nous pouvons citer les biais suivants, choisis car étant ceux que l'on retrouve dans le processus d'expertise relatif aux barrages :

- Biais de récence : une personne se souvient plus facilement d'un événement récent, qui va avoir un impact plus important sur sa pensée.

Les experts sont soumis à ce biais de différentes façons pendant le processus d'expertise. Lorsqu'une maintenance d'urgence a dû être opérée récemment sur une partie d'un système, par exemple, les experts auront tendance à identifier le risque sur cette partie comme plus importante qu'elle ne l'est réellement, et ce malgré la maintenance récente. De la même façon, si, pendant une étude de danger récente qu'ils ont produite, ils ont identifié au moins un risque important, leur attention sera plus facilement focalisée sur les risques équivalents dans les études de danger à venir. Enfin, si l'actualité s'est portée sur des risques particuliers pour le type d'ouvrages sur lequel l'expert travaille, il prêtera également davantage d'attention sur ce risque.

- Biais de simple exposition : être régulièrement exposé à un même objet ou un même paramètre rend son interprétation plus optimiste ou pessimiste qu'il ne l'est réellement, selon l'expérience à cette exposition.

Les experts travaillent sur des systèmes proches qui correspondent à leur expertise. Même si les systèmes étudiés sont tous différents, ce qui est par exemple le cas des barrages, de nombreux paramètres et critères restent proches. En étudiant constamment des systèmes proches, l'expert est exposé au biais de simple exposition, et selon son expérience, en particulier son expérience récente, il donnera un jugement différent.

- Biais d'ancrage : la façon de présenter un problème influe sur le jugement.

Ce biais très courant peut naître de différentes situations. En pratique, les études de danger se font automatiquement sur des systèmes tels que des barrages, sur une période de temps donnée. Ces études de danger, faites rapidement pour répondre aux besoins de l'entreprise, peuvent constituer une routine pour l'expert. Cette approche initiale peut constituer une source de jugements erronés, car le contexte de l'étude devient une « routine de vérification » plutôt qu'une vraie étude de

danger. De la même façon, si un préfet demande une étude de danger urgente sur un ouvrage particulier du fait d'événements récents ou prévus à court terme pouvant avoir un impact important, l'expert considèrera là aussi le risque sous un angle différent, le contexte de l'étude étant différent.

- Biais de halo : voir un objet ou un paramètre sous un jour positif (respectivement négatif) tend à voir les objets ou paramètres associés sous un jour plus optimiste (respectivement pessimiste) qu'ils ne le sont.

Les critères d'un système complexe comme un barrage étant liés dans une certaine mesure (nous verrons plus tard dans le présent mémoire ces interactions), le jugement d'un critère peut avoir un impact sur le jugement d'un autre critère interagissant avec celui-ci.

- Biais d'illusion de savoir : une personne se fie à ses propres croyances qu'elle croit objectives, sans chercher à recueillir plus d'informations.

Les experts travaillent sur de nombreux barrages dans un temps très court. A EDF, les experts estiment qu'ils étudient les dangers d'environ 40 barrages par an. Que ce soit par leur seul statut d'expert ou par la nécessité d'être efficaces et rapides, les experts ont tendance à se reposer énormément sur leur propre expertise, ce qui n'est souvent que peu ou pas justifiée dans les études de danger.

- Biais de confirmation d'hypothèse : une personne considère plus pertinentes les informations qui confirment leur hypothèse personnelle que celles qui l'infirmement.

Ce biais cognitif peut apparaître lorsqu'un expert a un *a priori* sur certains critères (dans un sens comme dans l'autre, cela peut être dû par exemple à un changement de pièce ou une autre maintenance), et que son observation se cristallise autour de certains points précis qui confirment cet *a priori*, au détriment d'une vision objective de l'ensemble du critère. De même, si un expert considère un critère comme généralement peu pertinent (ou respectivement très pertinent),

il sera tenté de sous-évaluer (ou respectivement de surévaluer) ce critère pour chaque ouvrage, le justifiant sur la base d'informations sélectionnées dans ce sens (au détriment d'une vision sur l'ensemble des informations disponibles, traitées de façon équivalente).

- Biais de l'effet de seuil : une personne voit une plus grande différence entre les probabilités aux bornes 0 et 1 qu'entre des probabilités « moyennes ».

Cet effet de seuil apparaît autant pour les très faibles et très fortes probabilités que pour les probabilités proches d'un seuil déterminé. Aussi longtemps qu'un critère sera jugé sur des valeurs éloignées des seuils, un expert n'étudiera pas de façon plus détaillée sa valeur exacte, tandis qu'il reportera son attention sur les critères dont les valeurs sont proches des seuils, et ces critères auront un impact beaucoup plus important sur son jugement du risque pour un événement redouté particulier.

- Biais d'évaluation de probabilités : une personne évalue différemment des probabilités selon les conséquences de l'occurrence (par exemple, une personne verra une probabilité de catastrophe plus grande si la catastrophe a des conséquences graves).

Ce biais est très courant lorsqu'un expert produit une étude de danger sur un système comme un barrage. En effet, les événements redoutés les plus importants en termes de conséquences sont les ruptures des barrages, et les conséquences sont souvent désastreuses, tant par les vies humaines en jeu, que par les impacts économiques, psychologiques, politiques etc. Par conséquent, les critères pouvant mener directement à ce type de conséquences sont jugés beaucoup plus sévèrement par les experts.

- Biais de représentativité : une personne considère certains éléments familiers comme représentatifs.

Comme nous l'avons déjà vu précédemment, les experts sont amenés à travailler sur de nombreux ouvrages dans des temps réduits. Les experts considèrent par conséquent les éléments qu'ils voient le plus

souvent comme familiers. Lorsque ces éléments apparaîtront dans le processus d'expertise, l'expert s'y fierà et son jugement général en sera influencé.

- Biais de disponibilité : une personne se contente plus facilement d'informations directement disponibles, sans chercher à en acquérir d'autres.

De nouveau, les experts étant amenés à travailler rapidement sur un grand nombre d'ouvrages, ils sont naturellement très enclins à être victimes de ce biais. En effet, dans un souci d'efficacité, les experts se contenteront des informations les plus facilement disponibles sur des critères donnés, et s'amenderont d'une recherche d'informations plus poussée, qui pourrait pourtant modifier leur jugement.

- Biais d'illusion des séries : une personne perçoit à tort des séries ou des liens dans des données au hasard.

Ce biais cognitif apparaît chez les experts en ce qu'ils travaillent sur des ouvrages complexes où les critères à juger sont très nombreux, parfois légèrement différents d'un système à l'autre. L'expert verra, dans ces quantités de critères, en particulier dans les critères plus ou moins différents d'un ouvrage à l'autre, des liens ou des séries qui n'existent pourtant pas, les systèmes étant différents.

- Biais du paradoxe d'Ellsberg : à probabilités réelles égales, une personne juge de façon plus positive un objet ou un paramètre qui recèle moins d'incertitudes.

Pour les systèmes comme les barrages, l'état des connaissances est très inégal, et certains critères sont mieux connus que d'autres. L'incertitude est plus forte sur les critères plus difficilement observables ou dont on connaît mal les mécanismes. Ces critères sont souvent considérés comme plus importants sur le risque généré par les experts, du fait de ce biais cognitif.

- Biais de l'amélioration sur l'échange : une personne préfère améliorer son gain sans en changer la nature plutôt que d'en changer la nature, même si le gain serait supérieur.

Ce biais cognitif est très important dans le cadre de la présente étude. En effet, il apparaît lorsqu'un expert se voit proposer de modifier sa façon de travailler. Il préférera plus facilement les nouvelles méthodes qui sont présentées comme continues par rapport à leurs méthodes actuelles, mais présentant une amélioration, qu'une nouvelle méthode radicalement différente, même si cette dernière constitue une amélioration majeure de leur travail. Le travail de thèse sera particulièrement attentif à ce biais, la dimension industrielle restant un facteur de préoccupation.

Comme on peut le constater, ces biais sont nombreux et leur influence importante. Les experts sont chacun soumis à ces biais à différents niveaux. Nous montrerons dans la partie IV.B en quoi la méthode proposée dans la thèse répond bien à ces biais.

c. L'incertitude knightienne

[Knight, 1921] est le premier à définir l'incertitude telle que comprise et utilisée depuis en management des risques. Il présente l'incertitude comme l'absence d'information. L'incertitude se différencie alors du risque en ce que le risque est probabilisable, alors que l'incertitude, par nature, ne peut pas l'être, et est davantage l'expression d'une ignorance, voire de l'impossibilité d'obtenir l'information. Dans sa vision de l'incertitude, Knight introduisait notamment le concept d'incertitude subjective, qu'il pensait non mesurable. Cependant, des travaux vinrent le contredire en montrant qu'il est possible, au moins en théorie, de la mesurer (voir par exemple [de Finetti, 1931]).

Les experts ont des rapports différents face à l'incertitude, selon la nature de l'incertitude, et différentes méthodes existent pour la modéliser. Il existe deux types d'incertitude principaux :

- L'incertitude épistémique, qui correspond à la nature incomplète, imprécise, ou absente de l'information, et qui peut être réduite par un effort de recherche
- L'incertitude stochastique, qui correspond au caractère aléatoire des données utilisées, intrinsèque au système étudié, et qui ne peut par conséquent pas être réduite

L'incertitude épistémique peut être au moins partiellement corrigée selon qu'elle est liée à l'incomplétude, l'imprécision ou l'ignorance. Dans le cas de l'imprécision, par exemple, il est possible de reformuler la question, ou de proposer une métrique plus adaptée. Dans le cas de l'ignorance, il faut chercher, si cela est possible, les informations manquantes en reciblant la question. Dans le cas de l'incomplétude, il faut proposer d'autres hypothèses de départ de l'étude. Dans chacun de ces trois cas de figure, l'incertitude peut au moins être diminuée en remaniant l'étude et le questionnaire proposé aux experts.

Un problème important soulevé dans l'observation du traitement de l'incertitude par les experts est que sa nature diffère selon la subjectivité desdits experts. Par exemple, un expert peut voir une incertitude stochastique lorsqu'un autre peut y voir une incertitude épistémique. Dès lors, il peut être difficile de proposer un remaniement de l'étude dans le but de réduire cette incertitude. Il convient donc, ici aussi, de connaître l'heuristique des experts pour mieux calibrer l'étude. »

Nous verrons dans la partie II.D que nous positionnerons les travaux de thèse sur une approche de type analyse décisionnelle multicritère. Dans ce cadre, et pour la suite du présent mémoire, nous utiliserons la définition de l'incertitude proposée par [Zimmermann, 2000] qui semble la plus appropriée :

« Uncertainty implies that in a certain situation a person does not possess the information which quantitatively and qualitatively is appropriate to describe, prescribe or predict deterministically and numerically a system, its behavior or other characteristics. »

Ce qui peut se traduire par :

« L'incertitude implique que dans une certaine situation, une personne ne possède pas l'information nécessaire, sous forme quantitative ou qualitative, pour décrire, prescrire ou prédire de façon déterministe et numérique un système, son comportement ou d'autres de ses caractéristiques. »

De façon générale, l'incertitude, comme les biais cognitifs, vont faire dévier l'avis de l'expert de son jugement rationnel. Certains systèmes, comme les structures de génie civil, comportent une incertitude forte, par exemple car le retour d'expérience est pauvre, et que donc l'information est encore insuffisante. En particulier, dans ces systèmes, les phénomènes à l'œuvre sont encore méconnus, et le retour d'expérience est donc souvent le seul moyen d'avoir une information sur le comportement du système. En conséquence, l'incertitude est très importante, ce qui va modifier le jugement des experts. L'incertitude peut également pousser un même expert à exposer des opinions différentes sur un même système, après un certain temps. Ce phénomène est à prendre en compte lors de la gestion des risques, car il prouve le manque de robustesse et de crédibilité du jugement de l'expert.

D. Le projet d'étude

Lorsque le gestionnaire de risques est confronté à des systèmes complexes, pour lesquels les mécanismes de vieillissement ne sont pas toujours connus et maîtrisés, l'utilisation de méthodes habituelles n'est plus satisfaisante. En particulier, pour les ouvrages de génie civil, d'autres difficultés viennent s'ajouter, comme le manque d'événements significatifs dans le retour d'expérience (et ce malgré une durée de vie de plusieurs décennies desdits ouvrages), ou l'impact de l'heuristique des experts compte tenu des spécificités, par exemple liées aux conséquences catastrophiques que les risques peuvent engendrer, et qui modifient la perception des experts.

A ces problèmes déjà bloquants vient se superposer un cahier des charges très restrictif pour le décideur. En effet, dans la pratique, les études de danger doivent être produites rapidement et en grande quantité. De façon générale, eu égard au nombre de systèmes surveillés et d'experts travaillant sur ces systèmes, il n'est pas rare qu'un expert doive produire une étude de danger par semaine minimum. Une étude de danger étant un document ayant pour vocation de juger de l'état d'un ouvrage à un moment donné, en considération des risques portés par l'ouvrage, eux-mêmes identifiés et quantifiés, il est facile de comprendre que les méthodes de gestion des risques doivent impérativement être faciles et rapides à produire. Il est également de plus en plus impératif pour ces méthodes d'être rigoureuses et auditable (voir définition suivante) d'un point de vue de l'organisme les produisant : d'une part les enjeux sont souvent très importants, ne souffrant pas d'imprécisions ou de travail bâclé, d'autre part les demandes d'organismes contrôleurs sont toujours plus pointues.

Définition :

Une méthode est dite **auditable** lorsqu'il est possible d'en vérifier la validité scientifique par un audit, c'est-à-dire par un protocole rigoureux, admis et accepté par la communauté scientifique relative à l'objet étudié.

Ainsi, l'objectif du travail de thèse est double :

- D'une part, il est nécessaire d'identifier une méthode qui soit rigoureuse, auditable et capable de s'affranchir des difficultés techniques propres aux ouvrages de génie civil, comme l'incertitude élevée et l'impact de l'heuristique des experts.
- D'autre part, la méthode doit être acceptée par les utilisateurs (en particulier les experts), facile à utiliser et rapide à mettre en œuvre.

Pour atteindre ces objectifs ambitieux, nous verrons que nous avons développé une méthode originale, empruntant des approches de différentes disciplines. Ce travail a été développé d'une part grâce aux recherches menées dans ces disciplines et d'autre part en collaboration avec des experts travaillant sur les barrages d'EDF, afin de couvrir les deux grands axes présentés ci-dessus.

Dans un premier temps, nous allons révéler l'état des recherches et des pratiques au moment de la rédaction du présent mémoire, afin d'essayer d'identifier les approches susceptibles d'aiguiller notre réflexion. Cette étude nous permettra d'identifier les bases de la méthode que nous proposons. Les outils permettant d'enrichir cette méthode seront ensuite présentés, et nous verrons comment il est possible de les utiliser, bien qu'issus de disciplines différentes, vers un objectif commun. Ces outils ont été sélectionnés tant pour leur pertinence, leur facilité d'utilisation, que pour tenter d'offrir une réponse aussi poussée que possible à la problématique. Nous verrons ensuite comment la méthode présentée dans le présent mémoire peut

s'appliquer à un cas d'étude concret. Enfin, nous discuterons les résultats obtenus et ouvriront les perspectives de recherche envisagées à travers cette étude.

II] Les méthodes d'analyse de risques pour le génie civil

A. Généralités

Dans le domaine du génie civil, le management des risques est une composante d'autant plus importante que les événements redoutés ont généralement des conséquences importantes, souvent mortelles, toujours très chères. Il devient de plus en plus inacceptable qu'une structure de génie civil s'effondre, et les enjeux sont de plus en plus importants, alors que les structures sont de plus en plus complexes et leur taille importante. Traditionnellement, le management des risques est effectué par les experts en génie civil, en ce qu'il possède les connaissances techniques pour décrire, prédire et prescrire les risques d'une structure. Malheureusement, dans la pratique, ces experts n'ont souvent qu'une formation très basique des méthodes propres au management des risques. Il existe ainsi une certaine asymétrie entre les compétences en génie civil et les compétences en management des risques.

Cette asymétrie est par exemple très visible à la lecture de certains ouvrages écrits par des experts en génie civil, qui révèle des lacunes très importantes (vocabulaire non adapté, introduction de concepts non reconnus dans la discipline comme la « maîtrise des risques », vision « ingénieure » du risque à renforts de normes, réglementations, etc., approche déterministe, etc.), sans aborder les problèmes liés à l'incertitude, sans jamais évoquer les méthodes probabilistes ou statistiques, sans jamais présenter d'axiomatique relative à la gestion des risques.

Or, en particulier lorsque les conséquences d'un événement redouté sont si importantes, il n'est pas raisonnable d'envisager le management des risques sous le seul œil d'un expert en génie civil, non plus qu'il soit raisonnable de s'affranchir de compétences solides dans le domaine. Il apparaît ainsi nécessaire d'enrichir les pratiques du génie civil avec des méthodes qui prennent en compte plus scientifiquement des attitudes face au risque, des conséquences de l'incertitude et des heuristiques des experts, de l'incertitude des systèmes, et de poser des méthodes dont la justification dépasse la seule tradition du « savoir-faire ». En particulier, il est important que les méthodes utilisées soient auditable (voir définition I.D).

Dans notre étude, nous postulons que les utilisateurs d'une méthode de management des risques en génie civil sont les experts et décideurs en génie civil, et qu'ils possèdent donc toutes les compétences requises pour décrire, prescrire et prédire le comportement d'un système de génie civil sous réserve d'être en possession d'une information complète sur ledit système. Dans la pratique, l'incertitude est très forte, et l'information jamais complète. Néanmoins, notre postulat signifie que les compétences des utilisateurs en génie civil sont suffisantes. Les apports de la thèse seront donc focalisés sur les approches issues du management des risques, et nous n'avons aucune prétention d'apporter des connaissances nouvelles dans le domaine du génie civil.

Ainsi, ce chapitre est dédié aux méthodes existantes, théoriques ou appliquées, relatives au management des risques, dont l'approche peut avoir un sens compte tenu de la problématique, et qu'elles soient ou non liées au génie civil.

B. Les propositions théoriques

a. Les méthodes probabilistes et multiattributs

Les travaux les plus emblématiques (bien que non fondateurs) autour de l'élargissement de la théorie de l'utilité espérée sont sans conteste ceux menés par A. Tversky et D. Kahneman entre 1974 et 1992, au travers de la théorie des perspectives dont l'apport principal est d'avoir posé les bases de l'économie comportementale. En particulier, Maurice Allais (dès [Allais, 1953] par exemple) ou encore Daniel Ellsberg ([Ellsberg, 1961] par exemple), parmi d'autres, avaient déjà montré que la théorie de l'utilité espérée, même élargie aux situations incertaines grâce aux axiomes de [Savage, 1954], n'est pas suffisamment descriptive pour rendre compte du comportement des agents économiques. En effet, l'axiome d'indépendance (ou de la chose sûre) est violé par le paradoxe d'Allais, tandis qu'Ellsberg montre que les croyances sont différentes des probabilités réelles.

La théorie des perspectives a été développée dans le cadre de ces observations, avec pour but affiché de ne plus proposer la recherche d'une décision optimale, mais d'introduire un modèle descriptif, proche des observations de la vie réelle. Le constat initial est que les agents économiques ne raisonnent pas en termes de résultats finals, mais apprécient la plupart du temps les changements apportés à leur situation (eu égard à une perception de celle-ci appuyée sur un « point d'ancrage », comme vu dans la partie I.C.b) et ceci appelle à représenter le cadre du choix - rationnel ou pas - différemment de ce que fait la théorie classique de la décision.

Afin d'illustrer le besoin d'un nouveau modèle, déjà fortement pressenti par de nombreux acteurs, [Tversky & Kahneman, 1974] dressent une liste non exhaustive des biais cognitifs sur les choix dans les univers incertains, dans l'esprit des travaux initiés par [Allais, 1953] et [Ellsberg, 1961]. Ce travail préliminaire est une justification de l'introduction de la théorie des perspectives par [Tversky, Kahneman, 1979]. Cette théorie décrit deux étapes : l'encadrage et l'évaluation. L'encadrage consiste à dresser l'heuristique de l'agent économique étudié et d'en déduire un

ordre des résultats finals (l'agent économique propose alors des résultats qu'il juge équivalents, en déduit un point de référence, puis interprète les autres résultats comme un gain ou une perte compte tenu de ce point de référence). L'évaluation consiste ensuite à juger de l'utilité d'un résultat final en utilisant une formule de type :

$$U = \sum_{i=1}^n w(p_i)v(x_i)$$

Où U est l'utilité ; $w(p_i)$ est une fonction de pondération des probabilités p_i réelles qui rend compte de la perception subjective des agents économiques ; $v(x_i)$ est une fonction de valeur des gains x_i réels qui rend compte de la perception subjective des agents économiques.

La fonction obtenue est concave pour les gains et convexe pour les pertes, ce qui reflète l'aversion au risque pour les gains et la recherche du risque pour les pertes. La pente est plus importante pour les pertes, ce qui reflète le principe qu'une perte est vue de façon plus négative qu'un gain de même valeur n'est vu de façon positive. De plus, la fonction est non linéaire, ce qui permet de tenir compte de l'effet d'échelle.

Ces travaux font l'objet de nombreuses critiques. D'une part, la théorie des perspectives viole le principe de dominance stochastique au premier degré, ce qui constitue la critique la plus handicapante. D'autre part, les méthodes d'obtention des fonctions dites « subjectives » w et v sont sujettes à caution. Certains psychologues, comme [Gigerenzer, 1996] réfutent la vision des heuristiques proposée par Tversky et Kahneman, en ce que ces derniers partent du postulat que les biais cognitifs induisent nécessairement un impact négatif dans l'appréciation, par un agent économique, des changements liés à sa situation. Or, cette vision est sujette à débat (voir notamment [Todd & Gigerenzer, 2000]), ainsi que l'association qui est faite entre les biais cognitifs et une démarche illogique (voir notamment [Hoffrage & Reimer, 2004]).

Afin de formaliser les méthodes déjà utilisées par de nombreux psychologues pour répondre à ces limites, [Tversky & Kahneman, 1992] proposèrent un développement de leur théorie, appelée « théorie des perspectives cumulatives », qui résout le problème de la violation de la dominance stochastique au premier ordre, au prix d'une condition supplémentaire d'intransitivité sur les préférences du sujet étudié. Cette amélioration se rapproche des travaux de la science de la décision sur les intégrales de Choquet. Il s'agit d'ailleurs pour l'essentiel d'une autre formalisation des méthodes à dépendance de rang déjà connues et pensées, notamment par Allais ou [Quiggin, 1981].

D'autres critiques récurrentes de ces travaux concernent les fonctions dites « subjectives ». En effet, leur appréciation est délicate et nécessite de faire appel à des outils complexes et qui ne prennent pas toujours en compte tous les aspects de l'heuristique des acteurs sociaux (l'aversion au risque et l'optimisme étant souvent seuls considérés). Dans cet état d'esprit, de nombreuses améliorations ont par la suite été proposées. On peut citer notamment [Diecidue *et al.*, 2007] qui proposent une méthode d'élicitation de ces fonctions à l'aide des travaux de [de Finetti, 1931] ; ou encore [Kammoun, 2007] poursuivant les travaux d'[Abdellaoui *et al.*, 2006] sur l'estimation non paramétrique de la fonction d'aversion au risque.

Suivant les travaux notamment de [Schmeidler, 1989], [Gilboa & Schmeidler, 1989], [Winkler, 1991] ou encore [Tversky & Wakker, 1995], [Abdellaoui *et al.*, 2010] propose un enrichissement des méthodes de calcul des fonctions de poids, appelée « méthode source », introduisant une fonction appelée « source » en plus des fonctions habituelles. Prévue pour une source d'incertitude uniforme (où le système de préférence des perspectives ne dépend que de la source et de la distribution de probabilités), cette fonction est une représentation de la sensibilité à l'incertitude et du pessimisme d'un acteur social donné.

Les travaux issus de l'école américaine de la décision sont en général caractérisés par une axiomatique forte, mais une application délicate. Notamment, ces difficultés autour de l'obtention des fonctions

« subjectives » et de la prise en compte des heuristiques, à plus forte raison si on prend en compte les objections de [Gigerenzer, 1996], nécessitent le recours à des méthodes trop complexes pour une application en milieu industriel. Nous verrons néanmoins que certaines tentatives dans ce sens ont été faites, bien qu'elles aient échoué (voir II.C.c).

Parmi les méthodes probabilistes, il faut également citer les statistiques bayésiennes. Le principe de ces méthodes est de proposer une hypothèse sur la loi que suivrait une probabilité de défaillance et de demander à l'expert d'en donner les paramètres *a priori*, de façon subjective. Puis, l'utilisateur, en fonction des données issues du retour d'expérience, affine ces paramètres, et infère ce travail pour chaque nouveau jeu de données, ce qui permet de converger vers les valeurs « objectives » des paramètres et d'obtenir la loi cherchée. Ces méthodes sont beaucoup plus fines et rigoureuses que les statistiques classiques lorsque l'incertitude d'un système commence à avoir un impact non négligeable. Cependant, elles sont tributaires de la qualité et de la quantité du retour d'expérience, d'une part, et l'élicitation des données *a priori* (appelée « prior ») est trop peu rigoureuse malgré les recherches sur le sujet (voir par exemple [Bernier *et al.*, 2000]) pour être utilisée sans retour d'expérience. Or, le travail de thèse se situe dans des cas où le retour d'expérience ne propose que peu de données, où l'incertitude est trop forte pour se fier uniquement à des méthodes non rigoureuses d'élicitation d'information d'expertise subjective. Il ne nous est donc pas possible d'appliquer ce genre de méthodes dans le cadre de la présente étude.

De façon générale, l'approche de cette école qui propose d'étudier les heuristiques « à part » et de les intégrer à l'aide de fonctions difficiles à éliciter ne semble pas réaliste d'un point de vue opérationnel dans le cadre précis de la présente étude, qui appelle à une méthode plus légère et rapide à appliquer (les experts devant produire en moyenne près de 40 études de danger par an sur des ouvrages aussi complexes que les barrages).

b. Les méthodes issues des sciences de la décision

Une autre façon de concevoir le risque est de l'étudier en tant qu'objet multicritère et non plus probabiliste. La plupart des méthodes qui en sont issues s'inspirent des sciences de la décision dont le développement se poursuit depuis les années 1960. Certains des travaux emblématiques de cette approche regroupent notamment les méthodes ELECTRE initiées par [Roy, 1963] et d'autres méthodes de surclassement (PROMETHEE etc.), les méthodes MAUT (MultiAttribute Utility Theory) ou encore l'utilisation de mesures floues pour le tri ou le classement en aide à la décision multicritère. Ces méthodes ont la particularité de s'affranchir de la vision probabiliste du risque et d'imaginer des approches à vocation plus appliquée. Ces approches sont ainsi plus intéressantes pour les cas où les probabilités ne sont pas aisément identifiables.

Une des composantes importantes de la problématique de la thèse est justement de se situer dans un environnement où les connaissances sont mal maîtrisées : on connaît mal certains mécanismes de vieillissement des structures de génie civil (*a fortiori* des barrages), on ne dispose que de peu d'événements significatifs dans le retour d'expérience, etc. Les systèmes étudiés ici sont mal probabilisables. Il en résulte que les méthodes qui ne dépendent pas de probabilités sont plus indiquées, ce qui justifie notre intérêt pour les méthodes de type multicritère.

Parmi les méthodes multicritères souvent citées et utilisées se trouvent les méthodes ELECTRE. Ces méthodes se déclinent sous de nombreuses formes, la première ayant été décrite par [Roy, 1963]. Les méthodes ELECTRE sont des méthodes de surclassement utilisant les principes de concordance et de non-discordance pour enrichir les relations de préférences. Ainsi, lorsque deux actions sont comparées pour un critère donné, les méthodes ELECTRE proposent de valider leur relation si un nombre suffisant de critères la vérifie et si aucun critère ne s'y oppose de façon trop importante. En comparant toutes les paires

d'actions possibles (il s'agit de la phase de construction), il est ensuite possible de choisir, ordonner ou trier ces actions (il s'agit de la procédure d'exploitation). Le raisonnement est particulièrement axé sur les relations, le but étant de déterminer pour ces relations les éléments pesant pour ou contre, par exemple en travaillant sur des coalitions de critères. Cette approche est opposée à la recherche d'un indice unique de synthèse comme pour les méthodes MAUT.

ELECTRE II a été créée spécifiquement pour l'obtention d'ordres de préférence, et ELECTRE III en est une amélioration en vue de traiter les problèmes d'information (qu'elle soit incertaine, insuffisante ou imprécise). Elle est fondée sur l'axiome de comparabilité partielle où les préférences sont exprimées selon quatre relations binaires (indifférence, non comparabilité, préférence importante et préférence légère) et des seuils (pour l'indifférence, la préférence ou le veto).

Cette dernière méthode semble *a priori* bien répondre aux besoins de la problématique de la thèse : proposer un traitement ordinal de l'information, capable de s'affranchir des problèmes d'incertitude et d'incomplétude de l'information. Cependant, il peut résulter des incomparabilités dans le pré-ordre final que la méthode ne peut efficacement résoudre. De plus, s'il est possible d'obtenir un pré-ordre, ceci fait perdre une partie importante de l'information utilisée, car on ne peut alors déterminer de quantification des préférences homogène sur tout le pré-ordre (par exemple, donner une valeur à chaque alternative entre 0 et 1, correspondant aux « forces » de préférence). La méthode est plus sophistiquée qu'ELECTRE II, mais aussi beaucoup plus difficile à mettre en œuvre et à interpréter. En particulier, une analyse de sensibilité est presque obligatoire pour chaque utilisation, tant l'heuristique de l'utilisateur influence le résultat.

De façon générale, les méthodes fondées sur les comparaisons par paire offrent un grand nombre d'avantages particulièrement adaptés à la problématique :

- Elles sont flexibles, permettant à l'utilisateur d'orienter leur utilisation en fonction du système étudié et de la problématique abordée

- Elles sont idéales pour obtenir un aperçu des interactions entre tous les couples de critères
- Il est possible de les enrichir selon les besoins de l'utilisateur avec des concepts connus comme la dominance, l'indifférence, la pondération etc.
- Elles permettent d'obtenir d'autres informations, comme des pré-ordres partiels, l'impact de coalitions etc.

En outre, les comparaisons par paires vérifient les trois principes de base nécessaire pour toute méthodologie en science de la décision :

- La fidélité : elles permettent de respecter les préférences de l'utilisateur avec une axiomatique raisonnable
- La flexibilité : quelle que soit la quantité et la qualité de l'information disponible, il est possible de l'exploiter
- La transparence : les méthodes se fondant sur les comparaisons par paires sont compréhensibles et il est possible d'en suivre l'application de façon intelligible tout au long de la méthodologie

Toutes ces propriétés sont particulièrement intéressantes dans le cadre de la thèse, car elles répondent parfaitement à certains aspects de la problématique. Nous verrons plus loin que les comparaisons par paires peuvent effectivement être utilisées pour résoudre notre problématique, et nous en poserons le cadre.

Il existe d'autres modèles issus des sciences de la décision que nous pouvons citer. Par exemple, les méthodes MAUT, inspirées des travaux fondateurs de [von Neumann & Morgenstern, 1947] et popularisées par [Keeney & Raiffa, 1993], présentent des représentations de préférence, en cas de certitude ou de risque, sous forme de fonctions d'utilité et de comparaisons ordinales. Néanmoins, ces modèles n'ont pas été retenus dans la thèse car ils considèrent que les critères pris en compte sont indépendants et que la fonction de préférence est donc additive. Or, dans notre problématique, les différents critères sont liés, ce qui est une caractéristique des ouvrages de génie civil. Certaines approches cherchent à enrichir les méthodes MAUT grâce à des modèles non

additifs, mais malgré cela les interactions subtiles et nombreuses entre les critères sont délicates à représenter à l'aide d'une fonction multiattribut, même non additive. De fait, les méthodes MAUT ne peuvent pas répondre à une problématique où le système présente des attributs trop interdépendants, et sont donc exclues des perspectives de la thèse.

D'autres méthodes issues des sciences de la décision permettent d'aborder les problématiques liées au risque pour les ouvrages de génie civil. Notamment, récemment l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, anciennement CEMAGREF) a mené des travaux en vue de concilier les approches de génie civil et celles de sciences de la décision. [Serre, 2005] utilise par exemple des méthodes d'ingénierie qu'il enrichit avec les sciences de la décision. Il compare deux modèles, l'un utilisant les méthodes de type « moyenne pondérée » issues des analyses multiattributs, l'autre utilisant les règles logiques de type « si... alors... ». Il a retenu ce dernier modèle, en construisant les règles d'affectation en collaboration avec les experts. Malheureusement, la méthode de construction des règles n'est pas présentée, et seule la concertation avec les experts est envisagée pour les construire, sans égard des biais à l'œuvre lors des discussions. Les travaux sont néanmoins d'autant plus intéressants que cette approche a, d'après l'auteur, été très bien accueillie par les experts et a permis d'obtenir des résultats bien meilleurs qu'à l'aide des méthodes d'ingénierie seule (de type AMDE – Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets, méthode produisant des analyses systématiques des causes et effets des défaillances). Néanmoins, ces travaux gagneraient à être enrichis en tenant en compte de l'heuristique des experts et l'interdépendance des critères. Les règles logiques seront présentées de façon détaillée dans le présent travail, notamment dans la partie III.A.

Globalement, les méthodes issues des sciences de la décision ont un nombre important d'avantages qui vont dans le sens de notre problématique. Nous pouvons citer notamment :

- Eviter l'effet « boîte noire » propre aux méthodes probabilistes

- Proposer des modèles descriptifs
- Impliquer une flexibilité importante, que ce soit pour améliorer les méthodes existantes, ou pour appliquer les méthodes à des systèmes très différents
- Offrir la possibilité de traiter l'information de façon ordinale

Compte tenu à la fois de la nature des systèmes étudiés (où l'incertitude est forte et l'heuristique des experts joue un rôle important) et des besoins de l'apport de cette étude (notamment son application concrète), ces avantages sont trop importants pour être ignorés, et nous avons décidé de nous inspirer préférentiellement de ces types d'approche. Malheureusement, aucune ne semble, en l'état, répondre à la problématique, que ce soit à cause de ses limites inhérentes (comme les méthodes ELECTRE et MAUT) ou des limites liées à l'état actuel des connaissances (comme les règles logiques). Pour ce dernier cas, nous verrons que le choix a été fait de proposer dans ce travail de thèse des recherches et propositions dont l'ambition est d'enrichir cet état des connaissances.

C. Les pratiques dans le domaine du Génie Civil

a. Le diagramme de Farmer

[Farmer, 1977] proposa une vision du risque d'après son acceptabilité : il présentait aux utilisateurs différents risques et leur demandait lesquels étaient acceptables selon eux. Il généralisa cette approche dans des graphes représentant une courbe de la fréquence des risques acceptables (plus tard considérée comme la probabilité d'occurrence du risque) en fonction de ses conséquences. Ces courbes, puis ces diagrammes, mettant en relation les probabilités d'occurrence des risques avec leurs conséquences (ou criticité) sont appelées courbes de Farmer (respectivement diagrammes de Farmer).

L'utilisation de ces diagrammes reste aujourd'hui très répandue dans l'industrie. Cette méthode consiste à catégoriser les risques dans un diagramme avec la gravité des risques en abscisse et la probabilité du risque en ordonnées. Prenant la forme générale d'un tableau, des cases y sont définies pour hiérarchiser les risques pointés. Voici un exemple type de diagramme de Farmer :

	Gravité négligeable	Gravité faible	Gravité moyenne	Gravité forte	Gravité excessive
Probabilité très forte					
Probabilité Forte		Risque A			
Probabilité moyenne					Risque D
Probabilité faible	Risque B			Risque C	
Probabilité quasi-nulle					

Tableau 1 : exemple de diagramme de Farmer

L'utilisateur définit ainsi des seuils d'acceptabilité en fonction de la probabilité d'occurrence et de la gravité du risque. Dans l'exemple ci-dessus, les cases en vert correspondent aux risques dont le besoin de gestion est minimale (par exemple le risque B). En jaune apparaissent les risques dont le besoin de gestion est important (risque A et C). Enfin, en rouge apparaissent les risques critiques à traiter dans les plus brefs délais (risque D).

En pratique, de façon générale, l'expert a à disposition une liste des risques établie par les acteurs de l'objet étudié. Ils pointent les risques en jugeant, grâce aux informations à disposition, les catégories de probabilité et d'occurrence de chaque risque séparément.

Cette méthode, très simple, intuitive et rapide à mettre en œuvre, permet de mettre en lumière une hiérarchisation des risques répertoriés pour juger par exemple de la façon dont les ressources seront utilisées en maintenance.

Cette méthode présente en revanche un nombre impressionnant de défauts qui rendent son utilisation peu rigoureuse. Les principaux défauts sont :

- L'opacité voire l'absence du traitement de l'incertitude et des heuristiques des experts
- L'obligation pour l'expert de pointer tous les risques, même si, par exemple par manque d'information trop important, un risque n'y est pas classifiable, rendant son pointage dans le diagramme très approximatif
- Les limites entre les cases ne sont pas toujours clairement définies, et lorsqu'elles le sont, elles ne permettent pas de discriminer les risques au sein d'une même case.
- Les seuils d'acceptabilité représentent une notion très floue et subjective, et ils sont la plupart du temps proposés « au doigt mouillé »
- Le diagramme devient très vite inutilisable si le nombre de risques par rapport au nombre de cases devient trop important, ne serait-ce que par l'impossibilité de hiérarchiser la plupart des risques (dans l'exemple, il n'existe aucun moyen de hiérarchiser les risques A et C)
- Le risque est représenté comme un objet à deux dimensions, ce qui appauvrit considérablement l'information qu'il porte

Ces quelques lacunes illustrent l'importance d'une rupture avec les pratiques actuelles. Les diagrammes de Farmer sont encore largement utilisés par les entreprises, en particulier de génie civil, ce qui est visible par exemple dans les travaux de [Breyse, 2009]. Compte tenu des écueils des diagrammes de Farmer, nous pouvons déjà esquisser certaines propriétés qu'une méthode rigoureuse devrait proposer, notamment :

- Une prise en compte implicite des heuristiques des experts, ainsi que de l'incertitude du système

- Un traitement ordinal des risques qui soit complet : tous les risques sont hiérarchisés, et si deux risques sont considérés équivalents, alors une justification rigoureuse doit montrer une équivalence mathématique et on simplement conceptuelle
- Une métrique claire, rigoureuse et unique sur laquelle s'expriment tous les risques
- La considération qu'un risque n'est pas un objet à deux dimensions (probabilité et criticité), mais un objet complexe à n dimensions, désignant des facteurs ou des critères interagissant entre eux

En outre, les diagrammes de Farmer considèrent implicitement que l'information est complète sur les systèmes étudiés. Cette hypothèse abusive est une caractéristique commune à de nombreuses pratiques actuelles. Or, et plus encore pour les systèmes issus du génie civil, cette hypothèse est fantaisiste : non seulement certains mécanismes de vieillissement des systèmes est mal connu, mais le nombre d'événements significatifs est tellement faible (en particulier pour les barrages) que mêmes les méthodes issues des sciences statistiques ne peuvent conclure.

b. Les méthodes de sûreté de fonctionnement

Une approche particulièrement courante en management des risques pour les entreprises est d'envisager les systèmes à l'aide de méthodes issues de la sûreté de fonctionnement. Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes comme les ouvrages de génie civil, ou tout autre système issu du patrimoine immobilier d'une entreprise. D'après [Pagetti, 2012], la sûreté de fonctionnement se définit comme ce qui « consiste à évaluer les risques potentiels, prévoir l'occurrence des défaillances et tenter de minimiser les conséquences des situations catastrophiques lorsqu'elles se présentent ». Elle est souvent abusivement décrite comme la « science des défaillances ». En

fonction des besoins d'un système donné, elle peut se décliner en plusieurs propriétés, dont les quatre principales sont :

- La disponibilité : aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.
- La fiabilité : aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant une durée donnée.
- La sécurité : aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques
- La maintenabilité : aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits

Il existe de nombreuses méthodes qui permettent d'étudier la sûreté de fonctionnement d'un système donné. On peut par exemple citer l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) ou MDCC (Méthode du Diagramme Cause-Conséquence). Leur particularité est de se positionner sur une approche de type « ingénierie » consistant à décomposer le problème et de se focaliser sur les événements perturbateurs du système, ou défaillances. Les méthodes commencent toujours par une analyse préliminaire des dangers, où le contexte est présenté, puis l'accent est mis sur les dangers et leurs causes et conséquences. Ensuite, soit l'étude se focalise sur les modes de défaillance (comme par exemple l'AMDE), soit sur la construction d'un arbre de défaillance ou d'un schéma papillon cause-conséquence (comme par exemple la MDCC).

Ces méthodes ont été enrichies dans le temps pour tenir compte par exemple des réparations du système, à l'aide de chaînes de Markov (pour les processus stochastiques). Elles ont une vocation opérationnelle et le but est de pouvoir décrire un système sur un cycle de vie. Il s'agit essentiellement de dresser des prévisions de fonctionnement pour un système en fonction du retour d'expérience des cycles de vie précédents, et d'enregistrer l'évolution du système afin d'adapter les prévisions en temps réel.

Ainsi, par nature, les méthodes de sûreté de fonctionnement reposent énormément sur la qualité et la quantité de retour d'expérience, et la connaissance du vieillissement d'un système (pannes, dysfonctionnements etc.). Il s'agit de méthodes très descriptives et faciles à comprendre pour l'utilisateur, mais très primaires dans leur approche. En effet, il ne s'agit plus d'étudier en détails les attributs constitutifs d'un risque et de chercher une méthode étudiant ces attributs, mais de se focaliser uniquement sur les défaillances d'un système donné et d'en maîtriser le vieillissement sur la base d'un retour d'expérience et d'une prise de mesure. De plus, lorsque le système étudié devient trop complexe, les méthodes de sûreté de fonctionnement deviennent trop difficiles à utiliser : les interactions entre les causes d'une défaillance ne sont pas prises en compte et si elles deviennent trop importantes, l'utilisateur se trouve dépourvu ; les méthodes ne prévoient aucune forme d'incertitude sur un système donné, ce qui est très éloigné de la réalité pour les structures de génie civil ; les méthodes nécessitent pour leur application un retour d'expérience riche en quantité et en qualité, ce qui à nouveau n'est pas réaliste dans notre cas ; l'heuristique des experts n'est pas du tout prise en compte et il n'est pas rare de constater de très forts écarts dans les études de danger d'un système donné entre plusieurs experts, laissant le décideur dans une position délicate.

Néanmoins, certaines méthodes de sûreté de fonctionnement ont des propriétés très intéressantes que nous recherchons. Par exemple, leur approche fondamentale issue de l'ingénierie les rend très descriptives et faciles à comprendre pour un expert. Dans le cas des méthodes utilisant des diagrammes de causes et/ou de conséquences, il est même

possible de voir le système d'une façon très visuelle. Ceci est important, car c'est un moyen facile et particulièrement efficace de faire un lien entre l'expert et le gestionnaire de risques, autour d'une représentation acceptée et sur laquelle il est facile de communiquer et d'échanger. Les diagrammes actuellement utilisés nécessitent cependant d'être largement enrichis pour une utilisation rigoureuse en gestion des risques.

c. Les indices de condition

Depuis le milieu des années 1980, les ingénieurs de l'armée américaine (USACE), ainsi qu'Hydro-Québec, ont développé une méthode d'évaluation de l'état de leurs ouvrages, en particulier des barrages. Cette méthode consiste à déterminer un indice de condition (condition index – CI) qui précise, sur une échelle de 0 à 100 l'état général de l'ouvrage (0 étant la destruction totale et 100 une santé parfaite). De cet indice est déduite l'importance de l'action à entreprendre sur l'ouvrage. D'un point de vue plus précis, il est possible de déterminer un indice de condition pour des « groupes de défense » particulier, un « groupe de défense » étant un ensemble de critères et/ou systèmes liés en termes de risques. On peut notamment en déduire une priorité de rang, calculée à la fois sur la base de cet indice et de l'importance donnée au groupe de défense par l'utilisateur. De la même façon, on peut obtenir l'indice de condition général d'un ouvrage en additionnant tous les indices de condition des différents groupes de défense, pondérés par l'importance relative de chaque groupe.

L'importance des groupes de défense se veut objective, mais comme le notent [McKay *et al.*, 1999], la part de subjectivité est importante dans son obtention, et l'expert est souvent livré à une élicitation directe soumise à son heuristique propre. Elle est construite à partir de l'ampleur des conséquences en cas de rupture (CI = 0) du groupe de défense. Ainsi, si la rupture entraîne la mort d'au moins une

personne, l'importance sera très forte. Cette importance est donnée sur une échelle de 0 à 1, et la somme des importances de tous les groupes de défense est égale à 1.

[Andersen *et al.*, 1999] montre comment obtenir l'importance des groupes de défense. Ils précisent que les indices de condition sont donnés de façon « relativement objective » à l'aide du tableau suivant (issu de l'article) :

Zone	Condition Index	Condition Description	Recommended Action
1	85 to 100	Excellent: No noticeable defects. Some aging or wear may be visible.	Immediate action is not required.
	70 to 84	Good: Only minor deterioration or defects are evident.	
2	55 to 69	Fair: Some deterioration or defects are evident, but function is not significantly affected.	Economic analysis of repair alternatives is recommended to determine appropriate action.
	40 to 54	Marginal: Moderate deterioration. Function is still adequate.	
3	25 to 39	Poor: Serious deterioration in at least some portions of the structure. Function is inadequate.	Detailed evaluation is required to determine the need for repair, rehabilitation, or reconstruction. Safety evaluation is recommended.
	10 to 24	Very Poor: Extensive deterioration. Barely functional.	
	0 to 9	Failed: No longer functions. General failure or complete failure of a major structural component.	

Tableau 2 : exemple d'indexation de condition

Ce tableau est largement accepté et utilisé sous des formes proches dans la presque totalité des études portant sur les indices de condition. Le terme utilisé par les auteurs pour le décrire (« relativement objectif ») est, à la vue du tableau, incorrect. Il serait plus réaliste de parler de « très subjectif ». L'utilisateur pointe « à peu près » là où la fonction se trouve dans le tableau, comme pour un diagramme de Farmer à une dimension. De plus, l'indice est obtenu « à l'envers ». En effet, au lieu de juger d'un critère par un indice et d'utiliser le tableau ci-dessus pour voir à quelle catégorie cela correspond, l'expert donne la catégorie et en déduit une plage de valeurs possibles, parmi lesquelles il choisit celle qu'il pense être la meilleure.

En outre, l'ordre de priorité d'un groupe de défense est donné comme suit :

Soient :

$PR_{DG_{i,j}}$ l'ordre de priorité (Priority Ranking) du groupe de défense (Defense Group) i pour le barrage j .

CF_j l'importance relative du barrage j parmi tous les barrages répertoriés (en fonction des conséquences de la rupture)

$I_{DG_{i,j}}$ l'importance du groupe de défense i au sein du barrage j , noté de 0 à 1, la somme des importances de tous les groupes de défense devant être égale à 1

$CI_{DG_{i,j}}$ l'indice de condition du groupe de défense i du barrage j , noté de 0 à 100 représentant la capacité du groupe de défense à fonctionner

On a :

$$PR_{DG_{i,j}} = CF_j \times I_{DG_{i,j}} \times \frac{(100 - CI_{DG_{i,j}})}{100}$$

L'importance d'un barrage (CF_j) est généralement donné en fonction de plusieurs critères, des pertes de vies humaines, des dégâts économiques, etc. La mesure très difficile et issue de l'élicitation directe par les experts de cette valeur la rend très subjective.

Le terme $I_{DG_{i,j}}$, supposé additif (ce qui est totalement absurde dans un système où les critères interagissent) est déduit des instruments de mesure du barrage. Les instruments de mesure vérifient l'état de tous les éléments constitutifs du groupe de défense. Une fois ce travail effectué pour tous les groupes de défense, l'expert en déduit une approximation relative par normalisation. Les interactions sont négligées et les incertitudes de mesure sont multipliées entre elles dans le terme.

Nous avons vu précédemment que le terme $CI_{DG_{i,j}}$ est donné avec une subjectivité très forte.

En multipliant ainsi trois termes issus de très fortes subjectivités et incertitudes, il paraît évident que l'ordre de priorité résultant n'apporte aucune information exploitable.

Le retour d'expérience est fondamental dans cette méthode, afin d'affiner les intervalles des indices qui sont, par nature, subjectifs. L'utilisation des indices de condition s'adapte également en fonction des besoins. Par exemple, si on cherche à déterminer l'ampleur d'une action immédiate sur un système, on peut définir une limite de condition pour laquelle l'indice sera au maximum à la limite d'intervention et mesurer l'état en fonction de cette limite ; on en déduit alors l'importance de l'action à mener sous la forme d'une équation du type :

$$CI = 100 \times 0.4^{\frac{X}{X_{lim}}}$$

où X est l'état, de la fonction surveillée et X_{lim} l'état limite de la fonction (dans notre exemple, CI = 40 est la limite d'intervention, d'où le facteur 0.4).

De façon générale, même si la littérature sur le sujet est abondante, la réflexion sur la méthode est très restreinte. En effet, elle revient finalement peu ou prou à donner un indice « au nez » de condition d'un ouvrage et un indice « au nez » d'importance d'un groupe de défense. Il n'y a alors plus de métrique à proprement parler, puisqu'il s'agit simplement de donner un indice relatif et très général. Cet indice peut néanmoins se décomposer en plus d'indices si on souhaite plus de « précision », mais l'agrégation de ces sous-indices se fait sous la forme d'une somme pondérée, à l'aide d'une fonction poids donnée par élicitation directe des experts (c'est-à-dire de façon complètement subjective).

A aucun moment il n'est question de traiter les heuristiques des experts, et les études se bornent à dire que sur le long terme, le retour d'expérience résout ce problème en affinant les intervalles d'indices. Néanmoins, sur des systèmes comme des barrages, il faut parfois de nombreux siècles de retour d'expérience pour diminuer de façon conséquente l'incertitude et permettre une évaluation qui ne soit pas entièrement dépendante de la subjectivité de l'expert.

Pour résumer, les forces de cette méthode sont : métrique de référence pour les experts, commune et convenue ; seuils exploitables ; application modulable selon les besoins ; amélioration possible par le retour d'expérience ; seule méthode actuelle qui cherche à se libérer des écueils des gestions de risques courantes. Les faiblesses de cette méthode sont : beaucoup trop de subjectivité ; les seuils posés de façon peu robuste ; la simplification à l'extrême, qui permet la modularité de l'ensemble, mais qui peut être un lourd handicap ; les jugements qualitatifs qui ne donnent que des intervalles ; la non prise en compte de l'heuristique des experts. Pour des systèmes soumis à des hauts degrés d'incertitude et au retour d'expérience trop faible, comme les barrages, cette méthode est très insuffisante. Les défauts inhérents sont les mêmes que pour les diagramme de Farmer, et le gain ne se fait qu'en ce que le problème est décomposé pour faciliter les élicitations directes. Ces écueils sont trop propres à la méthode pour que celle-ci puisse être utilisable, même au prix d'une amélioration conséquente.

d. Les études de danger EDF pour les ouvrages de génie de civil

Actuellement, les experts d'EDF utilisent, pour modéliser les risques sur les barrages, un protocole détaillé par des guides méthodologiques, avec diverses étapes. Ce protocole répond à un certain nombre de normes, dictées tant par le droit dans la matière que par les exigences qu'EDF s'impose. L'approche est très empirique et la méthodologie s'inscrit dans une logique d'ingénierie traditionnelle.

Les études de danger commencent habituellement, en guise d'introduction, par une étude rapide et qualitative des dangers liés à l'ouvrage considéré. Une cartographie physique de l'ensemble est dressée, et les généralités sur les risques sont listées. Les experts chargés de l'étude de danger relèvent les principaux événements redoutés et les mesures de sécurité existantes.

Après avoir rappelé le cadre administratif et défini les périmètres et zones d'étude, l'ouvrage est décrit en détail et de façon exhaustive. Cette description est purement technique et ne s'intéresse pas encore aux risques liés aux descriptions listées. Dans cette partie, les experts proposent également une vision générale du fonctionnement de l'ouvrage, depuis l'amont jusqu'à très en aval, à la limite d'influence du barrage.

Les études de danger dressent ensuite la liste des protocoles de sécurité, de la politique de prévention des accidents majeurs et de gestion de ces accidents propres au barrage. Cette partie des études de danger n'influe pas sur le reste du document, et sert surtout de rappel à l'intention du personnel concerné par le document. Certains aspects des protocoles de sécurité peuvent néanmoins renseigner les experts sur certaines particularités liées au risque du barrage.

Les études de danger présentent ensuite la méthodologie utilisée pour identifier et caractériser les risques potentiels et l'appliquent ensuite, en différenciant les risques de la façon suivante :

- D'abord est fait mention des risques appelés ici « aléas naturels » (climatologie, géologie, etc.). Ces risques sont présentés très qualitativement, et les experts jugent s'ils retiennent ou non l'aléa présenté comme un risque potentiel pour l'ouvrage. Dans le cas où l'aléa n'est pas retenu, il disparaît de la suite de l'étude de danger.
- Ensuite, les experts présentent une étude accidentologique associée à un retour d'expérience. Cette partie a pour objectif de relever tous les risques relevés par l'expérience d'utilisation du barrage. De la même façon que pour les aléas naturels, ces risques sont étudiés de façon très qualitative, et les experts relèvent simplement si le retour d'expérience est significatif ou non pour chaque risque.

Il est notable que les études de danger actuellement produites par les experts ne considèrent que les risques naturels et les risques dont on dispose d'un retour d'expérience. Il n'est pas envisagé que des risques

qui ne se sont pas encore produits puissent avoir une influence sur l'étude. Cela s'explique par le fait que les experts considèrent le risque de façon très qualitative et décident de complètement déconsidérer les risques jugés trop faibles, jugement basé justement sur le retour d'expérience. En l'absence de retour d'expérience, il est donc naturel, dans la logique de construction des études de danger, qu'un risque soit non mentionné.

Dans la suite des études de danger, les experts entrent plus précisément dans l'analyse des risques. La méthodologie utilisée à partir de là est celle des schémas dits « nœuds papillon ». A partir des risques relevés dans les parties précédentes, les experts construisent l'« aile gauche » du nœud papillon en liant les risques par les chemins menant à un événement redouté particulier. Puis ils développent l'« aile droite » en évaluant les conséquences dudit événement redouté. Le schéma suivant montre un exemple de schéma papillon utilisé.

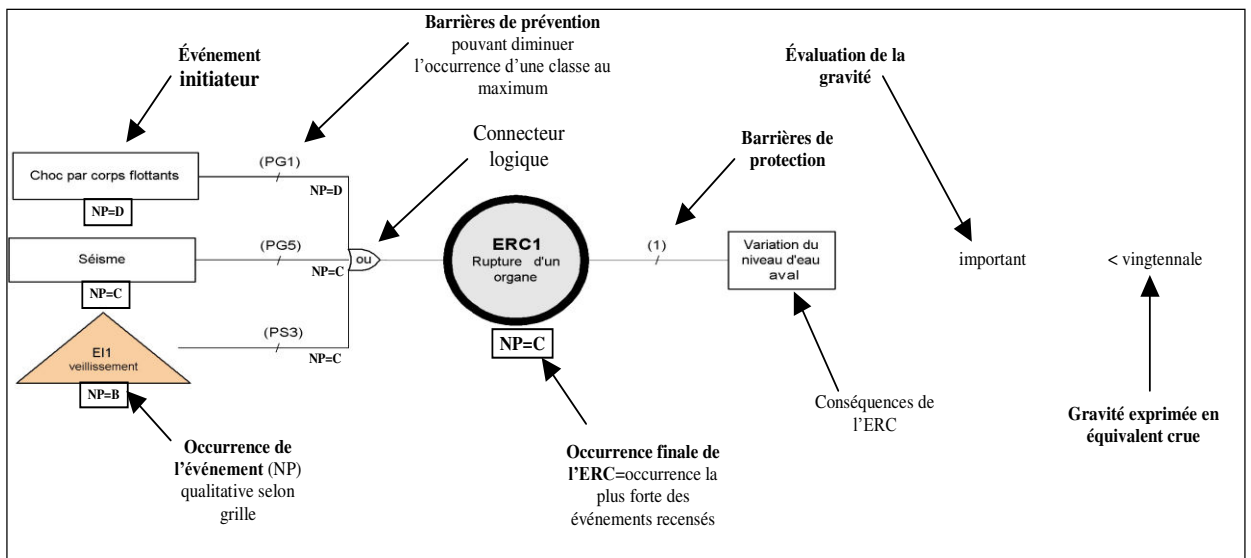


Figure 1 : exemple de schéma papillon

On voit dans ce schéma diverses notations correspondant à la méthodologie générale utilisée pour toutes les études de danger. La probabilité d'occurrence d'un risque à gauche du nœud papillon est indiquée par une lettre, allant de A à E, attribuée de façon qualitative. A correspond à un risque « courant » et E à un risque « possible mais

extrêmement peu probable ». Des barrières de prévention sont insérées entre les risques et ont pour effet de diminuer cette occurrence selon un tableau indiqué dans le guide méthodologique. A chaque barrière de prévention est associé un « niveau de confiance » noté de 0 à 2. Ce niveau va diminuer d'autant la note d'occurrence du risque.

Les risques sont agrégés vers l'événement redouté à l'aide de connecteurs logiques en « et » et « ou ». Ici aussi, un guide méthodologique donne des tableaux de règles pour les notes sortantes des connecteurs. Voici un exemple de tableau utilisé :

ET	A	B	C	D	E
A	B	C	D	E	E
B	C	C	D	E	E
C	D	D	D	E	E
D	E	E	E	E	E
E	E	E	E	E	E

Tableau 3 : exemple d'agrégation de connecteurs logiques

Dans ce tableau, par exemple, si les risques en amont d'un connecteur « et » sont notés respectivement B et C, la note en aval sera donc D. Il est remarquable qu'il n'existe pas de tableau pour définir une note en aval s'il y a strictement plus de deux risques en amont. Dans ce cas, le choix est laissé libre à l'expert de choisir la note qui lui semble la plus cohérente. En outre, ces connecteurs logiques sont incompatibles avec des mesures du risque non-additives, et supposent donc que les critères n'interagissent pas. Evidemment, cette vision est très éloignée de la réalité où certains critères, en particulier dans des ouvrages complexes comme les barrages, interagissent entre eux, pas toujours de façon linéaire.

A cette probabilité d'occurrence est associée, au niveau de l'événement redouté, une gravité. Cette gravité est donnée en équivalence de débit. Plusieurs catégories de débit sont utilisées : un débit correspondant à une crue décennale, centennale, millénaire, décennalaire, etc.

L'aile droite du schéma papillon représente les conséquences si l'événement redouté est atteint. Cette partie du schéma est construite de la même façon que l'aile gauche, les barrières de prévention étant remplacées par des barrières de protection. La seule différence est que cette partie est descriptive et répond à des exigences phénoménologiques. Les conséquences ne sont donc pas évaluées, mais simplement citées.

Les schémas papillon sont dressés pour tous les événements redoutés relevés par les experts à partir des risques retenus dans les parties précédentes. Les résultats sont consignés dans un tableau général où figurent en colonnes les gravités et en lignes les probabilités d'occurrence. Les événements redoutés sont ainsi pointés dans le tableau, à la façon d'un diagramme de Farmer.

Enfin, les experts proposent une étude de réduction des risques pour le barrage. Ils déduisent de la partie précédente un niveau de danger général de l'ouvrage, puis proposent des mesures ayant deux visées principales : la réduction de la criticité des risques et la non-aggravation des niveaux de criticité.

Pour conclure, les études de danger présentent des cartes de l'ouvrage et de la région potentiellement impactée par les événements redoutés. Ces cartes ont pour objectif d'ouvrir l'étude sur des mesures en cas d'accident majeur.

Globalement, les études de danger produites actuellement par la profession souffrent de nombreuses lacunes, dont plusieurs sont critiques. D'une part, presque toute l'étude repose sur des évaluations qualitatives dont les bases sont très peu solides. Pour un ouvrage comme un barrage, sur lequel il n'existe que peu de retour d'expérience, ne considérer que les risques répertoriés empiriquement est très insuffisant. En outre, de nombreux risques sont écartés sans donner plus

d'explication que le « jugé » de l'expert. Voici une liste non exhaustive des lacunes les plus importantes :

- De nombreux risques sont écartés de l'étude. La seule raison évoquée est l'absence ou la faiblesse du retour d'expérience. En particulier en tenant compte du manque général de retour d'expérience sur les systèmes de génie civil, ces simplifications sont abusives.
- Les probabilités d'occurrence sont données sous la forme de lettres ne correspondant à aucune appréciation quantitative (une note correspond à quelle probabilité, mathématiquement ?).
- Les probabilités d'occurrence sont produites sur la base d'un retour d'expérience. Or, pour les ouvrages de génie civil, et en particulier pour les barrages, le retour d'expérience est très faible et non révélateur.
- L'agrégation des probabilités d'occurrence est non rigoureuse. En effet, les tableaux définissant les règles en fonction du connecteur logique sont construits au jugé, sans méthodologie, apparemment sans raisonnement, de façon grossière et ne correspondent à aucun sens physique ou mathématique (les notes A, B, ..., E étant purement qualitatives, comment peut-on dire qu'un connecteur logique va diminuer d'un ou deux crans une note, ou comment peut-on affirmer qu'une note A et une note C entrant dans un connecteur « et » va donner une note D et non une note F ? Quel est le sens derrière ce raisonnement ?). D'autre part, les notes A, B, etc. n'ayant aucun sens (voir point précédent), un tableau les agrégeant n'en a pas plus. En outre, il n'existe aucune règle pour agréger au moins trois critères, et l'expert est donc abandonné à un jugement « au doigt mouillé ».

- Les connecteurs logiques ne permettent pas de déterminer la prévalence d'un risque sur un autre. Par exemple, si on a deux risques en entrée, comment les agréger en ne se basant que sur leur probabilité d'occurrence si l'un des deux a une influence nettement plus importante que l'autre sur l'événement redouté (exemple : agréger les risques de rupture du noyau du barrage avec le risque de fissuration d'une pale de turbine) ? Si les connecteurs logiques permettent de comprendre l'aspect phénoménologique, ils sont beaucoup trop grossiers pour servir en gestion de risques.

- La cotation en équivalence de débit de crue pour la gravité de l'événement redouté est jugée qualitativement, sans nuance (crue décennale, etc.). Ceci est probablement dû à un manque d'information. En effet, il est extrêmement difficile de connaître la phénoménologie exacte résultant des conséquences d'un événement redouté. En conséquence, la cotation de la gravité n'a aucun sens en l'état.

- Les barrières de prévention et le niveau de confiance associé ne répondent à aucune exigence de rationalité. En effet, on utilise en l'état un niveau de confiance d'une barrière de prévention comme homogène à une probabilité d'occurrence du risque. De plus, ce niveau de confiance est donné, à nouveau, de façon grossière et qualitative.

- Le résultat final de l'étude de danger prend la forme d'un tableau reprenant le principe des diagrammes de Farmer exposés dans la partie II.C.a du présent mémoire (probabilité d'occurrence x gravité), avec toutes les lacunes qui y sont associées, notamment l'impossibilité concrète de conclure quoi que ce soit.

Compte tenu de ces difficultés et de ces manques, les études de danger telles que pratiquées à EDF actuellement doivent être intégralement reconsidérées. Ce sentiment est partagé par les experts

de l'entreprise qui cherchent des moyens plus efficaces et surtout plus auditable pour produire leurs études de risques sur les barrages.

L'absence presque totale de rigueur et de quantification des risques ne permet en l'état ni d'ordonner les risques, ni de les quantifier, ni même de les qualifier. Les principes mêmes utilisés (connecteurs logiques, notes A, B, etc., barrières de prévention, etc.) sont incompatibles avec une gestion des risques rigoureuse et auditable. La Direction Technique Générale d'EDF, et plus particulièrement les experts chargés des risques sur les barrages, sont conscients de ces lacunes et ont commencé à envisager une modification en profondeur de la méthodologie d'études de danger.

D. Vers une représentation alternative du risque

Nous avons vu dans ce chapitre un état de l'art non exhaustif des méthodes de management des risques. Il existe encore un écart particulièrement important entre les recherches académiques et les pratiques employées par les acteurs industriels, même si ces derniers se tournent de plus en plus vers des propositions issues notamment du milieu de la recherche opérationnelle.

Cet écart est souvent justifié par les approches considérées comme « trop théoriques » des milieux académiques, que les acteurs ne maîtrisent pas toujours, ou qu'ils jugent trop complexes ou longs à mettre en œuvre. En effet, dans le cadre de la thèse, les experts du département d'hydraulique d'EDF estiment à environ 200 le nombre d'études de danger à produire sur un cycle de cinq ans, avec un effectif réduit à quelques experts, ce qui équivaut à une étude de danger par semaine en moyenne. Ces études de danger sont autoportantes et représentent des documents longs à rédiger. En

considération de ces contraintes, il apparaît difficilement concevable d'utiliser des méthodes impliquant un travail continu de plusieurs mois sur un ouvrage donné.

En outre, les études de danger produites pour les barrages d'EDF doivent être renouvelées tous les dix ans. Pendant cette période, de nombreux paramètres d'études sont souvent modifiés, comme les normes, le personnel, ou les exigences toujours plus pointues des clients des études de danger. Lors des échanges avec les experts de la Division Technique Générale, il est rapidement apparu nécessaire que le travail de thèse devait prendre en compte une flexibilité importante dans ce cadre.

Le besoin de flexibilité de la méthode à développer ne s'arrête cependant pas là. En effet, les barrages sont tous des systèmes uniques, par leur architecture, leur conception ou leur environnement. Or les méthodes habituelles présentées dans ce chapitre ne proposent jamais un tel niveau d'adaptabilité, et il faut souvent recommencer entièrement la méthode pour chaque ouvrage.

En ce qui concerne les méthodes appliquées par les acteurs industriels, l'enrichissement le plus important qu'il est possible d'apporter concerne l'auditabilité des études. Au regard de ce que nous avons présenté dans la partie II.C, nous avons choisi de nous orienter vers une approche la plus rigoureuse possible, sans rentrer dans les écueils des approches académiques présentées dans la partie II.B.

Il est en outre notable que peu de méthodes considèrent le risque comme un objet multicritère dont les critères sont soumis à des interactions particulièrement forte, dans un milieu où l'heuristique des experts influence énormément les résultats. Nous avons cité dans la partie II.B.a la méthode source qui propose un début de solution, mais à nouveau ces méthodes, si elles sont axiomatiquement très performantes, sont trop complexes pour être utilisées dans le cadre industriel, où les experts n'ont pas les connaissances pour manipuler de tels outils, et

n'ont pas le temps de développer les profils d'aversion au risque ou d'autres éléments d'heuristique des experts.

Voici donc les propriétés qui sont attendues pour la résolution de la problématique de thèse :

- La méthode doit être auditable et rigoureuse
- La méthode doit être compréhensible par les acteurs industriels
- Le travail doit être intuitif et utilisable dans un délai acceptable par les acteurs
- La solution proposée doit être flexible et adaptable, à plusieurs niveaux : adaptable entre les différents systèmes, adaptable dans le temps en fonction des nouvelles exigences, adaptable en fonction de l'évolution de l'état des connaissances sur les systèmes étudiés
- L'heuristique des experts doit être prise en compte dans le résultat, sans tomber dans une forme à peine voilée de système expert
- Les interactions entre les critères liés au risque doivent être traitées avec rigueur
- L'impact de l'incertitude doit être minimisé

En définitive, le travail de thèse a nécessairement dû s'orienter vers un cahier des charges qu'aucune méthode actuelle ne propose. Plus motivant, comme nous l'avons vu dans ce chapitre, les méthodes utilisées actuellement sont intrinsèquement incompatibles avec au moins un élément dudit cahier des charges. Compte tenu de ce constat, nous avons recherché des approches différentes, issues nécessairement d'une représentation alternative du risque.

De fait, différentes pistes de réflexion ont déjà été engagées au sein d'EDF, dans le département du Management des Risques Industriels de la R&D d'une part, dans la Division Technique Générale d'autre part. En effet, cela fait de nombreuses années qu'EDF a compris les problèmes rencontrés pour le management des risques des systèmes complexes et

cherche à améliorer ses propres pratiques. Nous avons choisi dans cette thèse d'utiliser certaines bases issues de ces travaux, que nous avons largement enrichies à l'aide d'outils divers, issus d'analogies qui seront justifiées lors du chapitre suivant.

En effet, il nous est rapidement apparu qu'il était possible d'utiliser ces développements pour répondre à l'intégralité du cahier des charges, au seul prix de considérer le risque de façon un peu différente que ce qui est fait habituellement. Pour résumer simplement, nous avons repris les arbres des causes développés par EDF pour les ouvrages étudiés, et nous avons remplacé les connecteurs logiques par une visualisation intuitive de la nature multicritère des risques : les règles logiques. Nous avons ainsi mélangé une représentation complexe mais rigoureuse empruntée aux travaux académiques, à une représentation visuelle, simple et compréhensible par les acteurs.

Comme nous l'avons vu dans la partie II.C.b, la représentation sous forme d'arbres de causes, typique des approches empruntées à l'ingénierie, implique une vision du risque autour des événements redoutés d'un système. Cette vision est particulièrement adaptée à la problématique de la thèse : le but est de proposer une méthode qui permette d'obtenir des informations, compte tenu des risques étudiés, sur d'éventuels événements redoutés. Il ne s'agit pas simplement de faire des études de sûreté de fonctionnement afin de vérifier la disponibilité d'un système, mais bien d'anticiper des catastrophes : en particulier pour les structures de génie civil, les événements redoutés conduisent à de telles conséquences que tous les acteurs intéressés par la gestion du risque sur ces systèmes raisonnent dans ce sens, du préfet qui a besoin de savoir l'état des barrages sur le territoire qu'il gère (pour préparer un plan de crise, exiger des maintenances, des évacuations, etc.), au technicien qui doit prioriser sa maintenance en fonction des dangers catastrophiques. Il est d'ailleurs notable que quelle que soit l'entité concernée, et ce dans tous les pays, lorsqu'il s'agit de gérer les risques sur des ouvrages de génie civil et *a fortiori* sur des barrages, les experts et décideurs raisonnent toujours sur les événements redoutés (voir par exemple II.C.a sur l'utilisation des diagrammes de Farmer, II.C.c

sur les indices de condition ou II.C.d sur les études de danger faites par EDF).

III] Présentation des outils utilisés

A. Les règles logiques pour agréger des arbres de causes

a. Les arbres de causes

Une façon courante de représenter les risques est d'utiliser des schémas dits « papillons ». Le principe est d'avoir dans un même schéma la représentation de l'événement redouté, au centre, de la séquence phénoménologique des causes qui y mènent (ou arbre des causes), sur l'« aile gauche », et les conséquences qui en découlent, sur l'« aile droite ». Voici un schéma papillon type :

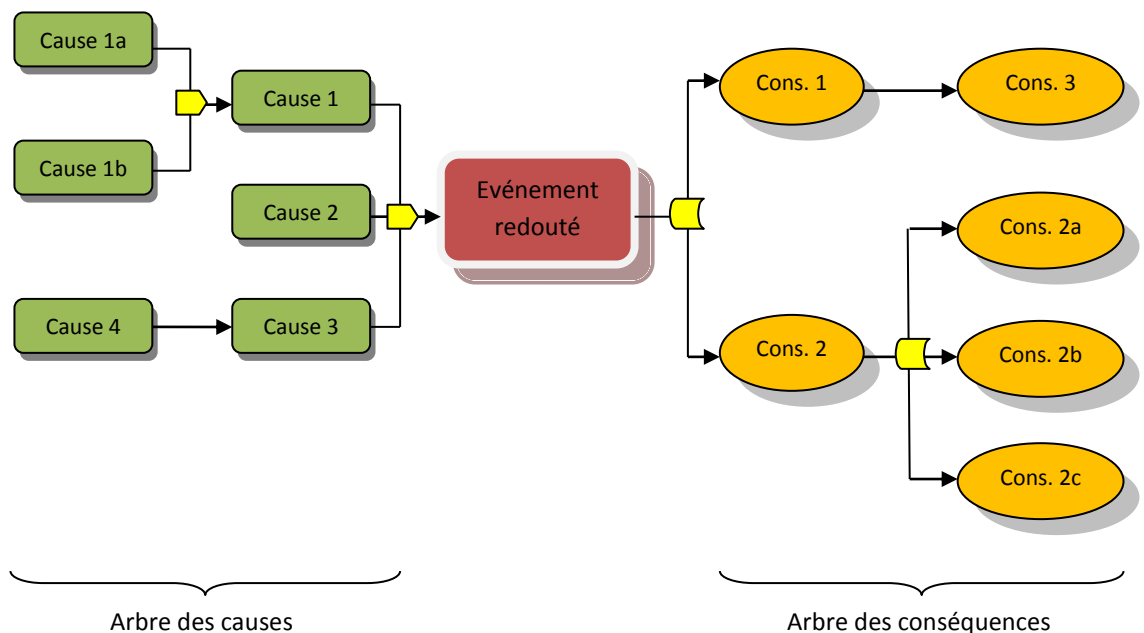


Figure 2 : détail d'un schéma papillon

Actuellement, les experts d'EDF développent, pour modéliser les risques sur les barrages, des arbres de causes, c'est-à-dire uniquement l'« aile gauche » du schéma papillon. Ils partent d'un événement redouté (généralement la rupture du barrage), et en recherchant la source, par exemple l'érosion ou l'instabilité mécanique, mettent en lumière les fonctions régissant ces sources et modélisent les causes de défaillance de ces fonctions, en particulier à la lumière d'un défaut de conception/réalisation ou d'une perte de performance.

Un arbre de causes a pour objectif de recenser tous les critères, objets et événements initiateurs pouvant contribuer ou influencer sur un événement redouté particulier. Ils sont ensuite répertoriés au sein d'un arbre qui fait apparaître les différentes familles et l'interaction entre eux qui peut mener, *in fine*, à l'événement redouté.

Ils ont l'avantage d'être plutôt simples à mettre en œuvre, d'avoir un fort pouvoir représentatif, et de constituer un modèle que tout le monde comprend, autour duquel il est facile de communiquer.

En revanche, ce modèle nécessite un fort retour d'expérience pour être complet, et il est très difficile d'y traiter l'incertitude. Les risques n'y sont pas hiérarchisés, et ils ne peuvent, au mieux, être utilisés qu'en tant que représentation générale du système de risques de l'ouvrage. Certaines représentations proposent néanmoins des connecteurs logiques et une forme de notation basique (A, B, C, D, E), comme nous l'avons vu dans la partie II.C.d. Cependant, elles souffrent des lacunes que nous avons répertoriées. C'est la raison pour laquelle les experts de la Division Technique Générale (DTG) d'EDF proposent de nouveaux arbres des causes pour illustrer les risques dans les barrages.

Voici un exemple des arbres produits par la DTG d'EDF (nous noterons au passage que les flèches sont dans le sens opposé à celui des schémas papillon vus précédemment : les schémas papillon ont une visée phénoménologique, ce qui explique que les flèches vont dans le sens de ce qui se passe physiquement lorsque les causes d'un événement redouté sont vérifiées, tandis que l'arbre des causes ci-

dessous cherche à retrouver ce qui a causé l'événement redouté, le raisonnement suit le chemin inverse ; nous utiliserons cette dernière représentation pour la suite de la thèse, car elle nous paraît plus pertinente compte tenu de l'évolution possible de l'état des connaissances) :

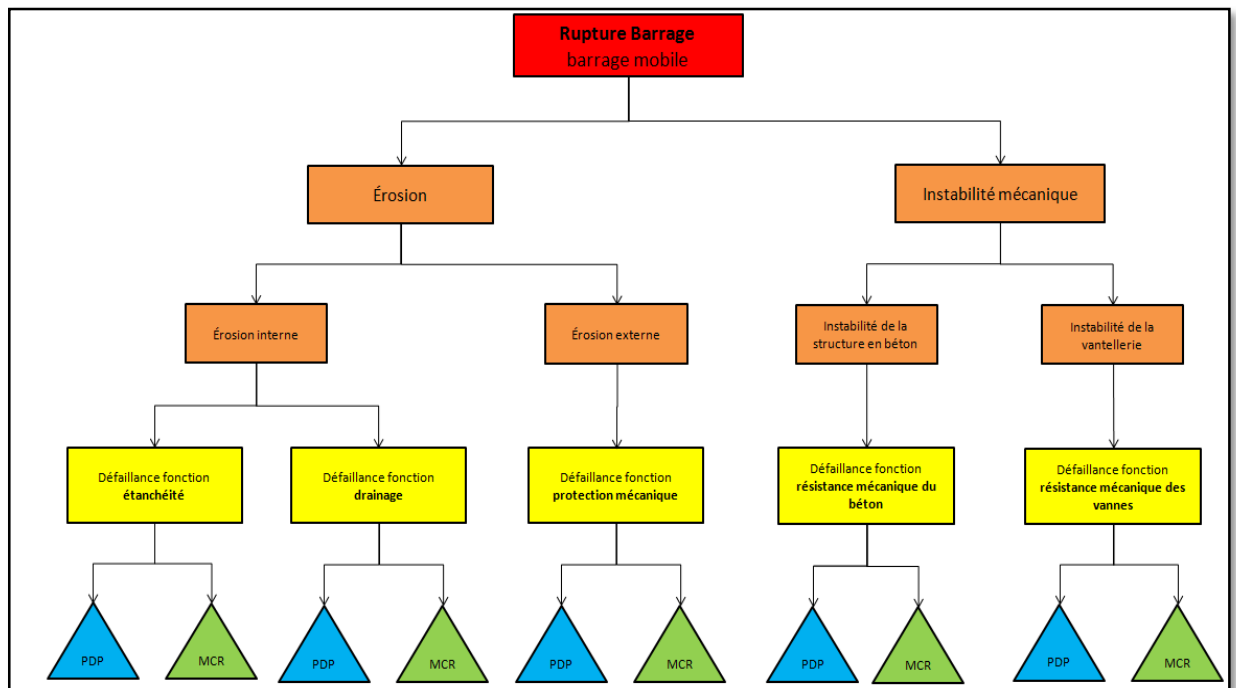


Figure 3 : Arbre des causes pour un barrage en remblais

Ce modèle est largement partagé par les experts et présente des avantages fonctionnels indéniables, comme sa valeur de représentation visuelle, rapide et cohérente. Nous avons décidé de conserver ce modèle comme base de travail, et de l'enrichir avec des outils issus de la science de la décision et de la gestion des risques. Si ces arbres de causes sont excellents pour bénéficier d'une vision des phénomènes menant à un événement redouté, ils nécessitent davantage de travail pour fournir des informations sur les risques à un décideur. En particulier, le point d'amélioration principal qui nous est apparu est l'agrégation des risques d'un niveau à l'autre de l'arbre.

Dans la figure ci-dessus, nous voyons que les arbres de causes sont construits à partir d'un événement redouté. Les causes de l'événement

apparaissent en orange. Ces causes sont elles-mêmes dépendantes du niveau de défaillance des fonctions les régissant, apparaissant ici en jaune. Ce niveau de défaillance peut avoir de nombreuses origines, que les experts trient en deux catégories : les pertes de performance (assimilées au vieillissement de l'ouvrage) et une mauvaise conception ou réalisation de l'ouvrage, c'est-à-dire les défauts présents initialement dans l'ouvrage. C'est dans ces catégories qu'on retrouvera tous les critères de base constitutifs du risque général. Si chaque arbre est commun pour une famille de barrages, ce sont souvent ces critères de base qui seront différents et qui feront de chaque barrage un ouvrage unique.

Lors d'une analyse de risques, il est possible d'envisager un événement redouté et d'en rechercher les causes possibles. Une fois l'arbre des causes construit, il sera en revanche beaucoup plus simple de remonter l'arbre à partir des données d'entrée sur les critères à la base de l'arbre. C'est donc le choix que nous avons fait.

Dans la suite de cette partie, nous expliquerons comment nous avons décidé de procéder pour remonter l'arbre des causes.

b. Généralités sur les règles logiques

La visualisation du risque sous la forme d'un arbre de causes implique une approche multicritère, justifiée par l'aspect « agrégateur de critères » qu'on retrouve à chaque niveau de l'arbre. Cette approche correspond également à la façon de procéder des experts qui estiment le risque selon l'évolution d'un certain nombre de critères. Ceci revient à considérer le problème comme un problème multicritère de tri, où l'évolution des critères va impacter une affectation donnée exprimée sur une échelle ordinale. L'approche décisionnelle à base de règles logiques est la plus indiquée, puisque cette méthode correspond exactement au besoin exprimé.

Un système à base de règles logiques est un modèle construit avec les acteurs du processus de décision et qui permet d'assigner des objets ou des alternatives, sur de multiples dimensions, dans des catégories prédéfinies. La syntaxe générale de ces règles est de type :

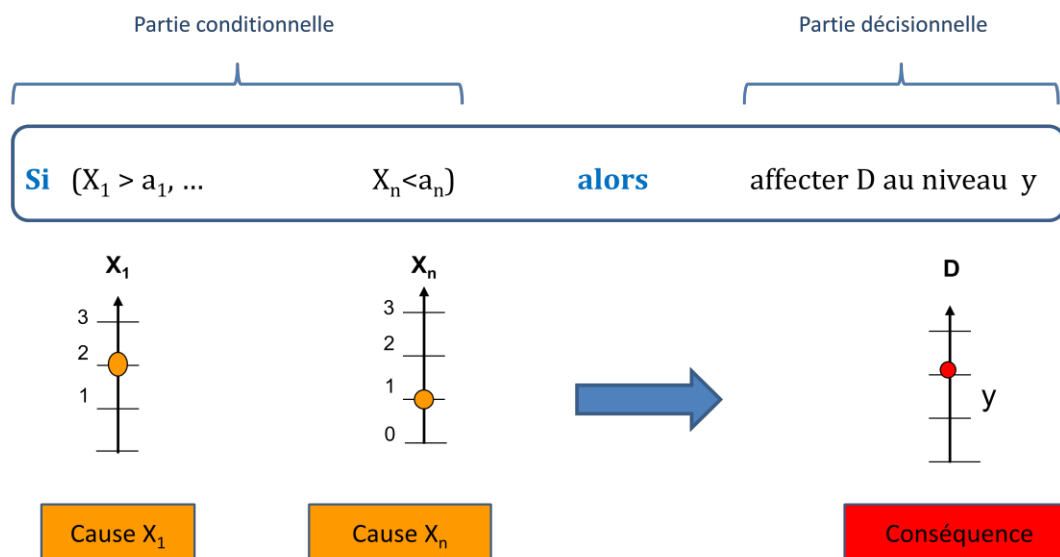


Figure 4 : Structure d'une règle logique

La partie se trouvant après « IF » est appelée « partie conditionnelle ». La partie se trouvant après « THEN » est appelée « partie décisionnelle ».

Les systèmes à base de règles logiques représentent le modèle d'agrégation le plus général. Les règles sont construites avec les acteurs du processus de décision grâce à des échanges, des questionnaires ou des interviews. Les règles doivent être simples à comprendre et à exprimer. Elles possèdent, par nature, un très fort potentiel de représentation, de transparence et d'interprétation en aide à la décision, évitant ainsi « l'effet boîte noire ». En outre, elles sont très flexibles, permettant d'exprimer simplement ce qu'un opérateur analytique ne pourrait rendre. Elles s'accommodent d'une information pauvre ou imprécise et de l'incertitude sous-jacente, en rendant un résultat sous une forme ordinale. Selon la méthode de construction des

règles qui est retenue, les règles logiques peuvent en outre reproduire plus ou moins fidèlement, et toujours de façon plus crédible et auditable, le raisonnement des experts (nous montrerons plus tard que la méthode retenue dans la thèse constitue même un estimateur du maximum de vraisemblance). En outre, comme l'ont montré [Slowinski, Greco & Matarazzo, 2002], ces modèles sont les plus généraux pour traiter l'information ordinale et imprécise.

Les règles logiques ont d'autres avantages sur les méthodes classiques de type MAUT : elles ne transforment pas l'information ordinale en information quantitative, mais la gardent et travaillent en gardant la nature de l'information. En outre, toutes les formes de préférence sont représentées, mêmes celles qui sont incohérentes avec le principe de dominance selon Pareto.

En revanche, les règles logiques peuvent parfois être très difficiles à construire, en particulier lorsque plusieurs acteurs sont appelés à le faire, et elles peuvent mener à des contradictions, par exemple à la violation de la dominance stochastique.

Il est néanmoins possible de réduire ces contradictions en suivant des règles de construction, comme celles proposées par [Azibi & Vanderpooten]. Trois propriétés doivent être vérifiées :

- D'une part, le système doit être complet, tous les objets/alternatives doivent être assignés à une catégorie.
- D'autre part, chaque catégorie doit présenter au moins une règle d'assignation.
- Enfin, on doit s'assurer que le système ne viole pas le principe de dominance.

Une des informations possibles qui sont dissimulées derrière l'incohérence apparente d'un résultat par règles logiques est relative à l'incertitude. Il peut également s'agir de biais cognitifs et d'heuristique générale de l'acteur. Ces causes sont à considérer et à inclure dans le modèle. La violation de la dominance stochastique peut également

être résolue grâce à un système de tests itératifs tel que celui proposé par [Azibi & Vanderpooten, 2002].

Les règles telles que définies précédemment proposent d'envisager les parties décisionnelles comme l'affectation à une catégorie et une seule. Dans le cadre de notre étude, où l'incertitude est importante, cette affectation est souvent déroutante pour les experts, qui n'envisagent pas un résultat aussi précis compte tenu des informations à disposition. En outre, lors de la construction des règles, les différences d'approches des experts peut mener à des règles légèrement différentes, où les catégories d'affectation d'une même règle sont différentes, le plus souvent contigües.

Plusieurs moyens existent pour régler les deux problèmes à la fois. Les chercheurs d'EDF ont dans un premier temps cherché à élargir la partie décisionnelle des risques en lui donnant une syntaxe de type « au plus tôt » / « au plus tard ». Dans la présente étude, nous avons décidé de nous affranchir entièrement des catégories d'affectation et de proposer une agrégation ordinale quantitative, sous la forme d'un segment de valeurs, donnant un résultat relatif de l'élément agrégé. Ainsi, on peut interpréter l'incertitude par l'amplitude du segment, ce qui permet à l'expert d'avoir visuellement le résultat de l'imprécision dont ils perdaient l'information avec l'affectation à une catégorie, tout en conservant un traitement ordinal du résultat des bases de règles.

En outre, en s'affranchissant des catégories d'affectation au profit d'un résultat ordinal quantitatif sous forme de segments de valeurs, il devient possible de réinterpréter les trois propriétés définies ci-dessus par [Azibi & Vanderpooten, 2002]. Le principe de dominance ne doit jamais être violé, mais les principes d'exclusivité et de complétude sont rendus obsolètes du fait de l'absence des catégories.

Nous pouvons cependant envisager des propriétés qui s'en inspirent pour encadrer la construction des règles logiques de façon rigoureuse. La propriété la plus intuitive est de s'assurer que toutes les parties conditionnelles des règles, c'est-à-dire toutes les combinaisons possibles

de valeurs des critères, sont assignées à une partie conditionnelle sous la forme d'un segment (propriété de **pseudo-complétude**). Cette propriété permet de s'assurer qu'une base de règles logiques couvre bien tous les cas possibles.

D'autre part, s'il est devenu obsolète de considérer des catégories d'affectation, et donc de s'assurer que toutes les parties décisionnelles puissent être atteintes par au moins une partie conditionnelle, nous pouvons en revanche considérer que l'ensemble des parties décisionnelles des risques doivent nécessairement constituer un ordre complet, où chaque objet de l'ordre est atteint, par construction, par au moins une partie conditionnelle (propriété de **pseudo-exclusivité**).

Avec ces nouvelles propriétés, nous nous assurons ainsi d'avoir des bases de règles qui soient cohérentes, qui respectent le principe de dominance, qui couvrent tous les cas possibles, et dont les résultats sont donnés sous forme d'ordres complets correspondant aux combinaisons possibles des parties conditionnelles.

c. Application des règles logiques aux arbres de causes

Le modèle principal retenu, compte tenu des paragraphes précédents, est d'utiliser à la fois les arbres des causes et les règles logiques. De cette façon, nous avons accès à la fois à l'aspect visuel et intuitif des arbres des causes, et à la rigueur, la flexibilité et la fidélité à l'expert des règles logiques.

En effet, cette méthode permet de conserver le travail effectué sur les arbres des causes, et de remplacer les connecteurs logiques par des bases de règles, suffisamment fines pour permettre l'élicitation des interactions entre critères d'un même niveau bien au-delà d'un simple connecteur « et » ou « ou ». En fait, la contribution de chaque critère vers

le niveau supérieur de l'arbre, en interaction avec les autres, peut être exprimée sans limite par les règles logiques, ce qui permet de couvrir tous les cas de figure. Voici un exemple où nous insérons une base de règles logiques à la place d'un nœud de l'arbre des causes où devrait se situer un connecteur logique :

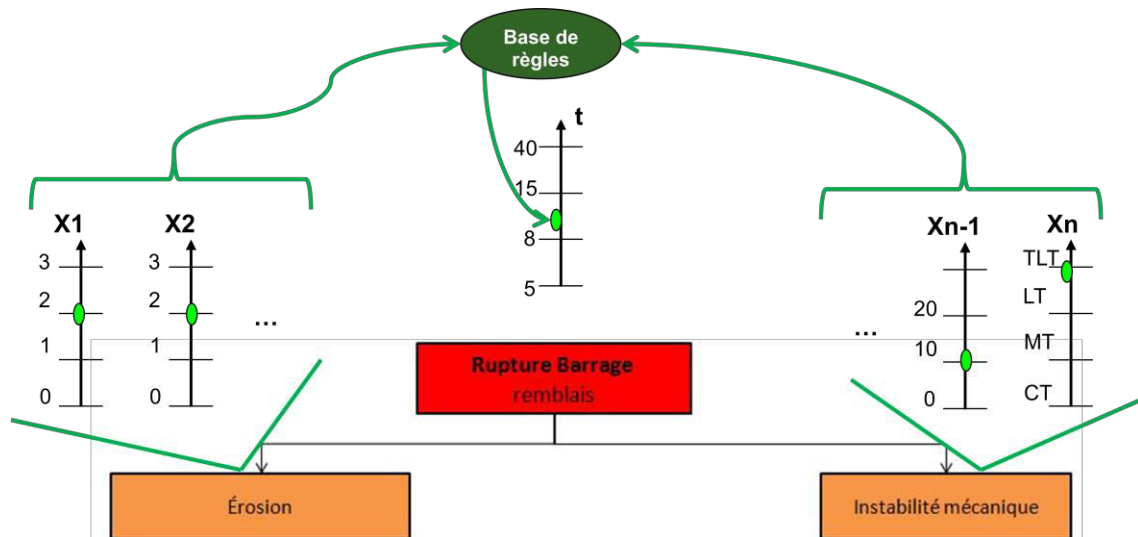


Figure 5 : Utilisation d'une base de règles dans un arbre de causes

Nous avons expliqué dans le paragraphe précédent que nous utiliserons, non pas des catégories d'affectation, mais des segments de valeurs pour chaque combinaison de valeurs de critères de la partie conditionnelle.

Les bases de règles situées tout en bas de l'arbre ont dans leur partie conditionnelle les valeurs, quantitatives ou qualitatives, que l'expert a relevées pour chaque critère de base. Néanmoins, on comprend rapidement qu'en utilisant non plus des catégories mais des segments ordonnés, les bases de règles situées au-delà de ce niveau dans l'arbre des causes doivent agréger des critères d'une nature un peu différente, puisqu'il s'agit d'agréger des segments de valeurs ordonnés.

Pour différencier ces bases de règles, nous appellerons « **bases de règles primaires** » les bases de règles situées tout en bas de l'arbre des

causes et qui relèvent de l'agrégation de critères issus des relevés de l'expert. Nous appellerons « **bases de règles secondaires** » les bases de règles agrégeant une partie conditionnelle elle-même issue de bases de règles précédentes. Ainsi, pour l'arbre des causes suivant, cela revient à :

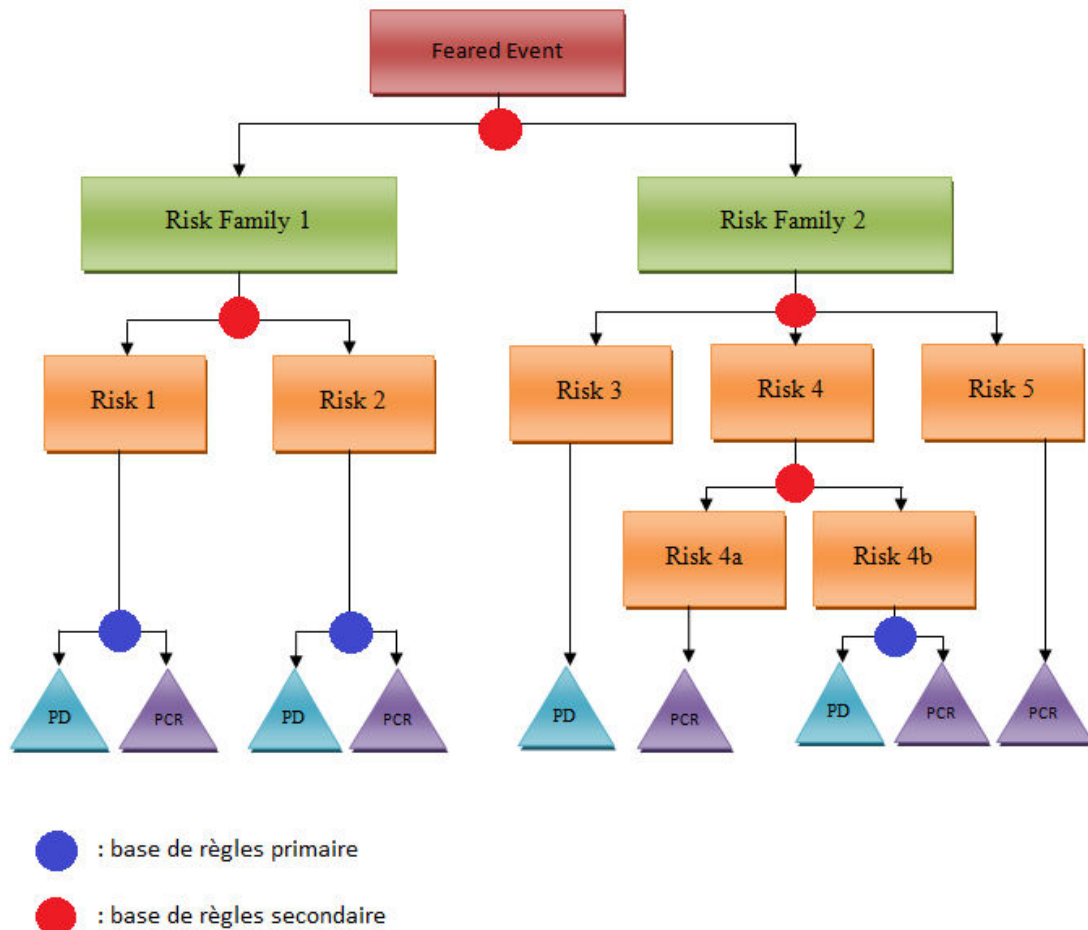


Figure 6 : Arbre de causes utilisant des bases de règles

Afin de rester fidèles aux méthodes utilisées par les experts et de simplifier la construction des règles logiques, nous avons décidé d'utiliser des « états de critères » dans la partie conditionnelle des règles. Cette notion est centrale pour toute la suite de l'étude, la création des règles logiques se formant autour de ces états de critère.

Définition :

On appelle **partition d'états** l'ensemble des parties non vides des valeurs (quantitatives ou qualitatives) atteignables E par un critère donné, disjointes et recouvrant E , et telles que chaque partie soit constituée de l'ensemble des valeurs de E ayant un impact équivalent sur le risque associé à la fonction pour laquelle le critère est un élément de la partie conditionnelle de la base de règles logiques considérée.

Les éléments d'une partition d'états sont appelés **états de critère**. Si on pose f une fonction transformant une partie conditionnelle en partie décisionnelle dans une règle logique pour laquelle X est un critère, un état du critère X est donc défini par :

$$X_i = \{x, y \in E / f(x) = f(y)\}$$

Quels que soient les autres critères appliqués à f .

Exemple : on considère le critère « tassement du barrage » au sein de la fonction « protection de la surverse » pour un barrage. On note T l'ensemble des valeurs atteignables par le critère. Une partition d'états possible pour T est :

$$T = \{T_0, T_1, T_2\}$$

Où T_0 correspond à un tassement négligeable dans le cadre de la protection de la surverse

T_1 correspond à un tassement augmentant sensiblement le risque de la protection de la surverse

T_2 correspond à un tassement critique de la surverse mettant en danger sa protection

T_0, T_1 et T_2 sont les états du critère « tassement du barrage ».

Les états de critère ne nécessitent pas d'être clairement définis ou encadrés par des seuils exprimés quantitativement, en revanche l'ensemble des états d'un même critère ne peuvent partager aucune

valeur en commun, et l'union de tous les états de critères représente l'ensemble de toutes les valeurs atteignables par le critère.

Ainsi, les bases de règles primaires sont l'agrégation de toutes les combinaisons possibles d'états de critère pour une fonction donnée. En revanche, les bases de règles secondaires sont l'agrégation non plus d'états de critères, mais de segments ordonnés issus de bases primaires (ou secondaires). Nous n'avons donc besoin, pour les bases secondaires, que de connaître l'influence relative de chaque fonction précédent la base considérée. En revanche, la création de bases de règles primaires est *a priori* beaucoup plus complexe et fait l'objet d'une méthode complète issue d'outils divers, que nous allons présenter dans les paragraphes suivants.

B. De l'intérêt de la théorie du vote et de la théorie des jeux pour les règles logiques

Si les règles logiques apportent de nombreux avantages, il est nécessaire d'en soigner particulièrement la construction si on veut éviter de faire face aux inconvénients des méthodes habituelles. Il est possible, en utilisant notamment les travaux de [Azibi & Vanderpooten, 2002], de proposer une méthodologie générale et quelques propriétés souhaitées pour nos règles.

Comme nous venons de le voir, les règles logiques sont constituées de deux parties : la partie conditionnelle et la partie décisionnelle. La partie conditionnelle peut être vue comme l'ensemble des facteurs qui vont décider de la partie décisionnelle. En conséquence, une quantification précise n'est pas nécessaire, puisque du point de vue de l'expert, c'est une plage de données d'entrée qui va avoir une conséquence et non simplement une valeur isolée.

Par exemple, si on considère le critère de la hauteur d'eau dans le barrage. Si l'expert estime que cette hauteur est faible, l'impact de ce critère sera sensiblement le même que cette hauteur représente exactement 14.2% de la hauteur du barrage ou 27.3%. L'expert considèrera le critère comme ayant un impact équivalent, et la hauteur d'eau dans le barrage sera simplement vue comme « faible ». Bien sûr, les valeurs particulières, comme ici la valeur 100%, sont à traiter séparément. Dans tous les cas, on s'aperçoit que proposer une valeur exacte n'est souvent pas pertinent, seul l'état du critère importe.

En revanche, la partie décisionnelle des règles doit être la plus précise possible, car c'est elle qui fournit une information véritable sur les items dans l'arbre, et *in fine* sur les risques du système.

Cette partie peut être décomposée en deux informations : l'amplitude du segment représentant les valeurs d'affectation (l'amplitude représente alors l'incertitude agrégée avec laquelle la règle logique est donnée ; l'amplitude diminuera donc quand l'incertitude sera moindre), et un point remarquable du segment (qui peut être vu comme une valeur d'affectation agrégée, représentant par exemple un minimum, un maximum ou une valeur moyenne). Avec ces deux informations, nous pouvons obtenir la valeur d'affectation de chaque règle logique.

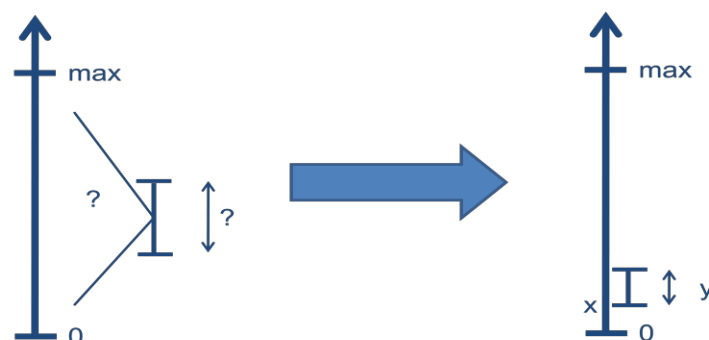


Figure 7 : représentation du problème de l'élicitation de la partie d'affectation d'une règle logique

Le principal enjeu des règles logiques (et une des forces de cette méthode) est de rendre compte le plus finement possible des interactions entre les critères. Chaque règle logique est l'expression de l'agrégation des états physiques des critères considérés, qu'ils interagissent ou non, et quelle que soit la force de leur interaction. En somme, cela revient à considérer un système où un certain nombre de critères ont un niveau de contribution interactif pour l'obtention d'une valeur finale.

Dans cette partie, nous allons voir comment il est possible de quantifier cette contribution interactive et d'en déduire les deux informations recherchées. Nous prouverons dans III.B.a.1 que la valeur remarquable recherchée est en fait le milieu du segment, c'est-à-dire la moyenne arithmétique de la contribution d'un ensemble d'états de critères.

a. Des analogies intuitives

Un des aspects importants que nous avons à traiter lors de l'élaboration des règles logiques est l'interaction entre les critères, et plus particulièrement entre les états de critères. En effet, par construction, une règle logique propose d'assigner une valeur décisionnelle à une séquence non ordonnée d'états de critères. Si dans cette séquence, deux ou plus d'états de critères interagissent, alors la modification d'un de ces états va entraîner une modification de la partie décisionnelle, parfois radicalement. Il est donc important, lorsqu'on construit des règles logiques, de toujours considérer ces interactions.

1. Avec la théorie des jeux

Il existe un domaine qui permet d'étudier la contribution d'un certain nombre d'éléments à un résultat final. Il s'agit de la théorie des jeux. On s'aperçoit rapidement qu'une analogie peut ici être faite entre les états de critères et des joueurs, qui contribueraient à un gain final, représenté par la partie décisionnelle des règles logiques. Dans les règles logiques, la contribution des « joueurs » n'est pas séquentielle, et les « joueurs » interagissent vers un « gain » final, comme dans tout jeu. De plus, dans notre cadre, les interactions entre les états de critères sont fixes, et en tant que joueurs, ils sont obligés de se tenir aux « engagements » représentés par les interactions, rendus inaliénables par le système auquel ils appartiennent et qui définit le cadre physique de ces interactions. Cette idée d'interactions constituant autant d'engagements devant être tenus sous l'œil d'un arbitre impartial, est ce qui définit un jeu coopératif. Dans la méthode que nous proposons, en révélant les interactions, l'expert s'octroie de fait le statut d'arbitre et impose que ces interactions restent fixes et vraies tout au long de l'étude jusqu'à l'obtention du résultat final.

Tout le travail de la conception des règles logiques est de pouvoir connaître la partie décisionnelle de tous les ensembles d'états de critères possibles. Dans l'idéal, il faudrait donc connaître le niveau de contribution de chaque état de critère au « gain » du jeu, afin de pouvoir les combiner. C'est ici que les travaux de [Shapley, 1954] prennent toute leur importance. En effet, Shapley a proposé une méthode afin de distribuer les gains d'un jeu coopératif entre les différents joueurs. On peut assimiler cette méthode à l'attribution d'un niveau de contribution de chaque état de critère au risque final.

Afin de justifier cette analogie, rappelons ici les bases sur lesquelles repose la valeur de Shapley.

Définition :

Soit un jeu à n joueurs (on note N l'ensemble des joueurs). Pour tout joueur (respectivement toute coalition de joueurs) j du jeu, on note $v(j)$ le gain du joueur j (respectivement de toute coalition de joueurs).

$\forall i \in N$, pour toute coalition S contenant i , on appelle **contribution marginale** de i dans S la quantité $v(S) - v(S - \{i\})$.

Définition :

Soit (P, \leq) un ensemble ordonné.

$\forall (x, y) \in P^2 / x \leq y$, une **chaîne maximale** de x à y sur P est une suite $(k_0 := x, k_1 := \dots, k_m := y)$ d'éléments de P telle que :

$$k_i < k_{i-1}, \forall i \in \{1, \dots, m\}.$$

Définition :

Soit un jeu à n joueurs (on note N l'ensemble des joueurs). On note v la fonction gain du jeu. Soit $\Sigma(N)$ l'ensemble des permutations de N . On note P l'ensemble ordonné $(2^N, \subseteq)$. On note σ l'unique élément de $\Sigma(N)$ tel que pour toute chaîne maximale $C = (\emptyset, \Sigma_1, \dots, \Sigma_n = N)$ de P , $\Sigma_1 = \sigma(1), \Sigma_2 - \Sigma_1 = \sigma(2), \dots, \Sigma_n - \Sigma_{n-1} = \sigma(n)$.

On appelle **vecteur de contribution marginale** de v relativement à σ , noté $m^\sigma(v)$, l'élément de \mathbb{R}^n dont la composante d'ordre $\sigma(i)$ vaut la contribution marginale de $\sigma(i)$ dans Σ_i .

Définition :

Soit $G(2^N)$ l'ensemble des jeux coopératifs classiques sur N un ensemble de n joueurs.

$\forall v \in G(2^N)$, on appelle **ensemble de Weber** de v l'enveloppe convexe des $n!$ vecteurs de contributions marginales de v .

Définition :

Un jeu coopératif v est dit **convexe** si pour toutes les coalitions $S, T \in 2^N$,
 $v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) - v(S \cap T)$.

En d'autres termes, un jeu coopératif est dit convexe si la contribution d'une coalition de joueurs permet d'obtenir un gain supérieur que la contribution des joueurs composant la coalition séparément. Or, dans notre problématique, une règle logique est la loi régissant la contribution d'un certain nombre d'états de critères interagissant entre eux vers un score final. Aussi longtemps que l'interaction entre les états de critères est non nulle, une règle logique est alors analogue à la fonction v d'un jeu coopératif convexe. Les états de critères représentent donc les joueurs dont il faudrait calculer la contribution marginale.

De plus, la valeur de Shapley est définie comme suit :

Théorème :

Soit un jeu coopératif J composé de N joueurs.

On note $v(S)$ le gain attendu de J si la coalition S joue. On appelle la fonction v la fonction caractéristique.

Soit $\Phi_i(v)$ la fonction représentant la répartition du gain total pour le joueur i .

On a, $\forall i \in \llbracket 1, N \rrbracket$:

$$\Phi_i(v) = \frac{1}{N!} \sum_R [v(P_i^R \cup \{i\}) - v(P_i^R)]$$

Où R est un ordre possible dans lequel les joueurs jouent

P_i^R est l'ensemble des joueurs ayant joué avant le joueur i dans l'ordre R .

$\Phi_i(v)$ est appelée la valeur de Shapley.

Il s'agit donc du centre de l'ensemble de Weber du jeu considéré, c'est-à-dire la moyenne arithmétique de tous les vecteurs de contributions marginales de v (et Φ_i est une moyenne pondérée des contributions marginales de i). En utilisant la valeur de Shapley pour calculer la contribution de chaque état de critère au résultat d'une règle logique, on cherche donc la moyenne arithmétique des contributions de toutes les coalitions et leurs permutations possibles dans une règle. Puisqu'une règle logique ne doit pas dépendre de l'ordre dans lequel les états de critères contribuent, le centre de l'ensemble de Weber d'un jeu regroupant tous les états de critère donne le résultat moyen d'une règle logique.

On en déduit qu'en utilisant la valeur de Shapley, on obtient donc la valeur moyenne de la partie décisionnelle d'une règle logique, c'est-à-dire le milieu du segment présenté en préambule de la partie III.B.a.

La valeur de Shapley possède des propriétés très intéressantes dans le cadre de la thèse. Comme l'a montré [Shapley, 1954], la fonction Φ est linéaire. C'est-à-dire que pour tous jeux v et w et tout réel α :

$$\forall i \in N, \Phi_i(v + \alpha w) = \Phi_i(v) + \alpha \Phi_i(w)$$

Cette propriété est particulièrement intéressante pour la construction de règles logiques, puisque cela permet de la flexibilité dans leur utilisation. Par exemple, on peut facilement regrouper des critères après avoir construit les règles logiques, sans avoir besoin de refaire toute la méthodologie d'obtention des règles, si on connaît déjà les valeurs de Shapley des critères séparément. De la même façon, si on souhaite utiliser des bases de règles créées pour un système donné, sur un autre système très proche où les seules différences portent sur la constitution des familles de critères (par exemple les seuils de certains critères au sein d'une famille sont différents), on peut modifier simplement les règles grâce à cette propriété.

Notons qu'en théorie du vote, la valeur de Shapley s'appelle **indice de pouvoir**.

L'analogie est récapitulée par le tableau suivant :

Dans la méthode proposée	Dans la théorie des jeux coopératifs
Etat de critère	Joueur
Partie décisionnelle d'une règle à n critères	Gain moyen de tous les jeux à n joueurs
Participation relative de chaque état de critère	Valeur de Shapley
Expert	Arbitre

Tableau 4 : tableau récapitulatif de l'analogie avec la théorie des jeux

L'analogie avec la théorie des jeux revient à considérer le problème «à l'envers». En effet, au lieu de voir les éléments de la partie conditionnelle des règles pour en déduire la partie décisionnelle, on va partir de cette dernière, les « gains », et on va chercher à les distribuer entre les « joueurs », à savoir les éléments constitutifs de la partie conditionnelle.

Comme nous le verrons dans la partie III.B.b, afin de déterminer la valeur de Shapley pour chaque joueur, il est néanmoins nécessaire de connaître les gains pour tous les jeux impliquant les mêmes joueurs, en tenant compte de l'ordre dans lequel ils jouent ainsi que les coalitions qu'ils peuvent former.

2. Avec la théorie du vote

La théorie des jeux ne permet pas à elle seule de calculer les gains pour tous les jeux possibles. Ces gains sont supposés connus. Afin de pallier ce problème, il est nécessaire de mobiliser d'autres outils.

Pour rappel, il est possible de voir une règle logique comme un jeu, et de chercher à redistribuer les « gains » parmi les « joueurs ». Cette distribution revient à chercher le niveau de contribution de chaque état de critère au risque agrégé. A minima, il est intéressant de mettre en lumière un ordre de niveau de contribution, afin de pouvoir dire qu'un état de critère X a contribué davantage au risque agrégé qu'un état de critère Y. Dans l'idéal, il faudrait même pouvoir quantifier ce résultat.

De nombreux outils très intéressants permettent d'obtenir des ordres, parfois même quantifiés, et la plupart sont inspirés de la théorie du vote. En effet, par nature même, la théorie du vote cherche les méthodes qui, à partir d'au moins deux alternatives, dégagent les préférences d'un groupe de votants. Certaines méthodes développent justement des ordres de préférences entre les alternatives présentées.

On voit ici qu'une analogie peut être faite. En effet, il est possible de considérer les états des critères comme autant de « votants », mais aussi de « candidats ». De cette façon, il est possible d'obtenir des ordres en fixant un ou plusieurs états de critères.

Par exemple, si on fixe tous les critères sauf deux, on obtient une préférence de l'un des deux sur l'autre, compte tenu du fait que les autres critères sont fixes. En procédant à des comparaisons deux à deux de la même façon sur toutes les combinaisons d'états de critères (alors apparentés à des coalitions), on obtient non seulement un ordre, mais en outre il est possible de quantifier cet ordre.

Il existe une méthode, issue de la théorie du vote, qui permet d'appliquer ce principe. Les comparaisons deux à deux reviennent à un vote par paires, selon la méthode Condorcet. [Kemeny, 1959] a proposé une méthode qui permet justement, à partir d'un vote à la Condorcet, de donner des scores à tous les ordres de candidats possibles. Cette méthode sert à dégager un unique vainqueur en cas d'égalité (cas possible avec la méthode de Condorcet). Mais les scores obtenus sont également homogène au niveau de préférence de chaque ordre.

En ce qui concerne la présente étude, on peut également voir ces scores comme les « gains » des jeux coopératifs présentés dans le paragraphe précédent. Chaque ordre devient alors l'ordre dans lequel les « joueurs » ont participé au jeu. C'est l'information dont nous avons besoin pour calculer les valeurs de Shapley des critères. Nous montrerons dans la partie III.B.c comment il est possible d'utiliser ces informations pour calculer la valeur de Shapley évoquée précédemment.

Cette analogie est récapitulée par le tableau suivant :

Dans la méthode proposée	Dans la théorie des jeux coopératifs	Dans la théorie du vote
Etat de critère	Joueur	Votant ET Candidat
Comparaison de la participation de deux états de critère à la partie décisionnelle		Comparaison de votes par paire / méthode de Condorcet
Participation relative de chaque état de critère	Valeur de Shapley	Indice de pouvoir
	Gain d'un jeu à n joueurs	Score de Kemeny d'un pré-ordre

Tableau 5 : tableau récapitulatif de l'analogie avec la théorie du vote

Ainsi, les analogies peuvent être résumées selon le schéma suivant :

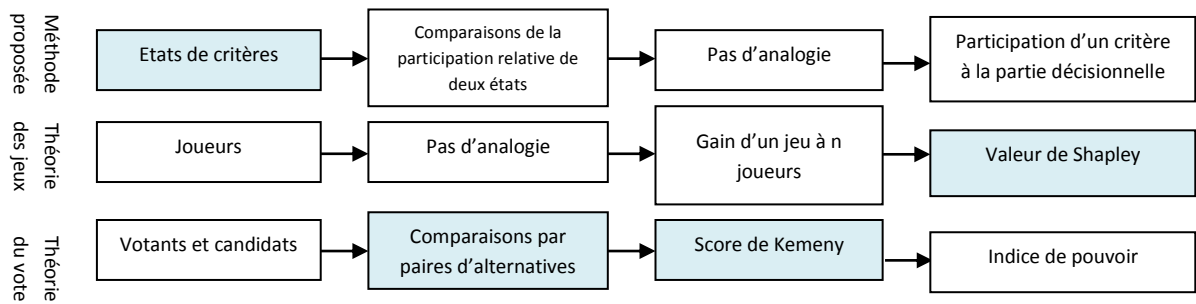


Figure 8 : chemin analogique utilisé

En bleu clair sont représentées les étapes utilisées pour construire la partie décisionnelle des règles. Nous noterons que dans le schéma ci-dessus, nous obtenons à la fin les participations des critères à la partie décisionnelle, et non des états de critères. Nous verrons dans la partie IV.A.e comment en déduire la participation des états de critères. Les analogies s'arrêtent néanmoins ici.

Cette analogie avec les votes, en particulier avec les votes deux à deux, n'est pas nouvelle en science de la décision. L'école européenne, comme vu dans la partie II.B.b, s'inspire déjà largement de ces outils. Dans la présente étude, ces outils sont utilisés différemment mais avec un esprit proche. Il s'agit toujours de minimiser l'impact de l'incertitude et des biais cognitifs en décomposant le problème à l'extrême (les paires étant alors le système le plus simple imaginable). En particulier, les méthodes ELECTRE s'inspirent largement des comparaisons par paires.

b. La valeur de Shapley pour distribuer la partie décisionnelle des règles logiques

Nous avons vu précédemment que la théorie des jeux coopératifs proposait des outils permettant de répartir les gains (par analogie de juger du niveau de contribution) parmi les joueurs (par analogie les états

de critères) à la fin d'un jeu coopératif (par analogie un ensemble d'états de critères interagissant). En particulier, [Shapley, 1953] proposa une répartition équitable et unique calculée à partir des résultats de tous les jeux coopératifs possibles avec un ensemble donné de joueurs.

Cette méthode présuppose que l'on connaisse les gains des différents jeux, en particulier dans le cas où des coalitions de joueurs se forment. Toutes les coalitions doivent être envisagées, ainsi que l'ordre dans lequel les joueurs et/ou les coalitions jouent. Une fois ces informations connues, la répartition des gains se fait grâce à la valeur de Shapley introduite au III.B.a.1. Pour rappel, la valeur de Shapley se définit par la formule suivante :

$$\Phi_i(v) = \frac{1}{N!} \sum_R [v(P_i^R \cup \{i\}) - v(P_i^R)]$$

Cette formule peut se lire de la façon suivante : le joueur i se voit distribuer un gain équivalent à la moyenne de tous les gains ajoutés au jeu après sa participation.

En utilisant la valeur de Shapley, on peut donc distribuer le gain du jeu (soit ici la partie décisionnelle d'une base de règles logiques) entre tous les joueurs (soit ici les différents états de critères). Chaque règle voit apparaître un état de critère pour chaque critère (tous les critères apparaissant dans chaque règle), et toutes les règles d'une même base présentent ensemble toutes les combinaisons possibles d'états de critères. Donc, sous réserve de connaître la partie décisionnelle de toutes les séquences d'états de critères et de leurs coalitions, il est possible de donner un niveau de contribution de chaque état de critère à la note finale. Une fois ce niveau de contribution connu, il suffit de les combiner pour obtenir la règle.

Nous noterons que cette approche est dans le fond assez proche des modèles multicritères fondés sur la mesure de Choquet, tel que proposé par [Grabisch, 2004] : l'agrégation des critères en tenant

compte de leur interaction est l'indice d'interaction à l'ordre 1 dans ce cadre.

Afin de révéler la partie décisionnelle, comme nous en avons parlé dans la partie III.B.a., nous utiliserons des outils issus de la théorie du vote.

c. Le score de Kemeny pour comparer les éléments de la partie conditionnelle des règles

Afin de connaître les résultats des différents jeux coopératifs par toutes les coalitions et tous les ordres des joueurs, nous avons choisi de comparer les états de critères deux à deux. En effet, le premier point est d'obtenir un ordre de jeu des états de critères, mais également d'être capable de quantifier cet ordre, afin de pouvoir les situer sur une échelle. En connaissant les rapports des ordres entre eux, on en déduit leur position, donc leur valeur sur une échelle normalisée. Cette méthode permet donc de révéler exactement ce que nous cherchons pour appliquer les valeurs de Shapley : la valeur de chaque ordre possible, soit par analogie le gain de tous les jeux possibles en fonction de l'ordre dans lequel les joueurs jouent. En outre, nous avons besoin de connaître les gains des différentes coalitions, et la théorie du vote possède de nombreux outils pour traiter de cet aspect commun dans la discipline.

Le choix d'utiliser des modèles de comparaison deux à deux est fondé sur les travaux de [Young & Levenglick, 1978], [H.P. Young, 1986]. En effet, [Young, 1995] a démontré que les comparaisons par paires étaient la meilleure estimation possible du maximum de vraisemblance pour la construction d'ordres de préférence. En outre, il a démontré qu'une règle, appelée règle de Young-Kemeny, développée par [Kemeny, 1959], découlant des comparaisons par paires et des travaux

de [de Condorcet, 1785], était la seule à satisfaire trois propriétés importantes :

- Le critère de neutralité : si on permute les options d'un vote, le résultat est permuté. En d'autres termes, le résultat n'est pas modifié si on modifie l'ordre dans lequel les états de critères apparaissent dans les règles logiques
- Le critère de continuité : si deux groupes de votants donnent une même préférence séparément, alors cette préférence est toujours gagnante si les deux groupes sont réunis. En pratique, si deux experts donnent un ordre de préférence sur des états de critères qui est identique, notre méthode prévoit que cette préférence soit toujours vraie si on réunit les experts. Cette propriété est nécessaire pour qu'une méthode de choix puisse être considérée comme une méthode de score (nous permettant de quantifier les préférences par la suite), comme l'a démontré [Young, 1975].
- Le critère de Condorcet : si une alternative est donnée gagnante contre chacune des autres alternatives séparément, alors cette alternative doit être la préférée. Ce critère assure le critère de majorité.

Cette règle revient à utiliser les scores de Kemeny pour comparer les ordres. Ces scores sont homogènes à une quantification de la préférence, comparativement par rapport aux autres préférences. Par analogie, le score de Kemeny est le gain d'un jeu joué dans l'ordre des joueurs donné par l'ordre de préférence. [Kemeny, 1959] définit le score de Kemeny comme suit :

Définition :

Soit un choix composé de N alternatives et soumis à X votants.
 Le **score de Kemeny** d'un ordre i des N alternatives est la somme du nombre de votes issus de toutes les comparaisons par paires des N alternatives satisfaisant l'ordre i .

Pour trouver le score de Kemeny d'un ordre de préférence, il faut commencer par comparer deux à deux tous les choix d'une alternative. Tous les votants expriment leur préférence sur toutes les paires possibles. On compte ensuite le nombre de fois où une alternative est préférée par rapport à une autre, et ce pour toutes les alternatives. On obtient alors un tableau de ce type :

	1	2	...	N
1	-	T_{12}	...	T_{1N}
2	T_{21}	-	...	T_{2N}
...	-	...
N	T_{N1}	T_{N2}	...	-

Tableau 6 : table des votes par paires

Où $1, 2, \dots, N$ sont les alternatives du choix

Et pour tout (α, β) de $\llbracket 1, N \rrbracket^2$, $T_{\alpha\beta}$ est le nombre de votants qui ont préféré α à β .

Le score de Kemeny d'un ordre de préférences s'obtient en additionnant tous les termes en $T_{\alpha\beta}$ qui satisfont l'ordre considéré. Notons K le score de Kemeny d'un ordre i sur N alternatives. On a donc :

$$K_i = \sum_{\substack{X,Y=1 \\ X>Y \text{ dans } i}}^N T_{XY}$$

Si par exemple, dans un ordre de préférence à trois alternatives 1, 2 et 3, l'alternative 1 est préférée à la fois aux alternatives 2 et 3, le score de Kemeny est la somme : $T_{12} + T_{13} + T_{23}$. En théorie du vote, une fois le score de Kemeny obtenu pour tous les ordres de préférence, l'ordre retenu est celui qui a obtenu le score le plus élevé. Nous n'utiliserons cependant pas le score de Kemeny de cette façon, mais plutôt pour quantifier les ordres de préférence.

La méthode de Young-Kemeny est une méthode qui utilise les principes à la fois de la méthode de Condorcet et de la méthode de Borda, et permet de conserver des avantages des deux méthodes (critère de Condorcet pour la méthode de Condorcet, critère de continuité pour la méthode de Borda). Le système de score qui en découle est une estimation du maximum de vraisemblance.

Pour la suite de l'étude, nous utiliserons cette méthode pour comparer des paires d'états de critères. A cause des interdépendances, ces comparaisons donneront des résultats différents en fonction des états des autres critères par ailleurs. Nous considérerons donc des coalitions d'états de tous les critères autres que les deux comparés. Pour simplifier, nous dirons que nous « fixons » des états de critères ou des coalitions d'états de critères lors d'une comparaison.

Une fois le score de Kemeny obtenu pour tous les ordres d'un système, est il facilement envisageable d'en déduire le score de

Kemeny pour tous les ordres comprenant des coalitions. Il suffit pour cela de considérer tous les pré-ordres où la coalition apparaît, dans tous les ordres possibles de ses éléments constitutifs. Pour obtenir le score d'une coalition, on retient tous les pré-ordres où les alternatives apparaissent de façon directement consécutive, quel que soit l'ordre. Le calcul de la moyenne des scores de Kemeny, pour tous les pré-ordres comprenant la coalition, donne le score de la coalition. Le score de la coalition, que nous avons noté $v(P_i^R)$ dans la partie précédente, est une des données nécessaires pour obtenir la valeur de Shapley d'un élément. Si on considère une alternative comme une coalition formée d'un singleton, on obtient de la même façon $v(i)$. Il devient alors possible de calculer la valeur de Shapley de tous les joueurs.

Malheureusement, ces propriétés très intéressantes ont un coût. En effet, le nombre de comparaisons deux à deux à effectuer pour un système peut rapidement devenir extrêmement important. En effet, si on pose X le nombre de critères d'un système et Y le nombre d'états de critères, en considérant tous les ordres possibles et toutes les coalitions possibles d'états de critères fixés, le nombre de comparaisons à effectuer est :

$$\sum_{\substack{i,j=1 \\ i>j}}^Y \sum_{k=1}^X C_k^{E(\frac{X}{2})+1} y_i y_j$$

où y_i et y_j sont respectivement le nombre d'états de critères des critères i et j .

Dans un système simple, par exemple avec 5 critères chacun comportant 3 états de critères, on a 2250 comparaisons à effectuer. Il nous faut donc trouver un moyen de réduire ce nombre d'opérations à effectuer afin de rendre notre méthode fonctionnelle.

C. Comment la théorie des bases de données permet de simplifier la construction des règles logiques

Comme nous l'avons vu précédemment, le nombre de comparaisons à effectuer peut rapidement devenir trop important pour une utilisation industrielle. Il nous est donc apparu nécessaire de chercher les méthodes qui permettraient de réduire ce nombre pour une opérationnalisation de la méthode générale. Intuitivement, on voit que de nombreuses redondances vont apparaître lors des comparaisons. Par exemple, si des critères ne sont pas liés, alors le fait qu'ils votent ensemble ou séparément ne changera pas le résultat du vote, moyennant des règles simples. De la même façon, par transitivité, des interactions vont être traitées plusieurs fois. Dans cette intuition, les interactions sont le levier des redondances. Nous avons donc cherché des outils qui permettent de réduire les comparaisons sur la base de ces interactions. En particulier, des outils issus des travaux sur les bases de données permettent exactement de réduire considérablement la quantité d'informations nécessaires à l'application des outils vus précédemment.

a. Analogie entre les interactions et les dépendances fonctionnelles

La théorie des bases de données, et plus particulièrement des bases de données relationnelles, propose des outils pour représenter les relations entre des informations. Dans le modèle relationnel, on appelle « dépendance fonctionnelle » la relation qui lie deux informations interdépendantes. Cette dépendance est considérée unilatérale. Si cette dépendance est bilatérale, on écrira alors deux dépendances fonctionnelles. On voit bien ici l'analogie qui peut être faite avec les interactions entre les états de critères. En outre, si un état de critère peut

influencer sur un autre, ce n'est pas nécessairement réciproque, ce qui correspond à la représentation des dépendances fonctionnelles. Ci-après un tableau récapitulatif de l'analogie proposée :

Dans la méthode proposée	Dans la théorie des bases de données
Critère	Objet
Etat de critère	Attribut d'un objet
Interaction entre deux états	Dépendance fonctionnelle de deux attributs

Tableau 7 : tableau récapitulatif de l'analogie avec la théorie des bases de données

Afin d'alléger les bases de données toujours davantage, il est intéressant, grâce au modèle relationnel, de réduire le plus possible le nombre de dépendances fonctionnelles nécessaire à la description d'un système. Dans cette optique, la couverture minimale est l'objectif à atteindre.

La couverture minimale est l'ensemble des dépendances fonctionnelles minimal suffisant pour décrire toutes les dépendances fonctionnelles d'un système. Par analogie, cela reviendrait à l'ensemble minimal des interactions entre les états de critères desquelles découlent toutes les interactions relevées *a priori* par un expert.

Un tel ensemble est primordial si on souhaite réduire le nombre de comparaisons à effectuer. En effet, avec la couverture minimale des interactions, on met en lumière toutes les redondances possibles qui auront lieu entre tous les états de critères d'un système. En outre, la couverture minimale, par nature, n'autorise aucune redondance d'interdépendance, par exemple par transitivité.

Moyennant des règles simples, on peut supprimer toutes les redondances de nos comparaisons deux à deux. Voici les règles à utiliser pour simplifier les redondances dans le cas où les états de critères sont indépendants, c'est-à-dire qu'ils n'apparaissent pas dans la couverture minimale :

Notons :

a et b deux états de deux critères indépendants A et B du système.

X et Y deux critères différents de A et B tels que A et B sont chacun interdépendants avec au moins l'un d'eux.

X_i et Y_j les états de critères i et j respectivement de X et Y (indépendants ou non).

$X_i > Y_j$ la relation « X_i a une plus forte influence que Y_j ».

R une relation liant deux états de critères (on notera aRb une relation entre a et b).

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors $\forall aRb$, ab étant fixe, $X_i > X_j$

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, si $a > b$, ab étant fixe, $X_i > X_j$

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, si $a \sim b$, ab étant fixe, $X_i \sim X_j$

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, si $a < b$, ab étant fixe, $X_i < X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors, si $a > b$, ab étant fixe, $X_i < X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors, si $a \sim b$, ab étant fixe, $X_i \sim X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors, si $a < b$, ab étant fixe, $X_i > X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, $\forall aRb$, ab étant fixe, $X_i < X_j$

Ainsi, si on connaît aRb , et les X_iRX_j sachant respectivement a et b, on connaît automatiquement X_iRX_j sachant ab. Il est également possible

de considérer ab non plus comme une coalition, mais comme un état de critère agrégé, et de réutiliser les règles ci-dessus entre ab et un autre état de critère, et ainsi de suite pour couvrir toutes les coalitions possibles.

On voit bien ici que le nombre d'opérations à effectuer pourra être considérablement réduit, puisque toutes les coalitions sont concernées et ainsi simplifiées. Le nombre d'états de critères indépendants est augmenté puisque le nombre d'interdépendances est réduit au strict minimum. Nous verrons à travers un exemple concret, dans la partie IV de ce mémoire, à quel point cette méthode permet de réduire le nombre d'opérations.

b. Les axiomes d'Armstrong et la recherche de la couverture minimale

Pour chercher la couverture minimale des dépendances fonctionnelles dans une base de données relationnelle, l'utilisateur a le plus souvent recours aux axiomes d'Armstrong. [Armstrong, 1974] a proposé des axiomes montrant que certaines dépendances fonctionnelles sont les conséquences d'un ensemble de dépendances fonctionnelles dont elles ne font pas partie. Autrement dit, les axiomes d'Armstrong mettent en avant les propriétés nécessaires et suffisantes pour montrer qu'une dépendance fonctionnelle est redondante dans une base de données. En utilisant ces axiomes, il devient donc possible d'identifier les cas où les propriétés sont avérées et donc de supprimer les redondances, obtenant *in fine* la couverture minimale.

Dans l'étude des bases de données relationnelles, les axiomes d'Armstrong sont définis comme suit :

Théorème :

On note X, X', Y, Z, Z', W des attributs d'une base de données.

Une dépendance fonctionnelle $X \rightarrow Y$ est conséquence d'un ensemble de dépendances fonctionnelles F si et seulement si elle s'obtient à partir :

- de F
- des axiomes $X \rightarrow X'$ avec X' inclus dans X (réflexivité)

par les règles suivantes :

- si $Z \rightarrow Z'$ alors $ZW \rightarrow Z'W$ (augmentation)
- si $X \rightarrow Y$ et $Y \rightarrow Z$ alors $X \rightarrow Z$ (transitivité)

On en déduit :

1. Si $X \rightarrow Y$ et $X \rightarrow Z$ alors $X \rightarrow YZ$
2. Si $X \rightarrow Y$ et $WY \rightarrow Z$ alors $WX \rightarrow Z$
3. Si $X \rightarrow Y$ et Z inclus dans Y alors $X \rightarrow Z$

En utilisant ces propriétés, on peut décomposer toutes les dépendances fonctionnelles et identifier immédiatement celles qui sont redondantes.

La recherche de la couverture minimale passe par trois étapes qui découlent de ces axiomes :

- Développer toutes les dépendances fonctionnelles qui présentent plusieurs éléments à droite
- Développer toutes les dépendances fonctionnelles qui présentent plusieurs éléments à gauche
- Supprimer toutes les redondances

Cette méthode peut s'apparenter à la recherche de la couverture minimale d'un graphe. On peut ainsi simplifier un système d'interactions de critères en ramenant l'ensemble des interactions à un minimum qui suffit à décrire l'ensemble des dépendances fonctionnelles. La couverture minimale est par construction la simplification optimale des

systèmes à dépendances relationnelles, et par conséquent un outil très puissant pour simplifier les interactions d'un système. En utilisant les règles définies dans la partie III.C.a, on peut ainsi réduire considérablement le nombre de comparaisons à effectuer. Nous verrons dans la partie IV que cette simplification est suffisante pour rendre ce nombre fonctionnel.

D. Récapitulatif de la méthode proposée

Nous avons choisi de positionner le problème en relation avec les événements redoutés d'un système donné. Ce choix est justifié par les pratiques courantes, elles-mêmes conditionnées par les besoins des études de danger. En effet, les études de danger ont diverses vocations, et pour des ouvrages de génie civil, *a fortiori* pour les barrages, de nombreux acteurs considèrent les risques des systèmes non plus par rapport à leur disponibilité ou à leur activité, mais par rapport aux conséquences catastrophiques que les événements redoutés peuvent générer : un barrage qui s'effondre peut mener à la perte tragique de nombreuses vies humaines, et quand bien même les vies seraient sauvées, l'impact économique, environnemental et sur l'image de l'exploitant seraient de très grande envergure. La maintenance sur de tels systèmes est toujours pensée afin de diminuer le plus possible la probabilité d'occurrence de ces événements redoutés. Par conséquent, les études de danger sur de tels systèmes ont toujours pour but d'étudier les risques relatifs aux événements redoutés.

Nous avons vu précédemment les outils généraux que nous utiliserons pour factoriser les risques sur un système complexe (les règles logiques et les arbres de causes), ainsi que les outils complémentaires qui nous permettent d'appliquer ces concepts en satisfaisant nos exigences d'auditabilité et de réduction des effets cognitifs. Nous allons à présent récapituler toutes les étapes à suivre, du point de l'utilisateur, pour appliquer la méthode proposée à un système de génie civil comme un

barrage. Cette méthode revient à construire, pour chaque ouvrage considéré, l'arbre des causes et les bases de règles qui vont remplacer les connecteurs logiques. Une fois ce travail effectué, il pourra être enrichi en fonction des modifications de l'état des connaissances sur le système, mais pourra servir de base pour toutes les études de risques du système à l'avenir. Autrement dit, sous réserve des modifications d'usage, une fois les bases de règles établies, l'expert n'aura plus qu'à entrer les valeurs des critères de base du système pour obtenir toutes les informations souhaitées.

Pour simplifier la compréhension de la méthodologie, voici le vocabulaire spécifique que nous proposons :

Nous appellerons « **base** » de l'arbre des causes le niveau de l'arbre le plus bas, où se situent les critères non décomposables (ex. : vent, vanne défaillante, séisme, crue décennale etc.).

Nous appellerons « **nœud** » de l'arbre des causes le lien qui permet de passer d'un niveau à l'autre au sein de l'arbre. Les bases de règles seront insérées sur les nœuds.

Nous appellerons « **items** » de l'arbre des causes les objets constituant l'arbre à chaque niveau, qu'ils soient des critères, des fonctions, des événements, etc.

Les règles logiques utilisées dans le présent document prendront la forme « IF (X), THEN (CLASS(Y)) ».

Dans cette notation, la partie « IF (X) » est appelée « **partie conditionnelle** », où (X) représente une condition sur un critère X (par exemple, une valeur), et la partie « THEN (CLASS(Y)) » est appelée « **partie décisionnelle** », où Y est l'item cible de la règle logique, et CLASS(Y) est sa valeur (ou classe) d'affectation.

La partie conditionnelle des règles logiques sera formée par les états des critères.

Les bases de règles situées au niveau le plus bas d'un arbre de causes seront appelées « **bases de règles primaires** ». Les bases de règles dont les critères sont issus d'une ou plusieurs bases de règles précédentes seront appelées « **bases de règles secondaires** ».

Nous utiliserons les signes « < » et « > » à la fois pour désigner un ordre quantitatif et une préférence.

Voici une représentation générale de la méthode proposée (un logigramme complet est proposé en annexe 18) :

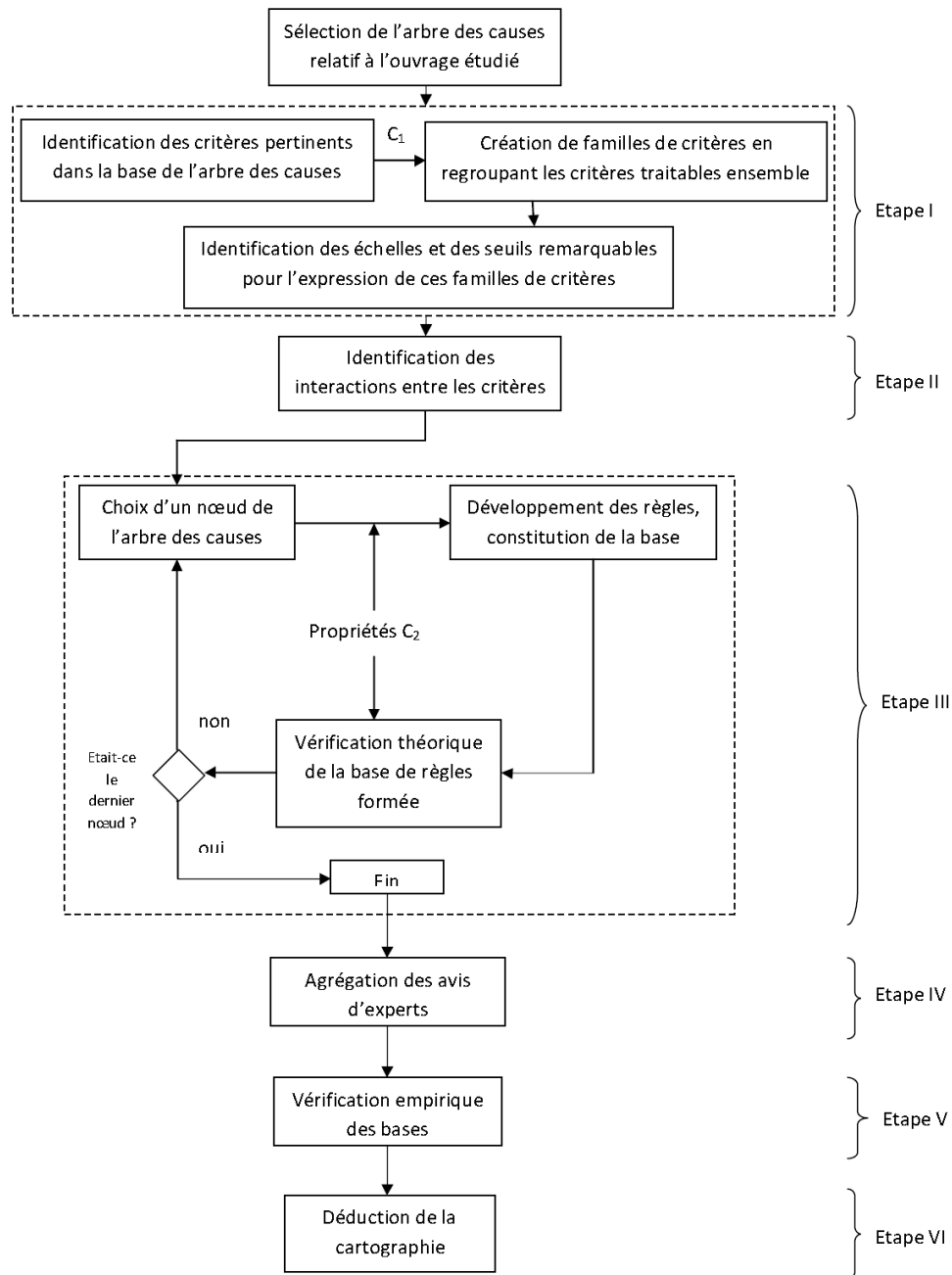


Figure 9 : schéma récapitulatif de la méthode proposée

1. Etape I : identification et factorisation des critères

La première étape est de savoir identifier, parmi les items et les critères développés dans l'arbre des causes de la famille d'ouvrages considérée, quels sont ceux qui sont pertinents. L'ouvrage à étudier ne répond pas toujours à tous les critères énumérés par l'arbre des causes, et il est également possible que certains critères lui soient propres et non envisagés dans l'arbre des causes. Cette identification permet donc d'affiner l'arbre des causes initial en éliminant ou en rajoutant des items, au besoin.

L'identification des critères peut se faire pour chaque sous-arbre primordial (i.e. les arbres dont la base ne dépend d'aucun autre arbre et seulement des facteurs physiques), séparément. Dans un premier temps, il convient de relever tous les critères visibles dans l'arbre des causes, en ne considérant que leur pertinence compte tenu de l'ouvrage considéré. Cette liste sera simplifiée plus tard en factorisant les critères qui peuvent être évalués ensemble. Il est préférable que l'expert procède à l'identification des critères pour chaque fonction (items en jaune sur l'arbre des causes, comme ceux de l'annexe 1) de l'arbre séparément.

Une fois tous les critères répertoriés, l'utilisateur peut ainsi regrouper les différents facteurs appartenant à une famille qu'il est capable d'identifier et dont il est capable de proposer les propriétés. Le but recherché est de «factoriser» les différents items répertoriés précédemment, afin de simplifier la base de règles construite dans les étapes suivantes. Certains critères, par exemple, conduisent aux mêmes conséquences en suivant les mêmes lois, l'apparition de l'un est liée à l'apparition de l'autre, et au final il est possible de considérer ces critères comme un unique critère de synthèse.

Pour qu'on puisse regrouper plusieurs critères au sein d'une même famille, il faut que l'expert considère :

- Que les critères soient liés d'un point de vue phénoménologique : l'expert devra par la suite proposer des états de critères pour chaque famille, correspondant à un ensemble de valeurs ayant

un impact comparable sur la partie décisionnelle des règles. Il est donc nécessaire que ces états de critères aient en commun leur implication phénoménologique.

- Que la fonction d'agrégation des critères en une famille soit bijective : autrement dit, il faut que les ensembles de valeurs décrivant les états de chaque critère séparément se retrouvent exactement comme ensembles de valeurs des états de la famille de critères résultante. Cela revient à factoriser les critères par leurs états.
- Que les valeurs de la partie décisionnelle de chaque critère séparément puissent se calculer sur la même échelle que celle de la famille de critères résultante : l'homogénéité garantit la possibilité d'expression des règles logiques résultant de l'agrégation des critères en familles.

Nous noterons cette liste de propriétés C1.

Une fois les critères factorisés et leur liste diminuée à son minimum, l'expert devra définir des états pour chaque critère ou chaque famille de critères, soit en donnant des seuils lorsque cela est possible, soit simplement en exprimant des ensembles de valeurs, qualitatives ou quantitatives, ayant un impact différent sur les parties décisionnelles des règles logiques. Ces états de critères sont très importants en ce que leur combinaison formera la partie conditionnelle des règles. Néanmoins, la seule importance dans leur choix est que ces ensembles doivent être considérés par l'expert comme ayant un impact équivalent sur la partie décisionnelle. Si, sous certaines conditions, par exemple d'interaction, ces ensembles deviennent disjoints, il faut que l'expert les considère comme autant d'états de critères.

Une fois les critères factorisés, et pour la suite de l'étude, nous considérerons chaque famille de critère comme un nouveau critère. La

liste finale peut donc être vue comme un ensemble de critères, et nous appellerons critère toute famille de critère pour la suite.

2. Etape II : identification et simplification des interactions

Dans cette étape, l'expert doit mettre en lumière les interactions apparaissant selon lui entre les états de critères. Il devra donc dire, pour chaque état de critères, puis pour chaque coalition possible d'états de critères, quelles interactions apparaissent avec quels autres états ou coalitions d'états de critères.

Ici, on ne demande pas à l'expert de définir la nature de l'interaction. Qu'il s'agisse d'un effet de veto, d'une majoration, d'une minoration ou de n'importe quel type d'interaction, il n'est pas pertinent d'en déterminer la nature à ce stade. La nature de l'interaction sera révélée ultérieurement, au cœur de l'étape III. De plus, l'expert révélera, lorsqu'il y a une interaction, dans quel sens elle apparaît. En effet, si un critère a peut avoir une influence sur un critère b , la réciproque n'est pas nécessairement vraie. Donc s'il y a interaction entre a et b , l'expert devra dire si c'est de a sur b , de b sur a ou les deux.

La façon de procéder peut être vue ainsi :

- L'expert sélectionne un critère a parmi l'ensemble F des critères du système étudié. Il cherche tous les critères de F interagissant avec le critère sélectionné.
- Pour un critère présentant une interaction avec a , il considère chaque état de a et le compare à chaque état du critère interagissant.
- Il réitère l'opération pour tout critère de F interagissant avec a .
- Il procède la même façon avec un critère de $F - \{a\}$, noté b , puis avec un autre critère, c , de $F - \{a, b\}$ et ainsi de suite jusqu'à couvrir tous les critères de F .

- L'expert considère une coalition de F^2 , par exemple $\{a, b\}$, et effectue le même travail avec tous les critères de $F - \{a, b\}$.
- Il recommence l'opération pour toutes les coalitions possibles de F^2 .
- L'expert fait ensuite de même avec toutes les coalitions de F^3 puis de F^4 et ainsi de suite jusqu'à couvrir toutes les coalitions possibles.

Une fois ces interactions révélées, l'expert peut les présenter sous la forme :

$a_1 \rightarrow c_3$

$a_1, b_5 \rightarrow d_2$

$e_3 \rightarrow a_1, b_2$

$d_2, f_1 \rightarrow c_1, e_3$

...

Comme nous l'avons vu dans la partie III.C, par analogie, nous pouvons considérer cet ensemble d'interactions comme un ensemble de dépendances fonctionnelles et appliquer les axiomes d'Armstrong pour en chercher la couverture minimale. L'expert devra donc ici donner la couverture minimale de cet ensemble d'interactions.

Nous négligerons par la suite toute interaction n'apparaissant pas dans la couverture minimale. De cette façon, l'expert peut simplifier le problème comme vu dans la partie II.C.b.

3. Etape III : construction des bases de règles

L'étape suivante consiste à construire les bases de règles. Ces bases de règles seront le support utilisé par l'expert afin de traiter les données qu'il a observées et d'en déduire la factorisation des risques de l'ouvrage. Les bases de règles ont pour but d'agrèger les résultats de

chaque niveau de l'arbre vers le niveau supérieur, jusqu'à l'événement redouté. On part donc de la base de l'arbre, où on a identifié les critères de l'étape 1.

Cette étape est différente pour chaque ouvrage, puisque l'utilisateur doit déterminer, à partir de son expertise et des seuils identifiés lors de l'étape 1, les différentes règles d'attribution de valeur dans l'arbre des causes. Ainsi, les règles dépendent des seuils de chaque critère, des interactions des critères entre eux, et des propriétés (que nous appellerons C_2) suivantes, proposées par [Azibi & Vanderpooten, 2002] :

- La monotonie : toute partie conditionnelle D qui domine une autre partie conditionnelle D' ne peut voir sa partie décisionnelle dominée par celle du jeu D'.
- La complétude : toute partie conditionnelle doit impliquer au moins une partie décisionnelle.
- L'exclusivité : toute partie conditionnelle doit impliquer au plus une partie décisionnelle.

Pour construire les bases de règles, nous utiliserons les analogies présentées dans la partie III.B. L'expert va donc comparer tous les états et coalitions d'états de critères deux à deux, en utilisant les règles définies dans la partie III.C.b pour simplifier le nombre de comparaisons à effectuer en utilisant la couverture minimale révélée lors de l'étape II.

En utilisant toutes les combinaisons d'états de critères pour en déduire autant de règles, l'expert s'assure *de facto* le respect de la complétude. Par construction, les combinaisons résultantes des valeurs de Shapley pour chaque règle impliquent nécessairement l'exclusivité, puisque les gains d'un jeu coopératifs sont uniques. Enfin, la méthode de Young-Kemeny satisfaisant la monotonie, comme l'a démontré [Young & Levenglick, 1978], les gains des jeux coopératifs en fonction des ordres de jeu le sont aussi, par analogie. Donc les ordres de préférence et leur quantification (donc par extension la partie décisionnelle des risques) est nécessairement monotone.

Les outils présentés dans la partie III satisfont donc les propriétés C₂.

L'expert peut donc appliquer la méthode Young-Kemeny à partir des comparaisons deux à deux, puis en déduire les valeurs de Shapley de chaque état de critère. La combinaison normalisée des valeurs de Shapley de chaque état de critère pour chaque combinaison d'état de critère donne donc la partie décisionnelle des règles logiques correspondant à chaque combinaison d'états de critères.

Nous verrons dans la partie IV.A comment, en pratique, l'expert va appliquer cette méthode à travers un exemple d'application.

4. Etape IV : agrégation des avis des experts

L'étape IV consiste à agréger les avis des différents experts dans le cas où plusieurs experts travaillent sur le cas d'étude. Plusieurs méthodes d'agrégation sont envisageables.

Nous avons choisi lors de cette étude de ne considérer qu'un unique expert, mais dans la pratique, plusieurs experts pourraient utiliser cette méthodologie pour un même système. Le choix de la méthode permettant d'agréger leurs avis est pour l'instant laissé au décideur, mais il est envisageable de proposer une étude ultérieure comparant les méthodes existantes, voire proposant de nouvelles méthodes d'agrégation. Nous discuterons davantage de ces perspectives dans la partie V.B.a.

5. Etape V : validation des bases de règles

L'étape V consiste à proposer une méthode de validation empirique du système complet {arbre des causes + bases de règles} par les experts,

afin de vérifier que le système rend bien compte de leur avis. Si le résultat de la validation est négatif, l'expert devra vérifier qu'il a correctement répondu à toutes les questions de l'étape III, et recommencera les étapes III et IV jusqu'à passer favorablement l'étape V.

6. Etape VI : obtention des résultats

Les bases de règles sont à présent construites, et validées. L'expert peut donc utiliser les bases de règles pour remonter l'arbre des causes. Il donne les états des critères qu'il observe tout en bas de l'arbre. Les bases de règles permettent automatiquement d'agréger chaque niveau afin de donner des résultats pour chaque item de l'arbre.

Les bases de règles pourront évoluer en fonction de l'état des connaissances. Par exemple, de nouvelles interactions peuvent être découvertes, ou les connaissances sur les mécanismes liés au vieillissement du système peuvent mettre en lumière des états de critères non envisagés jusqu'alors. Les règles peuvent être modifiées en conséquence et les bases tenues à jour. Aussi longtemps que l'état des connaissances ne change pas, les bases de règles peuvent être conservées pour chaque système et réutilisées régulièrement, les valeurs d'entrée étant modifiées en conséquence. En outre, contrairement aux études de danger actuelles (voir II.C.d), cette méthode considère tous les critères, et ne nécessite aucune approximation ou simplification du système.

Il est parfaitement envisageable de programmer la méthode de sorte que l'expert ne rentre que les critères, leurs états, leurs interactions, et les comparaisons deux à deux. Le programme déduit ensuite tout seul toutes les bases de données, et l'expert n'a plus qu'à entrer les états de critères initiaux pour déclencher le calcul.

Un logigramme complet reprenant tous les aspects de la méthode se trouve en annexe 18.

IV] Cas d'application : exemple du barrage de Serre-Ponçon

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les outils ainsi qu'une méthodologie générale en vue du traitement des risques pour un système, en particulier un ouvrage de génie civil. Afin de montrer son application et d'illustrer le travail effectué, nous appliquerons ces outils et cette méthodologie à un exemple concret, celui du barrage de Serre-Ponçon.

Nous verrons ensuite à partir des résultats de cet exemple les apports de la méthode par rapport aux pratiques en cours dans le génie civil.

A. Exemple d'application : le barrage de Serre-Ponçon

Le barrage de Serre-Ponçon a été mis en eau en 1961. Il se situe sur deux communes, Rousset et La Bréole, et deux départements, les Hautes-Alpes et les Alpes de Haute-Provence. Il se situe dans le lit majeur de la Durance et a pour but de régulariser le cours de la rivière, tant pour fournir une réserve d'eau aux agriculteurs, que pour prévenir les crues excessives et fournir de l'électricité. La retenue résultante du barrage est la deuxième retenue la plus importante d'Europe en capacité, pour un total de 1270 hm³.



Le barrage de Serre-Ponçon est un barrage en remblais à noyau étanche de 123,50m de haut. La crête a une épaisseur de 9,95m, l'épaisseur maximale (à la base du barrage) est de 650m et le couronnement est de 600m.

Les particularités de ce barrage sont la présence d'une fondation alluvionnaire au droit du lit majeur de la Durance et la présence de l'éperon rocheux du Serre-de-Monge en rive gauche. L'étanchéité en fondation est assurée d'une part, par la coupure étanche alluviale et d'autre part, par le voile d'injection du rocher en fondation.

EDF fournit en outre les caractéristiques suivantes pour le barrage :

« **L'évacuateur de crues de surface (EVC)**, implanté en rive gauche, est constitué par deux vannes segment débitant dans une galerie souterraine unique terminée en aval par une cuillère de dissipation d'énergie. La capacité totale d'évacuation des deux vannes est de 1 900 m³/s sous la cote de Retenue Normale (RN à 780 m NGF) et

2 300 m³/s sous la cote des Plus Hautes Eaux (PHE à 783 m NGF). La commande des vannes s'effectue en local depuis la chambre de manoeuvre sur le couronnement du barrage ou à distance depuis la salle de commande.

La **prise d'eau** du barrage de Serre-Ponçon remplit une fonction duale : une fonction de production (prise d'eau des groupes de l'usine) et une fonction de sécurité (vidange de fond). L'ouvrage de prise d'eau est aménagé dans les deux anciennes galeries de dérivation provisoire en rive gauche et est constitué de :

- deux vannes de tête ou de prise d'eau, ouvertes en exploitation normale,
- deux galeries d'amenée sur lesquelles ont été réalisés les quatre piquages de raccordement avec les conduites forcées (2 conduites forcées par galerie).

La commande des vannes s'effectue en local depuis la plateforme, à distance depuis la salle de commande ou en automatique sur protection usine (notamment fermeture des deux vannes sur inondation usine).

L'ouvrage de **vidange de fond**, concourant également à l'évacuation des crues, implanté en rive gauche, est aménagé dans les deux anciennes galeries de dérivation provisoire qui ont servi lors de la construction du barrage. L'ouvrage de vidange de fond comprend :

- deux vannes en série, implantées dans la galerie de dérivation provisoire : une vanne de garde, ouverte en exploitation normale et une vanne de réglage du débit, fermée en exploitation normale (ces deux vannes étant en cours de rénovation au moment de la réalisation de l'EDD).
- Deux galeries de vidange de fond, dans le prolongement des deux galeries d'amenée.

L'ouvrage de vidange de fond peut évacuer un débit total de 1 200 m³/s à RN. La commande des vannes s'effectue en local depuis deux chambres de manoeuvre souterraines.

La capacité totale d'évacuation du barrage de Serre-Ponçon (l'évacuateur de crues de surface et le système de vidange de fond) est de 3 500 m³/s à PHE. Elle permet donc d'évacuer la crue décennale (débit de pointe estimé de 4 530 m³/s) en utilisant la capacité de laminage de la retenue au-dessus de la cote RN.

Le niveau de la retenue de Serre-Ponçon est surveillé par des capteurs de mesure qui renvoient la cote de la retenue en permanence en salle de commande usine ; le dispositif de surveillance du niveau comporte aussi des détecteurs générant des alarmes.

L'alimentation en énergie électrique comprend une alimentation normale et une alimentation de secours. »

Le barrage de Serre-Ponçon étant un barrage en remblais, nous utiliserons les arbres de causes développés par EDF pour cette famille de barrage. Ces arbres de causes sont en annexe (annexes 1 à 14). L'arbre des causes pour les barrages en remblais comporte 5 fonctions (cases en jaune dans l'annexe 1) : étanchéité, protection de la surverse, filtration, protection mécanique et résistance mécanique. Dans ce cas d'application, nous traiterons en détail la fonction « protection de la surverse », et présenterons simplement les résultats pour les autres fonctions. En effet, le travail à effectuer étant le même, nous avons fait le choix de ne développer que celui qui est le plus représentatif et le plus complet.

Le présent cas d'étude a pour vocation d'illustrer par un exemple concret l'application de la méthode proposée. Bien que reposant sur des spécifications réelles, les valeurs exprimées dans cette partie ne sont pas issues d'un processus d'expertise. En effet, il ne s'agit pas ici de faire une étude de dangers complète, mais simplement de montrer l'utilisation des outils présentés précédemment en vue de l'obtention de résultats. Néanmoins, nous présenterons dans cette partie toute la méthodologie qui permet d'obtenir, à partir des spécifications d'un

ouvrage, des résultats qui seraient issus d'un processus d'expertise. Lorsque nous parlerons « d'expert », nous considèrerons qu'il s'agit d'un expert fictif qui aurait exprimé le jugement exposé tout au long de la méthodologie.

a. Travail préliminaire sur les critères

Les critères sont les éléments de base des arbres de causes. On les trouve tout en bas de l'arbre, au dernier niveau des développements de l'arbre. Dans notre exemple, ils sont listés dans les annexes 2 à 14, et répertoriés par grandes familles phénoménologiques (agresseurs externes, pathologie – ou vieillissement –, sollicitations excessives, etc.).

Le premier travail de l'expert, une fois l'arbre des causes correspondant identifié (ici, l'arbre des causes pour les barrages en remblais), est de répertorier les critères qui sont pertinents pour l'ouvrage étudié. Ici, compte tenu des informations à disposition sur le barrage de Serre-Ponçon, on relève les critères suivants (listes non hiérarchisées) :

Fonction résistance mécanique :

- Poussée des sédiments
- Poussée des glaces
- Dégradation des caractéristiques de résistance
- Discontinuités rocheuses
- Tassement de la fondation
- Lessivage des matériaux
- Fuites trop importantes
- Transport de matériaux dans les fuites
- Pressions interstitielles
- Séisme

Fonction protection mécanique :

- Vague/batillage sur parement amont
- Gel-dégel sur des matériaux de protection
- Importants volumes de matériaux charriés
- Matériaux de charriage abrasifs
- Ecoulements dans le corps du barrage débouchant sur le talus aval
- Dégradation des perrés de protection
- Dégradation des matériaux de protection
- Vieillissement des matériaux de protection
- Erosion par blocs rocheux
- Dégradation de la structure de génie civil du bassin
- Déplacements de blocs de protection
- Dégradation de la revanche
- Crue excessive

Fonction étanchéité :

- Ouverture de diaclase
- Lessivage du voile ou du collage d'injection
- Cheminements sableux
- Vieillessement des matériaux étanchéité
- Tassements différentiels
- Déformation de la fondation
- Chocs de corps de la retenue
- Gel
- Végétation
- Animaux fouisseurs
- Feu accidentel sur géomembranes
- Pollution chimique agressive sur géomembranes
- Fissuration du revêtement d'étanchéité
- Lessivage des ciments de l'étanchéité
- Remontée de fontis
- Gonflement de limons
- Dessiccation/retrait
- Gonflement du masque en béton
- Fatigue du matériau suite à une sollicitation mécanique excessive
- Fortes pressions interstitielles

Fonction filtration :

- Animaux fouisseurs
- Végétation
- Agressions chimiques sur filtre en géotextile
- Colmatage par particules fines
- Cisaillement des filtres granulaires
- Pollution des filtres

Fonction protection de la surverse :

- Point bas du couronnement
- Vents qui provoquent des vagues
- Perte de revanche par tassements excessifs
- Maintenance et dysfonctionnement des organes de décharge de sécurité
- Déformation suite à sollicitation excessive
- Vanne/pertuis indisponible pour travaux
- Gel empêchant l'ouverture des vannes
- Bouchage de la crépine d'admission
- Obstruction de corps flottants
- Envasement
- Indisponibilité de l'évacuateur de crues de surface (EVC)
- Instabilité de la structure de génie civil
- Obstruction du canal EVC
- Crue supérieure à la crue de dimensionnement
- Glissement d'un versant dans la retenue
- Séisme

Tableau 8 : liste des critères avant agrégation

Pour la fonction « protection de la surverse », plusieurs familles de critères peuvent être formées :

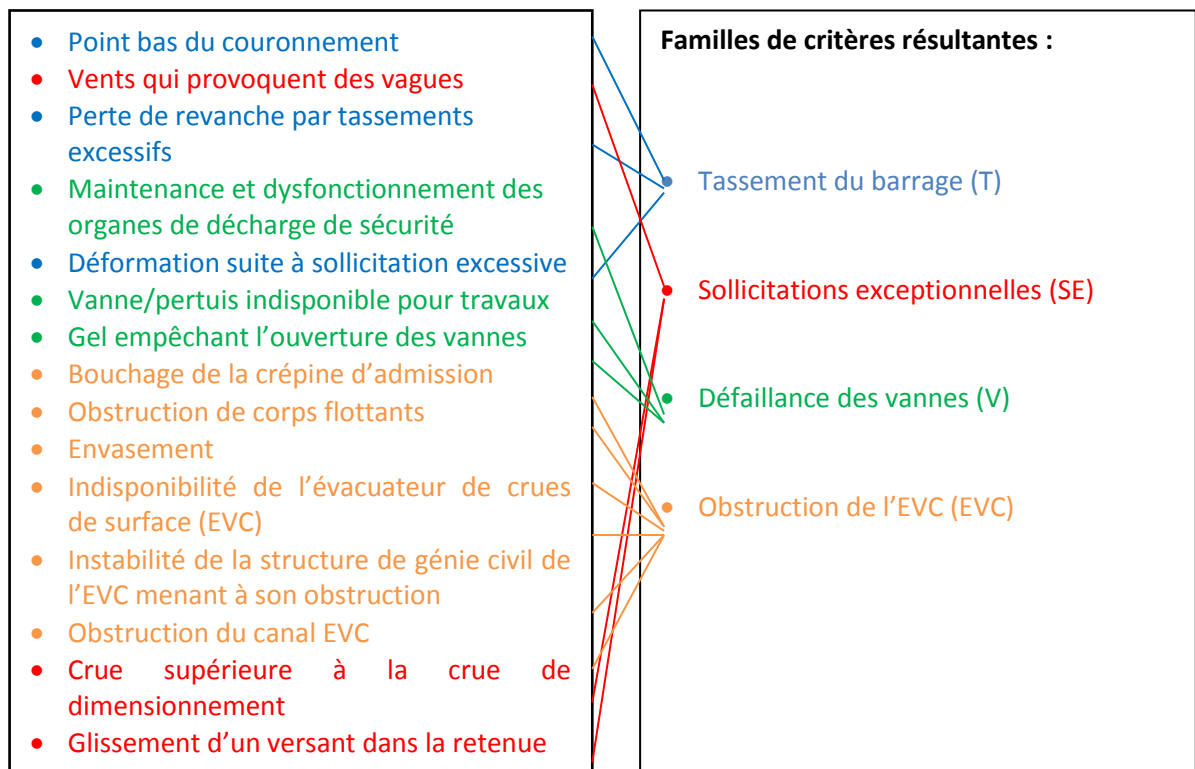


Tableau 9 : agrégation des critères en familles

Une fois ces familles de critères obtenues, l'expert va en chercher les états. Pour rappel, un état de critère est un ensemble de valeurs que peut atteindre le critère, qui ont un impact équivalent sur la partie décisionnelle d'une règle logique. Pour chaque critère, nous choisissons la convention suivante : les états proposés par l'expert doivent être donnés par ordre croissant du risque impliqué.

Pour la fonction « protection de la surverse », il nous reste quatre critères, pour lesquels l'expert relève :

- Tassement du barrage : il est négligeable (T_0) si le tassement ne nécessite qu'une surveillance de routine ; il est important (T_1) lorsqu'il nécessite un entretien ; il est excessif (T_2) lorsqu'il est tel qu'un débordement de la retenue est prévisible.

- Sollicitations exceptionnelles : elles sont nulles (SE_0) si la probabilité qu'un événement exceptionnel (géologique, météorologique etc.) se produise est négligeable sur la période d'étude ; elles sont préoccupantes (SE_1) si un événement exceptionnel est possible sur la période d'étude.
- Défaillance des vannes : il existe deux vannes pour le barrage de Serre-Ponçon. On distingue donc trois états, correspondant à la défaillance d'aucune vanne (V_0), d'une vanne (V_1) ou des deux vannes (V_2).
- Obstruction de l'EVC : l'obstruction de l'évacuateur est nulle (EVC_0) si le débit de sortie de l'évacuateur correspond au débit de conception ; elle est faible (EVC_1) si l'obstruction mène à une légère baisse du débit sans qu'une maintenance ne soit nécessaire ; elle est forte (EVC_2) si la perte de débit est telle qu'une maintenance doit être planifiée ; elle est excessive (EVC_3) si l'EVC ne peut plus remplir sa fonction.

De la même façon, pour les autres fonctions, on obtient :

Fonction étanchéité :

Dégradation des matériaux d'étanchéité : E_0 , E_1 et E_2

Agressions extérieures : A_0 et A_1

Vieillessement de la structure GC : VS_0 , VS_1 , VS_2 et VS_3

Fonction filtration :

Agresseurs naturels : AN_0 et AN_1

Pollution : P_0 , P_1 et P_2

Contraintes mécaniques : CM_0 , CM_1 et CM_2

Fonction protection mécanique :

Vieillessement propre au GC : VGC_0 , VGC_1 , VGC_2 et VGC_3

Vieillessement dû aux agressions chroniques : VAC_0 , VAC_1 et VAC_2

Fonction résistance mécanique :

Dégradations environnementales : DE_0 , DE_1 et DE_2

Perte de caractéristiques mécaniques : PCM_0 , PCM_1 , PCM_2 et PCM_3

Fuites : F_0 et F_1

Les critères sont à présent identifiés, factorisés, et les états de critères mis en lumière, ce qui correspond à l'étape I présentée dans la partie III.D. La prochaine étape pour l'expert consistera ensuite à chercher les interactions entre ces états de critères au sein d'une même fonction.

b. Recherche des interdépendances et de leur couverture minimale

L'expert passe alors à l'étape II telle que définie dans la partie III.D. Pour chaque fonction de l'arbre des causes, il va chercher les interdépendances entre les états de critères. Pour cela, il va procéder en cherchant d'abord les interactions possibles entre les critères, puis détaille les critères concernés en états de critères. Il répète ensuite l'opération pour toutes les coalitions de critères possibles, jusqu'à balayer tous les critères de chaque fonction. Les interactions ainsi listées forment des ensembles de dépendances fonctionnelles, dont il pourra chercher la couverture minimale.

Ici, comme précédemment, nous prendrons l'exemple de la fonction « protection de la surverse » en reprenant les familles de critères et leurs états tels que mis en évidence dans l'étape I.

Fonction protection de la surverse :

On commence par choisir un critère parmi les quatre, par exemple le tassement (T), puis on le compare aux autres critères pour chercher les interactions.

Le tassement peut permettre à certaines sollicitations exceptionnelles (SE) d'avoir un effet qui aurait été mineur autrement, comme par exemple un vent fort entraînant des vagues importantes, débordant au-dessus de la crête trop tassée. Il y a un effet de majoration.

Donc $T \rightarrow SE$

Nous cherchons ensuite en particulier les états de critères concernés. Cette interaction n'ayant lieu que lorsque les sollicitations sont avérées, seul l'état de critère SE_1 est concerné. L'expert relève que les sollicitations exceptionnelles ne peuvent avoir un effet de majoration sur le tassement si ce dernier est négligeable à cet instant. Néanmoins, si le tassement est suffisant pour atteindre l'état T_1 et au-delà, l'interaction est avérée.

D'où : $T_1 \rightarrow SE_1$ et $T_2 \rightarrow SE_1$

De la même façon, certaines sollicitations exceptionnelles peuvent augmenter l'effet du tassement sur le risque de la fonction protection de la surverse, par exemple en participant à l'affaissement de la crête ou au charriage de matériaux par débordement.

D'où : $SE \rightarrow T$

Compte tenu du dimensionnement du barrage, l'expert relève que cet effet n'est avéré que lorsqu'il y a effectivement des sollicitations exceptionnelles et lorsque le tassement est déjà critique.

Donc $SE_1 \rightarrow T_2$

L'expert compare ensuite le tassement à la défaillance des vannes (V). En cas de tassement critique, les vannes permettent l'évacuation d'urgence d'une partie de la retenue afin d'éviter le débordement. Cela signifie qu'en cas de tassement extrême, la défaillance des vannes va augmenter le risque de la fonction protection de la surverse. Tandis que si les vannes fonctionnent correctement, elles vont le diminuer.

D'où : $V_0 \rightarrow T_2$, $V_1 \rightarrow T_2$ et $V_2 \rightarrow T_2$

Compte tenu de la conception des vannes, la défaillance de celles-ci n'est néanmoins pas affectée par le tassement.

L'EVC permet d'évacuer les volumes exceptionnels d'eau, mais peut également servir à soulager le barrage si le barrage est trop important, en attendant par exemple une maintenance. Son comportement est identique à celui des vannes qui régulent son admission, à la différence que s'il est légèrement obstrué, il permet au mieux de ne pas amplifier le risque inhérent au tassement, sans néanmoins le diminuer.

D'où : $EVC_0 \rightarrow T_2$, $EVC_2 \rightarrow T_2$ et $EVC_3 \rightarrow T_2$

L'expert considère ensuite le critère « sollicitations exceptionnelles » (SE). Il note que la défaillance d'au moins une vanne peut considérablement augmenter le risque en cas de crues exceptionnelles, au même titre que si l'EVC est obstrué. Ces crues étant prévues dans le dimensionnement du barrage, le bon fonctionnement des vannes et de l'EVC ne diminuera pas le risque des SE puisque celui-ci prend déjà en compte leur fonctionnement.

D'où : $V_1 \rightarrow SE_1$, $V_2 \rightarrow SE_1$, $EVC_1 \rightarrow SE_1$, $EVC_2 \rightarrow SE_2$ et $EVC_3 \rightarrow SE_3$

Enfin, l'expert compare la défaillance des vannes et l'obstruction de l'EVC. L'obstruction de l'EVC peut être due à des corps étrangers portés par le courant. Si une vanne est défaillante, ces corps vont être entraînés vers le pertuis de la seconde vanne et s'y accumuler, augmentant le risque lié à l'obstruction de l'EVC.

D'où $V_1 \rightarrow EVC_2$, EVC_3

A présent, l'expert va faire le même travail à partir des coalitions possibles. Il s'agit en pratique de déterminer si la conjonction de plusieurs critères peut interagir avec d'autres critères. L'expert relève que le risque lié à la coalition formée par T et SE est indépendant du risque lié à la défaillance des vannes ou à l'obstruction de l'EVC. En revanche, les coalitions formées par T et V d'une part, et T et EVC d'autre part, vont avoir un effet de majoration important sur SE.

En particulier : $T_2, V_2 \rightarrow SE_1$, $T_2, EVC_2 \rightarrow SE_1$ et $T_2, EVC_3 \rightarrow SE_1$

L'expert relève également que la coalition formée par EVC et V ont un impact sur SE dans le cas où les EVC sont partiellement obstruées et une vanne est défaillante.

D'où : $EVC_1, V_1 \rightarrow SE_1$ et $EVC_2, V_1 \rightarrow SE_1$

L'expert relève qu'aucune autre coalition n'a d'interaction avec d'autres critères. L'ensemble des dépendances fonctionnelles pour la fonction « protection de la surverse » revient donc à :

$T_1 \rightarrow SE_1$
 $T_2 \rightarrow SE_1$
 $SE_1 \rightarrow T_2$
 $V_0 \rightarrow T_2$
 $V_1 \rightarrow T_2$
 $V_2 \rightarrow T_2$
 $EVC_0 \rightarrow T_2$
 $EVC_2 \rightarrow T_2$
 $EVC_3 \rightarrow T_2$
 $V_1 \rightarrow SE_1$
 $V_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_1 \rightarrow SE_1$
 $EVC_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_3 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow EVC_2, EVC_3$
 $T_2, V_2 \rightarrow SE_1$ (1)
 $T_2, EVC_2 \rightarrow SE_1$ (2)
 $T_2, EVC_3 \rightarrow SE_1$ (3)
 $EVC_1, V_1 \rightarrow SE_1$ (4)
 $EVC_2, V_1 \rightarrow SE_1$ (5)

L'expert va à présent chercher la couverture minimale de cet ensemble. Il procède en trois étapes, conformément à ce que nous avons vu dans la partie III.C.b.

Décomposant la partie de droite des dépendances, seule $V_1 \rightarrow EVC_2, EVC_3$ est concernée et devient :

$V_1 \rightarrow EVC_2$
 $V_1 \rightarrow EVC_3$

Décomposant la partie gauche, les cinq dernières sont concernées et :

- (1) devient $T_2 \rightarrow SE_1$ et $V_2 \rightarrow SE_1$
- (2) devient $T_2 \rightarrow SE_1$ et $EVC_2 \rightarrow SE_1$
- (3) devient $T_2 \rightarrow SE_1$ et $EVC_3 \rightarrow SE_1$
- (4) devient $EVC_1 \rightarrow SE_1$ et $V_1 \rightarrow SE_1$
- (5) devient $EVC_2 \rightarrow SE_1$ et $V_1 \rightarrow SE_1$

On supprime ensuite toutes les redondances, il reste :

- $T_1 \rightarrow SE_1$
- $T_2 \rightarrow SE_1$
- $SE_1 \rightarrow T_2$
- $V_0 \rightarrow T_2$
- $V_1 \rightarrow T_2$
- $V_2 \rightarrow T_2$
- $EVC_0 \rightarrow T_2$
- $EVC_2 \rightarrow T_2$
- $EVC_3 \rightarrow T_2$
- $V_1 \rightarrow SE_1$
- $V_2 \rightarrow SE_1$
- $EVC_1 \rightarrow SE_1$
- $EVC_2 \rightarrow SE_1$
- $EVC_3 \rightarrow SE_1$
- $V_1 \rightarrow EVC_2$
- $V_1 \rightarrow EVC_3$

Par transitivité, puisque $T_2 \rightarrow SE_1$, toutes les dépendances vers T_2 mènent vers SE_1 . D'où :

- $T_1 \rightarrow SE_1$
- $T_2 \rightarrow SE_1$
- $SE_1 \rightarrow T_2$
- $V_0 \rightarrow SE_1$
- $V_1 \rightarrow SE_1$
- $V_2 \rightarrow SE_1$
- $EVC_0 \rightarrow SE_1$
- $EVC_2 \rightarrow SE_1$
- $EVC_3 \rightarrow SE_1$
- $V_1 \rightarrow SE_1$
- $V_2 \rightarrow SE_1$
- $EVC_1 \rightarrow SE_1$
- $EVC_2 \rightarrow SE_1$

$EVC_3 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow EVC_2$
 $V_1 \rightarrow EVC_3$

De la même façon, par transitivité, les deux dernières dépendances mènent vers SE_1 .

D'où :

$T_1 \rightarrow SE_1$
 $T_2 \rightarrow SE_1$
 $SE_1 \rightarrow T_2$
 $V_0 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow SE_1$
 $V_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_0 \rightarrow SE_1$
 $EVC_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_3 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow SE_1$
 $V_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_1 \rightarrow SE_1$
 $EVC_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_3 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow SE_1$

On supprime les nouvelles redondances :

$T_1 \rightarrow SE_1$
 $T_2 \leftrightarrow SE_1$
 $V_0 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow SE_1$
 $V_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_0 \rightarrow SE_1$
 $EVC_1 \rightarrow SE_1$
 $EVC_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_3 \rightarrow SE_1$

Ce qui constitue la couverture minimale des dépendances fonctionnelles.

On observe qu'à l'exception de T_0 , les interactions reviennent à dire que le risque inhérent à tous les états de critères augmente le risque en cas de sollicitations exceptionnelles, et que ces dernières augmentent

celui d'un tassement critique. Pour la suite de l'étude, nous considérerons que toutes les interactions n'apparaissant pas dans cette couverture minimale sont négligées.

L'expert suit la même méthodologie pour chercher les couvertures minimales des dépendances fonctionnelles pour les autres fonctions du système. Il obtient :

Fonction étanchéité :

$A_1 \rightarrow E_1$
 $A_1 \leftrightarrow VS_3$
 $E_2 \rightarrow VS_2$
 $E_2 \rightarrow VS_3$

Fonction filtration :

$AN_1 \leftrightarrow CM_2$
 $CM_1 \rightarrow AN_1$
 $P_1 \rightarrow AN_1$
 $P_2 \rightarrow AN_1$

Fonction protection mécanique :

$VAC_2 \rightarrow VGC_2$
 $VAC_2 \rightarrow VGC_3$

Fonction résistance mécanique :

$F_1 \rightarrow PCM_2$
 $F_1 \rightarrow PCM_3$

Ces couvertures minimales vont permettre de réduire le nombre d'opérations à effectuer lors des étapes suivantes. En effet, toute interaction ne figurant pas dans la couverture minimale est considérée négligeable et les critères indépendants. Dans cette situation, la comparaison de deux critères ne changera pas si on modifie l'état d'un critère indépendant de chacun des deux critères comparés. Par exemple, si on fixe un critère A pour comparer deux critères X et Y, les

comparaisons seront les mêmes qu'on fixe A_0 , A_1 , etc., ou A_n . Si au moins un des critères fixés est interdépendants avec au moins un des deux critères comparés, on peut utiliser les règles définies au III.C.b.

c. Comparaison des états de critères

Les bases de règles apparaissent à chaque nœud de l'arbre des causes et permet de factoriser les risques d'un niveau à l'autre de l'arbre, en partant de la base et en remontant vers l'événement redouté. A chaque nœud, on doit donc former une base de règles. La première factorisation se fait pour les items « fonction » de l'arbre des causes (cases jaunes sur l'arbre de l'annexe 1). Pour chaque fonction, nous obtiendront donc une base de données. Ces bases de données sont construites indépendamment les unes des autres. Il est possible que des interactions apparaissent entre différentes parties de l'arbre. Ces interactions seront traitées lors des agrégations de niveau supérieur. Les seules interactions considérées lors de la construction des bases de règles sont celles qui ont lieu entre les critères à l'intérieur d'une même base, et ces interactions ont été réduites par recherche de couverture minimale comme nous l'avons vu dans la partie précédente.

L'expert va ici appliquer les outils développés dans la partie III.B.c. Il va donc comparer tous les états de critères deux à deux. Le nombre de comparaisons à effectuer est réduit grâce aux règles de simplification introduites en cas d'indépendance des critères (voir encadré précédent).

De nouveau, nous développerons plus particulièrement l'exemple de la fonction « protection de la surverse », et donnerons simplement les résultats pour les autres fonctions.

Les comparaisons deux à deux des critères se font compte tenu de l'état des autres critères. Autrement dit, pour chaque tableau de comparaison, nous fixerons une des combinaisons des états des autres critères, et nous referons le tableau pour toutes les combinaisons possibles.

Compte tenu de la couverture minimale des interactions des états de critères pour la fonction « protection de la surverse », tous les autres états de critères étant indépendants par ailleurs, nous en déduisons que toutes les coalitions comportant SE_0 (donc excluant SE_1) ont un impact identique sur les comparaisons deux à deux de toute paire de critères ne comportant pas SE . En conséquence, une seule comparaison est nécessaire pour ces états de critères.

Comme vu dans la partie III.B., afin d'obtenir une règle logique, nous avons besoin de deux informations : une valeur remarquable, et une amplitude. Dans un premier temps, nous allons chercher la valeur remarquable, que nous choisissons être le milieu du segment.

Pour comparer les états des critères de deux critères X et Y, la question posée à l'expert est la suivante : « à partir de quel état le critère X influe-t-il plus sur le risque de la fonction que Y si Y prend la valeur y_0 ? ». Cette question est répétée pour tous les états de Y, puis la question est inversée pour tous les états de X.

En effet, par construction, les états de critères sont donnés dans l'ordre croissant du risque impliqué. S'il existe un état du critère X qui domine y_0 en termes de risque impliqué, alors tout état dont l'indice est supérieur domine nécessairement y_0 . Les réponses « aucun » ou « je l'ignore » sont des réponses acceptables. Les réponses de l'expert sont consignées dans un tableau tel que suit :

	y_0	...	y_n
x_0	-	...	=
...
x_m	+	...	+

Tableau 10 : exemple de comparaisons par paires de critères

Le tableau se lit comme suit :

« y_0 a une plus forte influence sur le risque global de la fonction que x_0 » (si la valeur en abscisse a une plus forte influence, on rentre « - »).

« x_m a une plus forte influence sur le risque global de la fonction que y_n » (si la valeur en ordonnée a une plus forte influence, on rentre « + »).

« On ignore lequel, entre x_0 ou y_n , a une plus forte influence l'un sur l'autre » ou « les influences de x_0 et y_n sont équivalentes » (si on ignore ou s'il y a équivalence, on entre « = »).

Compte tenu de la question posée à l'expert, le tableau se remplira de cette façon :

	y_0	y_1	y_2	...	y_n
x_0	+	+	=	...	-
x_1	+	+	-	...	-
x_2	+	+	-	...	-
...
x_m	+	+	+	...	=

Tableau 11 : méthode de remplissage des comparaisons par paires

Dans le tableau ci-dessus, l'expert a répondu ainsi :

« A partir de quel état le critère X influe-t-il plus sur le risque de la fonction que Y si Y prend la valeur y_0 ? » : x_0 (flèche vert clair)

« A partir de quel état le critère X influe-t-il plus sur le risque de la fonction que Y si Y prend la valeur y_1 ? » : x_0 (flèche vert pomme)

« A partir de quel état le critère X influe-t-il plus sur le risque de la fonction que Y si Y prend la valeur y_2 ? » : x_i où $1 < i < m$ (flèche vert foncé)

...

« A partir de quel état le critère X influe-t-il plus sur le risque de la fonction que Y si Y prend la valeur y_n ? » : aucun

« A partir de quel état le critère Y influe-t-il plus sur le risque de la fonction que X si X prend la valeur x_0 ? » : y_j où $1 < j < n$ (flèche jaune)

« A partir de quel état le critère Y influe-t-il plus sur le risque de la fonction que X si X prend la valeur x_1 ? » : y_2 (flèche orange)

« A partir de quel état le critère Y influe-t-il plus sur le risque de la fonction que X si X prend la valeur x_0 ? » : y_2 (flèche rouge)

...

« A partir de quel état le critère Y influe-t-il plus sur le risque de la fonction que X si X prend la valeur x_m ? » : ignore

Dans le tableau ci-dessus, les cases par lesquelles une flèche passe se voient attribuées « + » ou « - » selon la réponse. Toutes les cases traversées par aucune flèche se voient attribuées « = ». Aucune case ne peut être traversée à la fois par une flèche horizontale et une flèche verticale, cela signifierait que le principe de dominance est violé.

Pour chaque tableau, on suppose un état fixe pour tous les autres critères. Les résultats étant potentiellement différents selon les états fixés par ailleurs, il est nécessaire de proposer un tableau par combinaison des états de critères. Le nombre de tableaux à effectuer est réduit grâce au travail précédent de recherche de la couverture minimale. En effet,

nous considérerons que les relations d'interdépendances n'apparaissant pas dans la couverture minimale sont négligeables. Ainsi, un seul tableau est nécessaire pour comparer deux critères pour toutes les combinaisons d'états de critères indépendants de chacun des deux critères comparés.

Si certains critères fixés sont interdépendants avec au moins un des deux critères comparés, on peut utiliser les règles définies au III.C.b et qui sont, pour rappel :

Notons :

a et b deux états de deux critères indépendants A et B d'une base de règles.

X et Y deux critères différents de A et B tels que A et B sont chacun interdépendants avec au moins l'un d'eux.

X_i et Y_j les états de critères i et j respectivement de X et Y (indépendants ou non).

$X_i > Y_j$ la relation « X_i a une plus forte influence que Y_j ».

R une relation liant deux états de critères (on notera aRb une relation entre a et b).

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors $\forall aRb$, ab étant fixe, $X_i > X_j$

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, si $a > b$, ab étant fixe, $X_i > X_j$

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, si $a \sim b$, ab étant fixe, $X_i \sim X_j$

Si, a étant fixe, $X_i > Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, si $a < b$, ab étant fixe, $X_i < X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors, si $a > b$, ab étant fixe, $X_i < X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors, si $a \sim b$, ab étant fixe, $X_i \sim X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i > Y_j$, Alors, si $a < b$, ab étant fixe, $X_i > X_j$

Si, a étant fixe, $X_i < Y_j$, et si b étant fixe, $X_i < Y_j$, Alors, $\forall aRb$, ab étant fixe, $X_i < X_j$

En pratique, ces règles s'utilisent pour éviter les redondances par transitivité. Ainsi, si parmi les états de critères fixés pour comparer une paire de critères, il en existe au moins deux, indépendants entre eux, mais interdépendants avec les critères comparés, il suffit de comparer les critères pour un seul état fixé (et toutes les coalitions comprenant cet état) de chaque critère interdépendant, pour en déduire les comparaisons pour toutes les combinaisons possibles.

Si, dans la coalition d'états de critères, un seul critère est interdépendant avec au moins un des critères comparés, il faut comparer la paire pour tous les états fixés de ce critère.

Reprenons l'exemple de la fonction « protection de la surverse ». La couverture minimale obtenue lors de l'étape précédente est :

$T_1 \rightarrow SE_1$
 $T_2 \leftrightarrow SE_1$
 $V_0 \rightarrow SE_1$
 $V_1 \rightarrow SE_1$
 $V_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_0 \rightarrow SE_1$
 $EVC_1 \rightarrow SE_1$
 $EVC_2 \rightarrow SE_1$
 $EVC_3 \rightarrow SE_1$

On en déduit ici que la comparaison de deux des critères (sauf SE) de la fonction donnera toujours le même résultat pour toutes les coalitions ne contenant pas SE₁. Lorsque SE₁ fera partie des états de critères fixés dans la coalition, le résultat sera différent que si SE₀ était fixé, du fait des interdépendances. Puisque SE₁ est le seul état de critère pouvant interagir avec les autres, toutes les coalitions contenant SE₁ donneront les mêmes résultats. Lorsque SE fera partie de la paire de critères à comparer, nous nous situerons dans le cas où le nombre d'opérations est réduit par les règles rappelées dans l'encadré ci-dessus.

Au final, pour chaque paire excluant SE, nous devons donc dresser deux tableaux de comparaisons (un pour les coalitions contenant SE₀ et un pour les coalitions contenant SE₁). On peut fixer trois critères différents

en plus de SE_0 et SE_1 (T, V ou EVC), donc en tout nous aurons 6 tableaux pour les comparaisons où SE est fixé (comparaison de paires excluant SE). En vertu des règles ci-dessus, nous n'avons besoin de connaître les comparaisons de chaque paire que pour les coalitions où chaque état apparaît une fois. Nous avons trois autres critères que SE, dont deux ont trois états, et un a quatre états. Il y a trois coalitions possibles de critères, dont deux avec un critère à quatre états, et une avec deux critères à trois états. Soit $4 \times 2 + 3 = 11$ tableaux. Nous avons donc besoin en tout de 17 tableaux.

La liste des questions posées à l'expert pour la fonction « protection de la surverse » est donnée en annexe 15. Voici les tableaux qui découlent des réponses :

En fixant SE_0 et T :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et T :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_0 et V :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	-	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et V :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	+	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant SE_0 et EVC :

	T ₀	T ₁	T ₂
V ₀	=	-	-
V ₁	+	+	-
V ₂	+	+	-

En fixant SE_1 et EVC :

	T ₀	T ₁	T ₂
V ₀	-	-	-
V ₁	+	-	-
V ₂	+	+	=

En fixant T_0 et V_0 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
SE ₀	-	-	-	-
SE ₁	+	+	+	-

En fixant T_1 et V_1 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
SE ₀	-	-	-	-
SE ₁	+	+	+	-

En fixant T_2 et V_2 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
SE ₀	-	-	-	-
SE ₁	+	+	-	-

En fixant T_0 et EVC₀ :

	V ₀	V ₁	V ₂
SE ₀	+	-	-
SE ₁	+	+	+

En fixant T_1 et EVC₁ :

	V ₀	V ₁	V ₂
SE ₀	+	-	-
SE ₁	+	+	-

En fixant T_2 et EVC₂ :

	V ₀	V ₁	V ₂
SE ₀	+	-	-
SE ₁	+	-	-

En fixant T_0 et EVC₃ :

	V ₀	V ₁	V ₂
SE ₀	+	-	-
SE ₁	+	+	-

En fixant V_0 et EVC₀ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	+	-

En fixant V_1 et EVC₁ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	-	-

En fixant V_2 et EVC₂ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	-	-

En fixant V_0 et EVC₃ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	+	-

Tableau 12 : comparaisons par paires des critères de la fonction « protection de la surverse »

Les tableaux de vote pour les autres fonctions sont donnés en annexe 17.

Nous pouvons désormais, à l'aide de ces tableaux, calculer les scores de Kemeny. Pour cela, nous considérerons que chaque critère est à la fois un votant et un candidat. Nous calculerons le score de Kemeny pour les critères, et non pour les états de critères. Nous additionnerons donc les résultats de tous les états d'un même critère pour obtenir le score de Kemeny d'un critère.

Les simplifications permises par le travail antérieur de recherche des interdépendances et de leur couverture minimale nous a permis de réduire le nombre de tableaux à remplir par l'expert en supprimant les redondances. Ces redondances, même si elles n'apparaissent plus, doivent tout de même être considérées dans le calcul du score de Kemeny. Cette prise en compte peut se faire simplement en multipliant le score d'un critère sur un tableau par le nombre de tableaux identiques qui ont été simplifiés. Les règles de simplification de l'encadré de la partie III.C.b nous permettent de retrouver les tableaux et lignes simplifiés, que nous ajouterons également au calcul. Enfin, tous les critères n'ayant pas le même nombre d'états de critères, certains pourraient être avantagés (comme un candidat à une élection qui aurait plus de votes exprimables que les autres). Pour résoudre ce problème, nous diviserons le score de chaque critère par le nombre d'états dudit critère.

Pour rappel, le score de Kemeny d'un ordre de préférence est calculé sur la base du nombre de fois qu'une alternative est préférée sur chacune des autres conformément à l'ordre, pour toutes les paires possibles d'un ordre de préférence. Les états apparaissant en abscisse d'un tableau verront donc augmenter le score de Kemeny du critère correspondant pour chaque « + » dans sa ligne, tandis que les états apparaissant en ordonnée verront augmenter le score de Kemeny du critère correspondant pour chaque « - » dans sa colonne. Enfin, les signes

« = » n'octroieront aucun point. On rappelle que le score de Kemeny est donné par la formule :

$$K_i = \sum_{\substack{X, Y=1 \\ X > Y \text{ dans } i}}^N T_{XY}$$

Par exemple, pour connaître le score de Kemeny de l'ordre $V > T > SE > EVC$, il faut additionner tous les « votes » en faveur des préférences suivantes :

$$V > T ; V > SE ; V > EVC ; T > SE ; T > EVC \text{ et } SE > EVC$$

car ce sont toutes les préférences qui vérifient l'ordre.

Dans cet exemple, pour rappel, les tableaux comparant les états de V et ceux de T sont :

En fixant SE_0 et EVC :

	T_0	T_1	T_2
V_0	=	-	-
V_1	+	+	-
V_2	+	+	-

En fixant SE_1 et EVC :

	T_0	T_1	T_2
V_0	-	-	-
V_1	+	-	-
V_2	+	+	=

Tableau 13 : comparaisons entre les états de T et V

Il y a 4 états possibles pour EVC, chaque tableau de vote comptera donc pour 4.

Il y a donc $4 \times 4 = 16$ votants qui ont exprimés $V > T$ sur le premier tableau (4 « + » pour 4 tableaux identiques).

$3 \times 4 = 12$ votants qui ont exprimés $V > T$ sur le second tableau (3 « + » pour 4 tableaux identiques).

Soit un total de $16 + 12 = 28$ votants en tout ayant exprimé $V > T$.

On réitère l'opération pour obtenir tous les votants ayant exprimé une préférence pour chaque paire d'états de critères.

Voici les résultats des « votes » de comparaisons de critères deux à deux (on remarque notamment que la somme des votes pour $X > Y$ et $Y > X$, X et Y étant deux critères, n'est pas égale à la somme des votants, dans notre exemple égale à 72, cela est dû aux votes « nuls », c'est-à-dire « = ») :

	V	T	SE	EVC
V		28	40	36
T	36		44	39
SE	32	16		24
EVC	30	27	48	

Tableau 14 : résultat des votes par paires pour la fonction « protection de la surverse »

(on lit le tableau comme suit : « N personnes ont préféré X à Y », où N est le nombre indiqué dans la case, X est le critère en ordonnée et Y celui en abscisse)

Les tableaux pour les autres fonctions relatives aux bases de règles logiques primaires sont donnés en annexe 17.

On en déduit les scores de tous les ordres de préférence possibles des critères :

V > T > SE > EVC : 211	T > V > SE > EVC : 219	SE > V > T > EVC : 175	EVC > V > T > SE : 217
V > T > EVC > SE : 235	T > V > EVC > SE : 243	SE > V > EVC > T : 163	EVC > V > SE > T : 189
V > SE > T > EVC : 183	T > SE > V > EVC : 211	SE > T > V > EVC : 183	EVC > T > V > SE : 225
V > SE > EVC > T : 171	T > SE > EVC > V : 205	SE > T > EVC > V : 177	EVC > T > SE > V : 217
V > EVC > T > SE : 223	T > EVC > V > SE : 237	SE > EVC > V > T : 157	EVC > SE > V > T : 181
V > EVC > SE > T : 195	T > EVC > SE > V : 229	SE > EVC > T > V : 165	EVC > SE > T > V : 189

Comme nous l'avons vu dans la partie III.B., ces scores de Kemeny sont, par analogie, le résultat d'un jeu coopératif où les joueurs V, T, SE et EVC jouent, chaque fois dans un certain ordre. Grâce à la méthode de Shapley, ces scores vont nous permettre de redistribuer les gains parmi les joueurs, c'est-à-dire les critères. Il s'agit de la prochaine étape.

La même méthode utilisée pour la **fonction étanchéité** nous donne les scores de Kemeny suivants :

$E > A > VS : 26$	$A > E > VS : 27$	$VS > E > A : 29$
$E > VS > A : 33$	$A > VS > E : 23$	$VS > A > E : 30$

Pour la **fonction filtration** :

$AN > P > CM : 24$	$P > AN > CM : 22$	$CM > AN > P : 21$
$AN > CM > P : 21$	$P > CM > AN : 22$	$CM > P > AN : 19$

Pour la **fonction protection mécanique** :

$VAC > VGC : 5$	$VGC > VAC : 4$
-----------------	-----------------

Pour la **fonction résistance mécanique** :

$F > DE > PCM : 14$	$DE > F > PCM : 24$	$PCM > F > DE : 30$
$F > PCM > DE : 24$	$DE > PCM > F : 30$	$PCM > DE > F : 32$

d. Calcul des valeurs de Shapley

Les scores de Kemeny précédemment calculés sont suffisants pour calculer la valeur de Shapley de chaque critère. Néanmoins, pour appliquer la formule de Shapley, il faut connaître les gains de tous les

jeux, non seulement selon l'ordre dans lequel les joueurs jouent, mais également pour toutes les coalitions possibles de joueurs, ainsi que l'ordre de jeu desdites coalitions. Afin d'appliquer la formule de Shapley, un petit travail est donc nécessaire.

Afin d'obtenir les gains des jeux pour les coalitions, nous appliquerons la formule de Shapley pour les comparaisons par paires (jeux à deux joueurs), puis par triplés (jeux à trois joueurs dont une coalition de deux joueurs dont le gain moyen vient d'être estimé), et ainsi de suite jusqu'à couvrir tous les n-uplets de coalitions, utilisant les résultats des (n-1)-uplets.

Afin d'illustrer cette méthode, nous utiliserons à nouveau l'exemple du barrage de Serre-Ponçon, en développant particulièrement la fonction « protection de la surverse ». Pour rappel, les scores de Kemeny des ordres des critères pour cette fonction sont les suivants :

V > T > SE > EVC : 211	T > V > SE > EVC : 219	SE > V > T > EVC : 175	EVC > V > T > SE : 217
V > T > EVC > SE : 235	T > V > EVC > SE : 243	SE > V > EVC > T : 163	EVC > V > SE > T : 189
V > SE > T > EVC : 183	T > SE > V > EVC : 211	SE > T > V > EVC : 183	EVC > T > V > SE : 225
V > SE > EVC > T : 171	T > SE > EVC > V : 205	SE > T > EVC > V : 177	EVC > T > SE > V : 217
V > EVC > T > SE : 223	T > EVC > V > SE : 237	SE > EVC > V > T : 157	EVC > SE > V > T : 181
V > EVC > SE > T : 195	T > EVC > SE > V : 229	SE > EVC > T > V : 165	EVC > SE > T > V : 189

Pour rappel, la valeur de Shapley est définie en partie III.B.b.

Afin de pouvoir la calculer, il nous suffit donc de connaître la fonction caractéristique de la coalition comprenant les joueurs jouant avant le joueur i et le joueur i , ce qui correspond au terme $v(P_i^R \cup \{i\})$. Pour cela, il faut connaître le gain moyen des ordres commençant par la coalition et immédiatement suivie par i . Par exemple, ici, il faut connaître les gains moyens de tous les ordres commençant par des coalitions de 1 ou 2 joueurs. En effet, il y a 4 joueurs en tout, donc un ordre commençant par trois joueurs distincts (par exemple $X > Y > Z$) est unique et son gain est donné par le score de Kemeny. En revanche, il existe à chaque fois 2 ordres distincts pour un pré-ordre composé de 2 joueurs, et 6 ordres pour un pré-ordre composé d'un seul joueur. Nous devons donc calculer le

gain moyen pour ces deux derniers cas. De façon générale, il faut calculer le gain moyen pour tous les pré-ordres constitués de (N-2) joueurs, N étant le nombre de joueurs des ordres complets.

Par exemple, en reprenant la fonction « protection de la surverse » :

$$\text{Gain moyen si V joue en premier : } G_V = \frac{211+235+183+171+223+195}{6} = 203$$

$$\text{Pour T : } G_T = \frac{219+243+211+205+237+229}{6} = 224$$

$$\text{Pour SE : } G_{SE} = \frac{175+163+183+177+157+165}{6} = 170$$

$$\text{Pour EVC : } G_{EVC} = \frac{217+189+225+217+181+189}{6} = 203$$

$$\text{Pour V > T : } G_{VT} = \frac{211+235}{2} = 223$$

$$\text{Pour V > SE : } G_{VSE} = \frac{183+171}{2} = 177$$

$$\text{Pour V > EVC : } G_{VEVC} = \frac{223+195}{2} = 209$$

$$\text{Pour T > V : } G_{TV} = \frac{219+243}{2} = 231$$

$$\text{Pour T > SE : } G_{TSE} = \frac{211+205}{2} = 208$$

$$\text{Pour T > EVC : } G_{TEVC} = \frac{237+229}{2} = 233$$

$$\text{Pour SE > V : } G_{SEV} = \frac{175+163}{2} = 169$$

$$\text{Pour SE > T : } G_{SET} = \frac{183+177}{2} = 180$$

$$\text{Pour SE > EVC : } G_{SEEVC} = \frac{157+165}{2} = 161$$

$$\text{Pour EVC > V : } G_{EVCV} = \frac{217+189}{2} = 203$$

$$\text{Pour EVC > T : } G_{EVCT} = \frac{225+217}{2} = 221$$

$$\text{Pour EVC > SE : } G_{EVCSE} = \frac{181+189}{2} = 185$$

En outre, nous noterons K_{XY} le score de Kemeny de l'ordre $X > Y$.

On en déduit les valeurs de Shapley de chaque critère :

Pour V :

$$\Phi_V = \frac{1}{4!} \sum_R [v(P_V^R \cup \{V\}) - v(P_V^R)]$$

$$\begin{aligned} \Phi_V = \frac{1}{24} & (6G_V + 2(G_{TV} - G_T) + 2(G_{SEV} - G_{SE}) + 2(G_{EVCV} - G_{EVC}) \\ & + (K_{TSEVEVC} - G_{TSE}) + (K_{SETVEVC} - G_{SET}) + (K_{TEVCVSE} - G_{TEVC}) \\ & + (K_{EVCTVSE} - G_{EVCT}) + (K_{SEEVCVT} - G_{SEEVC}) + (K_{EVCSEVT} - G_{EVCSE})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_V = \frac{1}{24} & (6 \times 203 + 2(231 - 224) + 2(169 - 170) + 2(203 - 203) \\ & + (211 - 208) + (183 - 180) + (237 - 233) + (225 - 221) \\ & + (157 - 161) + (181 - 185))\end{aligned}$$

$$\Phi_V = 51.5$$

De la même manière, on obtient :

$$\Phi_T = 62$$

$$\Phi_{SE} = \frac{215}{6}$$

$$\Phi_{EVC} = 51.5$$

Par construction, les valeurs de Shapley des joueurs sont indépendantes et additives. On peut donc les normaliser. Afin de faciliter la lecture des résultats à l'aide d'indices compris entre 0 et 1, c'est ce que nous ferons dans l'exemple, bien que ce ne soit pas nécessaire.

Ainsi :

$$\Phi_V^e = 0.256$$

$$\Phi_T^e = 0.309$$

$$\Phi_{SE}^e = 0.179$$

$$\Phi_{EVC}^e = 0.256$$

Le fait de normaliser les valeurs de Shapley permet d'obtenir des règles logiques dont la partie décisionnelle sera exprimée sur une échelle de 0 à 1. Cela n'est pas obligatoire, et l'utilisateur peut choisir d'exprimer le résultat sur n'importe quelle échelle numérique. Il est également possible d'associer des plages de valeurs à des résultats qualitatifs, qui

seront eux-mêmes ensuite utilisés en tant qu'états de critères pour la base de règles du niveau supérieur.

Les résultats obtenus pour les autres fonctions de l'arbre sont les suivants :

Pour la **fonction étanchéité** :

$$\Phi_E^e = 0.36$$

$$\Phi_A^e = 0.28$$

$$\Phi_{VS}^e = 0.36$$

Pour la **fonction filtration** :

$$\Phi_{AN}^e = 0.357$$

$$\Phi_P^e = 0.345$$

$$\Phi_{CM}^e = 0.298$$

Pour la **fonction protection mécanique** :

$$\Phi_{VAC}^e = 0.556$$

$$\Phi_{VGC}^e = 0.444$$

Pour la **fonction résistance mécanique** :

$$\Phi_F^e = 0.221$$

$$\Phi_{DE}^e = 0.325$$

$$\Phi_{PCM}^e = 0.454$$

Ces valeurs représentent la participation maximale de chaque critère au risque final, sur une échelle de 0 à 1. En connaissant la participation relative de chaque état d'un même critère au risque de la fonction, on peut utiliser les valeurs de Shapley pour obtenir directement le point remarquable de la partie décisionnelle des règles d'une base (rappel : pour obtenir la partie décisionnelle des règles logiques, nous

avons besoin de connaître un point remarquable du segment et l'amplitude du segment, voir III.B). Il suffirait alors de pondérer la valeur de Shapley d'un critère par la participation relative de l'état considéré pour une règle donnée, et d'additionner ainsi les termes de tous les critères, en vertu de l'additivité des valeurs de Shapley.

Remarque importante :

Il ne peut être envisagé d'utiliser la valeur de Shapley directement pour les états de critères. En effet, deux états d'un même critère ne peuvent coexister au sein de la même coalition. Toutes les valeurs des coalitions ne sont donc pas atteignables, et la valeur de Shapley d'un état de critère ne peut donc être calculée. Il est donc nécessaire de calculer la valeur de Shapley d'un critère, et non d'un état de critère. Pour en déduire la participation des états de critère, il faut par conséquent connaître la participation de chaque état au critère considéré.

e. Participation des états et bases de règles primaires

Afin de terminer la construction des bases de règles, il convient tout d'abord de se pencher plus précisément sur les états de chaque critère, pour chaque fonction. Les états de critères sont ici remis dans le contexte du critère auquel ils appartiennent et leur participation relative au risque porté par le critère est calculée.

On note P_{X_i} la participation relative de l'état X_i au risque porté par le critère X au sein de la fonction considérée. Pour chaque critère, on cherche tous les P_{X_i} de sorte que ce terme reflète l'influence prêtée par les « votants » à l'état de critère, autrement dit, de sorte qu'il soit

cohérent avec le nombre de fois que l'état de critère considéré est préféré à tous les autres, sur une échelle de 0 à 1.

Si on considère la règle logique agrégeant les états des critères $X_i^1, X_j^2, \dots, X_k^N$ respectivement des critères X^1, X^2, \dots, X^N d'une fonction F , la valeur moyenne de la valeur décisionnelle s'obtient sous la forme :

$$\mathbf{IF (X_i^1, X_j^2, \dots, X_k^N), THEN F^m = P_{X^1} \times \Phi_{X^1}^e + P_{X^2} \times \Phi_{X^2}^e + \dots + P_{X^N} \times \Phi_{X^N}^e}$$

Afin de déduire la participation de chaque état de critère au risque que ce dernier porte, il est possible de reprendre les tableaux de comparaisons deux à deux construits dans la partie IV.A.c. En effet, la valeur de Shapley est déduite de ces tableaux grâce aux scores de Kemeny. Or ces tableaux sont construits à partir des états de critères, qui contribuent chacun au score de Kemeny, et donc à la valeur de Shapley du critère. Le score de Kemeny naît de l'agrégation de la participation de ces états de critères, donc en reprenant ces tableaux avant l'agrégation, il est possible de mettre en lumière les informations recherchées.

Par exemple, s'il y a eu en tout 5 votes en faveur de $X > Y$ pour 6 votants, dont 3 (sur un maximum de 6 votants) sont issus d'une préférence de X_1 sur des états de Y , et 2 sont issus d'une préférence de X_0 sur des états de Y , alors X_1 a participé à hauteur de $\frac{3}{6} = 50\%$ et X_0 à hauteur de $\frac{2}{6} = 33\%$. En raisonnant de cette façon pour toutes les comparaisons par paire, on peut à l'aide d'une simple moyenne en déduire la participation relative de chaque état de critère au risque porté par le critère au sein de la fonction étudiée. Ce système est

cohérent avec la valeur de Shapley, cette dernière représentant le risque maximum d'un critère par rapport aux autres au sein d'une fonction. Rechercher une participation relative des états de la façon proposée permet donc de pondérer ce maximum en fonction du niveau de contribution de l'état au risque général. Si un état d'un critère n'a jamais été préféré à aucun état d'un autre critère, sa contribution est nulle, ce qui se traduira par un apport égal à 0 dans la règle logique. De la même façon, si un état est préféré à l'intégralité des états des autres critères, son apport sera égal à 100%, ce qui correspond à une contribution du critère égale à sa valeur de Shapley, à savoir son maximum atteignable. On note que les termes $P_{X_i^N}$ ne sont pas additifs.

Par exemple, si on reprend la fonction « protection de la surverse » dont les tableaux de comparaisons sont présentés dans la partie IV.A.c :

Critère **V** (72 votants) :

V_0 : préféré 0 fois

V_1 : préféré 40 fois

V_2 : préféré 64 fois

D'où :

$$P_{V_0} = \frac{0}{72} = 0$$

$$P_{V_1} = \frac{40}{72} = 0.556$$

$$P_{V_2} = \frac{64}{72} = 0.889$$

Critère **T** (72 votants) :

T_0 : préféré 4 fois

T_1 : préféré 47 fois

T_2 : préféré 68 fois

D'où :

$$P_{T_0} = 0.056$$

$$P_{T_1} = 0.653$$

$$P_{T_2} = 0.944$$

Critère **SE** (108 votants) :

SE_0 : préféré 12 fois

SE_1 : préféré 60 fois

D'où :

$$P_{SE_0} = 0.111$$

$$P_{SE_1} = 0.556$$

Critère **EVC** (54 votants) :

EVC_0 : préféré 9 fois

EVC_1 : préféré 21 fois

EVC_2 : préféré 33 fois

EVC_3 : préféré 42 fois

D'où :

$$P_{EVC_0} = 0.167$$

$$P_{EVC_1} = 0.389$$

$$P_{EVC_2} = 0.611$$

$$P_{EVC_3} = 0.778$$

De la même façon,

Pour la **fonction étanchéité** :

$$P_{E_0} = 0$$

$$P_{E_1} = 0.563$$

$$P_{E_2} = 0.688$$

$$P_{A_0} = 0$$

$$P_{A_1} = 0.625$$

$$P_{VS_0} = 0$$

$$P_{VS_1} = 0.417$$

$$P_{VS_2} = 0.5$$

$$P_{VS_3} = 0.833$$

Pour la **fonction filtration** :

$$P_{P_0} = 0$$

$$P_{P_1} = 0.583$$

$$P_{P_2} = 0.75$$

$$P_{CM_0} = 0$$

$$P_{CM_1} = 0.417$$

$$P_{CM_2} = 0.667$$

$$P_{AN_0} = 0$$

$$P_{AN_1} = 0.833$$

Pour la **fonction protection mécanique** :

$$P_{VGC_0} = 0$$

$$P_{VGC_1} = 0.333$$

$$P_{VGC_2} = 0.333$$

$$P_{VGC_3} = 0.667$$

$$P_{VAC_0} = 0$$

$$P_{VAC_1} = 0.5$$

$$P_{VAC_2} = 0.75$$

Pour la **fonction résistance mécanique** :

$$P_{PCM_0} = 0$$

$$P_{PCM_1} = 0.417$$

$$P_{PCM_2} = 0.75$$

$$P_{PCM_3} = 1$$

$$P_{DE_0} = 0$$

$$P_{DE_1} = 0.375$$

$$P_{DE_2} = 0.75$$

$$P_{F_0} = 0$$

$$P_{F_1} = 0.417$$

Ces résultats, combinés avec les valeurs de Shapley de chaque critère, nous permet d'obtenir directement les valeurs remarquables de l'intégralité de la base de règles logiques pour la fonction « protection de la surverse ».

Comme vu au début de ce paragraphe, il nous suffit de combiner ces pondérations avec les valeurs de Shapley correspondantes. Par exemple, pour la règle : « IF (V_1 , T_0 , SE_0 , EVC_2), THEN ... », le milieu du segment de la partie décisionnelle, qu'on notera ici PS^m , est égale à :

$$PS^m = P_{V_1} \Phi_V^e + P_{T_0} \Phi_T^e + P_{SE_0} \Phi_{SE}^e + P_{EVC_2} \Phi_{EVC}^e$$

$$PS^m = 0.55556 \times 0.25643 + 0.05556 \times 0.30871 + 0.11111 \times 0.17843 + 0.61111 \times 0.25643$$

$$PS^m = 0.33615$$

Ce résultat est exprimé sur $[0 ; 1]$. Pour simplifier, nous considèrerons une précision à 10^{-3} , soit $PS^m = 0.336$. Le choix de la précision est laissée libre à l'utilisateur.

Cette valeur, comme nous l'avons vu dans la partie III.B.b, est la valeur moyenne d'affectation. D'un point de vue de l'utilisateur, il peut être pertinent de se contenter de cette valeur. En effet, elle représente un positionnement ordinal exploitable : chaque règle débouche sur une valeur moyenne d'affectation, l'ensemble de ces valeurs constituant un ordre où la violation de la dominance stochastique est strictement interdite par construction (ce qui est prévisible par le seul fait que la méthode de Kemeny a pour propriété de l'interdire, comme nous l'avons vu dans la partie III.B.c). On peut alors voir une base de règles complètes selon les valeurs moyennes d'affectation sous cette forme :

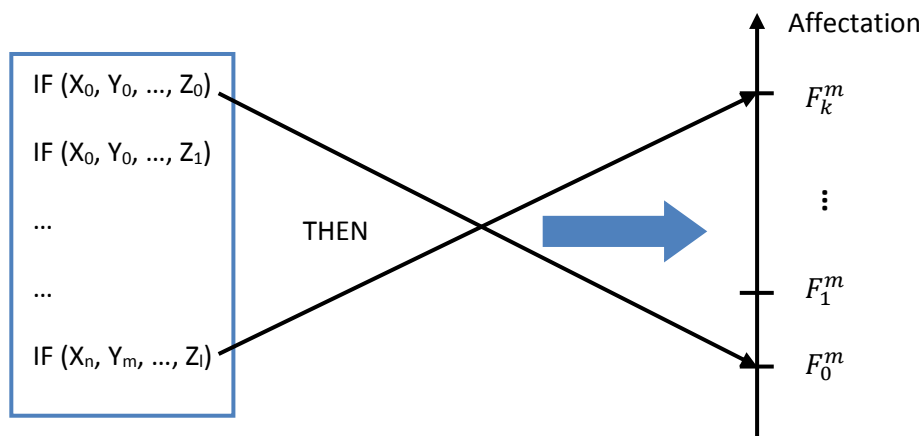


Figure 10 : Obtention des résultats sur une échelle ordonnée

Néanmoins, afin d'obtenir la règle logique complète tenant compte de l'incertitude, il faut à présent obtenir l'amplitude du segment dont ce point est le milieu. Cette amplitude correspond au degré d'incertitude de l'expression du jugement de l'expert. Afin de connaître cette amplitude, nous soumettons l'expert à une loterie. Nous montrons à l'expert le résultat pour le milieu du segment, obtenu à partir de son jugement (ici, 0.336). Nous lui posons alors la question suivante : « préféreriez-vous 1000€ si vous êtes à moins de 0.1 de la réponse exacte, ou 500€ si vous êtes à moins de 0.2 ? ». Si l'expert répond préférer 1000€, on peut encore affiner en proposant le choix entre cette même loterie ou 2000€ s'il est à moins de 0.05, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il préfère la loterie moins risquée.

L'amplitude donnée par celle-ci est alors l'amplitude de notre segment. Si l'expert, à la première question, dit préférer la loterie moins risquée, on procède la même façon en élargissant les intervalles (et en diminuant le gain), et ce jusqu'à obtenir, à nouveau, l'intervalle limite qui marque la confiance de l'expert dans le résultat donné. Il est possible de cette façon d'obtenir des intervalles de plus en plus précis en fonction du nombre de questions posées (les questions étant orientées de façon à converger vers l'intervalle exact de la confiance de l'expert).

Si l'expert est totalement sûr du résultat exact donné par la méthode, alors l'intervalle est nul, et la partie décisionnelle de la règle est exactement égale à la valeur remarquable. Ceci peut arriver, particulièrement dans les systèmes où il n'y a que deux ou trois critères.

Reprenons ici notre exemple, et particulièrement la règle en « **IF** (V_1, T_0, SE_0, EVC_2) », qui donnait $PS^m = 0.336$. Voici les questions posées et leur réponse :

- *Préféreriez-vous 1000€ si vous êtes à moins de 0.05 de la réponse exacte, ou 500€ si vous êtes à moins de 0.1 ?* **Réponse** : 500€ pour 0.1
- *Préféreriez-vous 500€ si vous êtes à moins de 0.1 de la réponse exacte, ou 250€ si vous êtes à moins de 0.2 ?* **Réponse** : 500€ pour 0.1
- *Préféreriez-vous 500€ si vous êtes à moins de 0.1 de la réponse exacte, ou 750€ si vous êtes à moins de 0.06 ?* **Réponse** : 750€ pour 0.06
- *Préféreriez-vous 750€ si vous êtes à moins de 0.06 de la réponse exacte, ou 650€ si vous êtes à moins de 0.08 ?* **Réponse** : 750€ pour 0.06
- *Préféreriez-vous 750€ si vous êtes à moins de 0.06 de la réponse exacte, ou 700€ si vous êtes à moins de 0.07 ?* **Réponse** : 700€ pour 0.07

Nous avons décidé d'arrêter ici les questions, mais si l'utilisateur a besoin d'une précision plus importante, il peut continuer à faire converger les questions. Nous prendrons donc ici l'intervalle 0.07. Les questions ont été posées de sorte que la réponse se situe à plus ou moins l'intervalle, donc ici l'amplitude totale est 0.14. Lorsque l'amplitude est telle qu'au moins une partie du segment est en dehors de l'intervalle $[0 ; 1]$, on tronquera simplement le segment aux valeurs limites de $[0 ; 1]$.

D'où :

IF (V_1, T_0, SE_0, EVC_2), **THEN** $PS \in [0.266 ; 0.406]$

On procède de la même façon pour toutes les règles logiques de la base de règles. Ainsi, la base de règles complète pour la **fonction protection de la surverse** devient alors :

IF (V_0, T_0, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0; 0.159]$ *IF* (V_1, T_1, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.456; 0.516]$
IF (V_0, T_0, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.037; 0.237]$ *IF* (V_1, T_1, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.513; 0.573]$
IF (V_0, T_0, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.154; 0.234]$ *IF* (V_1, T_1, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.54; 0.66]$
IF (V_0, T_0, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.166; 0.306]$ *IF* (V_1, T_1, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.613; 0.673]$
IF (V_0, T_0, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0; 0.318]$ *IF* (V_1, T_2, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.457; 0.537]$
IF (V_0, T_0, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.116; 0.326]$ *IF* (V_1, T_2, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.524; 0.584]$
IF (V_0, T_0, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.203; 0.343]$ *IF* (V_1, T_2, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.601; 0.621]$
IF (V_0, T_0, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.203; 0.516]$ *IF* (V_1, T_2, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.633; 0.673]$
IF (V_0, T_1, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.234; 0.294]$ *IF* (V_1, T_2, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.526; 0.626]$
IF (V_0, T_1, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.311; 0.331]$ *IF* (V_1, T_2, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.603; 0.663]$
IF (V_0, T_1, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.348; 0.408]$ *IF* (V_1, T_2, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.68; 0.7]$
IF (V_0, T_1, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.371; 0.471]$ *IF* (V_1, T_2, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.673; 0.793]$
IF (V_0, T_1, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.313; 0.373]$ *IF* (V_2, T_0, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.278; 0.338]$
IF (V_0, T_1, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.39; 0.41]$ *IF* (V_2, T_0, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.345; 0.385]$
IF (V_0, T_1, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.427; 0.487]$ *IF* (V_2, T_0, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.392; 0.452]$
IF (V_0, T_1, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.47; 0.53]$ *IF* (V_2, T_0, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.414; 0.514]$
IF (V_0, T_2, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.314; 0.394]$ *IF* (V_2, T_0, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.357; 0.417]$
IF (V_0, T_2, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.401; 0.421]$ *IF* (V_2, T_0, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.434; 0.454]$
IF (V_0, T_2, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.418; 0.518]$ *IF* (V_2, T_0, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.481; 0.521]$
IF (V_0, T_2, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.481; 0.541]$ *IF* (V_2, T_0, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.534; 0.554]$
IF (V_0, T_2, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.393; 0.473]$ *IF* (V_2, T_1, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.452; 0.532]$
IF (V_0, T_2, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.48; 0.5]$ *IF* (V_2, T_1, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.499; 0.599]$
IF (V_0, T_2, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.517; 0.577]$ *IF* (V_2, T_1, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.586; 0.626]$
IF (V_0, T_2, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.57; 0.61]$ *IF* (V_2, T_1, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.619; 0.679]$
IF (V_1, T_0, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.152; 0.292]$ *IF* (V_2, T_1, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.541; 0.601]$
IF (V_1, T_0, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.259; 0.319]$ *IF* (V_2, T_1, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.598; 0.658]$
IF (V_1, T_0, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.266; 0.406]$ *IF* (V_2, T_1, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.645; 0.725]$
IF (V_1, T_0, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.339; 0.419]$ *IF* (V_2, T_1, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.718; 0.738]$
IF (V_1, T_0, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.271; 0.331]$ *IF* (V_2, T_2, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.552; 0.612]$
IF (V_1, T_0, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.348; 0.368]$ *IF* (V_2, T_2, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.619; 0.659]$
IF (V_1, T_0, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.365; 0.465]$ *IF* (V_2, T_2, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.636; 0.756]$
IF (V_1, T_0, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.428; 0.488]$ *IF* (V_2, T_2, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.719; 0.759]$
IF (V_1, T_1, SE_0, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.377; 0.437]$ *IF* (V_2, T_2, SE_1, EVC_0), *THEN* $PS \in [0.631; 0.691]$
IF (V_1, T_1, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.444; 0.484]$ *IF* (V_2, T_2, SE_1, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.698; 0.738]$
IF (V_1, T_1, SE_0, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.5; 0.54]$ *IF* (V_2, T_2, SE_1, EVC_2), *THEN* $PS \in [0.725; 0.825]$
IF (V_1, T_1, SE_0, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.533; 0.593]$ *IF* (V_2, T_2, SE_1, EVC_3), *THEN* $PS \in [0.718; 0.918]$

Cette base de règles couvre tous les états de critères possibles. Ainsi, en observant l'état des différents critères, l'expert peut obtenir immédiatement le risque sur la fonction protection de la surverse. Ce

résultat servira ensuite de donnée d'entrée pour la base de règle du niveau supérieur de l'arbre des causes.

De la même façon, on obtient :

Pour la **fonction étanchéité** :

<i>IF</i> (E_0, A_0, VS_0), <i>THEN</i> $ETA = 0$	<i>IF</i> (E_1, A_1, VS_0), <i>THEN</i> $ETA \in [0.368; 0.388]$
<i>IF</i> (E_0, A_0, VS_1), <i>THEN</i> $ETA \in [0.12; 0.18]$	<i>IF</i> (E_1, A_1, VS_1), <i>THEN</i> $ETA \in [0.508; 0.548]$
<i>IF</i> (E_0, A_0, VS_2), <i>THEN</i> $ETA \in [0.17; 0.19]$	<i>IF</i> (E_1, A_1, VS_2), <i>THEN</i> $ETA \in [0.538; 0.578]$
<i>IF</i> (E_0, A_0, VS_3), <i>THEN</i> $ETA \in [0.28; 0.32]$	<i>IF</i> (E_1, A_1, VS_3), <i>THEN</i> $ETA \in [0.628; 0.728]$
<i>IF</i> (E_0, A_1, VS_0), <i>THEN</i> $ETA \in [0.165; 0.185]$	<i>IF</i> (E_2, A_0, VS_0), <i>THEN</i> $ETA \in [0.228; 0.268]$
<i>IF</i> (E_0, A_1, VS_1), <i>THEN</i> $ETA \in [0.305; 0.345]$	<i>IF</i> (E_2, A_0, VS_1), <i>THEN</i> $ETA \in [0.368; 0.428]$
<i>IF</i> (E_0, A_1, VS_2), <i>THEN</i> $ETA \in [0.325; 0.385]$	<i>IF</i> (E_2, A_0, VS_2), <i>THEN</i> $ETA \in [0.388; 0.468]$
<i>IF</i> (E_0, A_1, VS_3), <i>THEN</i> $ETA \in [0.435; 0.515]$	<i>IF</i> (E_2, A_0, VS_3), <i>THEN</i> $ETA \in [0.508; 0.588]$
<i>IF</i> (E_1, A_0, VS_0), <i>THEN</i> $ETA \in [0.193; 0.213]$	<i>IF</i> (E_2, A_1, VS_0), <i>THEN</i> $ETA \in [0.403; 0.443]$
<i>IF</i> (E_1, A_0, VS_1), <i>THEN</i> $ETA \in [0.313; 0.393]$	<i>IF</i> (E_2, A_1, VS_1), <i>THEN</i> $ETA \in [0.543; 0.603]$
<i>IF</i> (E_1, A_0, VS_2), <i>THEN</i> $ETA \in [0.363; 0.403]$	<i>IF</i> (E_2, A_1, VS_2), <i>THEN</i> $ETA \in [0.563; 0.643]$
<i>IF</i> (E_1, A_0, VS_3), <i>THEN</i> $ETA \in [0.473; 0.533]$	<i>IF</i> (E_2, A_1, VS_3), <i>THEN</i> $ETA \in [0.673; 0.773]$

Pour la **fonction filtration** :

<i>IF</i> (AN_0, P_0, CM_0), <i>THEN</i> $FI = 0$	<i>IF</i> (AN_1, P_0, CM_0), <i>THEN</i> $FI \in [0.287; 0.307]$
<i>IF</i> (AN_0, P_0, CM_1), <i>THEN</i> $FI \in [0.104; 0.144]$	<i>IF</i> (AN_1, P_0, CM_1), <i>THEN</i> $FI \in [0.402; 0.442]$
<i>IF</i> (AN_0, P_0, CM_2), <i>THEN</i> $FI \in [0.169; 0.229]$	<i>IF</i> (AN_1, P_0, CM_2), <i>THEN</i> $FI \in [0.466; 0.526]$
<i>IF</i> (AN_0, P_1, CM_0), <i>THEN</i> $FI \in [0.181; 0.221]$	<i>IF</i> (AN_1, P_1, CM_0), <i>THEN</i> $FI \in [0.479; 0.519]$
<i>IF</i> (AN_0, P_1, CM_1), <i>THEN</i> $FI \in [0.305; 0.345]$	<i>IF</i> (AN_1, P_1, CM_1), <i>THEN</i> $FI \in [0.603; 0.643]$
<i>IF</i> (AN_0, P_1, CM_2), <i>THEN</i> $FI \in [0.36; 0.44]$	<i>IF</i> (AN_1, P_1, CM_2), <i>THEN</i> $FI \in [0.667; 0.727]$
<i>IF</i> (AN_0, P_2, CM_0), <i>THEN</i> $FI \in [0.249; 0.269]$	<i>IF</i> (AN_1, P_2, CM_0), <i>THEN</i> $FI \in [0.546; 0.566]$
<i>IF</i> (AN_0, P_2, CM_1), <i>THEN</i> $FI \in [0.373; 0.393]$	<i>IF</i> (AN_1, P_2, CM_1), <i>THEN</i> $FI \in [0.66; 0.7]$
<i>IF</i> (AN_0, P_2, CM_2), <i>THEN</i> $FI \in [0.438; 0.478]$	<i>IF</i> (AN_1, P_2, CM_2), <i>THEN</i> $FI \in [0.735; 0.775]$

Pour la **fonction protection mécanique** :

<i>IF (VGC₀,VAC₀),THEN PM ∈ [0; 0.05]</i>	<i>IF (VGC₂,VAC₀),THEN PM = 0.148</i>
<i>IF (VGC₀,VAC₁),THEN PM ∈ [0.268; 0.288]</i>	<i>IF (VGC₂,VAC₁),THEN PM = 0.426</i>
<i>IF (VGC₀,VAC₂),THEN PM ∈ [0.407; 0.427]</i>	<i>IF (VGC₂,VAC₂),THEN PM = 0.565</i>
<i>IF (VGC₁,VAC₀),THEN PM ∈ [0.138; 0.158]</i>	<i>IF (VGC₃,VAC₀),THEN PM ∈ [0.286; 0.306]</i>
<i>IF (VGC₁,VAC₁),THEN PM ∈ [0.416; 0.436]</i>	<i>IF (VGC₃,VAC₁),THEN PM ∈ [0.564; 0.584]</i>
<i>IF (VGC₁,VAC₂),THEN PM ∈ [0.555; 0.575]</i>	<i>IF (VGC₃,VAC₂),THEN PM ∈ [0.703; 0.723]</i>

Pour la **fonction résistance mécanique** :

<i>IF (F₀,DE₀,PCM₀),THEN RM = 0</i>	<i>IF (F₁,DE₀,PCM₀),THEN RM = 0.092</i>
<i>IF (F₀,DE₀,PCM₁),THEN RM ∈ [0.169; 0.209]</i>	<i>IF (F₁,DE₀,PCM₁),THEN RM ∈ [0.271; 0.291]</i>
<i>IF (F₀,DE₀,PCM₂),THEN RM ∈ [0.321; 0.361]</i>	<i>IF (F₁,DE₀,PCM₂),THEN RM ∈ [0.413; 0.453]</i>
<i>IF (F₀,DE₀,PCM₃),THEN RM ∈ [0.414; 0.494]</i>	<i>IF (F₁,DE₀,PCM₃),THEN RM ∈ [0.516; 0.576]</i>
<i>IF (F₀,DE₁,PCM₀),THEN RM ∈ [0.112; 0.132]</i>	<i>IF (F₁,DE₁,PCM₀),THEN RM ∈ [0.184; 0.244]</i>
<i>IF (F₀,DE₁,PCM₂),THEN RM ∈ [0.291; 0.331]</i>	<i>IF (F₁,DE₁,PCM₁),THEN RM ∈ [0.353; 0.453]</i>
<i>IF (F₀,DE₁,PCM₃),THEN RM ∈ [0.422; 0.502]</i>	<i>IF (F₁,DE₁,PCM₂),THEN RM ∈ [0.495; 0.615]</i>
<i>IF (F₀,DE₁,PCM₃),THEN RM ∈ [0.526; 0.626]</i>	<i>IF (F₁,DE₁,PCM₃),THEN RM ∈ [0.608; 0.728]</i>
<i>IF (F₀,DE₂,PCM₀),THEN RM ∈ [0.224; 0.264]</i>	<i>IF (F₁,DE₂,PCM₀),THEN RM ∈ [0.316; 0.356]</i>
<i>IF (F₀,DE₂,PCM₄),THEN RM ∈ [0.413; 0.453]</i>	<i>IF (F₁,DE₂,PCM₄),THEN RM ∈ [0.485; 0.565]</i>
<i>IF (F₀,DE₂,PCM₂),THEN RM ∈ [0.554; 0.614]</i>	<i>IF (F₁,DE₂,PCM₂),THEN RM ∈ [0.626; 0.726]</i>
<i>IF (F₀,DE₂,PCM₃),THEN RM ∈ [0.648; 0.748]</i>	<i>IF (F₁,DE₂,PCM₃),THEN RM ∈ [0.76; 0.85]</i>

Ces bases de règles permettent d'obtenir un résultat sur le risque de chaque fonction (en jaune sur l'arbre de l'annexe 1) de l'arbre des causes, et fournissent ainsi une première information. L'expert remonte ensuite l'arbre en développant des bases de règles pour les agrégations des niveaux supérieurs de l'arbre. A partir de ce moment, ces bases de règles seront construites de façon légèrement différente. En effet, le nombre de critères à agréger est largement réduit (dans la pratique, considérant les arbres de causes de la Division Technique Générale d'EDF, il s'agira au plus de trois critères), et surtout il n'est plus besoin

d'en chercher les états, puisque cette information est donnée par les bases de règles primaires que nous venons de développer. L'étape I de la méthode est donc inutile, et l'expert peut passer directement à l'étape II. En outre, il est possible d'utiliser les résultats issus des bases de règles primaires, et de les pondérer selon l'importance de la contribution générale d'un critère. Autrement dit, on peut considérer que la partie décisionnelle des bases de règles est équivalente aux termes en $P_{X_i^n}$, il ne nous reste donc plus qu'à trouver les valeurs de Shapley, ce qui est rendu très simple par le nombre réduit de critères.

f. Bases de règles secondaires et résultats

D'après l'annexe 1, voici les bases de règles secondaires pour le barrage de Serre-Ponçon :

- (1) (étanchéité, filtration) → érosion interne
- (2) (protection de la surverse, protection mécanique) → érosion externe
- (3) (érosion interne, érosion externe) → érosion
- (4) (érosion, instabilité mécanique) → rupture du barrage (événement redouté).

Comme nous l'avons vu précédemment, il ne nous reste qu'à calculer les valeurs de Shapley des critères pour obtenir les bases de règles. On ne peut pas utiliser la même méthode que pour les arbres primaires, puisque n'ayant pas d'états de critères, il ne nous est pas possible d'utiliser la méthode de Young-Kemeny, d'autant que les parties décisionnelles des règles des bases primaires sont des segments, qui parfois se chevauchent, rendant l'exercice de comparaison deux à deux périlleux. Néanmoins, le faible nombre de critères (deux à trois pour

les systèmes étudiés dans le cadre de la thèse) permet d'obtenir, non pas les valeurs de Shapley d'un jeu coopératif constitué des différents critères, mais un facteur reflétant la même information, à savoir le niveau de contribution moyen des critères dans le risque induit par les bases de règles.

Afin de trouver cette valeur, il est possible de s'inspirer du travail effectué sur les bases de règles primaires. En effet, en demandant à l'expert de définir des domaines seuils à partir desquels un élément de la partie conditionnelle, qu'on assimilera à un critère par analogie, voit son influence modifiée (dans un sens comme l'autre) sur la partie décisionnelle, on retrouve le principe d'« états de critères » à partir desquels nous pouvons travailler. La difficulté rencontrée est alors : qu'arrive-t-il lorsque ce domaine seuil se situe à l'intérieur du segment obtenu issu de la base précédente ? Autrement dit, si au moins un des critères de la base secondaire a une valeur située sur un segment dans lequel est inclus un domaine seuil, à quel « état » appartient-il ?

De par la construction de l'amplitude des segments telle que décrite dans la partie précédente, l'expert considère que la valeur exacte du critère peut se situer n'importe où dans le segment. Nous pouvons donc utiliser des bases de règles sur le même principe que les bases primaires, en considérant qu'un critère peut avoir plusieurs états, obtenant ainsi plusieurs règles dans la base qui sont vérifiées à la fois. Ces règles donneront des parties décisionnelles différentes, elles-mêmes exprimées sur des segments. Souhaitant obtenir un résultat unique pour une entrée unique dans la base de règles, nous considérerons que ce résultat est l'union des segments issus des différentes règles vérifiées. Or, comme nous l'avons vu dans la partie III.A.b, les parties décisionnelles d'une même base de règles forment un ordre complet. On en déduit que l'union des segments obtenue précédemment est l'union de segments ordonnés. Les bornes de cette union sont issues des bornes des règles les plus dominantes ou dominées de la base étudiée. En outre, toutes les valeurs comprises entre les bornes sont nécessairement incluses dans le segment final, qui est continu.

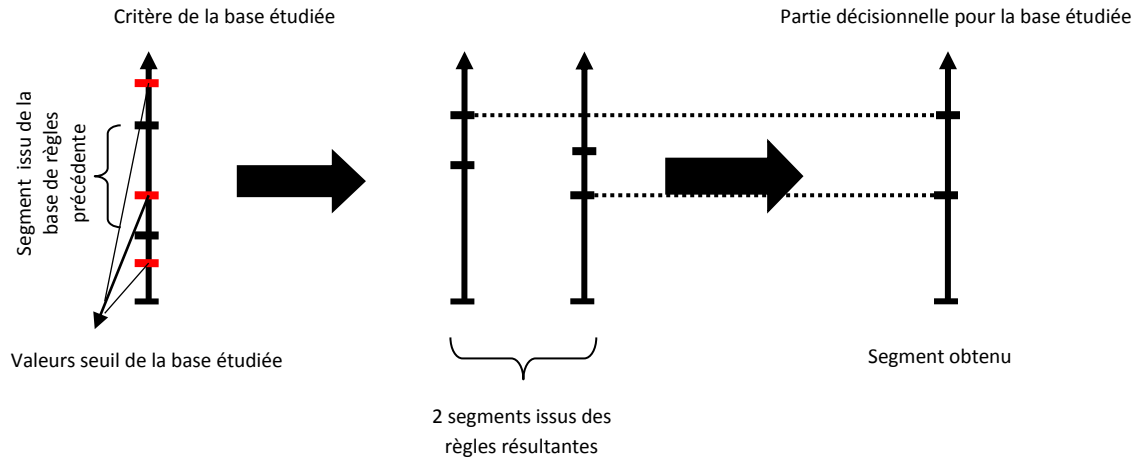


Figure 11 : obtention de la partie décisionnelle pour une base de règles secondaire

Cependant, ce résultat comporte le risque de propager les incertitudes de façon trop importante. En effet, à chaque base de règle secondaire supplémentaire, l'amplitude du segment résultant augmente. Cette propagation peut être grandement diminuée en affinant l'union des segments. En effet, comme on peut le voir sur le schéma ci-dessus, le segment issu de la base de règles précédente ne couvre pas les « états » des nouveaux critères de façon homogène. Puisque ces états sont ordinaux et résultent sur des valeurs ordinales par une fonction monotone (un état X supérieur à un état Y donnera toujours un segment où les valeurs sont supérieures à celles obtenues par Y), nous en déduisons qu'il est possible de simplement considérer la partie relative qui vérifie un « état » comme résultant sur un segment de relativité qu'on peut approximer égale (cette relativité dépend en fait de la distribution de probabilité sur le segment résultant, mais compte tenu de la méthode d'élicitation choisie, considérer la distribution homogène est une bonne approximation au premier ordre). Les bornes peuvent ainsi être ajustées.

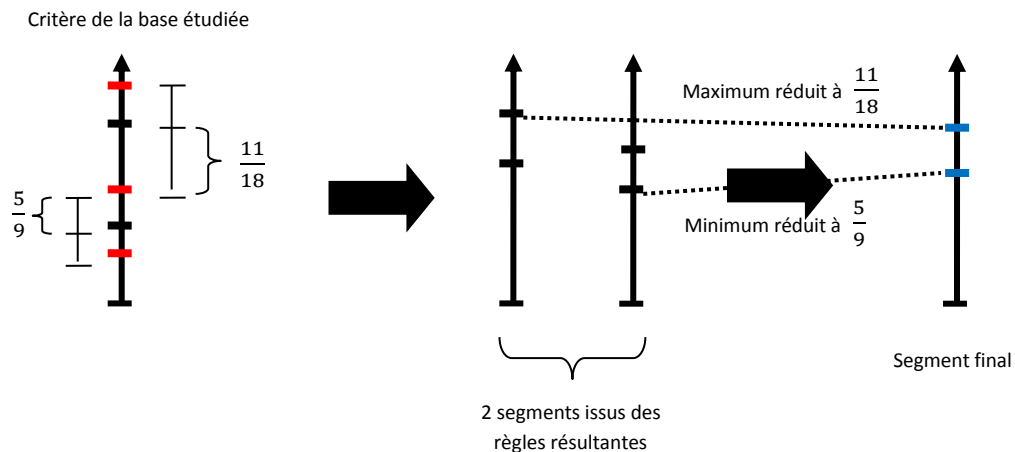


Figure 12 : simplification de la partie décisionnelle d'une base de règles secondaire

Prenons l'exemple de la base de règles secondaires relative à l'obtention de la fonction « érosion externe » agrégeant les fonctions « protection de la surverse » et « protection mécanique ». L'expert donne les états de critères suivants :

- Protection de la surverse : PS_0 correspond à une protection jugée optimale par l'expert. PS_1 correspond à une protection de la surverse nécessitant une maintenance légère. PS_2 correspond à une protection de la surverse à surveiller et nécessitant une maintenance régulière. PS_3 correspond à une protection très insuffisante de la surverse, voire à la destruction à court terme de la surverse.
- Protection mécanique : PM_0 correspond à une protection mécanique en parfait état des surfaces externes du barrage. PM_1 correspond à une protection partiellement détruite et nécessitant donc une maintenance. PM_2 correspond à une protection défailante impliquant à court terme une destruction des surfaces externes du barrage.

L'expert donne en outre les seuils suivants, obtenus en considération de la corrélation entre les combinaisons d'états de critères de la

fonction PS et le segment obtenu pour chaque règle de la base primaire de PS :

PS_0/PS_1 : PS = 0.2 : compte tenu des états de critères de la fonction PS qui peuvent mener aux valeurs inférieures, cela correspond en effet à une protection optimale.

PS_1/PS_2 : PS = 0.4

PS_2/PS_3 : PS = 0.55

De la même façon pour PM :

PM_0/PM_1 : PM = 0.2

PM_1/PM_2 : PM = 0.5

On reprend à présent la méthode utilisée pour les bases primaires. On obtient le tableau de vote suivant (unique car il n'y a que deux critères) :

	PS ₀	PS ₁	PS ₂	PS ₃
PM ₀	=	-	-	-
PM ₁	+	+	-	-
PM ₂	+	+	=	-

Tableau 15 : tableau de vote entre les critères PM et PS

Soit les scores de Kemeny :

$$K_{PS>PM} = 6$$

$$K_{PM>PS} = 4$$

D'où les valeurs de Shapley :

$$\Phi_{PS} = \frac{1}{2!} (2K_{PS>PM}) = 6$$

Par ailleurs, d'après le tableau ci-dessus, nous avons :

$$P_{PS_0} = 0$$

$$P_{PS_1} = 0.333$$

$$P_{PS_2} = 0.666$$

$$P_{PS_3} = 1$$

$$P_{PM_0} = 0$$

$$P_{PM_1} = 0.5$$

$$P_{PM_2} = 0.5$$

$$\Phi_{PM} = \frac{1}{2!}(2K_{PM>PS}) = 4$$

D'où :

$$\Phi_{PS}^e = 0.6$$

$$\Phi_{PM}^e = 0.4$$

La base de règle étant simple, dans notre exemple l'expert accepte ce résultat comme exact ($EE^m = EE$), d'où la base de règles :

<i>IF (PS₀, PM₀), THEN EE = 0</i>	<i>IF (PS₂, PM₀), THEN EE = 0.4</i>
<i>IF (PS₀, PM₁), THEN EE = 0.2</i>	<i>IF (PS₂, PM₁), THEN EE = 0.6</i>
<i>IF (PS₀, PM₂), THEN EE = 0.2</i>	<i>IF (PS₂, PM₂), THEN EE = 0.6</i>
<i>IF (PS₁, PM₀), THEN EE = 0.2</i>	<i>IF (PS₃, PM₀), THEN EE = 0.6</i>
<i>IF (PS₁, PM₁), THEN EE = 0.4</i>	<i>IF (PS₃, PM₁), THEN EE = 0.8</i>
<i>IF (PS₁, PM₂), THEN EE = 0.4</i>	<i>IF (PS₃, PM₂), THEN EE = 0.8</i>

Ainsi, si on a $PS \in [0.116 ; 0.326]$ et $PM \in [0.138 ; 0.158]$, alors EE est l'union de $\{0\}$ et $\{0.2\}$ (union des deux première règles de la base, qui correspondent aux conditions d'entrée). Puisque le segment final est continu et contient toutes les valeurs atteignables par les règles concernées dans la base, on a donc : $EE \in [0 ; 0.2]$. Si PM est inclus dans un état, ce n'est pas le cas de PS dont les valeurs appartiennent à deux états. PS est le critère déterminant pour la borne supérieure, et appartient à hauteur de $\frac{0.126}{0.2} = 0.63$ à l'état supérieur. La borne supérieure ajustée est donc de $2 \times 0.63 = 1.26$. D'où, si $PS \in [0.116 ; 0.326]$ et $PM \in [0.138 ; 0.158]$, alors $EE \in [0 ; 0.126]$.

De la même façon, on obtient les autres bases de règles secondaires suivantes :

Pour la fonction **érosion interne** :

<i>IF (FI₀, ETA₀), THEN EI = 0</i>	<i>IF (FI₁, ETA₀), THEN EI = 0.2</i>
<i>IF (FI₀, ETA₁), THEN EI = 0.3</i>	<i>IF (FI₁, ETA₁), THEN EI = 0.5</i>
<i>IF (FI₀, ETA₂), THEN EI = 0.6</i>	<i>IF (FI₁, ETA₂), THEN EI = 0.8</i>

Pour la fonction **érosion** :

<i>IF (EE₀, EI₀), THEN E = 0</i>	<i>IF (EE₂, EI₀), THEN E = 0.2</i>
<i>IF (EE₀, EI₁), THEN E = 0.3</i>	<i>IF (EE₂, EI₁), THEN E = 0.5</i>
<i>IF (EE₀, EI₂), THEN E = 0.6</i>	<i>IF (EE₂, EI₂), THEN E = 0.8</i>
<i>IF (EE₁, EI₀), THEN E = 0.2</i>	<i>IF (EE₃, EI₀), THEN E = 0.4</i>
<i>IF (EE₁, EI₁), THEN E = 0.5</i>	<i>IF (EE₃, EI₁), THEN E = 0.7</i>
<i>IF (EE₁, EI₂), THEN E = 0.8</i>	<i>IF (EE₃, EI₂), THEN E = 1</i>

Pour la fonction **événement redouté** :

<i>IF (E₀, IM₀), THEN ER = 0</i>	<i>IF (E₁, IM₀), THEN ER = 0.3</i>
<i>IF (E₀, IM₁), THEN ER = 0.3</i>	<i>IF (E₁, IM₁), THEN ER = 0.6</i>
<i>IF (E₀, IM₂), THEN ER = 0.6</i>	<i>IF (E₁, IM₂), THEN ER = 0.9</i>

Nous avons à présent toutes les bases de règles de l'arbre des causes. Nous pouvons donc injecter les valeurs de départ et obtenir des résultats pour chaque fonction de l'arbre. Ces bases de règles resteront inchangées aussi longtemps qu'aucune nouvelle donnée utilisée pour les construire ne s'ajoute ou se modifie. L'expert peut donc conserver ces bases de données et injecter les valeurs de base, par exemple tous les deux ans, et obtenir directement des résultats à tous les niveaux de l'arbre des causes.

Pour illustrer l'utilisation, prenons l'exemple suivant : sur le barrage de Serre-Ponçon, l'expert relève les critères des bases primaires suivants :

Fonction protection de la surverse :

Défaillance des vannes : V₀

Tassement du barrage : T₀

Sollicitations exceptionnelles : SE₀

Obstruction de l'EVC : EVC₁

Fonction étanchéité :

Dégradation des matériaux d'étanchéité : E_0

Agressions extérieures : A_1

Vieillessement de la structure GC : VS_1

Fonction filtration :

Agresseurs naturels : AN_1

Pollution : P_0

Contraintes mécaniques : CM_1

Fonction protection mécanique :

Vieillessement propre au GC : VGC_1

Vieillessement dû aux agressions chroniques : VAC_1

Fonction résistance mécanique :

Dégradations environnementales : DE_0

Perte de caractéristiques mécaniques : PCM_1

Fuites : F_0

Les règles des bases primaires concernées se déroulent ainsi :

IF (V_0, T_0, SE_0, EVC_1), *THEN* $PS \in [0.037; 0.237]$

IF (E_0, A_1, VS_1), *THEN* $ETA \in [0.305; 0.345]$

IF (AN_1, P_0, CM_1), *THEN* $FI \in [0.402; 0.442]$

IF (VGC_1, VAC_1), *THEN* $PM \in [0.416; 0.436]$

IF (F_0, DE_0, PCM_1), *THEN* $RM \in [0.169; 0.209]$

Donc : PS est à la fois sur PS_0 et PS_1 , PM est sur PM_1 , ETA est sur ETA_1 , FI est sur FI_1 et RM est à la fois sur IM_0 et IM_1 .

Les règles des bases secondaires concernées se déroulent ainsi :

IF (PS_0, PM_1), *THEN* $EE = 0.2$

IF (PS_1, PM_1), *THEN* $EE = 0.4$

IF (FI_1, ETA_1), *THEN* $EI = 0.5$

Soit $EE \in [0.237 ; 0.336]$, donc EE est inclus dans EE_1 . Or EI est inclus dans EI_1 . D'où :

IF (EE_1, EI_1), *THEN* $E = 0.5$

Soit E est inclus dans E_1 . Les dernières règles sont :

IF (E_1, IM_0), *THEN* $ER = 0.3$

IF (E_1, IM_1), *THEN* $ER = 0.6$

Soit $ER \in [0.435 ; 0.533]$

(RM appartient à 77,5% à IM_0 sur une amplitude de 0.3 soit 0.233 de l'amplitude générée pour la borne maximum, $0.3 + 0.233 = 0.533$; de la même façon RM appartient à 22.5% à IM_1 qui a une amplitude de 0.6, d'où une borne minimum de $0.3 + 0.135 = 0.435$)

B. Discussion des résultats

La première observation est que la simplicité des bases secondaires par rapport aux bases primaires mène à des résultats plus « tranchés » (par exemple pour une base primaire, on obtient un segment du type $[0.209 ; 0.269]$ contre un résultat exactement égal à 0.5 pour une base secondaire). Néanmoins, la précision des bases primaires se retrouve dans l'affinage des bornes obtenues dans les bases secondaires.

Un des objectifs que nous cherchions à atteindre est de tenir compte de l'heuristique des experts et des biais cognitifs auxquels ils sont soumis. Nous proposons ici de reprendre les biais cognitifs introduits dans la partie I.C.b et de proposer des pistes expliquant en quoi la méthode permet de diminuer l'impact des biais cognitifs. Afin de s'assurer que ces pistes se vérifient, il reste cependant nécessaire de confronter la méthode à plusieurs cas d'étude réels. Les analyses suivantes sont donc, en l'état, hypothétiques.

- Biais de récence :

Les bases de règles sont construites pour chaque ouvrage. Une fois terminées, elles évoluent en fonction de l'état des connaissances. Néanmoins, elles seront réutilisées telles qu'elles, ceci en dehors de tout autre contexte. Les événements récents n'auront donc aucun impact sur les règles. Le jugement de l'expert ne se faisant au final que sur les états de critères, qui ont des valeurs objectives car observables physiquement, il est désormais impossible que le biais de récence ait un impact dans le jugement des états de critères, ni dans la base de règles. Nous en déduisons que la méthode proposée n'autorise plus le biais de récence une fois la base formée. Néanmoins, un biais de récence peut toujours apparaître pendant le processus de construction d'une base de règles, notamment lorsque l'expert va modifier ses comparaisons deux à deux en fonction d'un événement récent marquant son opinion. Ce problème est naturellement supprimé à terme, d'une part lorsque la base de règles évoluera (les événements ne seront plus récents) ou simplement eu égard des résultats qui paraîtront tout de suite erronés si le biais est trop important.

- Biais de simple exposition :

La construction des bases de règles induit des comparaisons deux à deux des états de critères. Un biais de simple exposition pourrait apparaître entre deux ouvrages. Mais cette comparaison par paires permet d'en diminuer grandement l'impact, puisque l'expert devra comparer une donnée potentiellement sujette à ce biais (car récurrente entre les ouvrages) avec toutes les autres données qui, elles, sont différentes d'un ouvrage à l'autre. Le biais de simple exposition est donc très limité par l'utilisation de la méthode introduite dans la thèse.

- Biais d'ancrage :

Quel que soit le contexte dans lequel une étude de danger nécessitant la méthode proposée dans cette thèse sera produite, les bases de règles existeront déjà, et il ne sera demandé à l'expert que de juger de l'état des critères. Changer le contexte d'une étude n'impliquera aucune modification de l'appréciation des états de

critères, qui sont une donnée physique objective. Le biais d'ancrage est donc limité grâce à la méthode.

- Biais de halo :

Grâce à la méthode, l'expert n'a plus la possibilité de modifier l'impact d'un critère ou d'un état de critère sur le résultat final sans devoir modifier toute la base de règles. Or, modifier toute la base de règles doit être justifié de façon rigoureuse, ce qui ne sera pas possible si la motivation est le biais de halo. Néanmoins, à nouveau, pendant la construction de la base de règles, l'expert peut modifier inconsciemment les votes d'un état de critère de façon favorable ou défavorable à cause de ce biais.

- Biais d'illusion de savoir :

De la même façon, une fois les bases de règles construites, un expert n'a plus la possibilité de la modifier sans une motivation claire et rigoureuse, ce qui réduit considérablement l'impact de ce biais dans le temps, puisque les bases de règles, une fois construites, interdisent ce biais. Ce biais peut cependant apparaître lors de la création des bases de règles.

- Biais de confirmation d'hypothèse :

Par construction de méthode, il est impossible qu'un expert soit soumis à ce biais. En effet, la méthodologie impose la prise en compte de toutes les informations pertinentes, sans quoi les bases de règles ne peuvent être construites. Même si l'expert pense avoir vu davantage d'informations allant dans le sens de sa pensée pendant le processus de construction des bases de règles, il n'a aucun moyen d'influencer le résultat dans ce sens.

- Biais de l'effet de seuil :

Ici également, le biais est rendu impossible. En effet, si un état de critère est proche d'un seuil, son traitement sera de toute façon identique : soit un critère prend un état, soit il en prend un autre, la

méthode n'autorise pas de quantifier un état. L'expert reste libre de faire un commentaire dans l'étude de danger sur le fait que certains états sont proches d'un seuil, mais le résultat final sera le même et non influencé par le biais.

- Biais d'évaluation de probabilités :

Dans la méthode proposée, les conséquences d'un événement redouté ne sont pas du tout prises en compte. En outre, en s'affranchissant d'une approche probabiliste classique, nous nous affranchissons de fait de ce biais cognitif.

- Biais de représentativité :

Compte tenu de la méthode de comparaisons par paires, effectuée sur des ouvrages différents possédant des critères et états de critères différents, des données n'apparaissent que rarement comme familières, ce qui limite l'impact de ce biais. En outre, une fois les bases de règles créées, la méthode n'autorise plus ce biais.

- Biais de disponibilité :

De la même façon que pour le biais de confirmation d'hypothèse, l'expert est obligé pour construire une base de règles de tenir compte de toutes les informations nécessaires et d'en tenir compte de façon équivalente. Ce biais est donc rendu impossible par la méthode.

- Biais d'illusion des séries :

Ce biais cognitif est toujours possible lors de la construction des bases de règles. Par exemple, entre états de critères proches entre plusieurs ouvrages, l'expert peut avoir l'illusion que les votes de ces états de critères suivent un schéma, ce qui lui fera penser qu'il existe un lien non visible *a priori*. Ce biais reste réduit du fait de la multiplication des opérations à effectuer par l'expert pour produire une base de règles, ce qui éloigne la probabilité qu'il perçoive effectivement un lien d'un ouvrage à l'autre.

- Biais du paradoxe d'Ellsberg :

Comme nous l'avons vu précédemment, la visibilité même de l'incertitude par l'expert est modifiée au point qu'il ne la tient plus en compte. Sans la conscience de cette incertitude, le biais d'Ellsberg n'a plus de raison d'exister. Cependant, cette remarque est à nuancer par la partie relative aux loteries (dans le but de déterminer l'amplitude de la partie décisionnelle) qui, elle, peut tout à fait être soumise au biais d'Ellsberg. Ce biais pourra donc toujours avoir un impact, mais minimisé et seulement sur une partie de la méthode.

Ainsi, nous voyons que la méthode proposée a un effet bénéfique sur tous les biais cognitifs présentés dans la partie I.C.b. Nous pouvons pressentir que certains biais disparaissent totalement, d'autres voient leur impact fortement réduit. En outre, à condition de porter un soin particulier lors de la création des bases de règles pour la première fois pour chaque ouvrage, il pourrait être possible de réduire encore, presque jusqu'à tous les supprimer, l'impact des biais cognitifs. Afin de s'assurer de la présente analyse sur la diminution de l'impact des biais cognitifs, il reste néanmoins primordial de confronter la méthode à plusieurs cas d'étude et d'évaluer les différences avec les méthodes traditionnelles.

Par ailleurs, nous avons pu montrer que certains outils utilisés, comme le score de Kemeny ou la valeur de Shapley, permettaient d'obtenir une estimation du maximum de vraisemblance des avis d'expert. Ce résultat est important, bien qu'il faille le nuancer à cause des difficultés liées à l'élicitation des avis d'expert, en particulier lors des questionnaires et loteries proposées ici. Ce point sera discuté plus en détail dans la partie V.B.b.

Afin d'obtenir la méthode sous la forme proposée dans le présent mémoire, nous avons dû introduire de nouveaux concepts et mélanger des outils issus de diverses disciplines. Si nous sommes convaincus que cette méthode apporte une amélioration sensible aux pratiques actuelles, le prix à payer est d'en faire l'acceptation par les utilisateurs

(experts et décideurs), notamment eu égard à son approche originale et de l'introduction de termes différents. La méthode présentée peut être cognitivement difficile à comprendre et à accepter sans formation préalable. Néanmoins, nos échanges avec les experts d'EDF, issus de la Division Technique Générale et spécialistes des barrages, nous rendent très optimistes quant à l'applicabilité de cette méthode. Pour des raisons de confidentialité évidentes, il n'a pas été possible de soumettre la méthode à des cas d'étude réels, en collaboration avec les experts. Dans tous les cas, un soin particulier a été apporté pour rendre la méthode opérationnelle, tandis que l'auditabilité des études de danger l'utilisant devrait être considérablement améliorée. A nouveau, seule la confrontation de la méthode à un cas d'étude concret avec des experts destinés à en être les utilisateurs, permettra à terme d'affirmer avec certitude les améliorations apportées.

V] Conclusion et perspectives de recherche

A. Discussion de la méthode proposée

La méthode développée dans cette thèse semble très bien répondre à la problématique. D'une part, l'impact de l'heuristique des experts est minimisé, d'autre part l'incertitude est prise en compte de façon visible dans les résultats, et enfin la méthode est parfaitement auditable. En effet, à tout moment, quelle que soit l'étape de la méthodologie, l'utilisateur est capable de justifier de façon rigoureuse les choix effectués et la façon dont l'information est traitée. L'obtention de résultats quantifiés sur une échelle ordonnée est en outre une information précieuse pour un décideur, par exemple lorsqu'il s'agit d'allouer des ressources de maintenance.

Il est notable que la méthode présentée ici permette d'obtenir des résultats pour chaque noeud d'un arbre de causes, permettant à l'utilisateur de cibler aussi précisément qu'il le souhaite les risques recherchés. De plus, ces résultats sont toujours quantifiés sur une échelle ordonnée, permettant au décideur d'avoir une vision aussi précise qu'exploitable sur les risques de son système.

Un point important qui mérite d'être discuté est la méthode d'obtention de l'amplitude du segment pour la partie décisionnelle des règles logiques. D'une part, comme nous le verrons dans la partie V.B.b, le questionnaire sous la forme d'une loterie est largement perfectible. D'autre part, si la nécessité d'obtenir cette information est évidente d'un point de vue de la rigueur scientifique, son utilisation d'un point de vue opérationnel est plus discutable. En effet, un décideur sera souvent plus intéressé par la seule information de la valeur moyenne d'affectation, et selon ses besoins il n'accordera pas toujours d'importance à l'amplitude

du segment. Il est de plus à noter que selon l'incertitude liée au système, cette amplitude peut prendre des proportions qui font perdre toute signification au résultat, allant même jusqu'à potentiellement violer la dominance stochastique au premier ordre au niveau local, alors qu'en réalité, notre méthode interdit la violation de la dominance, ne serait-ce que par l'utilisation d'outils (comme le score de Kemeny) qui le garantissent. Dans la pratique, le décideur peut choisir de ne retenir que la valeur moyenne d'affectation et tirer parti au mieux de l'opérationnalisation de la méthode.

Nous n'avons pas traité dans ce mémoire la question de la validation des bases de règles. En effet, les bases de règles devraient être validées, après leur obtention, par des méthodes spécifiques. La méthode relevant d'une certaine originalité, le développement de méthodes de validation peut constituer un travail important si le décideur cherche à optimiser l'auditabilité de la méthode d'un point de vue opérationnel. Une telle étude peut être envisagée dans l'avenir.

Nous avons pu proposer dans ces travaux un moyen de gérer les risques original, empruntant des outils de diverses disciplines utilisés vers un objectif commun, et constituant *in fine* un estimateur du maximum de vraisemblance. Ce résultat constitue une amélioration notable, voire dans certains cas (en particulier lorsque l'incertitude est la plus forte ou l'impact de l'heuristique des experts le plus élevé) considérable, des pratiques traditionnellement utilisées. En particulier, il est intéressant de rappeler que la pratique la plus courante reste, hélas, l'utilisation de diagrammes de Farmer, que notre méthode surpasse en tout point.

Comme toutes les méthodes originales, cependant, celle-ci peut encore être enrichie de différentes façons, ce qui peut constituer autant d'axes de recherche pour l'avenir, qu'il s'agisse du traitement des cas avec plusieurs experts, des questionnaires qui leur sont posés, de méthodes de validation des bases de règles, ou encore des questions d'opérationnalisation et de programmation de la méthode.

B. Perspectives de recherche

a. Méthodes d'agrégation

Le plus souvent, les études de danger menées au sein d'une entreprise sur un système de type « ouvrage de génie civil » sont issues du travail d'un seul expert, relu et corrigé par d'autres personnes à différents niveaux. L'information d'expertise est cependant le plus souvent relevée par une seule personne. Cependant, bien que l'étude proposée ici permette de contrôler l'heuristique des experts mieux que la plupart des autres méthodes existantes, il est abusif de prétendre qu'elle s'en affranchit complètement. Si l'information d'expertise est relevée par plusieurs experts indépendamment les uns des autres, sur un même système et à une même période, il est prévisible qu'elle varie légèrement. Il est difficile de calculer la variation exacte qui résulterait de ces expertises séparées, même avec un travail de fond utilisant des outils des sciences de la décision ou de la psychologie.

Dans le cas où plusieurs experts proposent des expertises sur un même système à des intervalles très proches (par exemple au cours d'une même année), il peut être intéressant pour le décideur d'avoir à disposition des méthodes d'agrégation des informations d'expertise. Il est très peu probable que des experts observent des états de critère différents, ainsi une méthode d'agrégation pour l'exploitation des bases de règles semble inutile. Néanmoins, lors de la construction des règles, il est possible, par exemple, que différents experts fassent voter les états de critères différemment, ou répondent différemment aux loteries. C'est dans ces cas que des méthodes d'agrégation prennent un sens.

L'avantage de faire appel à plusieurs experts est justement de pouvoir agréger leurs avis pour être au plus près d'un maximum de vraisemblance « partagé » par les experts et donc d'avoir des règles logiques représentant au mieux l'information d'expertise. Il existe alors deux grandes familles de méthodes permettant d'agréger les avis des experts. La première grande famille consiste à faire communiquer les experts entre eux en amont du processus de création des règles logiques. Il peut être envisagé, par exemple en utilisant des méthodes issues des sciences de la négociation, d'aider les experts à se mettre d'accord sur les votes et les loteries lors de la création des bases de règles. Il peut également être envisagé de faire révéler, en utilisant les sciences de la décision, à chaque expert des approches comparables entre eux à l'aide de leurs opinions, facilitant la communication et permettant de converger plus rapidement vers une solution satisfaisante pour tous les experts.

L'autre grande famille de méthodes est d'agréger les résultats des experts donnés indépendamment les uns des autres. Ainsi, on peut demander aux experts, sans se consulter entre eux (le mieux étant alors qu'ils ignorent jusqu'à l'existence d'autres experts), de fournir des résultats sur l'expertise demandée. A partir de là, il est possible de développer des méthodes d'agrégation, quantitative ou qualitative, cherchant un compromis optimal entre les diverses opinions. Il est enfin possible de combiner des méthodes des deux grandes familles. Par exemple, on peut imaginer demander aux experts leurs opinions séparément, les agréger, puis soumettre ces résultats lors d'une réunion les regroupant tous et de s'en servir comme base pour négocier une solution que tous les experts accepteraient.

Dans cette optique, il existe de nombreux travaux pouvant éclairer ce problème. Bien que le travail de thèse n'ait pas cherché à en révéler la meilleure, il pourrait être intéressant, lors de recherches ultérieures, d'en dresser un état de l'art et de chercher celle qui serait la plus appropriée ou, le cas échéant, inspirer une nouvelle méthode qui irait dans ce sens. A titre d'exemple, nous allons esquisser ici une méthode développée en 2010 au sein d'EDF lors d'un stage de master de recherche mené par [Toret, 2010], présentée en annexe 19, qui semble

particulièrement bien s'adapter à nos besoins. L'idée générale est de regrouper les experts en sous-groupes, suite à une première expertise de leur part menée indépendamment les uns des autres, afin d'utiliser ces sous-groupes pour comprendre leur heuristique et s'en servir comme base de négociation en vue d'une convergence de tous les sujets vers un résultat jugé optimal.

Cette méthode a pour avantage, compte tenu de la méthode proposée dans cette thèse, de pouvoir agréger des informations qualitatives ou quantitatives et de travailler sur des pré-ordres de préférence. Ces pré-ordres peuvent avoir une signification importante dans le cadre de la thèse : il s'agit de préférences des experts pour chaque état de critère, ce qui permet d'avoir une vision très précise des divergences d'expertise, en particulier quelles sont les paires exactes d'états de critères dont la comparaison est différente selon les experts. En ciblant au plus près les différences, non seulement il est possible de valider automatiquement une large portion des résultats d'expertise (toutes les comparaisons pour lesquelles les experts sont d'accord), mais il est également plus facile de discuter avec les experts sur des points bien identifiés.

La méthode développée pour l'agrégation des avis d'experts repose un avis d'expertise multifactoriel et additif. Un certain nombre de critères sont présentés aux experts, qui doivent répartir une allocation donnée suivant l'impact de chaque critère au risque associé à un événement redouté. Dans notre exemple, cela correspond à utiliser les valeurs de Shapley des critères (par définition additives). On peut ainsi utiliser les valeurs de Shapley déduites des processus de vote des experts et agréger leurs avis directement à cette étape, plutôt que de chercher à analyser chaque vote séparément, ce qui prendrait un temps considérable.

Il s'agit dans un premier temps d'accorder un rang à des paires d'experts en utilisant une formule pour chaque paire. Cette formule est appelée « formule A ». Ces rangs permettent ensuite de regrouper les experts si les rangs des permutations de chaque paire sont suffisamment

proches, en s'assurant qu'un expert n'appartient pas à deux groupes simultanément. On obtient en effet un indice qui représente la distance entre les avis des experts. Le détail de cette méthode est fourni en annexe 19.

Cette méthode se prête particulièrement bien à la problématique soulevée par la construction des bases de règles logiques avec plusieurs experts. D'une part parce qu'il est possible de d'utiliser cette méthode au plus proche de l'obtention finale des règles (plus précisément après l'obtention des valeurs de Shapley), ce qui permet d'éviter de devoir refaire tout le processus d'agrégation si, par exemple, un expert supplémentaire apporte sa propre opinion tardivement, et ce qui permet de limiter le travail à effectuer en diminuant les problèmes de propagation d'incertitude liés à une agrégation trop anticipée. D'autre part, la méthode est parfaitement applicable car les pré-requis de son utilisation sont tous vérifiés : le nombre de critères est fini et connu et le décideur possède des valeurs additives représentant leur impact sur un risque donné (la valeur de Shapley des critères) issu du processus d'expertise. L'obtention des sous-groupes permet ensuite de discuter avec les experts et de converger rapidement vers une opinion acceptée par tous en maîtrisant davantage l'impact de leur heuristique par rapport à une négociation sans cette information, mathématique, sur la visualisation de leur heuristique et leur regroupement en sous-groupes.

b. Questionnaires aux experts

La question de l'élicitation des avis d'expert est centrale en management des risques, et réussir à faire révéler à un expert, ou au moins à l'aider à révéler, son opinion sur un sujet d'étude complexe, peut être une gageure. D'une part, les experts n'utilisent pas toujours le

même vocabulaire, les mêmes notions qu'un décideur ou un gestionnaire de risques, sans que cela ne soit évident au travers des échanges. Cela peut mener à des quiproquos, des approximations, des simplifications abusives ou même des divergences notables dans la compréhension du système et des risques associés. D'autre part, les experts exposent leur jugement au regard de leur propre expérience, de leur propre heuristique et d'un processus cognitif particulièrement délicat à modéliser.

Ce problème est d'autant plus complexe que les experts ont eux-mêmes des heuristiques très différentes et des expériences qui vont orienter leur jugement vers des appréciations sensiblement différentes. De nombreuses recherches ont tenté de répondre à cette problématique, par exemple en dressant des profils types parmi les experts en fonction de certains paramètres qu'on est capable de modéliser, comme l'optimisme ou l'aversion au risque (voir par exemple les travaux de [Abdellaoui *et al.*, 2010]). D'autres ont tenté d'approcher ces limites de façon plus générale en révélant le processus cognitif à l'œuvre lors d'un jugement (voir par exemple les travaux de [Todd & Gigerenzer, 2000]). La question n'est cependant pas tranchée, et des disciplines scientifiques différentes (sociologie, psychologie, science de la décision etc.) proposent des solutions différentes et non convergentes.

Il en résulte que la question fondamentale de l'élicitation des avis d'experts reste ouverte. Or, cette question prend un sens particulier et identifié dans le présent travail de thèse. A deux moments différents se pose la question de comprendre au mieux l'opinion des experts : lors des questions sur les préférences d'états de critères pour la construction des tableaux de vote (voir IV.A.c), et lors des questions dont l'objectif est de révéler l'incertitude avec laquelle l'expert considère les résultats des bases de règles (voir IV.A.e). Dans le premier cas, nous avons demandé aux experts un état de critère seuil à partir duquel le critère associé influe davantage sur un risque que si un autre critère prend un état donné. Dans le second cas, nous avons utilisé une élicitation indirecte sous la forme d'une loterie. Dans les deux cas, nous avons cherché à proposer un moyen cognitivement acceptable, simple et rapide, afin que l'expert

puisse révéler son opinion. Dans aucun des deux cas, nous ne prétendons que ces solutions sont optimales.

Etant donné le caractère opérationnel de la thèse et le besoin pour notre méthode d'être comprise et utilisable par des experts, il nous est paru essentiel d'utiliser des moyens d'élicitation intelligibles et acceptés. Compte tenu du nombre d'opérations à effectuer pour un système donné, afin d'aider à l'élicitation des avis des experts, il nous est également paru indispensable que ces moyens soient rapides. Néanmoins de larges améliorations peuvent être apportées aux solutions que nous proposons. Pour des cas comparables, [Ayyub, 2001] propose de nombreuses approches différentes, dont nous nous sommes inspirés pour les questionnaires. Les différentes solutions ont été soumises aux experts d'EDF, et leur retour nous a permis d'identifier celles qui étaient les plus cognitivement acceptables pour eux. Cependant, ces approches ne tiennent pas compte des progrès récents dans différentes disciplines universitaires. Une étude plus poussée sur moyens d'élicitation pourrait considérablement diminuer les écarts entre l'opinion des experts et les données recueillies. Ce travail nous a semblé néanmoins trop éloigné de notre problématique et trop conséquent pour figurer dans la thèse. Nous sommes convaincus que les outils que nous avons développés ici permettent de réduire de façon très sensible la part que joue l'incertitude et l'heuristique des experts dans la gestion des risques de systèmes complexes comme les barrages. En montrant que les outils comme le score de Kemeny ou la valeur de Shapley permettaient de travailler sur des maximums de vraisemblance des avis d'experts, développer les questionnaires proposés aux experts nous semble le seul moyen d'améliorer encore davantage les possibilités d'élicitation.

c. Programmation et opérationnalisation

La méthode développée dans la thèse est largement programmable. En vue de son opérationnalisation, il semble même

nécessaire d'en faire un programme, connu, compris et accepté par les experts.

Un tel programme peut se présenter sous la forme d'une interface à partir de laquelle l'expert peut créer un nouveau fichier, correspondant à un ouvrage particulier. Pour ce fichier, il importe un arbre des causes type pour la famille à laquelle l'ouvrage appartient. Le programme propose alors une liste de critères propres à cette famille. L'expert choisit les critères pertinents, peut éventuellement en ajouter, et les regroupe par familles. Le programme peut également proposer des états de critères, sinon l'expert les crée lui-même. Une fois ce travail effectué, il ne lui reste alors plus qu'à répondre aux questions du programme, qui correspondent aux questions pour la construction des bases de règles. Une fois toutes les questions répondues, le programme est normalement capable d'en déduire immédiatement toutes les règles logiques de toutes les bases pour l'arbre des causes choisi. Il doit pouvoir ensuite être possible de sauvegarder ces bases, et de constituer ainsi un fichier pour chaque ouvrage à étudier, où les bases de règles sont déjà construites.

L'expert n'a alors plus qu'à ouvrir ce fichier et choisir un état pour chaque critère, suite à quoi le programme propose immédiatement un résultat pour chaque fonction dans l'arbre des causes. Ces fichiers sont réutilisables aussi longtemps que l'état des connaissances n'est pas modifié pour l'ouvrage correspondant à chaque fichier.

L'utilisation d'un tel programme diminuerait considérablement le temps d'utilisation de la méthode proposée ici. Non seulement la méthode permet alors de fournir des résultats beaucoup plus fins, robustes et auditables que les autres méthodes, mais en plus elle serait nettement plus rapide à utiliser. Nous sommes convaincus que la méthode développée dans cette thèse représente ainsi un apport important comparé aux méthodes utilisées actuellement.

C. Conclusion générale

L'apport principal de ce travail de thèse est le développement d'une méthode originale adaptée à une problématique particulière. Nous avons dû, relativement à cette problématique, envisager le risque de façon différente de ce qui est fait habituellement, tout en se reposant sur des outils familiers de la recherche dans diverses disciplines. L'idée générale d'utiliser les règles logiques n'est pas nouvelle, mais la façon de construire ces règles n'était jusqu'alors pas satisfaisante, faisant de l'utilisation des règles logiques une méthode marginale face aux méthodes statistiques et probabilistes rencontrées dans l'industrie. Pourtant, à l'aide d'une méthodologie efficace et rigoureuse, nous avons vu que les règles logiques permettent d'aller beaucoup plus loin que ces méthodes traditionnelles, jusqu'à pouvoir gérer au mieux les risques sur un système où l'incertitude est trop importante et où l'heuristique des experts a un impact non négligeable. De fait, nous avons pu démontrer que l'utilisation des outils tels que le score de Kemeny et la valeur de Shapley permettent même d'avoir un estimateur du maximum de vraisemblance de l'information d'expertise au cours de la construction des règles, ce qui est un résultat particulièrement intéressant.

Ce résultat d'estimateur du maximum de vraisemblance de l'information d'expertise a pour conséquence principale une prise en compte inhérente des heuristiques des experts, et le format de la méthode permet de prendre également en compte l'incertitude du système, au lieu de l'ignorer ou de la minimiser. Cela permet notamment au décideur de mieux comprendre les résultats, et dans quelle mesure il est possible de comprendre les risques d'un ouvrage de génie civil donné, compte tenu du niveau d'incertitude de l'étude.

La méthode développée, dont une synthèse est présentée au congrès Lambda-Mu 2014 (voir [Toret *et al.*, 2014]) où les présents travaux ont été récompensés par le Prix Recherche & Industrie de l'IMdR, permet au final non seulement d'obtenir un traitement ordinal de

l'information d'expertise, mais elle permet de plus de quantifier les écarts entre les éléments ordonnés. Cette information est d'un intérêt important pour le décideur, par exemple dans le cas d'allocation de ressources de maintenance, ou lorsqu'il s'agit de communiquer avec des organismes extérieurs impliqués dans les risques des structures de génie civil, comme les préfets. De plus, la méthodologie développée répond parfaitement aux besoins d'auditabilité énoncés en début de mémoire : il est possible de justifier à chaque étape, partout et à tout moment, les choix effectués et les résultats obtenus. De plus, si la construction des règles peut être un processus *a priori* fastidieux, elle n'est en réalité pas plus longue que les méthodes utilisées actuellement, et une fois les règles construites, l'utilisation de la méthode est très rapide et les résultats toujours aussi rigoureux, ce qui satisfait également à l'impératif opérationnel de rapidité d'utilisation.

Nous sommes ainsi convaincus que l'apport de la thèse est très important par rapport aux méthodes utilisées traditionnellement en gestion des risques pour les ouvrages de génie civil. Comme toute approche originale, cependant, la méthode développée ici peut encore bénéficier de nombreuses améliorations, que ce soit d'un point de vue opérationnel comme d'un point de vue de l'auditabilité. Dans le premier cas, on pourra imaginer une programmation et/ou un protocole d'utilisation pour les experts, et dans le second une étude approfondie des questionnaires soumis aux experts, voire de façon plus générale de la communication avec eux afin d'élucider au mieux l'information d'expertise.

Bibliographie

- Abdellaoui M., Baillon A., Placido L. & Wakker P., "The Rich Domain of Uncertainty: Source Functions and their Experimental Implementation", *American Economic Review*, 2010
- Abdellaoui M., Bleichrodt H., Paraschiv C., "Loss Aversion under Prospect Theory: a Parameter-Free Measurement", SSRN, 2006
- Allais M., "Le Comportement de l'homme rationnel devant le risque : critique des postulats et axiomes de l'école américaine", *Econometrica*, vol. 21, pp. 503-546, 1953
- Andersen G., Chouinard L. & Foltz S., "Condition Rating Procedures for Earth and Rockfill Embankment Dams", Technical Report REMR-OM-25, USACE, 1999
- Armstrong L., "Dependency Structures of Data Base Relationships", IFIP Congress, pp. 580-583, 1974
- Ayyub B.M., "Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks", CRC Press, 2001
- Azibi R. & Vanderpooten D., "Construction of rule-based assignment models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 138, pp. 274-293, 2002
- Bazerman & Neale, "Negotiating Rationally", *Free Press*, 1992
- Beaudouin F., Avril T., Alessandrini A. & Mosnier D., "Several risk analysis methods to help maintenance for hydropowerplants at EDF", Commission internationale des grands barrages, *Actes du vingt troisième congrès des grands barrages*, Brazilia, 2009
- Beaudouin F., "Traitement multicritère des risques sur des échelles ordinales : inférence de règles logiques", Rapport H-T58-2010-03087-FR- EDF R&D, 2013
- Beaudouin F. & Merad M., "A guidance for implementing decision-aiding in risk management", *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*, Bérenguer, Grall & Guedes Soares (eds), 2011

- Beaudouin F., Meuwisse C. & Augem J., "Assessing proliferation resistance and safeguard efficiency with a rule-based support", ICFO-SI 9, The 9th International Conference on Facility Operations Safeguards Interface, Savannah, 2012
- Beaudouin F. & Munier B., "A revision of industrial risk management: Decisions and experimental tools in risk business", *Journal Risk and Decision Analysis*, 1, pp. 1875-1973, 2009
- Benayou R., Roy B. & Sussman B., "ELECTRE : une méthode pour guider le choix en présence de points de vue multiples", Note de travail 49, SEMA-METRA International, Direction Scientifique, 1966
- Bernier J., Parent E. & Boreux J.J., *Statistique pour l'environnement – Traitement bayésien de l'incertitude*, Tec et doc, Lavoisier, 2000
- Breyse D., "Maîtrise des Risques en Génie Civil", Ed. Lavoisier, ISBN 978-2-7462-2441-4, 2009
- Chateauneuf A. & Cohen M., "Choquet expected utility model: a new approach to individual behavior under uncertainty and to social welfare", in M. Grabisch, T. Murofushi & M. Sugeno (Eds), *Fuzzy Measures and Integrals: Theory and Applications*, pp.289-313, Heidelberg: Physica, 2000
- Chateauneuf A., Eichberger J. & Grant S., "Choice Under Uncertainty with the Best and the Worst in Mind : Neo-additive Capacities", *Journal of Economic Theory*, Vol. 137, pp. 538-567, 2007
- Choquet G., "Theory of Capacities", *Annales de l'Institut Fourier*, 5, pp. 131-295, 1953
- Condorcet, "Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix", Imprimerie Royale, 1785
- Curt C., "Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances", thèse, Université Blaise Pascal – Clermont II, CEMAGREF, 2008
- De Finetti B., "Sul Significato Soggettivo della Probabilità", *Fundamenta Mathematicae* 17, pp.298–329, 1931

- Dempster A. P., "Upper and Lower Probabilities induced by a Multivalued Mapping", *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 38(2), pp. 325-339, 1967
- Diecidue E., Wakker P. & Zeelenberg M., "Eliciting Decision Weights by adapting de Finetti's betting-odds method to prospect theory", *Journal of Risk and Uncertainty*, Springer, Vol. 34(3), pp. 179-199, 2007
- Eichberger J., Grant S. & Kelsey D., "Comparing Three Ways to update Choquet Beliefs", *Economics Letters*, No. 107, pp. 91-94, 2010
- Ellsberg D., "Risk, Ambiguity, and the Savage Axioms", *The Quarterly Journal of Economics*, vol.75, pp. 643-669, 1961
- Farmer R., "Today's risks: thinking the unthinkable", *Nature*, Vol.267, pp. 92-93, 1977
- Figueira J., Greco S. & Ehrgott M., *Multiple Criteria Decision Analysis*, Springer's International Series, 2005
- Foltz S., Howdyshell P. & McKay D., "Understanding Condition Indexes: Current Status and Future Opportunities", Report No ERDC/CERL SR-01, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, 2001
- Gigerenzer G., "On Narrow Norms and Vague Heuristics: A Reply to Kahneman and Tversky", *Psychological Review*, Vol. 103(3), pp. 592-596, 1996
- Gigerenzer G., Hertwig R. & Pachur T., *Heuristics: the Foundations of Adaptive Behaviour*, New York: Oxford University Press, 2011
- Gigerenzer G., *Risk Savvy: How to Make Good Decisions*, Viking Penguin Eds, 2014
- Gilboa I., Schmeidler D., "Additive Representations of Non-Additive Measures and the Choquet Integral", Discussion Paper n° 985, 1992
- Grabisch M., "A constructive Approach to Multicriteria Decision Making", *Traitement du Signal*, vol. 22, n°4, pp. 321-337, 2005
- Hoffman F.O. & Hammonds J.S., "Propagation of Uncertainty in Risk Assessments: The Need to Distinguish Between Uncertainty Due to

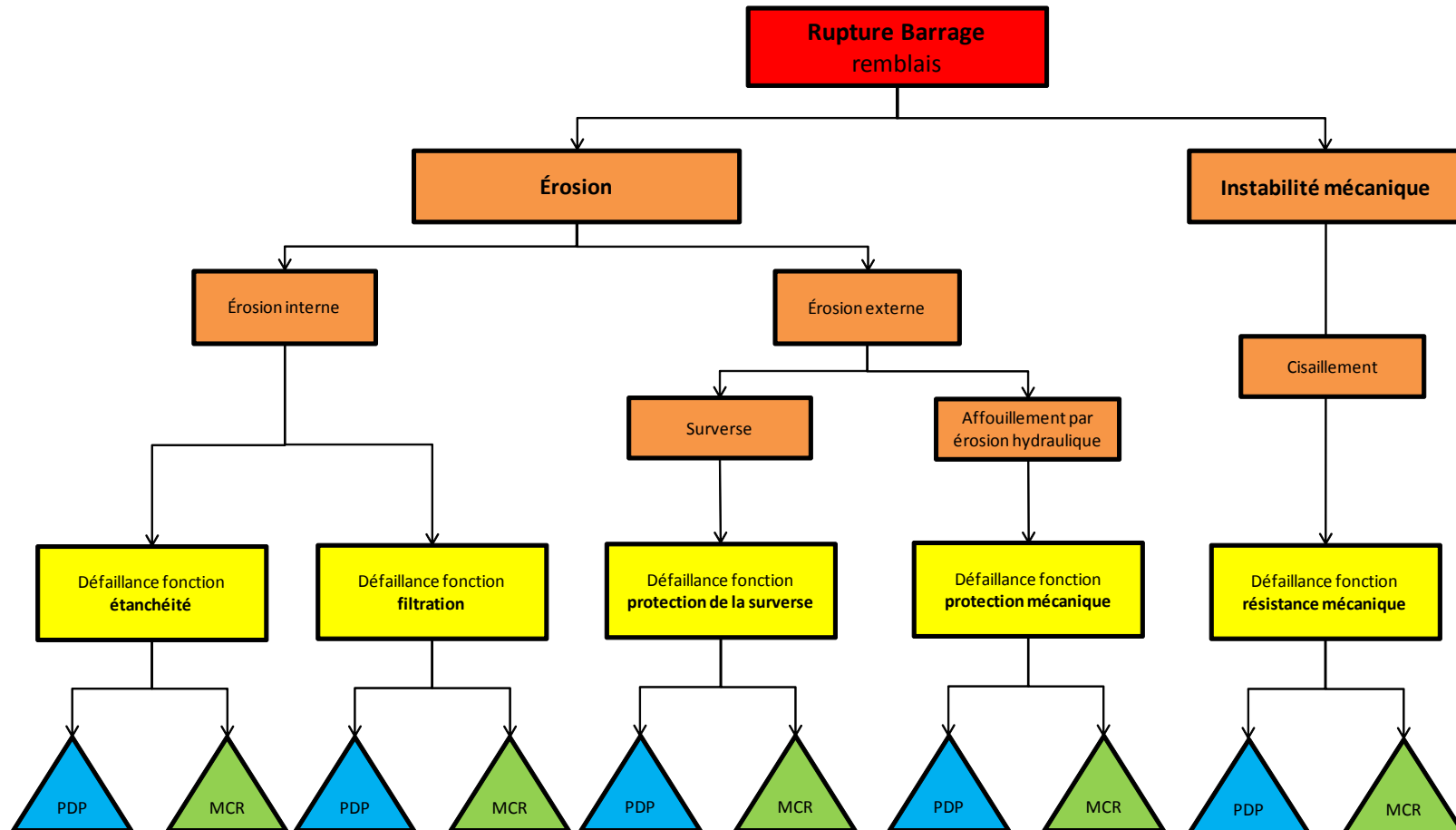
- Lack of Knowledge and Uncertainty Due to Variability », *Risk Analysis*, Vol. 14, No. 5, 1994
- Hoffrage U. & Heimer T., "Models of Bounded Rationality: The Approach of Fast and Frugal Heuristics", *Management Revue*, vol 15, issue 4, pp 437-459, 2004
- Kammoun H., "Elicitation non paramétrique de la fonction d'utilité et l'aversion aux pertes sous l'hypothèse « prospect theory »", thèse ENSAM, ED 471, 2007
- Keeney R.L. & Raiffa H., *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-44185-4, 1993
- Kemeny J., "Mathematics without numbers", *Daedalus*, Vol.88, pp. 577–591, 1959
- Knight F.H., *Risk, Uncertainty and Profit*, Houghton Mifflin Company, 1921
- Lebraty J.F & Pastorelli-Negre I., "Biais cognitifs : quels statuts dans la prise de décision assistée ?", *Système d'Information et Management*, Vol.9, n°3, 2004
- Munier B., "Market Uncertainty and the Process of Belief Formation", *Journal of Risk and Uncertainty*, Vol. 4, pp. 233-250, 1991
- Munier, B., "Markets, Risk and Uncertainty, Essays in Honor of Maurice Allais", *Markets, Risk and Uncertainty*, Kluwer Academic Publishers, pp. 209-232, 1995
- Munier B., Selten R., Bouyssou D., Bourgine P., Day R., Harvey N., Hilton D., Machina M.J., Parker PH., Sterman J., Weber E., Wernerfelt B. & Wensley R., "Bounded Rationality Modeling", *Marketing Letters*, vol. 10:3, pp.233-248, 1999
- Pagetti C., *Module de Sûreté de Fonctionnement*, ENSEEIHT, 2012
- Quiggin J., "Risk perception and risk aversion among Australian farmers", *Australian Journal of Agricultural Economics* 25(2), pp.160–169, 1981
- Roy B., "Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE) ", *La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle*, Vol.8, pp. 57–75, 1968

- Savage L., *The Foundations of Statistics*, John Wiley and Sons, New York, 1954
- Schmeidler, D., "Subjective Probability and Expected Utility without Additivity", *Econometrica*, 57, 571–587, 1989
- Serre D., "Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations", thèse, Université de Marne-la-Vallée, 2005
- Shapley L., "A Value for n -person Games", *Contributions to the Theory of Games*, Vol.2, 1953
- Simon H., "A Behavioral Model of Rational Choice", *Quarterly Journal of Economics*, vol. 69, pp. 99-188, 1955
- Slowinski R., Greco S. & Matarazzo B., "Axiomatization of utility, outranking and decision rule preference models for multiple-criteria classification problems under partial inconsistency with the dominance principle", *Control and Cybernetics*, Vol 31, pp. 1005–103, 2002
- Todd P.M. & Gigerenzer G., "Précis of Simple Heuristics That Make Us Smart", *Behavioral and Brain Sciences*, 23, 727–780, 2000
- Toret J.B., "Implémentation de systèmes d'aide à la décision au sein des organisations : entre aide à la coordination et aide à la négociation", *Mémoire de master de recherche*, Arts & Métiers Paristech, GRID & EDF, 2010
- Toret J.B., Beaudouin F., Meuwisse C., Sausse J. & Munier B., "To a new decision-based risk assessment method for dams", Congrès Lambda-Mu, 2014
- Tversky A. & Kahneman D., "Prospect theory: An analysis of decisions under risk", *Econometrica*, Vol. 47(2), 1979
- Von Neumann J. & Morgenstern O., *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, 1947
- Winkler R., "Ambiguity, Probability, Preference and Decision Analysis", *Journal of Risk and Uncertainty*, Vol. 4, pp. 285-297, 1991
- Young H. P., "Optimal Voting Rules", *Journal of Economic Perspectives* 9, no.1, pp. 51–64, 1995

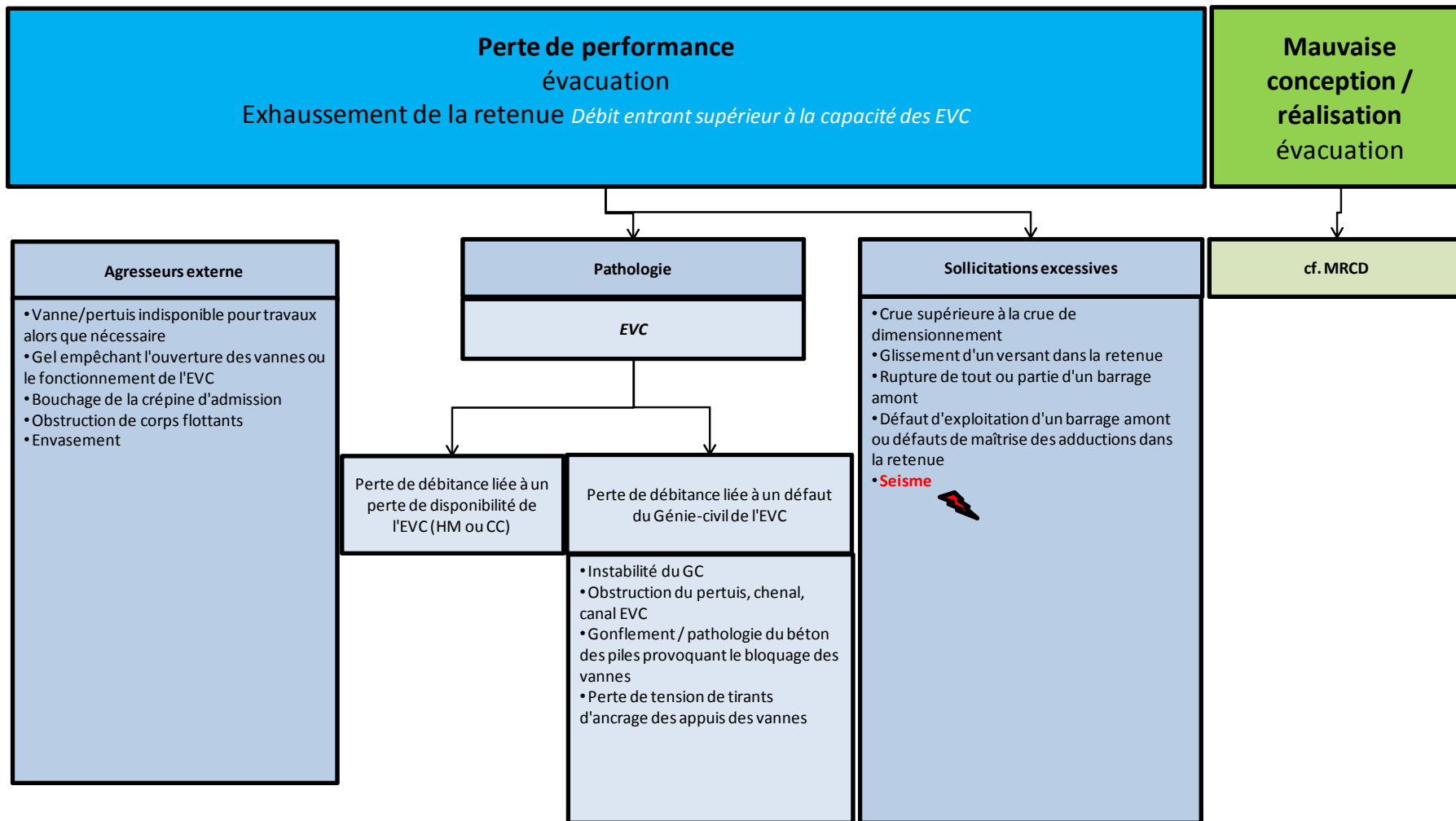
- Young H. P., "Optimal ranking and choice from pairwise comparisons", *Information pooling and group decision making* edited by B. Grofman and G. Owen, JAI Press, pp. 113–122, 1986
- Young H. P., "Optimal Voting Rules", *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 9, no.1, pp. 51–64, 1995
- Young H. P., "Group choice and individual judgments", *Perspectives on public choice: a handbook*, Chapter 9, edited by Dennis Mueller, Cambridge UP., pp.181 –200, 1997
- Young H. P. and Levenglick A., "A Consistent Extension of Condorcet's Election Principle", *SIAM Journal on Applied Mathematics* 35, no. 2, pp. 285–300, 1978
- Young H.P., "Social choice scoring Functions," *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 28, pp. 824-838, 1975
- Zimmermann H., "An application-oriented view of modeling uncertainty", *European Journal of Operational Research*, 122:190-198, 2000

Annexes

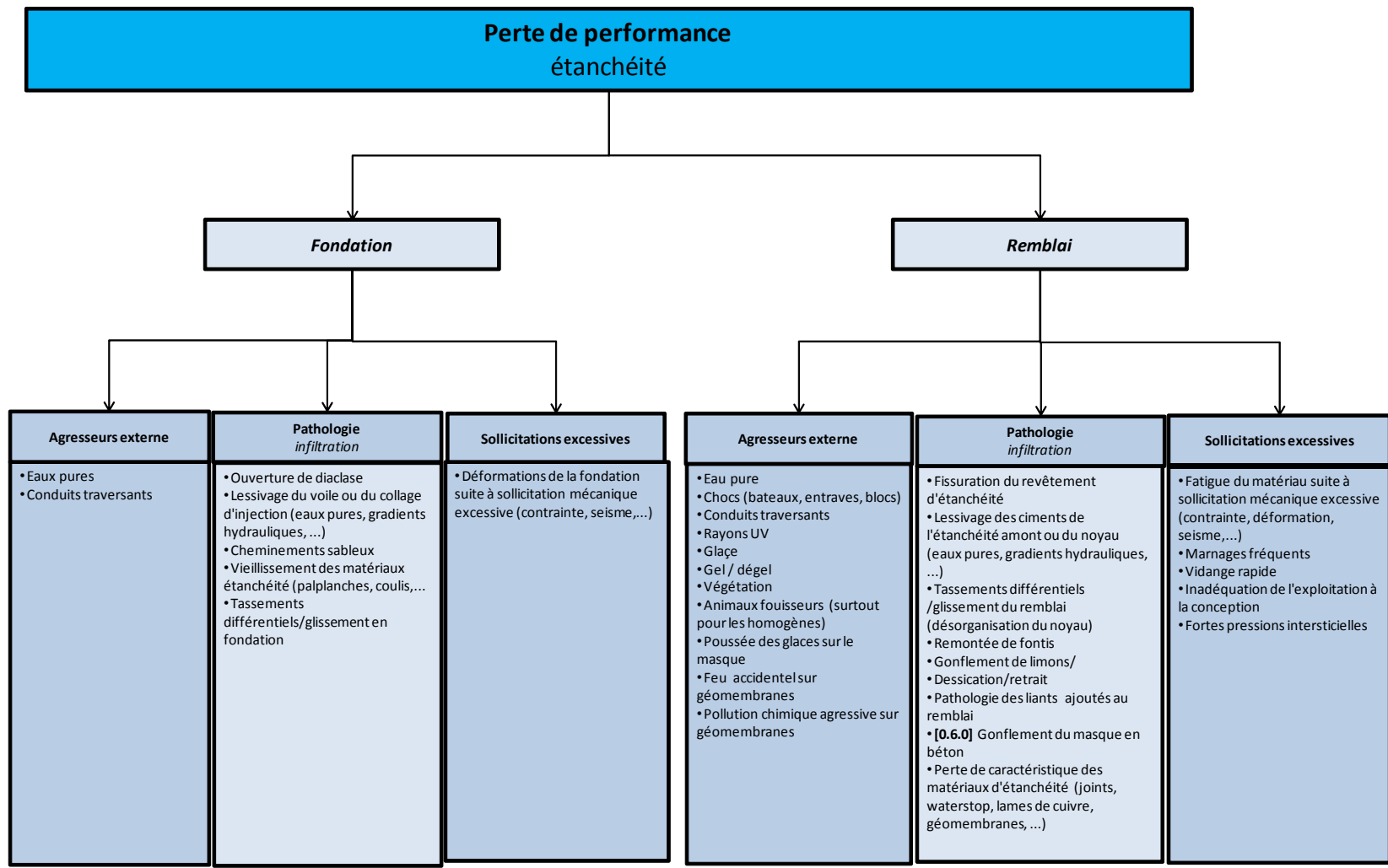
Annexe 1 : arbre des causes pour les barrages en remblais



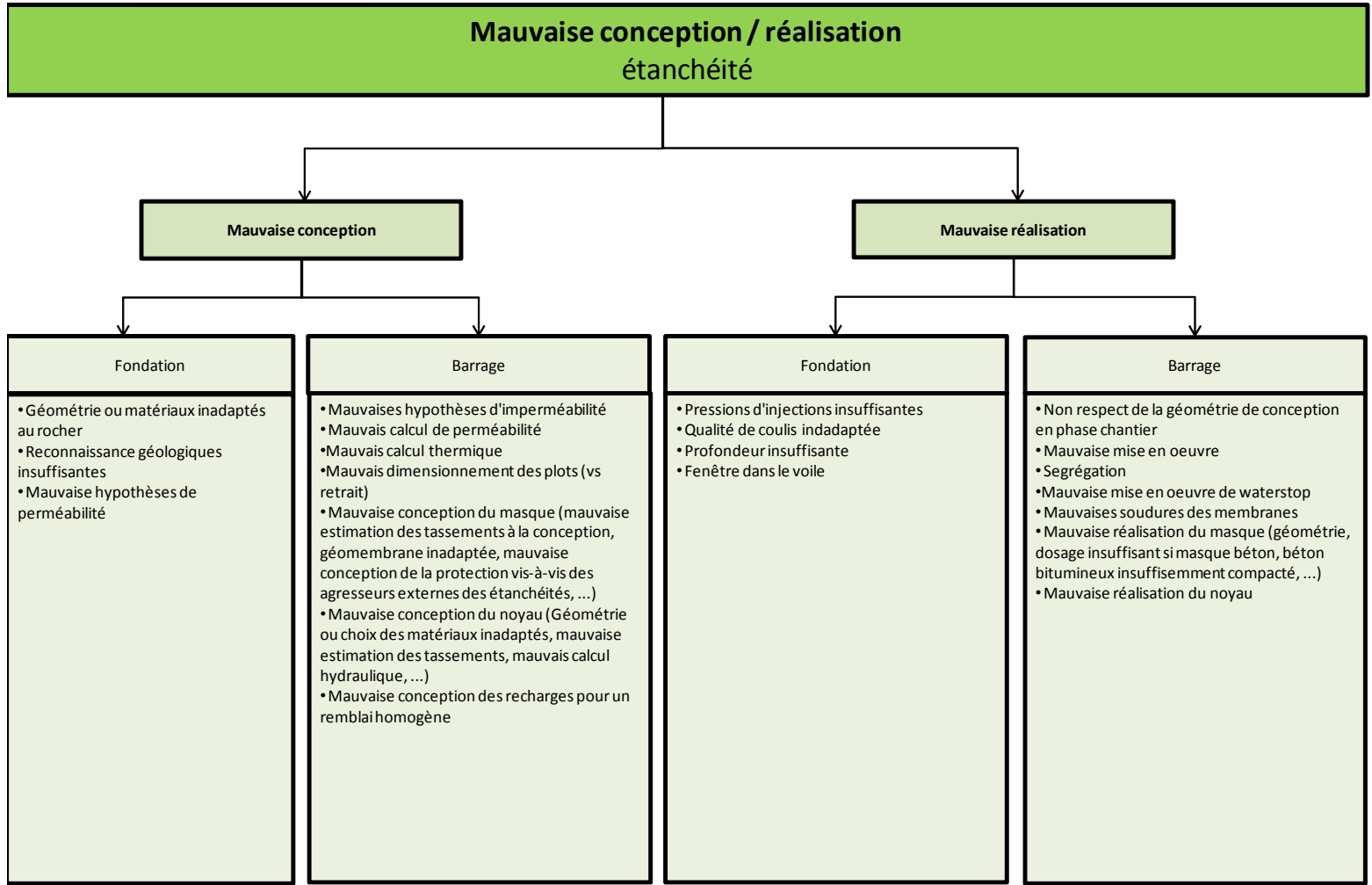
Annexe 2 : Détail de la fonction évacuation pour les barrages en remblais



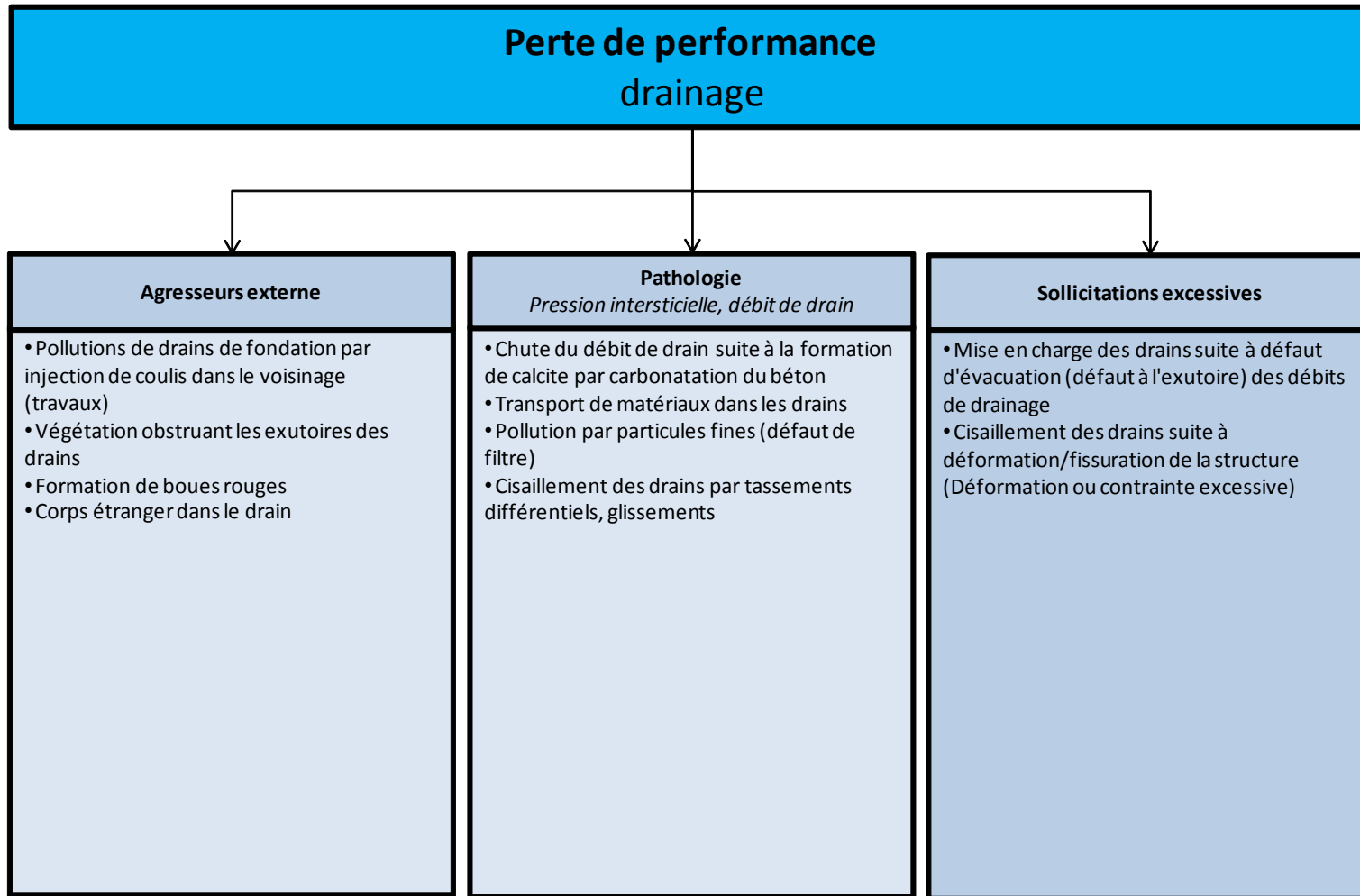
Annexe 3 : détail de la fonction PDP étanchéité pour les barrages en remblais



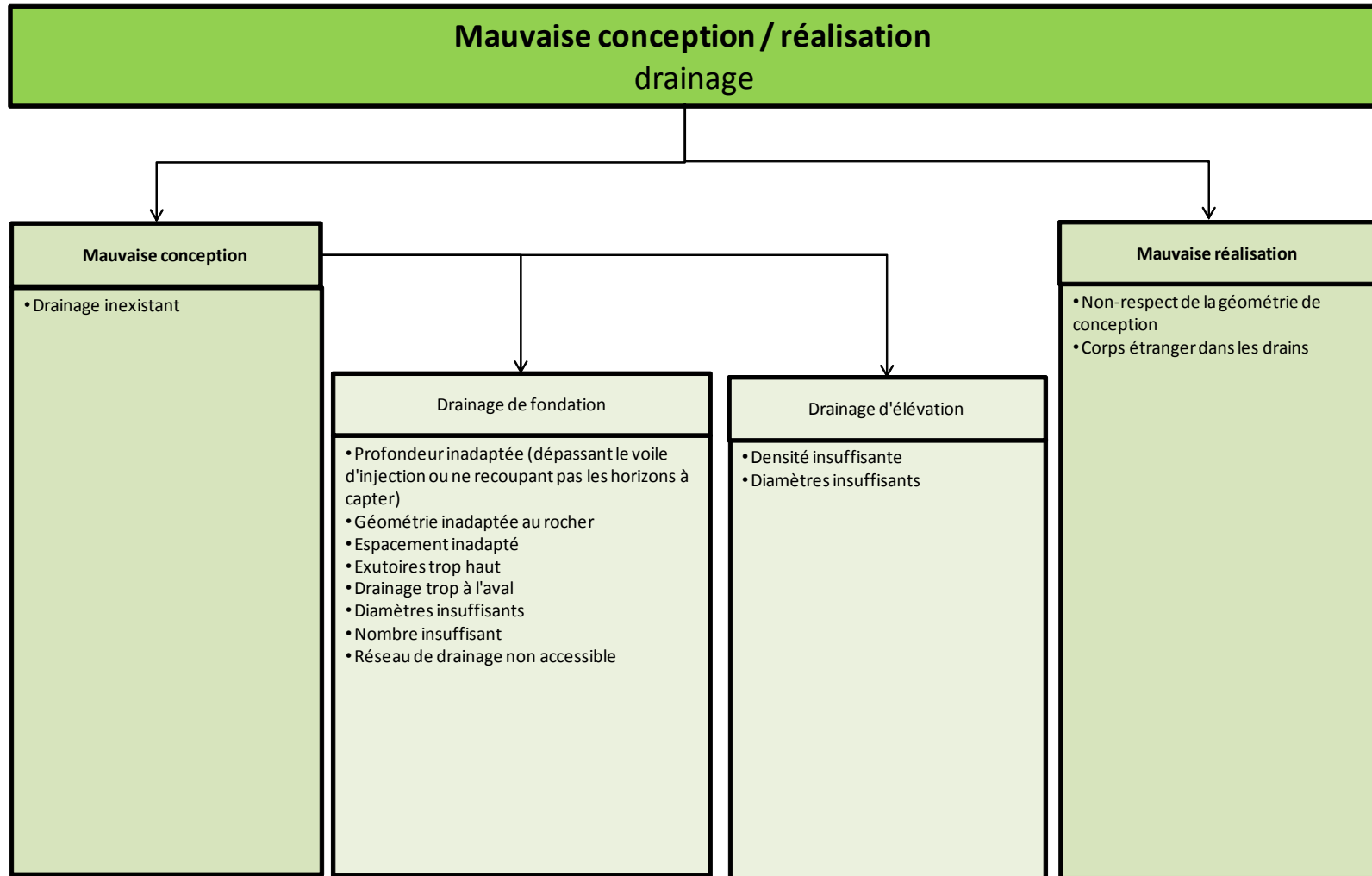
Annexe 4 : détail de la fonction MCR étanchéité pour les barrages en remblais



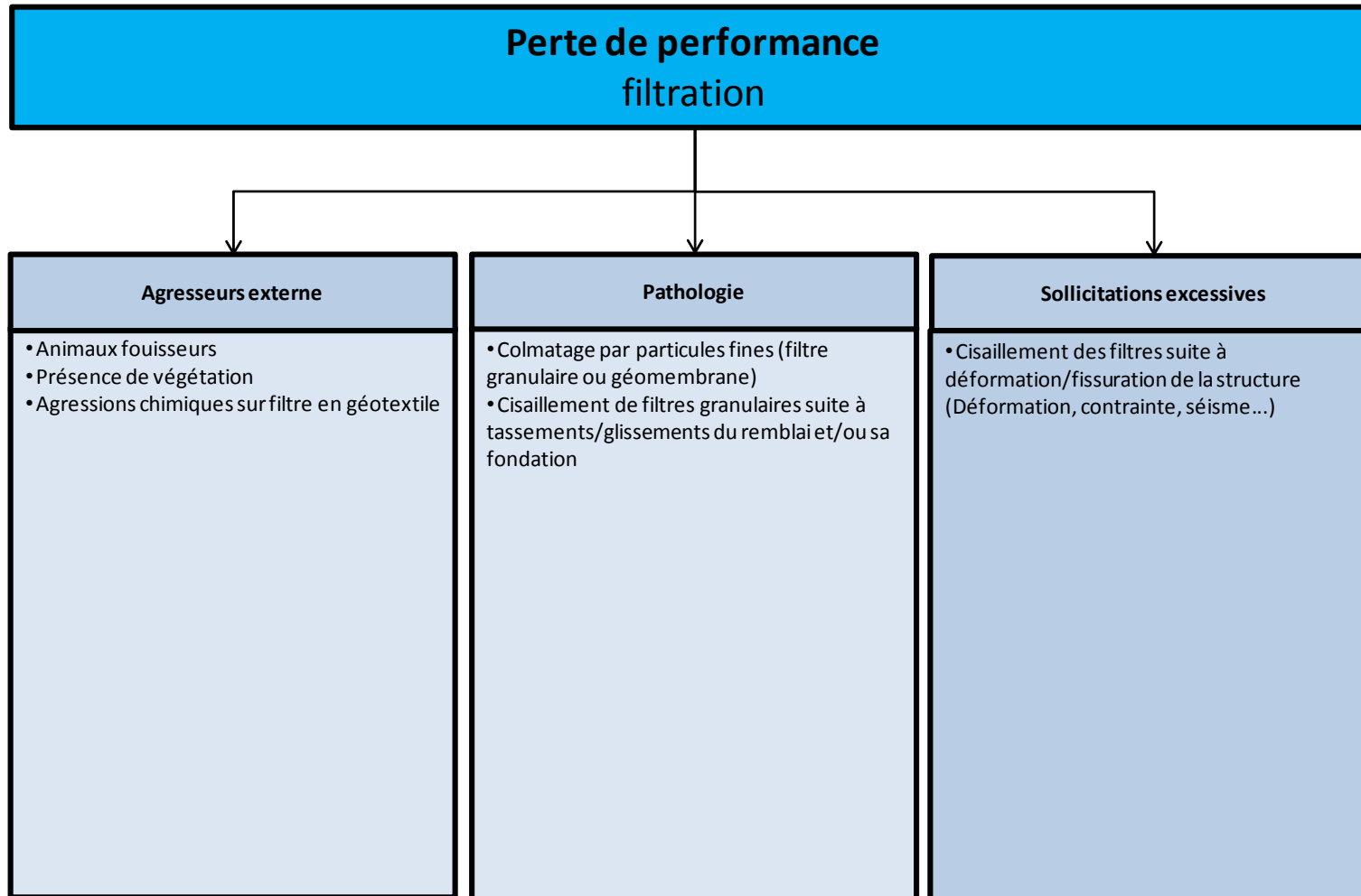
Annexe 5 : détail de la fonction PDP drainage pour les barrage en remblais



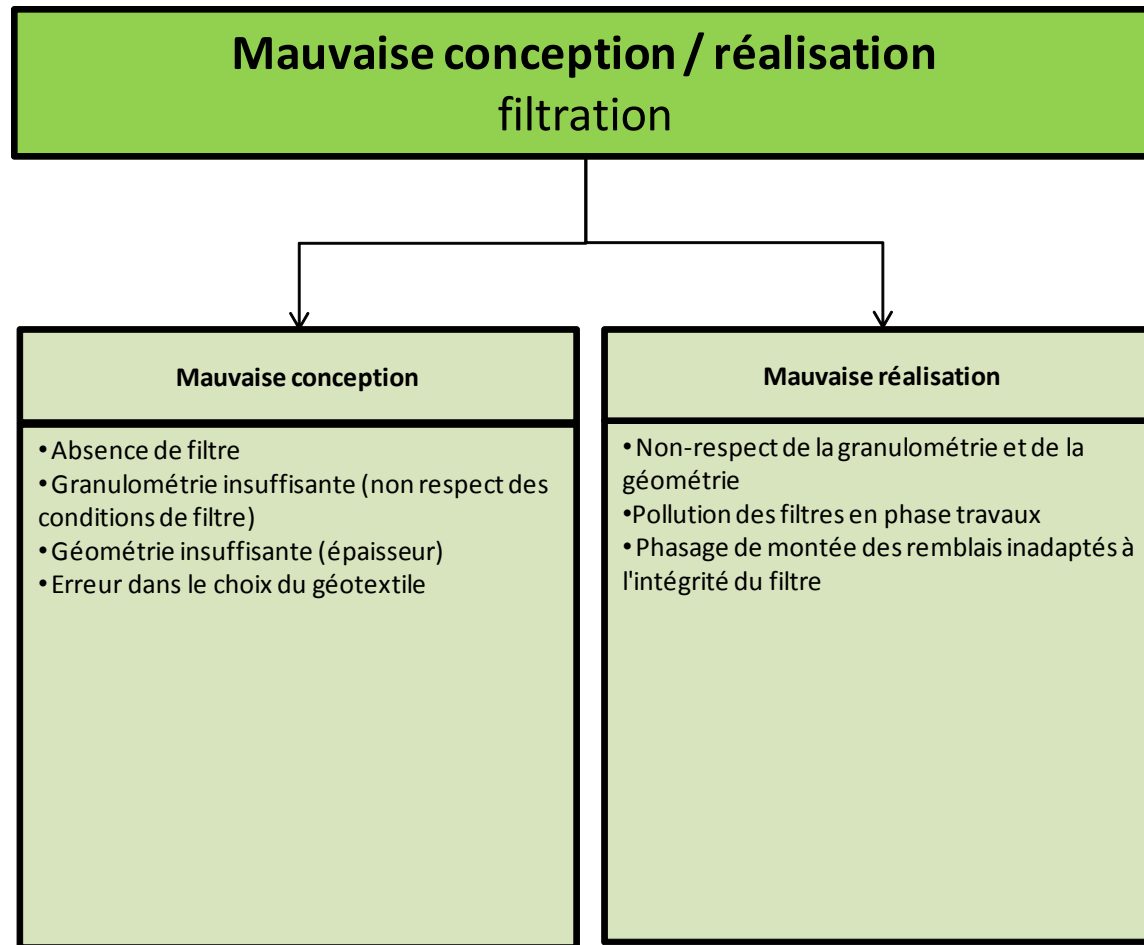
Annexe 6 : détail de la fonction MCR drainage pour les barrages en remblais



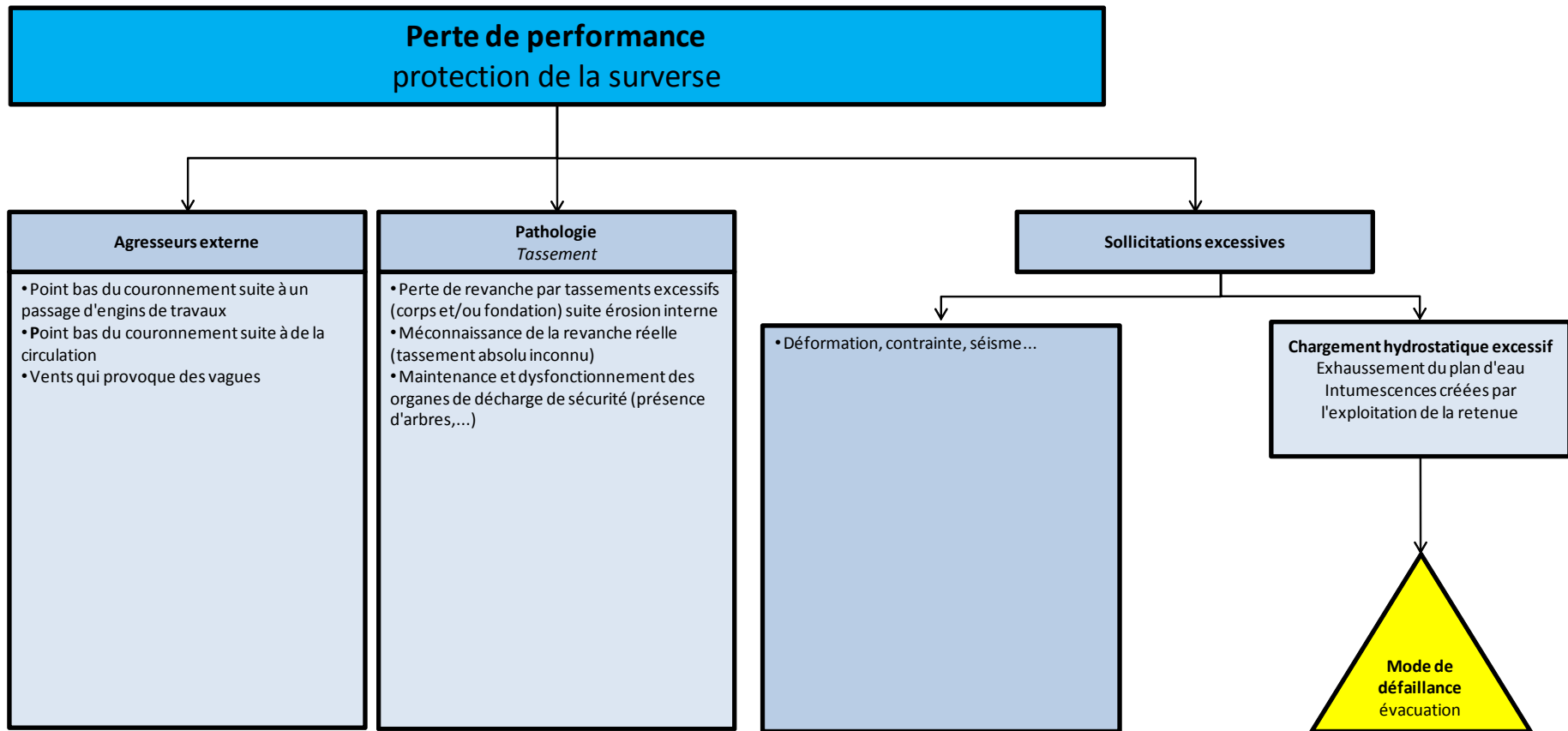
Annexe 7 : détail de la fonction PDP filtration pour les barrages en remblais



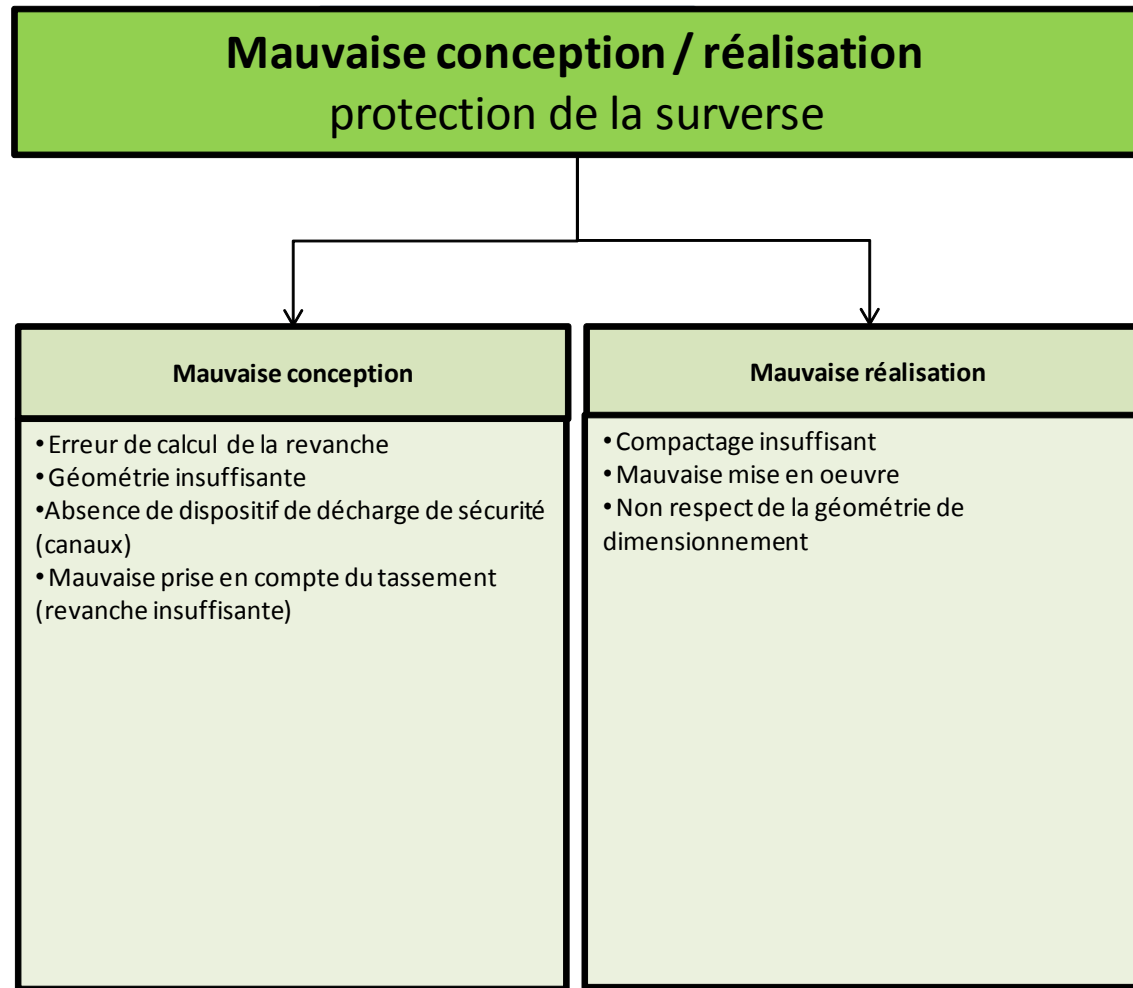
Annexe 8 : détail de la fonction MCR filtration pour les barrages en remblais



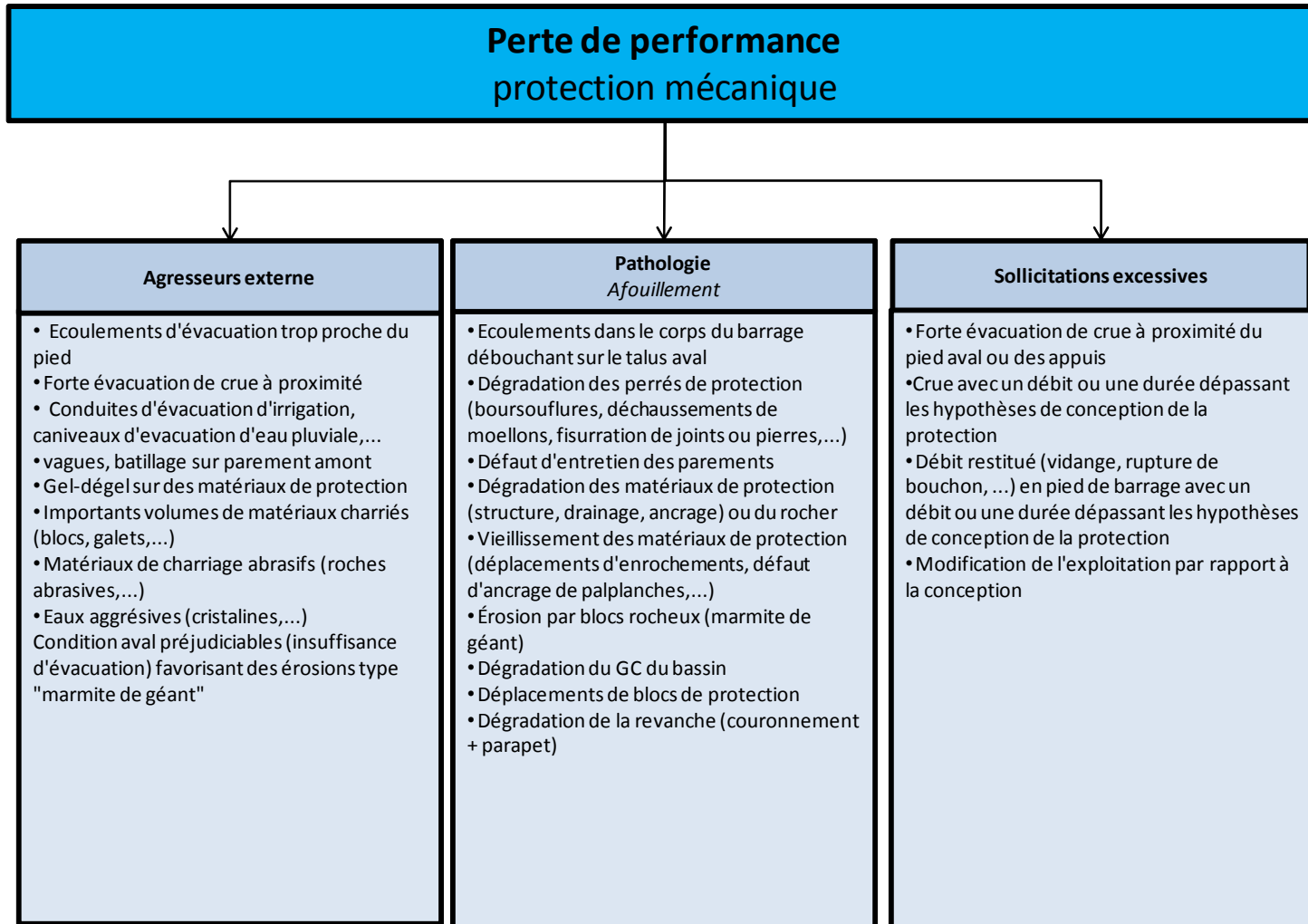
Annexe 9 : détail de la fonction PDP protection de la surverse pour les barrages en remblais



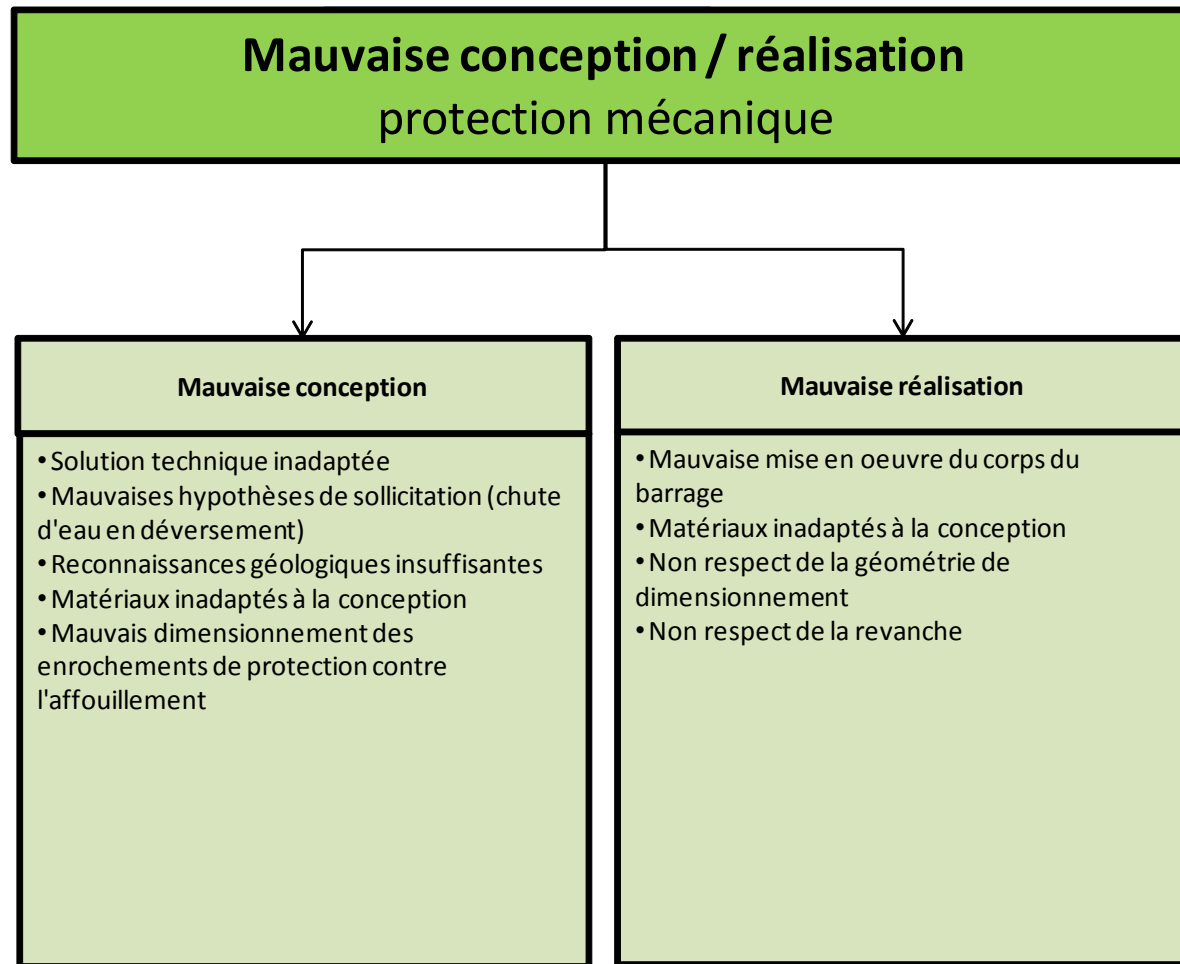
Annexe 10 : détail de la fonction MCR protection de la surverse pour les barrages en remblais



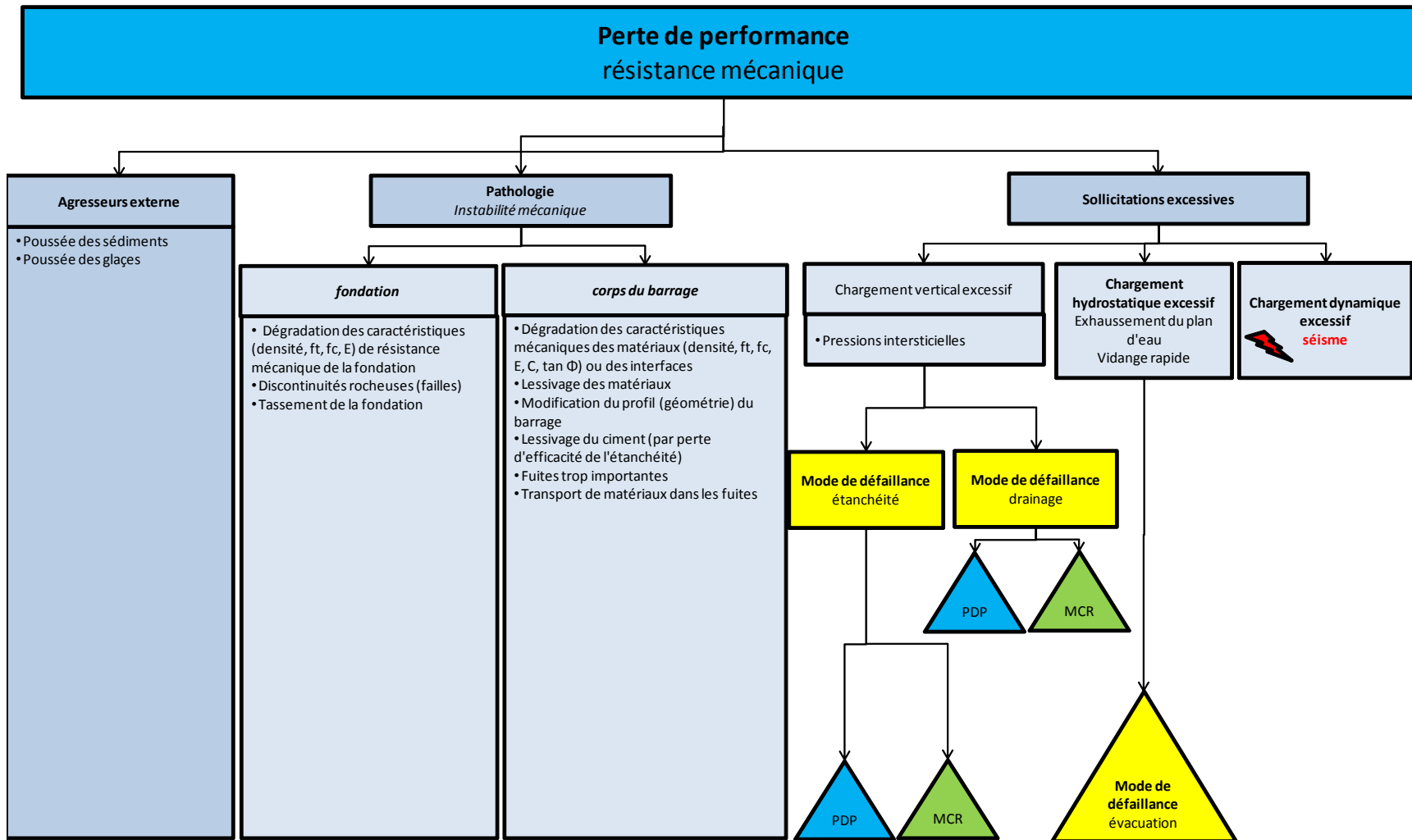
Annexe 11 : détail de la fonction PDP protection mécanique pour les barrages en remblais



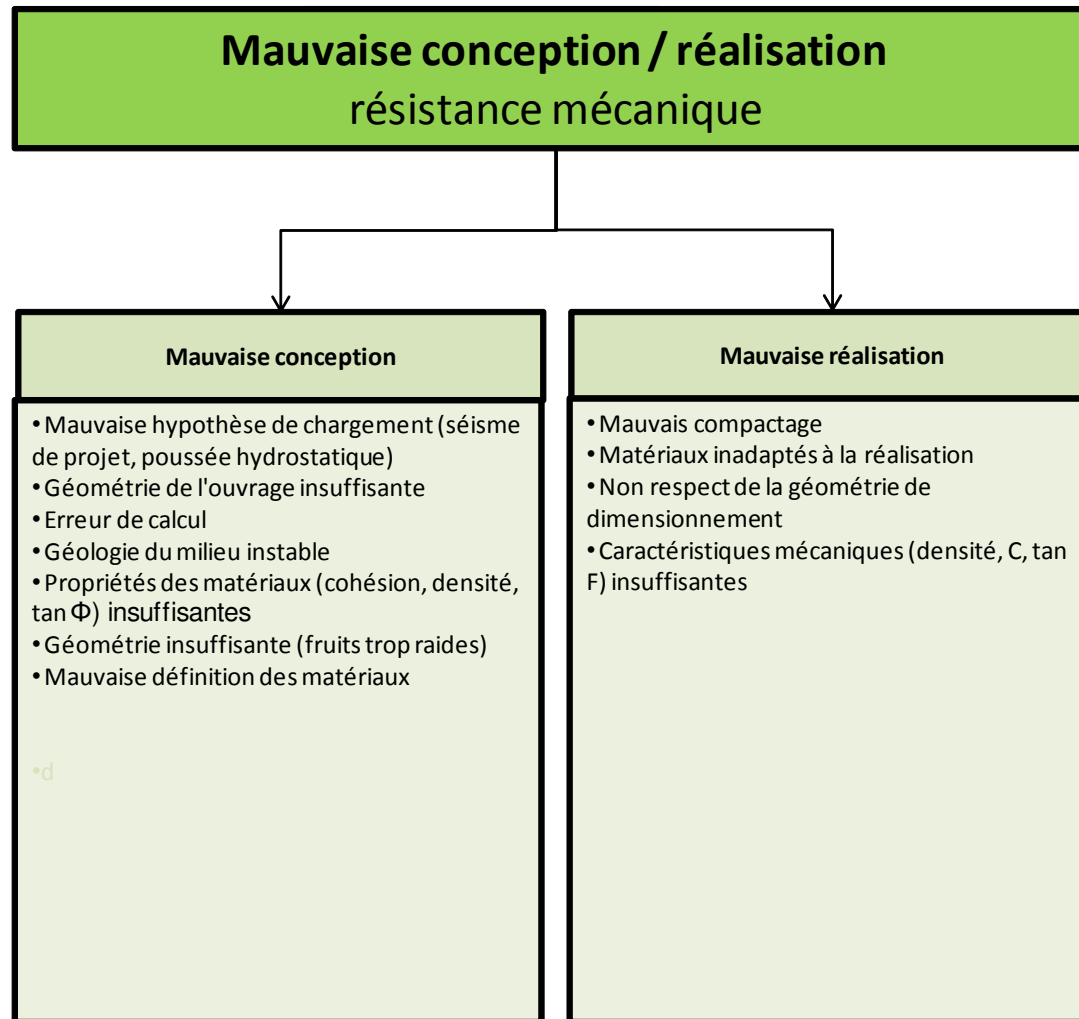
Annexe 12 : détail de la fonction MCR protection mécanique pour les barrages en remblais



Annexe 13 : détail de la fonction PDP résistance mécanique pour les barrages en remblais



Annexe 14 : détail de la fonction MCR résistance mécanique pour les barrages en remblais



Annexe 15 : questions posées à l'expert pour la fonction « protection de la surverse »

« A partir de quel état le critère V influe-t-il plus sur le risque de la fonction que T si T prend la valeur T_1 ? » : V_1
« A partir de quel état le critère V influe-t-il plus sur le risque de la fonction que T si T prend la valeur T_2 ? » : jamais

On fixe SE_1 et EVC :

« A partir de quel état le critère T influe-t-il plus sur le risque de la fonction que V si V prend la valeur V_0 ? » : T_0
« A partir de quel état le critère T influe-t-il plus sur le risque de la fonction que V si V prend la valeur V_1 ? » : T_1
« A partir de quel état le critère T influe-t-il plus sur le risque de la fonction que V si V prend la valeur V_2 ? » : ignore
« A partir de quel état le critère V influe-t-il plus sur le risque de la fonction que T si T prend la valeur T_0 ? » : V_1
« A partir de quel état le critère V influe-t-il plus sur le risque de la fonction que T si T prend la valeur T_1 ? » : V_2
« A partir de quel état le critère V influe-t-il plus sur le risque de la fonction que T si T prend la valeur T_2 ? » : ignore

On fixe T_0 et V_0 :

« A partir de quel état le critère EVC influe-t-il plus sur le risque de la fonction que SE si SE prend la valeur SE_0 ? » : EVC_0
« A partir de quel état le critère EVC influe-t-il plus sur le risque de la fonction que SE si SE prend la valeur SE_1 ? » : EVC_3
« A partir de quel état le critère SE influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_0 ? » : SE_1
« A partir de quel état le critère SE influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_1 ? » : SE_1
« A partir de quel état le critère SE influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_2 ? » : SE_1
« A partir de quel état le critère SE influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_3 ? » : jamais

On fixe T_1 et V_1 :

« A partir de quel état le critère EVC influe-t-il plus sur le risque de la fonction que SE_1 ? » : EVC_3
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_0 ? » : oui
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_1 ? » : oui
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_2 ? » : oui
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_3 ? » : non

On fixe T_2 et V_2 :

« A partir de quel état le critère EVC influe-t-il plus sur le risque de la fonction que SE_1 ? » : EVC_2
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_0 ? » : oui
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_1 ? » : oui
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_2 ? » : non
« L'état de critère SE_1 influe-t-il plus sur le risque de la fonction que EVC si EVC prend la valeur EVC_3 ? » : non

On fixe T_0 et EVC_0 :

« A partir de quel état le critère V influe-t-il plus sur le risque de la fonction que SE si SE prend la valeur SE_0 ? » : V_1
« A partir de quel état le critère V influe-t-il plus sur le risque de la fonction que SE si SE prend la valeur SE_1 ? » : jamais
« A partir de quel état le critère SE influe-t-il plus sur le risque de la fonction que V si V prend la valeur V_0 ? » : SE_0
« A partir de quel état le critère SE influe-t-il plus sur le risque de la fonction que V si V prend la valeur V_1 ? » : SE_1
« A partir de quel état le critère SE influe-t-il plus sur le risque de la fonction que V si V prend la valeur V_2 ? » : jamais

On fixe T_1 et EVC_1 :

Annexe 16 : Liste complète des tableaux de vote de la fonction « protection de la surverse »

En fixant SE_0 et T_0 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_0 et T_1 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_0 et T_2 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et T_0 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et T_1 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et T_2 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
V ₀	=	-	-	-
V ₁	+	+	-	-
V ₂	+	+	+	+

En fixant SE_0 et EVC₀ :

	T ₀	T ₁	T ₂
V ₀	=	-	-
V ₁	+	+	-
V ₂	+	+	-

En fixant SE_0 et EVC₁ :

	T ₀	T ₁	T ₂
V ₀	=	-	-
V ₁	+	+	-
V ₂	+	+	-

En fixant SE_0 et EVC₂ :

	T ₀	T ₁	T ₂
V ₀	=	-	-
V ₁	+	+	-
V ₂	+	+	-

En fixant SE_0 et EVC₃ :

	T ₀	T ₁	T ₂
V ₀	=	-	-
V ₁	+	+	-
V ₂	+	+	-

En fixant SE_1 et EVC_0 :

	T_0	T_1	T_2
V_0	-	-	-
V_1	+	-	-
V_2	+	+	=

En fixant SE_1 et EVC_1 :

	T_0	T_1	T_2
V_0	-	-	-
V_1	+	-	-
V_2	+	+	=

En fixant SE_1 et EVC_2 :

	T_0	T_1	T_2
V_0	-	-	-
V_1	+	-	-
V_2	+	+	=

En fixant SE_1 et EVC_3 :

	T_0	T_1	T_2
V_0	-	-	-
V_1	+	-	-
V_2	+	+	=

En fixant T_0 et EVC_0 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_0 et EVC_1 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_0 et EVC_2 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_0 et EVC_3 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_1 et EVC_0 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_1 et EVC_1 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_1 et EVC_2 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_1 et EVC_3 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	+	-

En fixant T_2 et EVC_0 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant T_2 et EVC_1 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant T_2 et EVC_2 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant T_2 et EVC_3 :

	V_0	V_1	V_2
SE_0	+	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant SE_0 et V_0 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	-	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant SE_0 et V_1 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	-	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant SE_0 et V_2 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	-	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et V_0 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	+	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et V_1 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	+	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant SE_1 et V_2 :

	EVC ₀	EVC ₁	EVC ₂	EVC ₃
T ₀	=	-	-	-
T ₁	+	+	+	-
T ₂	+	+	+	+

En fixant V_0 et EVC₀ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	+	-

En fixant V_0 et EVC₁ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	+	-

En fixant V_0 et EVC₂ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	+	-

En fixant V_0 et EVC₃ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	+	-

En fixant V_1 et EVC₀ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	-	-

En fixant V_1 et EVC₁ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	-	-

En fixant V_1 et EVC₂ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	-	-

En fixant V_1 et EVC₃ :

	T ₀	T ₁	T ₂
SE ₀	=	-	-
SE ₁	+	-	-

En fixant V_2 et EVC_0 :

	T_0	T_1	T_2
SE_0	=	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant V_2 et EVC_1 :

	T_0	T_1	T_2
SE_0	=	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant V_2 et EVC_2 :

	T_0	T_1	T_2
SE_0	=	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant V_2 et EVC_3 :

	T_0	T_1	T_2
SE_0	=	-	-
SE_1	+	-	-

En fixant T_0 et V_0 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	+	-

En fixant T_0 et V_1 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	+	-

En fixant T_0 et V_2 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	+	-

En fixant T_1 et V_0 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	+	-

En fixant T_1 et V_1 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	+	-

En fixant T_1 et V_2 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	+	-

En fixant T_2 et V_0 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	-	-

En fixant T_2 et V_1 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	-	-

En fixant T_2 et V_2 :

	EVC_0	EVC_1	EVC_2	EVC_3
SE_0	-	-	-	-
SE_1	+	+	-	-

Annexe 17 : tableaux de votes pour les bases de règles primaires du barrage de Serre-Ponçon

Fonction **étanchéité** :

VS ₀₋₁₋₂ \	E ₀	E ₁	E ₂
A ₀	=	-	-
A ₁	+	+	=

VS ₃ \	E ₀	E ₁	E ₂
A ₀	=	-	-
A ₁	+	+	+

E ₀₋₁ \	VS ₀	VS ₁	VS ₂	VS ₃
A ₀	=	-	-	-
A ₁	+	+	=	-

E ₂ \	VS ₀	VS ₁	VS ₂	VS ₃
A ₀	=	-	-	-
A ₁	+	+	-	-

A ₀₋₁ \	VS ₀	VS ₁	VS ₂	VS ₃
E ₀	=	-	-	-
E ₁	+	+	=	-
E ₂	+	+	+	=

\	E	A	VS
E	\	8	12
A	9	\	6
VS	8	13	\

Fonction **filtration** :

CM ₀ \	P ₀	P ₁	P ₂
AN ₀	=	-	-
AN ₁	+	+	=

CM ₁₋₂ \	P ₀	P ₁	P ₂
AN ₀	=	-	-
AN ₁	+	+	+

P ₀ \	CM ₀	CM ₁	CM ₂
AN ₀	=	-	-
AN ₁	+	+	-

P ₁ \	CM ₀	CM ₁	CM ₂
AN ₀	=	-	-
AN ₁	+	+	=

P ₂ \	CM ₀	CM ₁	CM ₂
AN ₀	=	-	-
AN ₁	+	+	+

AN ₀₋₁ \	CM ₀	CM ₁	CM ₂
P ₀	=	-	-
P ₁	+	+	-
P ₂	+	+	+

\	AN	P	CM
AN	\	8	7
P	6	\	9
CM	7	6	\

Fonction **protection mécanique** :

	VGC ₀	VGC ₁	VGC ₂	VGC ₃
VAC ₀	=	-	-	-
VAC ₁	+	+	=	-
VAC ₂	+	+	+	=

	VAC	VGC
VAC		5
VGC	4	

Fonction **résistance mécanique** :

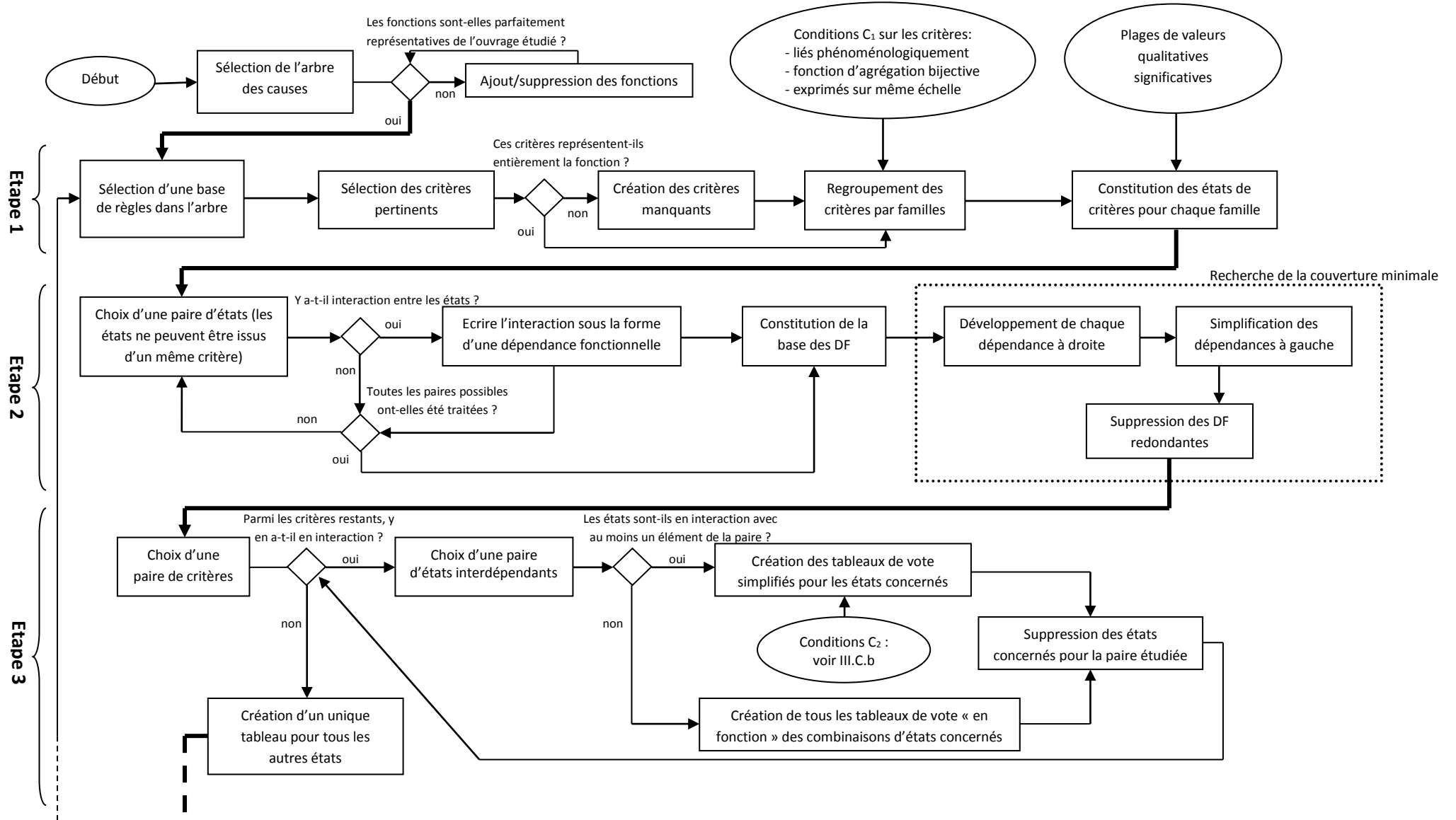
PCM	DE ₀	DE ₁	DE ₂
F ₀	=	-	-
F ₁	+	=	-

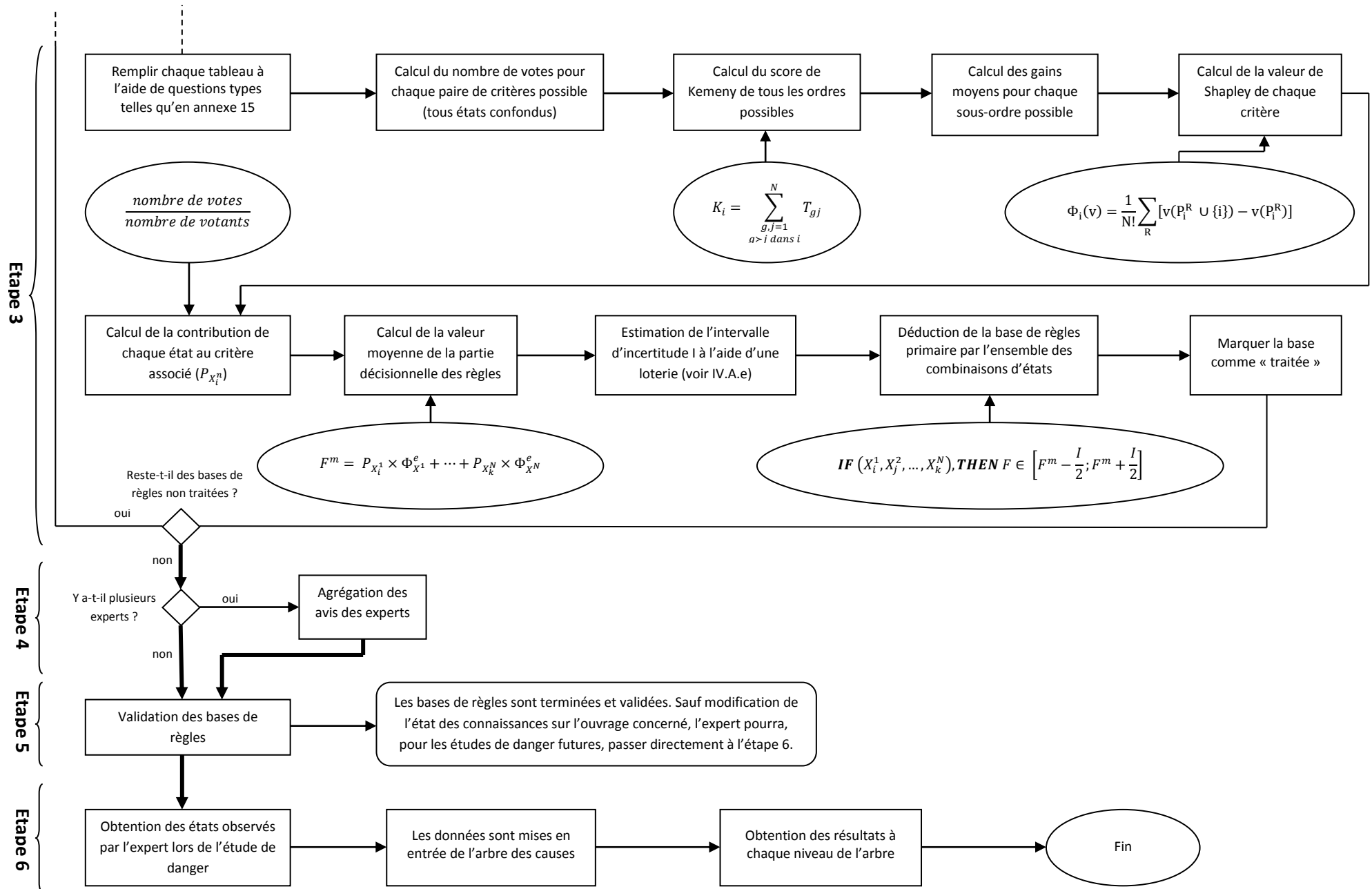
DE	PCM ₀	PCM ₁	PCM ₂	PCM ₃
F ₀	=	-	-	-
F ₁	+	+	=	-

F	PCM ₀	PCM ₁	PCM ₂	PCM ₃
DE ₀	=	-	-	-
DE ₁	+	=	-	-
DE ₂	+	+	-	-

	F	DE	PCM
F		4	6
DE	12		6
PCM	12	14	

Annexe 18 : logigrammes récapitulatifs de la méthode utilisée





Annexe 19 : présentation de la méthode d'agrégation des experts utilisant la formule A

Soit un système dont le risque est composé de n critères. Soit p le nombre d'experts exprimant une opinion sur ce système. Cette opinion est donnée sous la forme d'indices t_1, t_2, \dots, t_n pour chaque critère où $\sum_{i=1}^n t_i = 1$, représentant la contribution de chaque critère au risque considéré.

La première étape de la méthode consiste à calculer la moyenne géométrique pondérée des indices t pour chaque critère. Pour chaque critère, un rang r_i est donné à chaque expert i selon la distance de l'indice t donné par cet expert à cette moyenne. Ainsi, l'expert le plus proche aura le rang $r_i = 1$. Une fois tous les rangs obtenus, ils sont normalisés. On calcule ensuite une fonction f_i pour chaque paire d'experts, à partir de ces rangs normalisés, pour chaque critère i .

Cette fonction est calculée comme suit :

Soit i un critère, $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$.

Soient (x, y) une paire d'experts, $(x, y) \in \llbracket 1, p \rrbracket^2$.

Soient r_x et r_y les rangs normalisés respectivement de x et y .

$$\begin{cases} f_i(x, y) = 1 - \frac{(n-1)+(r_x-r_y)}{2(n-1)} & \text{si } r_x > r_y \\ f_i(x, y) = \frac{(n-1)+(r_x-r_y)}{2(n-1)} & \text{si } r_x < r_y \end{cases}$$

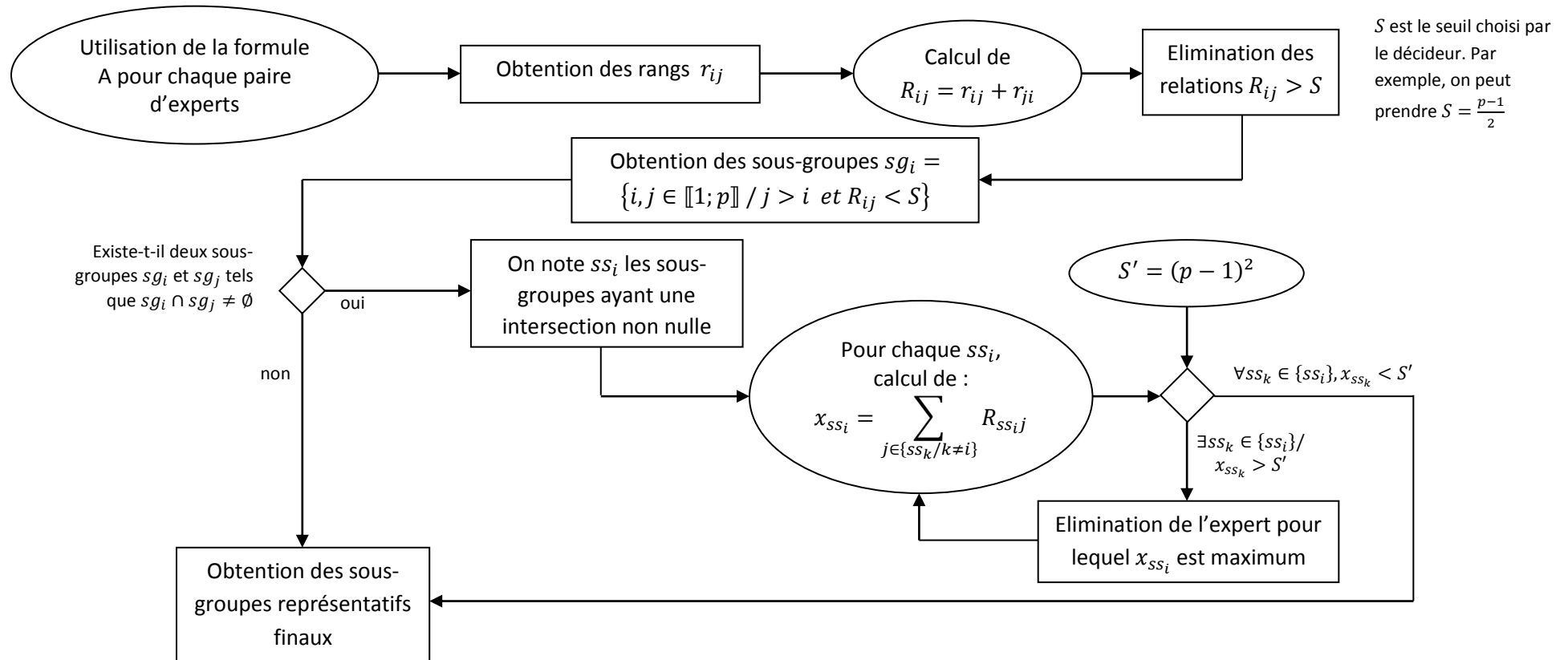
Nous appellerons $f_i(x, y)$ la fonction de préférence de x sur y pour le critère i . Cette fonction est définie sur $[0; 1]$.

Cette fonction représente le degré de préférence d'un expert sur un autre pour un critère considéré. D'un point de vue probabiliste, cela revient à voir la fonction de préférence comme une probabilité pour que $r_x > r_y$.

On en déduit une formule inspirée de la méthode de Borda qui permet d'obtenir des rangs pour chaque paire d'experts. Ces rangs, notés r_{xy} , correspondent à la proximité relative de chaque expert à un autre. Par exemple, $r_{xy} = 3$ se lit « l'expert x est le troisième expert le plus proche de l'expert y ». Ce rang n'est pas symétrique : ce n'est pas parce qu'un expert x est le plus proche d'un expert y par rapport à l'ensemble des experts, que l'expert y est lui aussi le plus proche de l'expert x . Ainsi, $r_{xy} \neq r_{yx}$. La formule permettant d'obtenir ces rangs est appelée « formule A » et peut être écrite :

$$r_{xy}^h = (p + 1) - \sum_{i=1}^p f_h(x, y)$$

La démonstration de cette formule se trouve dans le mémoire de master de recherche de [Toret, 2010]. A partir de ce rang, il est possible de construire des sous-groupes, par exemple en cherchant les paires d'experts (x, y) pour lesquels $r_{xy} + r_{yx}$ ne dépasse pas une certaine valeur seuil, ce qui illustrerait que les deux experts ont une opinion proche. Une telle méthode peut être décrite par le schéma suivant :



Glossaire

Auditabilité : Une méthode est dite auditable lorsqu'il est possible d'en vérifier la validité scientifique par un audit, c'est-à-dire par un protocole rigoureux, admis et accepté par la communauté scientifique relative à l'objet étudié.

Base d'un arbre des causes : niveau de l'arbre le plus bas, où se situent les critères non décomposables (ex. : vent, vanne défailante, séisme, crue décennale etc.)

Base de règles primaire : base de règle se situant au premier niveau d'agrégation de l'arbre des causes. Une base de règle primaire a pour objet l'agrégation des critères non issus eux-mêmes d'une base de règles.

Base de règles secondaire : une base de règles secondaire est une base de règles agrégeant des critères dont au moins un est issu d'une base de règles précédente (primaire ou secondaire)

Biais cognitif : un biais cognitif est une routine cognitive (raisonnement, jugement, décision, perception) amenant, dans des circonstances particulières, une déviation systématique de la réponse comportementale par rapport à une réponse attendue ou considérée comme correcte.

Contribution marginale : Soit un jeu à n joueurs (on note N l'ensemble des joueurs). Pour tout joueur (respectivement toute coalition de joueurs) j du jeu, on note $v(j)$ le gain du joueur j (respectivement de toute coalition de joueurs).

$\forall i \in N$, pour toute coalition S contenant i , on appelle contribution marginale de i dans S la quantité $v(S) - v(S - \{i\})$.

Convexité d'un jeu coopératif : un jeu coopératif v est dit convexe si pour toutes les coalitions $S, T \in 2^N$, $v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) - v(S \cap T)$.

Etat de critère : Un état de critère est une partition de l'ensemble des valeurs (quantitatives ou qualitatives) atteignables par un critère. Cette partition est formée des valeurs qui ont une influence équivalente sur le risque lié à la (ou les) fonction(s) utilisant ce critère. Une valeur d'un critère appartient à un unique état de critère, et l'union de tous les états d'un critère représente l'ensemble des valeurs atteignables dudit critère.

Heuristique : une heuristique est une démarche relativement empirique, établissant des hypothèses provisoires dans laquelle l'imagination, l'expérience, et l'histoire personnelle ont une place non négligeable

Incertitude : L'incertitude implique que dans une certaine situation, une personne ne possède pas l'information nécessaire, sous forme quantitative ou qualitative, pour décrire, prescrire ou prédire de façon déterministe et numérique un système, son comportement ou d'autres de ses caractéristiques (définition issue de [Zimmerman, 2000]).

Item de l'arbre des causes : objet constituant l'arbre à chaque niveau, qu'il soit un critère, une fonction, un événement, etc.

Nœud d'un l'arbre des causes : lien qui permet de passer d'un niveau à l'autre au sein de l'arbre. Les bases de règles seront insérées sur les nœuds.

Partie conditionnelle : partie « IF (X) » d'une règle logique où (X) représente une condition sur un critère X (par exemple, une valeur).

Partie décisionnelle : partie « THEN (CLASS(Y)) » d'une règle logique où Y est l'item cible de la règle logique, et CLASS(Y) est sa valeur (ou classe) d'affectation.

Pseudo-complétude : il s'agit de la propriété qui implique que toute combinaison d'état de critères constituant la partie conditionnelle d'une règle logique doit nécessairement être associée à au moins une partie décisionnelle définie sur son ensemble de valeurs.

Pseudo-exclusivité : il s'agit de la propriété qui implique qu'au sein d'une base de règles logiques, les parties décisionnelles des règles constituent un ensemble ordonné où chaque valeur est atteignable par au plus une partie conditionnelle.

Risque : le risque est l'effet de l'incertitude sur les objectifs (définition ISO guide 73)

Score de Kemeny : Soit un choix composé de N alternatives et soumis à X votants. Le score de Kemeny d'un ordre i des N alternatives est la somme du nombre de votes issus de toutes les comparaisons par paires des N alternatives satisfaisant l'ordre i.

Valeur de Shapley : soit un jeu coopératif J composé de N joueurs. On note $v(S)$ le gain attendu de J si la coalition S joue. On appelle la fonction v la fonction caractéristique. Soit $\Phi_i(v)$ la fonction représentant la répartition du gain total pour le joueur i. On a, $\forall i \in \llbracket 1, N \rrbracket$:

$$\Phi_i(v) = \frac{1}{N!} \sum_R [v(P_i^R \cup \{i\}) - v(P_i^R)]$$

Où R est un ordre possible dans lequel les joueurs jouent et P_i^R est l'ensemble des joueurs ayant joué avant le joueur i dans l'ordre R.

$\Phi_i(v)$ est appelée la valeur de Shapley.

Table des matières

Tableau 1 : exemple de diagramme de Farmer	43
Tableau 2 : exemple d'indexation de condition	49
Tableau 3 : exemple d'agrégation de connecteurs logiques	55
Tableau 4 : tableau récapitulatif de l'analogie avec la théorie des jeux	83
Tableau 5 : tableau récapitulatif de l'analogie avec la théorie du vote .	85
Tableau 6 : table des votes par paires	90
Tableau 7 : tableau récapitulatif de l'analogie avec la théorie des bases de données.....	94
Tableau 8 : liste des critères avant agrégation.....	114
Tableau 9 : agrégation des critères en familles.....	115
Tableau 10 : exemple de comparaisons par paires de critères	126
Tableau 11 : méthode de remplissage des comparaisons par paires	126
Tableau 12 : comparaisons par paires des critères de la fonction « protection de la surverse ».....	131
Tableau 13 : comparaisons entre les états de T et V	133
Tableau 14 : résultat des votes par paires pour la fonction « protection de la surverse ».....	134
Tableau 15 : tableau de vote entre les critères PM et PS	154
Figure 1 : exemple de schéma papillon	54
Figure 2 : détail d'un schéma papillon	64
Figure 3 : Arbre des causes pour un barrage en remblais	66
Figure 4 : Structure d'une règle logique	68
Figure 5 : Utilisation d'une base de règles dans un arbre de causes	72
Figure 6 : Arbre de causes utilisant des bases de règles.....	73

Figure 7 : représentation du problème de l'élicitation de la partie d'affectation d'une règle logique	76
Figure 8 : chemin analogique utilisé	86
Figure 9 : schéma récapitulatif de la méthode proposée	101
Figure 10 : Obtention des résultats sur une échelle ordonnée	145
Figure 11 : obtention de la partie décisionnelle pour une base de règles secondaire.....	152
Figure 12 : simplification de la partie décisionnelle d'une base de règles secondaire.....	153

