UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RÉDUCTION DU RISQUE BARRAGE PAR L'UTILISATION DES RÉSEAUX BAYÉSIENS

MARC SMITH
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE CIVIL)
OCTOBRE 2005

© Marc Smith, 2005.

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-17014-4
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-17014-4

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

RÉDUCTION DU RISQUE BARRAGE PAR L'UTILISATION DES RÉSEAUX BAYÉSIENS

présentée par : SMITH Marc

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. LÉGER Pierre, Ph.D., président

M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. ROBERT Benoît, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. DESMARAIS Michel, Ph.D., membre

M. CHOUINARD Luc, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, le professeur Claude Marche, ainsi que mon codirecteur de recherche, le professeur Benoît Robert, pour l'intérêt qu'ils ont toujours porté à mes travaux et pour leur collaboration constante.

Je remercie également M. Phuong Huu Nguyen, Chef de la Division Barrages et Ouvrages Civils de Hydro Québec, pour son appui qui m'a permis de concilier travail et études.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude au Bureau de la Protection des Infrastructures Essentielles et de la Protection Civile du Canada pour leur aide financière.

Par-dessus tout, j'aimerais mentionner que sans le soutien, la patience et l'amour de Lisanne, Charles, Audréanne et Élisabeth, cette étude n'aurait pu être réalisée.

RÉSUMÉ

Personne ne peut prédire le risque avec certitude car deux de ses caractéristiques principales sont la complexité et l'incertitude. Même lorsqu'un barrage est jugé sécuritaire et est surveillé et exploité de façon responsable, ce dernier pose un risque résiduel qui est toujours présent si des personnes ou des biens sont localisés dans la zone d'inondation potentielle. Les ruptures de barrages sont relativement rares mais elles ont toujours des conséquences très importantes tant au niveau humain qu'aux niveaux environnemental et matériel. L'établissement de mesures de réduction du risque est donc une des responsabilités d'un propriétaire de barrages.

Le risque est un danger qui provoque une action réfléchie. Les objectifs principaux de cette recherche sont premièrement d'établir ce danger, qui est défini en fonction de la probabilité de rupture du barrage, et deuxièmement de déterminer l'action la plus appropriée pour le réduire.

L'état de la pratique actuelle reliée au risque barrage ne permet pas de prioriser de façon adéquate les interventions en sécurité des barrages. Les analyses de risque ne peuvent prendre en compte simultanément la complexité et les incertitudes inhérentes au risque. La revue de la littérature et la réalisation d'analyses de risque détaillées pour des ouvrages en remblai de Hydro Québec ont montré que ces analyses présentent certaines limitations reliées au calcul et à la représentation du risque en termes absolus. D'importantes difficultés ont aussi été identifiées en rapport à la modélisation des possibilités d'intervention sur un barrage, des interrelations entre les mécanismes de rupture et du manque de flexibilité des outils d'analyse existants.

L'utilisation du concept des réseaux bayésiens est proposée afin de résoudre les difficultés rencontrées lors des analyses de risque détaillées tout en mettant en valeur les

avantages retirés. Un réseau bayésien est un graphe causal où les variables du système étudié sont représentées par des noeuds et les relations de dépendance entre ces variables par des liens directionnels. La représentation probabiliste sous-jacente permet de quantifier la force de ces dépendances et de réaliser des calculs d'inférence servant d'aide à la décision. Les calculs sont basés sur le théorème de Bayes qui peut être considéré comme l'expression mathématique de l'apprentissage par l'expérience.

Les concepts mis de l'avant dans cette recherche rendent possible l'établissement d'un portrait actualisé du risque barrage en tenant compte des nombreuses interrelations entre les mécanismes de rupture de même que des incertitudes et des jugements d'experts qui sont toujours présents dans les analyses.

Les possibilités offertes par l'approche proposée permettent de réaliser plusieurs formes de requêtes incluant les prédictions et les diagnostics servant entre autres à identifier les causes les plus probables de rupture d'un barrage. Des analyses de sensibilité peuvent aussi être réalisées afin d'identifier les facteurs contribuant le plus au risque ainsi que les interventions optimales en termes de coûts et de potentiel de réduction de ce risque. Aussi, il est possible de modéliser spécifiquement certains aspects plus critiques d'un problème et de comparer l'effet de mesures non structurales sur la probabilité de rupture. L'analyse de risque devient alors un outil d'aide à la décision beaucoup plus puissant et polyvalent.

La représentation du risque barrage pour un exemple d'application a permis d'examiner de façon originale à l'aide d'un modèle de causalité les liens entre différents mécanismes de rupture. L'établissement d'une loi de probabilités a permis de quantifier les incertitudes en tenant compte à la fois de statistiques et du jugement d'expert basé sur des données, des modèles et des connaissances reliés à l'ouvrage.

Contrairement aux méthodes existantes, la démarche présentée dans cette recherche caractérise le risque sans passer par une interprétation absolue de la probabilité de rupture qui cause plusieurs problèmes reliés à sa signification et à son utilisation. La probabilité de rupture est plutôt considérée comme base de comparaison, ou dénominateur commun, servant à déterminer l'importance relative de chaque élément incertain pouvant causer la rupture et servant à juger de l'efficacité potentielle des mesures structurales ou non structurales envisageables.

L'utilisation du concept des réseaux bayésiens a contribué à la solution d'une problématique réelle pour un projet de la Banque Mondiale au Vietnam touchant des ouvrages d'irrigation et de protection contre les crues. Le barrage en remblai et l'évacuateur de crue présentent plusieurs problèmes techniques pouvant menacer à court terme leur sécurité. Le nombre et la sévérité des problèmes font en sorte que la détermination du risque posé par ces ouvrages n'est pas possible à l'aide des outils d'analyse actuels. Les concepts novateurs mis de l'avant dans cette recherche ont permis de surmonter ces difficultés en considérant simultanément les mécanismes de rupture géotechniques, hydrologiques et structuraux de même que leurs nombreuses interrelations en tenant compte des incertitudes et du jugement d'expert.

À l'aide de l'approche globale et multidisciplinaire proposée, il a été possible de comparer, selon le dénominateur commun qu'est la probabilité de rupture, les risques géotechnique et hydrologique reliés au barrage de même que le risque relié à la fiabilité des composantes mécaniques/électriques de l'évacuateur. L'analyse réalisée a ainsi permis d'identifier les facteurs contribuant le plus au risque et les travaux de réfection à réaliser en priorité.

L'application des concepts novateurs d'analyse du risque barrage présentés dans cette thèse sur des exemples touchant des cas pratiques a permis de confirmer leur efficacité pour la modélisation simultanée de la complexité et de l'incertitude inhérentes au risque.

L'atteinte des objectifs de cette recherche a contribué à l'avancement des connaissances concernant l'étude des risques reliés à des infrastructures essentielles par le développement de concepts remplaçant la vision actuelle sectorielle par une vision plus globale.

ABSTRACT

No one can predict risk with certainty because two of its main characteristics are complexity and uncertainty. Even when a dam is judged to be safe and is monitored and operated in a responsible way, there still exists a residual risk that is always present if population or property are located in the potential flood zone. Dam failures are not common but they always have important human, material and environmental consequences. The establishment of risk-reduction measures is therefore an important part of the responsibilities of a dam owner.

Risk is a danger that implies a well-planned action. The main objectives of this research project are first to establish this danger, which is defined in relation with the probability of failure of the dam, and second to determine the most appropriate action to reduce it.

The existing risk analysis methodologies do not allow the adequate prioritization of dam safety interventions and do not take into account the complexity and the uncertainties that characterize risk. A literature review and the realization of risk analyses for embankment dams in Hydro Québec have shown that these methodologies present limitations related to the calculation and representation of risk in absolute terms. Important difficulties have also been identified in relation to the modelling of the effects of interventions on a dam, the interrelations between the various failure mechanisms and the lack of flexibility of the existing tools for analysis.

The use of bayesian networks is proposed to overcome the identified weaknesses of the existing tools and to capitalize on their merits. A bayesian network is a causal graph where the variables of the considered system are represented by nodes and their dependencies by directional links. The underlying probabilistic representation allows the quantification of the strength of these dependencies and the realization of inferences to

aid decision-making. These calculations are based on Bayes' theorem which can be considered as the mathematical expression of learning from experience.

The concepts put forward in this research allow the determination of an updated picture of dam risk which takes into account the numerous interrelations between failure mechanisms as well as the uncertainties and the expert judgements that are always present in the analyses.

The possibilities offered by the proposed approach allows the realization of multiple forms of queries including previsions and diagnostics used, among others, to identify the most probable causes of a dam failure. Sensitivity analyses can also be performed to identify factors contributing the most to risk as well as optimal interventions in terms of their risk-reduction potential and their costs. It is also possible to model more specifically certain critical aspects of a problem to compare the effects of non structural measures on the probability of failure. Consequently, risk analysis becomes a much more powerful and versatile tool for decision making.

The representation of dam safety risk for a generic example has allowed the innovative examination of the links between failure mechanisms using a causal model. The establishment of probability tables for each of the variables has allowed the quantification of uncertainties by taking into account statistical data and also expert judgement based on data, models and knowledge related to the dam.

Contrary to the existing risk analysis methods, the approach presented in this research characterizes risk without reference to an absolute interpretation of the probability of failure which causes many problems related to its interpretation and use. The probability of failure is rather considered as a comparison basis, or a common denominator, used for the determination of the relative importance of each uncertain element that could cause

failure and used also to judge the potential effectiveness of structural or non structural risk-reduction measures.

The use of bayesian networks has also contributed to solve an actual risk analysis problem for a World Bank project involving irrigation and flood protection works. The embankment dam and the spillway present multiple technical problems that could endanger their short term safety. Due to the number and the severity of these problems, the global representation of dam safety risk using the existing methods is not possible. The innovative concepts put forward in this research have allowed the analysis of the geotechnical, hydrological and structural failure mechanisms and their numerous interrelations as well as the consideration of uncertainties and expert judgement.

With the help of the global and multidisciplinary approach proposed, it was possible to compare, according to the probability of failure being used as a common denominator, the geotechnical and hydrological risks related to the embankment dam as well as the risk related to the reliability of the electrical/mechanical components of the spillway. The analysis has allowed the identification of the factors contributing the most to the overall risk and the interventions to be realized in priority.

The use of the innovative dam safety risk analysis concepts presented in this research on examples related to actual case studies confirmed their effectiveness for the simultaneous modelling of the complexity and uncertainties inherent to risk.

The realization of the objectives of this research has contributed to the advancement of knowledge concerning the analysis of risks related to essential infrastructures by the development of concepts replacing the actual sectoral vision of risk by a more global and holistic approach.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS . . . . . **iv**

RÉSUMÉ . . . . . **v**

ABSTRACT . . . . . **ix**

TABLE DES MATIÈRES . . . . . **xii**

LISTE DES TABLEAUX . . . . . **xviii**

LISTE DES FIGURES . . . . . **xx**

LISTE DES ABRÉVIATIONS . . . . . **xxiv**

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION **1**

CHAPITRE 2 : L'APPROCHE RISQUE EN SÉCURITÉ DES BARRAGES **6**

2.1 Concept du risque 6

2.2 Statistiques sur les ruptures de barrages 7

2.3 Le risque barrage 9

2.3.1 Utilisation de l'approche risque 9

2.3.2 Alternatives de réduction du risque 10

2.3.3 Historique des analyses de risque 12

2.3.4 Niveaux d'application 14

2.4 État de la pratique actuelle en analyse de risque 15
2.4.1 Description sommaire des mécanismes de rupture 15
2.4.2 Méthodes par indice 16
2.4.3 Méthodes de type portfolio 17
2.4.4 Analyses de risque détaillées. 18
2.5 Limitations identifiées lors de la réalisation
d'analyses de risque détaillées 21
2.5.1 Introduction 21
2.5.2 Représentation du risque 22
2.5.3 Limites des calculs conventionnels du risque 23
2.5.4 Utilisation des arbres d'événements 24
2.5.5 Interrelations entre les mécanismes de rupture 26
2.6 Approche proposée 27
2.7 Résumé 28

CHAPITRE 3 : LES RÉSEAUX BAYÉSIENS 34
3.1 Introduction 34
3.2 Composantes d'un réseau bayésien 37
3.3 Construction d'un réseau bayésien 39
3.4 Circulation de l'information dans un réseau bayésien 45
3.5 Causalité et statistiques 47
3.6 Comparaison avec d'autres formes d'intelligence artificielle 50
3.7 Résumé 54

CHAPITRE 4 : CALCULS D'INFÉRENCE 60

4.1 Introduction 60

4.2 Axiomes des probabilités 61

4.2.1 Diagrammes de Venn 61

4.2.2 Description des axiomes des probabilités 61

4.3 Interprétations des probabilités 63

4.4 Probabilités conditionnelles 66

4.4.1 Considérations générales 66

4.4.2 Théorème des probabilités conditionnelles 67

4.4.3 Probabilités marginales 68

4.5 Règle d'enchaînement 69

4.6 Théorème de Bayes 71

4.7 d-séparation 73

4.8 Description des algorithmes 75

4.8.1 Réseaux en chaîne 76

4.8.2 Réseaux en arbre 78

4.8.3 Réseaux en polyarbre 80

4.8.4 Réseaux avec boucle 84

4.8.5 Logiciel de calcul 85

4.9 Résumé 86

CHAPITRE 5 : DÉTERMINATION DES PROBABILITÉS 95

5.1 Introduction 95

5.2 Description des types d'incertitudes 96

5.3 Exemple de l'influence de l'incertitude sur l'évaluation du risque de rupture 98

5.4 Méthode d'élicitation des probabilités 101

5.4.1 Importance du jugement d'expert et d'un processus d'élicitation structuré 101

5.4.2 Heuristiques et biais 102
5.4.3 Processus d'évaluation des probabilités 104
5.5 Calcul des probabilités avec la technique du "OU Approché" 110
5.6 Résumé 112

CHAPITRE 6 : APPLICATION DU CONCEPT DES RÉSEAUX BAYÉSIENS AUX BARRAGES 118
6.1 Introduction 118
6.2 Types de variables 119
6.3 Définition du problème d'application. 124
6.4 Construction du modèle causal (phase qualitative) 127
6.4.1 Variables 127
6.4.2 États 130
6.4.3 Liens de causalité 132
6.5 Détermination des probabilités (phase quantitative) 133
6.5.1 Initiateurs 133
6.5.2 Indicateurs directs 135
6.5.3 Indicateurs indirects 142
6.5.4 Variables externes 144
6.6 Résumé 145

CHAPITRE 7 : DÉTERMINATION DES MESURES OPTIMALES DE RÉDUCTION DU RISQUE 157
7.1 Introduction 157
7.2 Mise à jour des probabilités 159
7.2.1 Généralités 159
7.2.2 Probabilités marginales 159
7.2.3 Probabilités conditionnelles 162

7.2.4 Conflits potentiels entre les observations et le réseau bayésien 167
7.3 Analyses de sensibilité 169
7.3.1 Généralités 169
7.3.2 Impact, criticité et indice de priorité 169
7.3.3 Détermination de l'impact et de la criticité des variables. . . 172
7.3.4 Variables ayant le plus grand potentiel de réduction du risque 173
7.3.5 Alternatives de réduction du risque 174
7.3.6 Alternatives de réduction du risque pour les indicateurs indirects 180
7.4 Modélisation spécifique 185
7.5 Résumé 188

CHAPITRE 8 : EXEMPLE PRATIQUE 197
8.1 Introduction 197
8.2 Description de l'aménagement Vuc Mau 198
8.3 Définition du problème 200
8.4 Calcul de l'hydrogramme unitaire 204
8.5 Laminage des crues 207
8.6 Remontée des vagues dues au vent 212
8.7 Construction du réseau bayésien 215
8.7.1 Interrelations entre les mécanismes de rupture et les initiateurs 215
8.7.2 Fonctionnement de l'évacuateur 216
8.7.3 Submersion de la crête 223
8.7.4 Érosion interne 226
8.8 Réseau bayésien pour le barrage Vuc Mau 232
8.9 Détermination des mesures optimales de réduction du risque 234

8.10 Résumé 239

CHAPITRE 9 : CONCLUSION 268

9.1 Résultats, contributions originales et limitations 268

9.2 Perspectives de recherche 272

RÉFÉRENCES 277

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Probabilités spécifiées pour le réseau bayésien de la Figure 4.12 88
Tableau 5.1 : Calcul des probabilités du nœud *rupture* 114
Tableau 6.1 : Variables et états servant à définir l'exemple d'application 147
Tableau 6.2 : Table de probabilités du nœud *S* 147
Tableau 6.3 : Table de probabilités du nœud *RE*. 147
Tableau 6.4 : Table de probabilités du nœud *RS*. 148
Tableau 6.5 : Table de probabilités du nœud *VEP* 148
Tableau 6.6 : Table de probabilités du nœud *TC* 148
Tableau 6.7 : Table de probabilités du nœud *TP* 148
Tableau 6.8 : Calcul des probabilités du nœud *GM* 149
Tableau 6.9 : Table de probabilités du nœud *GM* 149
Tableau 6.10: Table de probabilités du nœud *SC* 149
Tableau 6.11: Table de probabilités du nœud *R* 150
Tableau 6.12: Calcul des probabilités du nœud *BP* 150
Tableau 6.13: Table de probabilités du nœud *BP* 150
Tableau 6.14: Table de probabilités du nœud *ADM* 151
Tableau 6.15: Table de probabilités du nœud *V* 151
Tableau 6.16: Table de probabilités du nœud *SNF* 151
Tableau 7.1 : Calcul de l'impact négatif et de la criticité 191
Tableau 7.2 : Interventions ayant un impact positif sur *P(R)* 191
Tableau 7.3 : Coûts reliés aux interventions possibles 192
Tableau 7.4 : Effet de la réalisation des alternatives proposées sur *P(R)* 192
Tableau 7.5 : Calcul de l'impact positif et de l'indice de priorité 193
Tableau 7.6 : Alternatives optimales 193
Tableau 7.7 : Calcul de la pertinence 194

Tableau 7.8 : Table de probabilités modifiées du nœud *ADM* 194
Tableau 7.9 : Calcul de l'indice de priorité 194
Tableau 8.1 : Hydrogramme unitaire 242
Tableau 8.2 : Caractéristiques du réservoir 243
Tableau 8.3 : Précipitations et débits en fonction de la période de récurrence (le niveau du réservoir à $t = 0$ est égal à 21 m pour ce calcul) 243
Tableau 8.4 : Vitesse des vents 243
Tableau 8.5 : Remontée totale due au vent 244
Tableau 8.6 : Table de probabilités du nœud *VV* 244
Tableau 8.7 : Table de probabilités des nœuds x = *AE*, *SM*, *V1*, *V2* et *V3*. 244
Tableau 8.8 : Table de probabilités du nœud *GP* 244
Tableau 8.9 : Table de probabilités du nœud *ML* 245
Tableau 8.10: Table de probabilités du nœud *FE* 245
Tableau 8.10: Table de probabilités du nœud *FE* (suite) 246
Tableau 8.11: Table de probabilités du nœud *P24* 246
Tableau 8.12: Table de probabilités du nœud *NMR* 247
Tableau 8.13: Table de probabilités du nœud *RV* 248
Tableau 8.14: Table de probabilités du nœud *SD* 248
Tableau 8.15: Table de probabilités du nœud *ZP* 249
Tableau 8.16: Table de probabilités du nœud *GM* 249
Tableau 8.17: Table de probabilités du nœud *SE* 249
Tableau 8.18: Table de probabilités du nœud *SNF* 249
Tableau 8.19: Table de probabilités du nœud *TP* 250
Tableau 8.20: Table de probabilités du nœud *R* 250
Tableau 8.21: Coût des options envisagées pour le réduction du risque 251
Tableau 8.22: Calcul de l'impact et de la criticité 251
Tableau 8.23: Calcul de l'impact positif et de l'indice de priorité 251

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Alternatives de réduction du risque 30
Figure 2.2 : Niveaux d'application de l'approche risque en sécurité des barrages . . 30
Figure 2.3 : Évaluation de la probabilité de rupture par érosion interne à l'aide d'un arbre d'événements 31
Figure 2.4 : Représentation conventionnelle du risque 32
Figure 2.5 : Arbre d'événements comportant plusieurs états 33
Figure 3.1 : Illustration du principe des réseaux bayésiens (Becker et Nadim 1999) 56
Figure 3.2 : Composantes d'un réseau bayésien, nœuds et états 56
Figure 3.3 : Composantes d'un réseau bayésien, liens directionnels 56
Figure 3.4 : Composantes d'un réseau bayésien, ensembles de probabilités 57
Figure 3.5 : Construction d'un réseau bayésien, nœuds 57
Figure 3.6 : Construction d'un réseau bayésien, états 57
Figure 3.7 : Construction d'un réseau bayésien, relations causales 58
Figure 3.8 : Construction d'un réseau bayésien, modèle causal corrigé 58
Figure 3.9 : Construction d'un réseau bayésien, tables de probabilités 59
Figure 4.1 : Diagramme de Venn, événemements mutuellement exclusifs 89
Figure 4.2 : Diagramme de Venn, événemements non mutuellement exclusifs . . . 89
Figure 4.3 : Réseau bayésien pour exemple de calcul selon la règle d'enchaînement 89
Figure 4.4 : Connexions en série et d-séparation 89
Figure 4.5 : Connexions divergentes et d-séparation 90
Figure 4.6 : Connexions convergentes et d-séparation 90
Figure 4.7 : Réseau bayésien en chaîne, représentation générale 90
Figure 4.8 : Réseau bayésien en chaîne, exemple de calcul 91
Figure 4.9 : Réseau bayésien en arbre 91

Figure 4.10: Arbre d'événements 91
Figure 4.11: Utilisation d'un réseau bayésien pour la modélisation d'un arbre d'événements 92
Figure 4.12: Réseau bayésien en polyarbre 92
Figure 4.13: Réseau bayésien avec boucle 93
Figure 4.14: Illustration de la technique de l'arbre de jonction 93
Figure 4.15: Exemple d'écran du logiciel de calcul HUGIN 94
Figure 5.1 : Types d'incertitude 115
Figure 5.2 : Coefficients de sécurité et probabilités de rupture 115
Figure 5.3 : Description littérale de probabilité 116
Figure 5.4 : Exemple de tableau POUR/CONTRE 116
Figure 5.5 : Exemple d'échelle de probabilités 117
Figure 5.6 : Utilisation de la technique du "OU Approché" 117
Figure 6.1 : Types de variables dans un réseau bayésien 152
Figure 6.2 : Coupe du barrage étudié dans le problème d'application 152
Figure 6.3 : Première version du modèle causal pour l'exemple d'application . . . 153
Figure 6.4 : Modèle causal pour l'exemple d'application 153
Figure 6.5 : Variations du niveau du réservoir 154
Figure 6.6 : Distribution cumulative de probabilités de *RE* 154
Figure 6.7 : Précipitations journalières au site du barrage 155
Figure 6.8 : Distribution cumulative de probabilités de *RS* 155
Figure 6.9 : Distribution de probabilités des coefficients de sécurité face au glissement de masse 156
Figure 7.1 : Types de raisonnements 195
Figure 7.2 : Variations de l'indice de priorité en fonction du coût total 195
Figure 7.3 : Modélisation spécifique pour la capacité de détection et d'intervention relative à l'érosion interne 196
Figure 7.4 : Modélisation spécifique des facteurs influençant la capacité de détection et d'intervention relative à l'érosion interne 196

Figure 8.1 : Localisation de l'aménagement Vuc Mau (Vietnam) 252
Figure 8.2 : Localisation de l'aménagement Vuc Mau (province de Nghe An) . . . 253
Figure 8.3 : Localisation des ouvrages de Vuc Mau 253
Figure 8.4 : Barrage Vuc Mau 254
Figure 8.5 : Évacuateur Vuc Mau 254
Figure 8.6 : Zones les plus affectées par l'érosion interne 255
Figure 8.7 : Hydrogramme unitaire 24 heures calculé 255
Figure 8.8 : Débit évacué en fonction du niveau du réservoir 256
Figure 8.9 : Courbe d'emmagasinement du réservoir Vuc Mau 256
Figure 8.10: Relation Volume-Débit du réservoir Vuc Mau 257
Figure 8.11: Résolution de l'équation de continuité 257
Figure 8.12: Précipitations en 24 heures 258
Figure 8.13: Hydrogramme et variations du niveau du réservoir pour une crue centennale 258
Figure 8.14: Niveau maximum du réservoir atteint pour différentes périodes de récurrence 259
Figure 8.15: Remontée totale due au vent 260
Figure 8.16: Interrelations entre les composantes du risque de rupture 260
Figure 8.17: Modèle causal global 261
Figure 8.18: Arbre de défaillance global pour l'évacuateur 261
Figure 8.19: Arbre de défaillance pour l'évacuateur 262
Figure 8.20: Modélisation des connexions en "OU" 263
Figure 8.21: Modélisation des connexions en "ET" 263
Figure 8.22: Modèle causal pour le fonctionnement de l'évacuateur 264
Figure 8.23: Modèle causal pour le risque de submersion 265
Figure 8.24: Exemple de simulations de Monte Carlo 265
Figure 8.25: Modèle causal pour le risque d'érosion interne 266
Figure 8.26: Exemple de réseau d'écoulement calculé pour le barrage Vuc Mau . . 266
Figure 8.27: Réseau bayésien pour le barrage Vuc Mau 267

Figure 9.1 : Schéma conceptuel de l'approche proposée 275
Figure 9.2 : Modélisation des conséquences de rupture 276
Figure 9.3 : Modélisation du risque relié à plusieurs types d'infrastructures 276

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACB	Association Canadienne des Barrages
ANCOLD	Australian National Committee on Large Dams
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance et des Conséquences
CIGB	Commission Internationale des Grands Barrages
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
SEBJ	Société d'Énergie de la Baie James
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
USSD	United States Society on Dams

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La notion de risque est inhérente à l'existence humaine (Denis 1998). Un risque, selon la définition généralement admise, est le résultat de probabilités et de conséquences. En plus d'être présent dans les organisations, le risque touche les systèmes technologiques tels les barrages.

Même lorsqu'un barrage est jugé sécuritaire et est surveillé et exploité de façon responsable, ce dernier pose un risque résiduel qui est toujours présent si des personnes ou des biens sont localisés dans la zone d'inondation potentielle. Les ruptures de barrages sont relativement rares mais elles ont toujours des conséquences très importantes tant au niveau humain qu'aux niveaux environnemental et matériel. L'établissement de mesures de réduction du risque est donc une des responsabilités d'un propriétaire de barrages.

Depuis le début du 19e siècle, plus de 600 cas de rupture ont été publiés dans le monde (Commission Internationale des Grands Barrages [CIGB] 1977). Le Québec compte aussi malheureusement quelques cas de ruptures de barrages: la submersion du barrage Les Éboulements en 1966 provoqua la mort de 3 personnes (Boivin 1994), l'érosion interne du barrage du Lac Beloeil en 1985 causa une catastrophe écologique (Robert et Paré 1992) et la submersion et la rupture de quelques ouvrages au Saguenay en 1996 causèrent d'importants dégâts matériels.

Afin d'offrir un cadre juridique à la gestion des barrages et de leurs risques, la loi provinciale sur la sécurité des barrages a été adoptée en 2000 et vise plus de 5000

ouvrages. Aussi, il existe plus de 360 barrages de résidus miniers au Québec qui posent des risques supplémentaires à cause du degré de contamination des eaux retenues (Marche 2004). Plusieurs de ces structures nécessitent d'importants travaux de réfection afin de diminuer les risques qu'ils posent. Les risques reliés aux barrages doivent donc être gérés et pour être gérés ils doivent être compris.

Les deux caractéristiques principales du risque sont la complexité et l'incertitude ce qui implique qu'il n'existe pas de "vraie" valeur du risque pour une situation donnée. Le risque est une estimation, une perception d'un futur incertain basée sur des connaissances acquises dans le passé. Ainsi, la notion de risque est intimement reliée à celle du temps. Il ne peut y avoir de risque associé au passé, ce concept n'étant appliqué qu'aux événements futurs et incertains.

La représentation habituelle du risque par le produit des probabilités et des conséquences comporte plusieurs problèmes lorsqu'elle est appliquée aux barrages. Les évaluations statistiques et l'interprétation de probabilités en termes absolus sont peu pratiques car chaque barrage est unique au point de vue hydrologie, géologie, structural et géotechnique. De plus, la multiplication d'une faible probabilité de rupture par des conséquences très grandes revient à multiplier zéro et l'infini ce qui donne un résultat instable mathématiquement et difficilement utilisable comme base de comparaison.

La réalisation d'analyses de risque comporte des avantages reliés à la prise en compte du jugement d'expert et des incertitudes techniques. Cependant, les méthodes actuelles d'analyse présentent certaines limitations en rapport au calcul et à la représentation du risque en termes absolus. D'importantes difficultés ont aussi été identifiées en rapport à la modélisation des possibilités d'intervention sur un barrage, des interrelations entre les mécanismes de rupture et du manque de flexibilité des outils existants pour l'identification des solutions optimales de réduction du risque.

L'état de la pratique actuelle reliée au risque barrage ne permet pas de prioriser de façon adéquate les interventions en sécurité des barrages. Les analyses de risque ne peuvent prendre en compte simultanément la complexité et les incertitudes inhérentes au risque. De plus, les difficultés importantes reliées à la signification des probabilités de rupture font en sorte que les valeurs numériques obtenues sont d'une utilité limitée lorsqu'elles sont considérées sur une base absolue.

Les objectifs de cette thèse sont inspirés de la définition du risque proposée par la philosophe française Simone Weil (1962): *" le risque est un danger qui provoque une action réfléchie "*. Le premier objectif est d'identifier ce danger par la constitution d'un portrait actualisé du risque barrage sans passer par une interprétation absolue de la probabilité de rupture et qui tienne compte de la complexité, des incertitudes et des jugements techniques toujours présents dans le domaine de l'analyse des barrages. Le deuxième objectif porte sur l'établissement de critères qui permettent une action réfléchie par la détermination des mesures optimales de réduction du risque.

La réalisation de ces objectifs montre que l'approche risque permet d'améliorer la compréhension du comportement d'un barrage et est une aide à la décision efficace pour identifier les éléments les plus critiques qui composent le risque et prioriser les interventions de réduction de ce risque.

Il est nécessaire d'étudier non seulement les mécanismes de rupture de barrage isolément mais aussi de résoudre les problèmes reliés à l'interaction entre les mécanismes. Ce n'est pas tant le nombre des composantes qui rend un système complexe mais plutôt la multiplicité de leurs relations cause à effet. La réalisation des analyses de risque doit permettre d'avoir une vision globale des phénomènes et d'étudier les effets des interrelations entre les composantes du système.

Les réseaux bayésiens permettent de considérer un problème dans son ensemble grâce à une approche qui met en perspective toutes ses composantes. Cette forme d'intelligence artificielle traite les connaissances et les incertitudes par la représentation graphique des variables et des relations causales qui existent entre elles et par des évaluations numériques, en termes de probabilités calculées ou obtenues par jugement d'expert, des relations saisies par le graphe. Il est alors possible de modéliser des systèmes complexes et incertains comportant plusieurs interdépendances entre les variables.

L'application des concepts mis de l'avant dans cette recherche est réalisée à l'aide d'exemples portant sur des ouvrages en remblai. Le premier ouvrage étudié est un exemple d'application qui ne vise pas un barrage existant mais qui est néanmoins basé sur des problématiques réelles rencontrées en pratique. Le deuxième ouvrage étudié est un barrage existant pour lequel des problèmes de sécurité ont été identifiés dans le cadre d'une étude réalisée au Vietnam à titre de consultant pour un mandat de la Banque Mondiale.

L'introduction dans cette thèse du concept des réseaux bayésiens pour l'analyse du risque relié à des infrastructures essentielles permet de tenir compte pour la première fois de la complexité et des incertitudes selon une approche globale et multidisciplinaire qui considère simultanément des mécanismes de rupture géotechniques, hydrologiques et structuraux. Cette forme d'intelligence artificielle permet d'identifier les éléments les plus critiques d'un problème et la solution optimale en termes de coûts et de réduction potentielle du risque. L'approche novatrice proposée contribue à remplacer la vision actuelle sectorielle de l'analyse de risque par une vision plus globale.

Le présent texte est organisé en deux grandes parties. La première est une revue critique des techniques actuelles d'analyse du risque barrage et une description de l'approche présentée pour résoudre les difficultés rencontrées en pratique tout en mettant en valeur les avantages retirés.

Le Chapitre 2 traite de l'approche risque en sécurité des barrages et des limitations identifiées suite à une revue de la littérature et lors de la réalisation d'analyses de risque chez Hydro Québec. Le concept des réseaux bayésiens proposé pour résoudre ces difficultés est décrit au Chapitre 3. Le Chapitre 4 comprend un rappel des notions de probabilités et un examen des caractéristiques des réseaux bayésiens et des algorithmes de calcul utilisés. Le Chapitre 5 est consacré aux incertitudes, à leur influence sur l'évaluation des risques et à la présentation des points à considérer pour la détermination des probabilités associées à un réseau bayésien à partir du jugement d'expert.

La seconde partie correspond à l'application du concept des réseaux bayésiens. Le Chapitre 6 traite des types de variables et des phases qualitative et quantitative reliées à la modélisation de la probabilité de rupture d'un barrage à l'aide d'un exemple visant un ouvrage en remblai. L'identification des mesures optimales de réduction du risque à l'aide des concepts d'impact, de criticité, d'indice de priorité et de pertinence est décrite au Chapitre 7. Le Chapitre 8 traite du barrage Vuc Mau au Vietnam où les risques hydrologiques, géotechniques et ceux reliés à la fiabilité de l'évacuateur de crue sont comparés à partir des rares données existantes et d'informations recueillies sur le terrain. Les interventions envisagées pour la réduction du risque sont évaluées en fonction de leur effet sur la probabilité de rupture et de leur coût réel. Le Chapitre 9 conclut sur la portée des analyses réalisées et des concepts proposés dans cette thèse et identifie des perspectives de recherche.

Les Tableaux et Figures sont regroupés à la fin de chaque chapitre.

CHAPITRE 2

L'APPROCHE RISQUE EN SÉCURITÉ DES BARRAGES

2.1 Concept du risque

Le risque zéro n'existe pas. L'exploitation des barrages, à l'instar de toute intervention humaine, peut engendrer un risque d'incident ou d'accident dont les conséquences peuvent affecter les personnes, les biens et l'environnement. Un propriétaire de barrages est un générateur de risques et il doit donc gérer ces risques.

Dans sa forme la plus globale, le risque barrage comprend plusieurs facettes reliées aux phases de conception, de construction et d'exploitation d'un ouvrage. Le risque dont il est question dans cette thèse réfère à la phase d'exploitation d'un barrage. Il est cependant entendu que ce risque est tributaire des actions réalisées durant la conception et la construction.

Le risque est défini comme la probabilité qu'un événement se produise et que des conséquences particulières découlent de cet événement. Les conséquences dont il est question ici sont négatives, elles ont le sens de danger à redouter et de pertes. Ce danger implique une forme de vulnérabilité de la réponse et amène des réactions différentes selon nos perceptions ou notre degré de connaissance (Denis 1998).

Le problème avec la notion de risque est qu'il s'agit toujours de probabilités ou de convictions ce qui implique que personne ne peut prédire le risque avec certitude et qu'il n'existe pas de "vraie" valeur du risque pour une situation donnée. Le risque est donc une estimation, une perception provenant d'informations colligées dans le passé. Il n'est

pas une quantité concrète en dépit de la tendance à le percevoir et à le traiter comme tel. Personne ne peut prédire le risque avec certitude car deux de ses caractéristiques principales sont la complexité et l'incertitude.

2.2 Statistiques sur les ruptures de barrages

La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) définit une rupture de barrage comme la rupture ou le mouvement d'une partie d'un barrage ou de sa fondation provoquant la vidange incontrôlée du réservoir (CIGB 1995). Même si un barrage tient bon suite à une submersion, la vidange incontrôlée du réservoir fait en sorte que la structure ne peut plus remplir son rôle principal c'est-à-dire retenir l'eau. Ces cas sont donc aussi considérés comme des ruptures de barrage.

Selon le registre mondial des grands barrages, qui ne comprend que les structures ayant plus de 15 m de hauteur ou retenant plus de 10^6 m^3 d'eau (en excluant la Chine), 5268 barrages ont été construits jusqu'en 1950 (CIGB 1995). De ce groupe, 2,2% des barrages se sont rompus. Pour les 12138 barrages construits depuis 1951, le taux de rupture est de 0,5%. Environ 70% des ruptures eurent lieu au cours des 10 premières années d'exploitation et plus spécialement durant la première année.

Dans les chapitres suivants, des exemples touchant des barrages en remblai sont décrits afin d'illustrer les concepts mis de l'avant dans cette thèse. Pour ce type de barrage, la submersion constitue le mode de rupture le plus fréquent (31% des ruptures) suivi par l'érosion interne du corps du barrage (15% des ruptures) et l'érosion interne des fondations (12% des ruptures) (CIGB 1995).

Depuis 25 ans, les ruptures de barrages aux États Unis ont causé en moyenne 5 pertes de vie par an (Graham 2000). Entre 1960 et 1998, il y eut 23 ruptures de barrage avec

pertes de vie causant 318 décès dont plus de 88% sont reliés à la rupture d'ouvrages de moins de 15 m de hauteur (United States Bureau of Reclamation [USBR] 1999). Ces ouvrages ne sont donc pas considérés comme des grands barrages et ne font pas partie des statistiques de la CIGB.

La revue de tous les cas publiés montre que les barrages modernes ont une probabilité de rupture de l'ordre de 10^{-4} par an (De Medeiros 2000). Il faut mentionner que pour la plupart de ces barrages, le risque de pertes de vie dû aux accidents de travail pendant la construction est plus élevé que le risque de rupture de l'ouvrage en phase d'exploitation (CIGB 1989).

La revue des cas publiés ne donne pas un portrait complet de l'incidence des ruptures de barrages car les indices qui pourraient permettre de décrire les mécanismes de rupture de façon détaillée sont détruits lors des catastrophes et de plus, le prototypage n'est pas possible (Sowers 1993).

Cependant, l'établissement de statistiques de rupture exhaustives est sujette à des difficultés encore plus grandes. Pour des raisons politiques ou d'image corporative, les gouvernements et les propriétaires d'ouvrages ne sont pas enclins à publiciser la rupture de leurs barrages. Par exemple, la rupture des barrages de Shimantan et de Banqiao en 1975 en Chine provoqua directement la mort de plus de 26000 personnes. Même si cette catastrophe fut la plus meurtrière de l'histoire moderne en rapport à des structures de génie civil (Sowers 1993), les publications officielles concernant ces ruptures sont inexistantes.

Malgré qu'elles soient incomplètes, les statistiques permettent néanmoins de conclure de façon générale que le risque de rupture des barrages, bien que faible, est toutefois réel. Par conséquent, l'établissement de mesures de réduction du risque représente une part importante de la responsabilité d'un propriétaire de barrages.

2.3 Le risque barrage

2.3.1 Utilisation de l'approche risque

L'objectif principal de l'utilisation de la notion de risque en sécurité des barrages est l'aide à la décision. La caractérisation des risques est une activité qui doit permettre de mettre en valeur les options disponibles afin de solutionner les problèmes.

La réalisation d'une analyse de risque a pour but d'identifier les mécanismes de rupture plausibles et ce qui peut être fait pour diminuer leur probabilité d'occurrence ou leurs conséquences potentielles. Les résultats d'une analyse de risque servent d'aide à la décision dans la détermination des actions appropriées et des options à prioriser pour réduire ce risque.

L'utilisation de l'approche risque permet d'identifier les mécanismes de rupture contribuant le plus au risque global et d'optimiser les mesures de réduction du risque qui sont alors dirigées vers les aspects les plus critiques. L'évaluation de ces mesures en termes de coûts et de réduction du risque permet aussi de mettre en valeur des interventions non structurales telles l'établissement de plans de mesures d'urgence qui sont souvent plus simples à mettre en place et plus efficaces que des travaux de confortement à plus grande échelle (CIGB 2001a, Vick 2000).

L'utilisation de l'approche risque en sécurité des barrages implique un changement fondamental, partant d'un raisonnement unidimensionnel basé sur la connaissance objective et déterministe, vers un raisonnement à plusieurs dimensions, qui tient également compte de convictions et d'incertitudes comme éléments centraux de la démarche (Kreuzer 2000).

Enfin, l'approche risque encadre de façon systématique le processus de raisonnement qui sous-tend le jugement d'ingénieur et assure sa transparence afin qu'il puisse être validé et que les sources et l'importance des incertitudes soient décrites de façon explicite.

2.3.2 Alternatives de réduction du risque

Il y a toujours une limite au degré de conservatisme à adopter lors de la réfection d'un barrage. Des efforts démesurés pour réduire le risque peuvent annuler les bénéfices retirés de la présence du barrage. Cependant, la nature catastrophique d'une rupture place le propriétaire de barrages dans l'obligation d'employer tous les moyens raisonnables pour réduire le niveau de risque auquel la population est exposée (CIGB 2001b).

La réduction du risque doit se faire en examinant un large éventail de mécanismes de rupture plausibles afin de détecter et de prévenir les problèmes d'une manière globale et efficace en termes de coûts. L'identification des mécanismes de rupture spécifiques et des conséquences potentielles d'une rupture sert à préciser les mesures correctives les plus efficaces et permet de trouver quel type d'information est nécessaire pour qu'une évaluation mieux ciblée de la sécurité d'un barrage puisse être faite.

Le risque est souvent quantifié en multipliant une probabilité annuelle de rupture par des conséquences monétaires ou en pertes de vie. Le risque est alors exprimé en dollars par année ou en pertes de vie par année et est comparé à un critère d'acceptabilité.

Pour chaque cas de chargement considéré, le risque relié au barrage requiert l'évaluation de la probabilité d'un chargement, de la probabilité de rupture étant donné ce chargement et des conséquences occasionnées par la rupture. Dans sa forme la plus simple, le risque est calculé à l'aide de l'Équation 2.1 où il est égal au produit de ces trois paramètres pour les cas de chargement et les réponses possibles qui ont été envisagés:

$$\text{risque} = \sum_{i=1}^{\substack{\text{cas} \\ \text{chargement}}} \left(P(\text{chargement}_i) * \sum_{j=1}^{\substack{\text{réponses} \\ \text{possibles}}} \left(P(\text{rupture}) * \text{conséquences} \right)_j \right) \qquad (2.1)$$

Idéalement, les interventions servant à réduire le risque devraient être justifiées par leur efficacité sur la réduction de la probabilité de rupture et/ou des conséquences potentielles.

À titre d'exemple, la Figure 2.1 montre des pistes de réduction du risque pour un barrage en remblai soumis à une crue extrême. L'analyse globale du risque et des mécanismes de rupture permet d'envisager quatre options pour diminuer le risque. Chacune de ces options a pour effet de diminuer soit les conséquences, soit la probabilité de rupture ou une combinaison des deux.

L'implantation de mesures non structurales permet de diminuer le risque en agissant surtout sur les conséquences. Par exemple, l'établissement de mesures d'urgence augmente le temps d'alerte ce qui permet de réduire le nombre de pertes de vie et donc les conséquences (voir Figure 2.1).

Les mesures structurales diminuent le risque en agissant surtout sur la probabilité de rupture. Par exemple, la protection du barrage contre l'érosion rend la structure plus sécuritaire face à la submersion ce qui diminue la probabilité de rupture (voir Figure 2.1).

La solution privilégiée permet de diminuer le plus possible le risque au meilleur coût c'est-à-dire en minimisant le ratio (coûts)/(réduction du risque).

La Figure 2.1 est une représentation conceptuelle des principales composantes du risque et de l'effet des mesures pouvant réduire ce risque. Elle sert à illustrer les principes

généraux qui sous-tendent la prise de décisions en utilisant l'approche risque. Cependant, l'utilisation directe de la Figure 2.1 comme aide à la décision concernant le choix d'une mesure de réduction du risque dans une situation réelle est difficile car le risque et l'effet des mesures de réduction proposées y sont implicitement considérés comme des valeurs concrètes et absolues.

Cette approche suppose qu'il existe une "vraie" valeur de risque pouvant être calculée de façon analytique. Certaines des limitations reliées à l'interprétation d'une valeur absolue du risque sont discutées à la Section 2.5.

2.3.3 Historique des analyses de risque

Les premières expériences en analyse de risque pour les barrages ont été réalisées par le United States Bureau of Reclamation (USBR) en 1978. Elles étaient basées sur des travaux publiés en 1975 concernant des analyses sismiques (Von Thun 1998). En 1995, le USBR a implanté formellement les analyses de risque dans ses activités. Par la suite, le concept de risque a aussi été utilisé par le United States Army Corps of Engineers (USACE) en 1997 (Workshop report 1998). Les premières expériences de BC Hydro au Canada et du Comité Australien des Grands Barrages (ANCOLD) eurent lieu au début des années 90 (Bowles, Anderson et Glover 1998)

La tendance internationale est maintenant d'intégrer les concepts du risque dans les activités de sécurité des barrages (Darbre 2000). Ces concepts sont de plus en plus utilisés par les propriétaires de barrages en Australie, aux États Unis, au Canada, en France, en Norvège et en Afrique du Sud dans leurs activités régulières en sécurité des barrages (CIGB 2001b).

L'application du risque, qui s'est popularisée depuis une dizaine d'années (Hartford 2000), n'est cependant pas uniforme (Lafitte 1997). L'Australie est le seul pays ayant instauré des directives nationales concernant l'analyse du risque en sécurité des barrages. Le Canada et les Etats-Unis ont des directives pour la sécurité des barrages instaurées par des associations professionnelles, comme par exemple l'Association Canadienne des Barrages (ACB), dans lesquelles le concept de risque y est décrit dans ses grandes lignes (Rettermeier, Falkenhagen et Köngeter 2000).

Ces développements reflètent les changements qui se produisent dans la société. La population devient plus informée et mieux éduquée et exige plus de transparence et de rigueur dans les prises de décisions qui peuvent affecter les populations à risque et la société en général.

Cependant, les valeurs numériques obtenues dans les analyses de risque en sécurité des barrages sont souvent critiquées parce que trop vagues. L'acceptation de l'approche risque, qui est encore au début de son développement, est rendue plus difficile par cet obstacle.

De nombreux sondages auprès de professionnels en sécurité des barrages ont démontré que l'analyse de risque est le sujet où les besoins en recherche et développement sont les plus pressants (Lafitte 1997). L'établissement de méthodes permettant de concilier les expériences et les attentes des experts qui réalisent les analyses de risque et les décideurs qui les utilisent est un axe prioritaire de recherche en sécurité des barrages (Bowles, Anderson et Glover 1998). De plus, il n'existe peu ou pas de démarches qui combinent des expertises venant de différents domaines du génie appliqués à la problématique des risques (Robert 2003).

2.3.4 Niveaux d'application

Dans le cadre de la sécurité des barrages, l'application de la notion de risque signifie l'utilisation de processus analytiques ou faisant appel au jugement de l'ingénieur. Ces processus se situent dans un des niveaux d'application suivants:

1. Analyse du risque: évaluation des propriétés d'un ouvrage et de sa fondation, de la récurrence des différents cas de chargement, des mécanismes de rupture potentiels et des conséquences d'une rupture. Identification des actions optimales en termes de coûts et de réduction du risque;

2. Évaluation du risque: identification des actions possibles pour réduire le risque en considérant l'analyse de risque mais aussi des contraintes plus globales en rapport à l'environnement, l'économie et la société;

3. Gestion du risque: évaluation des pistes de réduction du risque en fonction des coûts pour un inventaire complet de barrages, établissement d'un programme de sécurité des barrages. Cette étape peut aussi englober le contrôle du risque qui comprend la réalisation d'activités récurrentes ou ponctuelles pour réduire le risque ou faire en sorte qu'il n'augmente pas.

Cette classification est souvent reprise dans la littérature sous des formes différentes mais qui dénotent toujours une progression à partir du plus détaillé jusqu'au plus global (CIGB 2001b, Conference report 1998, USBR 2000a, United States Society on Dams [USSD] 2003, Von Thun 1998). Ces trois niveaux d'application peuvent être vus comme étant des niveaux progressifs d'évaluation et de disposition de l'information menant à une prise de décision. La relation entre ces niveaux d'application est représentée schématiquement à la Figure 2.2.

L'application des concepts mis de l'avant dans cette thèse touche surtout l'analyse du risque qui est en grande partie à caractère technique. La considération de tous les aspects plus globaux relatifs à l'environnement, l'économie et la société qui doivent être considérés dans l'évaluation et la gestion du risque dépassent le cadre de cette recherche.

2.4 État de la pratique actuelle en analyse de risque

Le premier niveau d'application de l'approche risque en sécurité des barrages est l'analyse de risque. Dans la pratique actuelle, il existe quatre types de méthodologies servant à identifier, qualifier et quantifier, à des niveaux de détail variables, les aléas et les conséquences reliés à l'étape d'analyse de risque (USSD 2003).

Chacune de ces catégories d'analyse comporte des points forts et des points faibles. Le choix de la technique à utiliser dépend des objectifs visés.

2.4.1 Description sommaire des mécanismes de rupture

La description sommaire des mécanismes de rupture est utilisée surtout en complément d'une évaluation traditionnelle de la sécurité d'un barrage. Il s'agit de décrire qualitativement les mécanismes de rupture les plus probables en tenant compte des analyses effectuées dans l'étude. Cette méthode ne tente pas de quantifier les probabilités de rupture et les conséquences, donc le risque. Il ne s'agit pas d'une aide à la décision concernant des projets de réfection de barrages mais d'un outil pour mieux comprendre les points faibles de l'ouvrage.

Une méthode quelquefois utilisée comprend l'analyse qualitative des modes de rupture. Cette méthode est désignée par l'acronyme AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance

Et des Conséquences) ou FMEA (Failure Modes and Effects Analysis). Elle est utilisée pour avoir un portrait global du risque posé par un groupe d'ouvrages (Dupak et Smith 2000).

2.4.2 Méthodes par indices

Ces méthodes sont utilisées pour caractériser un groupe d'ouvrages. Elles consistent en des évaluations numériques sous forme de cotes et offrent un aperçu global des aspects les plus critiques du comportement des ouvrages.

Hydro Québec a mis au point la méthode des indices de condition avec la collaboration d'autres propriétaires de barrages. Elle est présentement utilisée pour les ouvrages en remblai et est en cours de développement pour les barrages en béton et les évacuateurs de crue. Cette méthode examine les systèmes de défense de l'ouvrage et les systèmes de surveillance et de détection en place. Les paramètres sont quantifiés à l'aide de cotes (Andersen, Chouinard, Bouvier et Back 1999, Andersen, Chouinard, Hover et Cox 2001). L'aspect des conséquences potentielles est abordé implicitement en combinant les cotes obtenues avec des pointages provenant de la classification des barrages qui tient compte du nombre de personnes à risque. L'aspect surveillance (inspections et instrumentation) est souligné. Les incertitudes et les mesures non structurales permettant de réduire les conséquences ne sont pas considérées.

Le USBR a aussi mis au point une méthode par indices qui a pour nom le *Risk Based Profiling System* (USBR 2000b). Cette méthode s'apparente aux indices de condition mais elle est plus détaillée au niveau des conséquences de rupture tels les impacts socio-économiques. Cependant, l'aspect géotechnique est traité de façon moins complète qu'avec les indices de condition.

Deux autres méthodes ont aussi été proposées par Lavallée, Marche et Quach (2000) pour définir des cotes d'acceptabilité des ouvrages. La première méthode est unidimensionnelle et qualifie l'acceptabilité de l'ouvrage au sens technique, au sens de son incidence sur la population et au sens de ses retombées. La deuxième méthode vise à situer un ouvrage dans un espace multidimensionnel où différents éléments de décision sont représentés. Cette méthode est basée sur l'indice de dangerosité de l'aménagement et l'indice de comportement et d'état. Ces deux méthodes font une plus grande place aux impacts de rupture que pour les indices de condition qui sont cependant plus détaillés au niveau géotechnique.

Les méthodes par indices ont comme avantage principal de considérer plusieurs ouvrages à la fois dans les évaluations. Elles peuvent servir pour une première analyse de l'importance relative des aspects touchant le risque posé par les ouvrages. Cependant, elles ne sont pas assez détaillées pour comparer l'efficacité de mesures structurales ou non structurales précises sur la réduction du risque. Par exemple, les méthodes par indices peuvent indiquer que parmi un groupe d'ouvrages, les problèmes d'écoulement dans les fondations d'un barrage donné sont prioritaires. Cependant, il n'est pas possible de prioriser selon les coûts ou l'efficacité une série de mesures permettant de corriger ces problèmes d'écoulement. De plus, les incertitudes ne sont pas prises en compte dans les méthodes par indices.

2.4.3 Méthodes de type portfolio

Ces analyses sont utiles pour faire une évaluation préliminaire quantitative et qualitative afin de prioriser, sur une base de coûts et d'efficacité, les interventions de sécurité des barrages pour un groupe d'ouvrages. Pour les pertes de vie, le critère de coût par vie statistique sauvée est utilisée (Bowles, Anderson et Glover 1998). Les interventions sont analysées sur une base générique et non détaillée.

Comme pour les méthodes par indices, les analyses de type portfolio ont comme avantage principal de pouvoir qualifier assez rapidement plusieurs ouvrages. Cependant, elles ne sont pas assez détaillées pour comparer l'efficacité de mesures structurales ou non structurales précises sur la réduction du risque et ne tiennent pas compte des incertitudes techniques.

Cette méthode a fait l'objet de quelques publications plutôt générales (Bowles, Anderson, Glover et Chauhan 1998, Bowles 2000, USSD 2003). Les comptes-rendus des applications concrètes de cette méthode sont rares dans la littérature.

2.4.4 Analyses de risque détaillées

Les analyses de risque détaillées ont pour but l'étude exhaustive des conditions de chargement, des mécanismes de rupture, des probabilités de rupture et des conséquences potentielles en termes monétaires et en pertes de vie. Ce type d'analyse est normalement réalisé à la suite d'études de sécurité traditionnelles et d'études de rupture de barrage. Ces analyses se déroulent sous forme d'ateliers de travail regroupant plusieurs spécialistes techniques.

Les analyses de risque détaillées remplacent l'approche déductive des analyses déterministes traditionnelles, dans lesquelles les opérations sont effectuées dans un enchaînement de règles bien définies, par une approche inductive où la séquence des opérations n'est pas définie a priori et dépend du jugement, des convictions et des expériences personnelles des participants aux ateliers de travail.

Ces analyses sont les plus détaillées et sont les seules qui tiennent compte des incertitudes techniques. L'aspect le plus controversé de ce type d'analyse concerne l'évaluation et surtout la signification des probabilités de rupture.

Chez les propriétaires de barrages utilisant l'approche risque, les décisions les plus importantes pour des travaux de réfection sont le plus souvent basées sur les analyses de risque détaillées. La plupart des études de cas qui sont publiées sont basées sur ce type d'analyse (Bowles, Anderson, Evelyn, Glover et Van Dorpe 1999, Dise et Vick 2000, USBR 2000a).

Les analyses de risque détaillées incluent les 4 étapes suivantes (De Cea Azanedo 2000, Fell, Bowles, Anderson et Bell 2000, Vick 2000):

A) Identification des mécanismes de rupture:

Cette étape nécessite que les ouvrages soient systématiquement examinés afin d'évaluer les modes par lesquels la structure, sa fondation ou les ouvrages connexes peuvent céder. Elle inclut aussi l'identification des cas de chargement qui doivent tenir compte de toute l'étendue des conditions envisageables, à partir du seuil critique où des dommages sont possibles jusqu'à la charge extrême. Les mécanismes de rupture sont le plus souvent décrits en utilisant des arbres d'événements.

B) Estimation de la probabilité de rupture du barrage:

La probabilité de rupture d'un barrage est déterminée en utilisant une des approches suivantes:

- la méthode empirique qui consiste à faire des comparaisons avec des statistiques de rupture historiques;
- le calcul de la probabilité de façon analytique en utilisant des modèles déterministes;
- l'agrégation des probabilités évaluées par un groupe de spécialistes pour chaque événement d'un arbre d'événements.

C) Calcul des conséquences potentielles en pertes humaines et économiques:

Ces pertes sont évaluées en considérant le type de rupture, les conditions d'inondation en aval, les mécanismes d'alerte en vigueur et le degré d'exposition des structures et de la population en aval. Les coûts de reconstruction et de pertes de revenus (par exemple la production d'électricité) sont aussi évalués. Les deux principales méthodes pour l'évaluation des pertes de vie sont celles de DeKay et McLelland (1993) et du USBR (1999). Ces méthodes empiriques sont basées sur des études de cas historiques. Le calcul des mortalités est basé sur le nombre de personnes à risque et différents facteurs dépendant entre autres de la sévérité de l'onde de submersion et du temps disponible pour l'alerte.

D) Évaluation du risque et comparaison avec un critère d'acceptabilité:

Dans la majorité des cas, le risque est quantifié par la multiplication des probabilités de rupture et des conséquences. Le risque est alors exprimé en pertes monétaires annualisées ou en pertes de vie annualisées. Ces valeurs sont ensuite comparées à des critères d'acceptabilité préétablis et servent d'intrants au processus de décision.

Les analyses de risque détaillées ont comme avantage de tenir compte du jugement collectif d'un groupe de spécialistes. Elles permettent de considérer de façon exhaustive les deux composantes du risque barrage, qui sont la probabilité de rupture et les conséquences, et de tenir compte de l'incertitude dans les évaluations. Il est alors possible d'examiner de façon détaillée les mécanismes de rupture plausibles et d'identifier les paramètres les plus critiques et/ou incertains du comportement des ouvrages. Ce type d'analyse présente cependant certaines limitations qui sont décrites ci-après.

2.5 Limitations identifiées lors de la réalisation d'analyses de risque détaillées

2.5.1 Introduction

Des analyses de risque détaillées ont été réalisées par l'auteur pour des ouvrages en remblai de Hydro Québec. Les mécanismes de rupture potentiels ont été décomposés par un groupe de spécialistes techniques à l'aide d'arbres d'événements. Un exemple d'arbre d'événements pour l'érosion interne d'un des ouvrages analysés est montré à la Figure 2.3. L'évaluation de la probabilité d'occurrence de chacun des événements a été réalisée par le groupe en considérant les données disponibles et l'expérience des spécialistes. Les calculs de probabilités de rupture et de leurs incertitudes ont été effectués à partir des arbres d'événements à l'aide de simulations de Monte Carlo.

Les impacts des ruptures ont été évalués en tenant compte des zones d'inondation déterminées par les études de bris de barrage. Les conséquences monétaires ont été calculées à partir des coûts probables de reconstruction des infrastructures et des pertes en production électrique. Les conséquences en pertes de vie potentielles ont été estimées à l'aide de la méthode du USBR (1999).

Ces analyses ont requis l'examen systématique et structuré des mécanismes de rupture potentiels ce qui a mis en lumière les éléments les plus critiques du comportement des ouvrages étudiés. Les phénomènes complexes ont pu être analysés en les décomposant en plusieurs éléments dans lesquels les processus en cause ont été mieux compris. Ceci a permis d'identifier de façon explicite les caractéristiques des barrages et les conditions de chargement qui contribuent le plus à leur vulnérabilité.

Malgré les avantages retirés de la réalisation de ces analyses, l'état actuel de la pratique ne permet pas de prioriser de façon adéquate les interventions en sécurité des barrages.

Certaines des difficultés identifiées dans les analyses réalisées à Hydro Québec et suite à une revue de la littérature sont présentées dans les sections suivantes.

2.5.2 Représentation du risque

Après avoir étudié les mécanismes de rupture, établi la possibilité d'une rupture et évalué les conséquences potentielles de cette rupture, le risque doit être représenté sous une forme qui tienne compte de tous ces intrants.

La Figure 2.4 montre les conséquences et les probabilités de rupture évaluées pour trois des ouvrages étudiés. La taille des rectangles illustrés correspond aux intervalles à 95% calculés à l'aide des simulations de Monte Carlo. Les droites pointillées indiquent les isovaleurs du risque calculé comme le produit de la probabilité (P) et des conséquences (C). Ces isovaleurs sont exprimées en pertes de vie par an et en K$ par an pour les pertes monétaires.

Selon la Figure 2.4, les risques associés aux barrages 1 et 2 sont sensiblement égaux et sont supérieurs au risque posé par le barrage 3 par environ 3 ordres de grandeur. Les probabilités de rupture les plus élevées sont pour le barrage 1 et sont de l'ordre de 0,07. Ce résultat correspond à une période de récurrence d'environ 14 ans alors que cet ouvrage est en exploitation depuis plus de 50 ans. Il est évident que l'interprétation de ces valeurs en termes absolus pose des difficultés.

L'utilisation de la Figure 2.4 comme aide à la décision est limitée à deux niveaux. Premièrement, la signification des valeurs de risque égales à P*C n'est pas claire. Elles peuvent suggérer par exemple que les provisions devant être accumulées à ce jour pour les pertes potentielles à encourir en rapport au barrage 1 devraient être de 1000 K$/an * 50 ans = 50 M$ ce qui est irréalisable en pratique surtout pour un

propriétaire de nombreux barrages. Deuxièmement, les décisions doivent être basées sur des critères d'acceptabilité qui ne peuvent être réduits à une seule valeur de risque déterminée lors des ateliers.

Le risque acceptable et les contextes de décision en sécurité des barrages varient avec le temps et aussi d'un endroit à l'autre. Ces variations sont reliées à des facteurs externes aux barrages tels la législation, les objectifs administratifs, l'assurabilité, l'environnement et la population affectée (De Cea Azanedo 2000). Ces considérations doivent être examinées dans un cadre plus large que celui des analyses de risque.

Les limites identifiées sont dues au type de représentation utilisé à la Figure 2.4. Les risques y sont traités comme des valeurs absolues alors qu'en réalité le risque est défini à partir de convictions de spécialistes basées sur leur jugement. Les informations générées lors des analyses du risque ne peuvent être synthétisées en un point dans un espace P-C car il n'existe pas de "vraie" valeur du risque pouvant être déterminée analytiquement.

2.5.3 Limites des calculs conventionnels du risque

La représentation habituelle du risque par le produit P*C comporte plusieurs problèmes. La multiplication d'une faible probabilité de rupture par des conséquences très grandes revient à multiplier zéro et l'infini ce qui donne un résultat indéfini. Aussi, en plus des problèmes de conditionnement mathématique, le produit P*C n'est pas le meilleur indicateur pour la prise de décisions en sécurité des barrages concernant des interventions de maintenance et de réfection.

Même si les produits P*C sont égaux, on ne peut mettre sur un même pied un premier événement ayant une faible probabilité et des conséquences importantes avec un deuxième événement plus fréquent mais ayant de plus faibles conséquences (Bier,

Haimes, Lambert, Matalas et Zimmerman 1999, Lavallée, Marche et Quach 2000). Des interventions dirigées sur le deuxième événement pourraient réduire le risque à moindre coût car les probabilités de rupture ou les conséquences pourraient être diminuées plus facilement que pour un événement très rare ayant des conséquences extrêmes.

On ne peut donc pas prioriser les interventions en sécurité des barrages par un simple classement basé sur les résultats de P*C. Une expérience a posteriori a été réalisée suite à la rupture de la digue Cut Away au Saguenay en juillet 1996 (Lavallée, Marche et Quach 2000). Dans cette étude, une analyse de risque utilisant le produit P*C et les données disponibles avant juillet 1996 n'auraient pas permis de détecter les problèmes de sécurité reliés à cette digue.

L'expérience acquise durant la réalisation des analyses de risque détaillées a montré que l'évaluation de probabilités est indispensable pour quantifier les incertitudes associées à chacun des facteurs servant à décrire les mécanismes de rupture plausibles et pour juger de leur importance relative. L'agrégation de ces évaluations afin d'évaluer une probabilité de rupture et la multiplication de cette valeur avec des conséquences sont cependant d'une utilité limitée.

2.5.4 Utilisation des arbres d'événements

Une des limitations des arbres d'événements utilisés pour décrire la séquence logique des mécanismes de rupture est la difficulté de modéliser les possibilités d'interventions servant à diminuer la probabilité de rupture. L'ajout d'un événement "intervention" après chacun des éléments de l'arbre rendrait celui-ci difficile à utiliser. Ces interventions font pourtant partie intégrante du processus de sécurité des barrages et comprennent la détection des signes avant-coureurs d'une rupture et la mise en place de mesures correctrices.

Par exemple, la possibilité d'avoir du sable entraîné a été évaluée à 59% dans l'arbre d'événements de la Figure 2.3. Cette probabilité pourrait être réduite ou même annulée si la fréquence et la qualité des inspections sont suffisantes pour entreprendre des travaux de réhabilitation afin de stopper le phénomène, si des bermes stabilisatrices peuvent être construites à temps ou s'il y a possibilité de réduire les gradients. Les probabilités de rupture calculées sont donc surévaluées par rapport au risque réel posé par un ouvrage faisant l'objet d'une surveillance et d'un entretien adéquats.

Les arbres d'événements sont peu flexibles pour juger de l'impact d'une nouvelle observation, réelle ou hypothétique, sur la possibilité de rupture d'un barrage. Par exemple, une intervention ayant pour but l'excavation du matériau érodable annule la probabilité d'occurrence de cet événement à la Figure 2.3. Ceci implique que la probabilité de rupture devient nulle ce qui n'est pas le cas en réalité. L'excavation du matériau érodable devrait avoir très peu d'impact sur la possibilité de mesurer un gradient élevé car ces événements n'ont pas de lien de cause à effet direct. Si des travaux d'excavation sont réalisés, il existe encore une possibilité d'observer un gradient élevé et donc une rupture par érosion interne si le matériau de remplacement ne respecte pas les critères de filtres. Aussi, il existe une possibilité de rupture par glissement si le niveau du réservoir est plus élevé ou suite à l'occurrence d'un séisme.

De plus, il n'est pas possible de déterminer l'événement représentant la cause ou l'effet le plus probable de l'observation d'un autre événement. Par exemple, à la Figure 2.3, la cause la plus probable de l'entraînement de sable ne peut être identifiée parmi les trois événements situés à gauche dans l'arbre.

Enfin, l'arbre d'événements peut rapidement devenir difficile à utiliser lorsque les mécanismes incluent de nombreux événements comprenant plusieurs états. La Figure 2.5 montre un arbre composé d'événements décrits à l'aide de 4 états. Il apparaît

clairement que la complexité d'un arbre d'événements augmente très rapidement avec le nombre d'événements et d'états et que son utilisation peut facilement porter à confusion.

Les événements comportant plusieurs états sont souvent rencontrés en pratique et touchent plus particulièrement des phénomènes caractérisés par une plage de valeurs numériques comme le niveau d'un réservoir ou un débit mesuré.

2.5.5 Interrelations entre les mécanismes de rupture

En plus de l'incertitude, la complexité est une des caractéristiques principales du risque. Les analyses de risque doivent donc tenir compte de l'effet des interrelations entre les mécanismes de rupture et les cas de chargement. Ces aspects ne peuvent être traités dans les analyses de risque utilisant les arbres d'événements pour la représentation des mécanismes de rupture.

Par exemple, un problème d'érosion interne des fondations peut avoir comme élément déclencheur une augmentation des pressions interstitielles due à une secousse sismique ou due à un niveau du réservoir élevé. Ces deux types de chargement peuvent aussi contribuer à d'autres mécanismes de rupture tels l'instabilité d'une pente. De plus, ces mécanismes de rupture peuvent aussi avoir certains liens entre eux comme par exemple l'augmentation de la possibilité d'érosion interne suite à un glissement de pente.

Il est essentiel de tenir compte des interrelations entre les mécanismes de rupture car ces dernières peuvent influencer les décisions concernant l'implantation de mesures de réduction du risque. Par exemple, la possibilité d'érosion interne d'un talus naturel en contact avec un réservoir peut être réduite par la construction d'une berme filtrante. Cependant, le poids de cette dernière peut dans certains cas diminuer la stabilité du talus face au glissement.

Les problèmes relatifs au comportement d'un barrage sont uniques d'un ouvrage à l'autre et ne remplissent pas toujours les conditions d'indépendance des chargements et des mécanismes de rupture imposées dans les analyses de risque traditionnelles (Vick 2000). Les mécanismes de rupture sont interreliés et ont des relations cause à effet souvent complexes qui ne peuvent être représentées par des arbres d'événements qui considèrent chaque mécanisme de façon indépendante. La mise au point d'outils permettant d'analyser ces interrelations est considérée comme un domaine de recherche prioritaire par plusieurs praticiens (Conference report 1998).

2.6 Approche proposée

La revue de la littérature et les expériences pratiques réalisées ont montré que les analyses de risque détaillées sont les mieux adaptées pour examiner les deux composantes du risque barrage qui sont la probabilité de rupture et les conséquences. Ces analyses permettent aussi de tenir compte des incertitudes et du jugement collectif d'un groupe de spécialistes.

Les techniques actuellement utilisées en pratique pour ce type d'analyse ne permettent cependant pas la prise en compte simultanée de la complexité et des incertitudes. De plus, les difficultés importantes reliées à la signification des probabilités de rupture font en sorte que les valeurs numériques obtenues sont d'une utilité limitée lorsqu'elles sont considérées sur une base absolue. Les calculs de risque ne peuvent être réalisés uniquement par l'utilisation de méthodes prédictives déterministes.

L'analyse du risque barrage à l'aide du concept des réseaux bayésiens est proposée dans cette recherche. Cette approche résout plusieurs des difficultés rencontrées lors de la réalisation des analyses détaillées en mettant en valeur les avantages retirés. Tout en tenant compte des incertitudes et du jugement de spécialistes, les réseaux bayésiens

permettent de modéliser graphiquement de façon compacte et intuitive des systèmes complexes comportant plusieurs interdépendances entre les variables. La grande flexibilité de ces réseaux permet la réalisation de nombreuses formes de requêtes servant à juger de l'impact de mesures de réduction du risque. Ces mesures peuvent alors être priorisées selon une vision globale en fonction de leur coût et de leur efficacité en considérant le risque de façon relative.

L'application des réseaux bayésiens au domaine du risque barrage permet de modéliser la probabilité de rupture, les conséquences ou les deux à la fois et ceci pour tous les types de barrages. En considérant le nombre et l'ampleur des éléments à considérer dans une analyse de risque, seuls les aspects techniques reliés à la probabilité de rupture de barrages en remblai sont présentés dans cette recherche.

2.7 Résumé

Le risque zéro n'existe pas mais personne ne peut le prédire avec certitude car deux de ses caractéristiques principales sont la complexité et l'incertitude.

Des statistiques de rupture de barrages sont disponibles. Malgré qu'elles soient incomplètes, elles permettent néanmoins de conclure que le risque barrage, bien que faible, est toutefois réel. L'établissement de mesures de réduction du risque est donc une des responsabilités d'un propriétaire de barrages. L'objectif principal de l'utilisation de la notion de risque en sécurité des barrages est l'aide à la décision concernant les mesures optimales de réduction de la probabilité de rupture et/ou des conséquences.

Depuis une dizaine d'années, la tendance internationale est d'intégrer les concepts de risque dans les activités en sécurité des barrages. Cependant, l'approche risque est encore

en développement. Plusieurs propriétaires de barrages considèrent que l'analyse de risque est un axe prioritaire de recherche.

L'approche risque est utilisée selon différents niveaux d'application à partir du plus détaillé techniquement jusqu'au plus global. Les analyses de risque détaillées ont comme avantage de tenir compte du jugement collectif d'un groupe de spécialistes et de considérer les incertitudes.

La revue de la littérature et la réalisation d'analyses de risque détaillées ont montré que ces dernières présentent certaines limitations reliées au calcul et à la représentation du risque en termes absolus. D'importantes difficultés ont aussi été identifiées en rapport à la modélisation des possibilités d'intervention sur un barrage, des interrelations entre les mécanismes de rupture et du manque de flexibilité des outils existants.

L'utilisation du concept des réseaux bayésiens est proposée afin de résoudre les difficultés rencontrées lors de la réalisation d'analyses de risque détaillées tout en mettant en valeur les avantages retirés. Les réseaux bayésiens peuvent modéliser simultanément la complexité et l'incertitude inhérentes au risque.

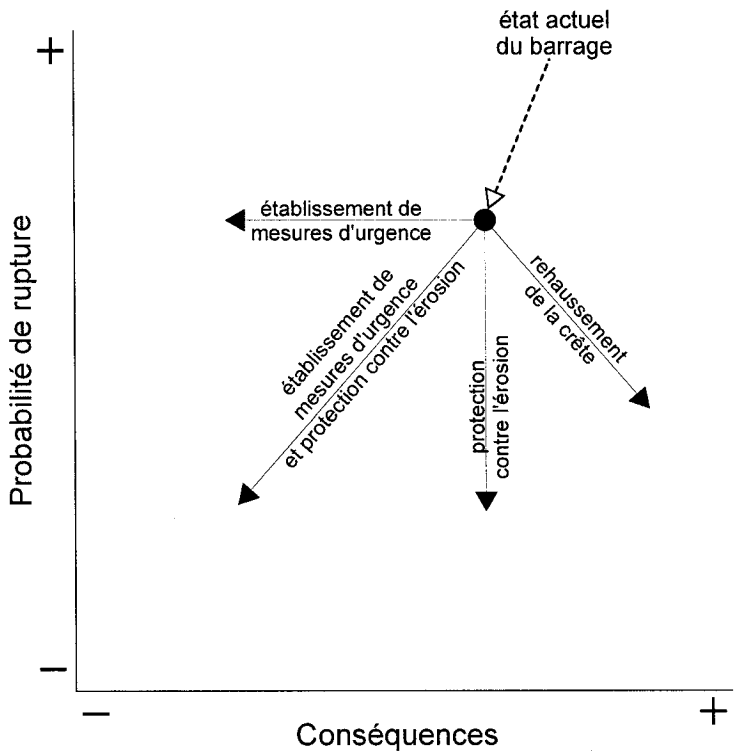


Figure 2.1: Alternatives de réduction du risque

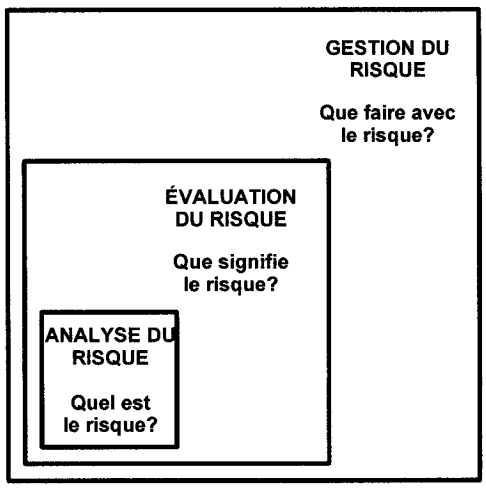


Figure 2.2: Niveaux d'application de l'approche risque en sécurité des barrages

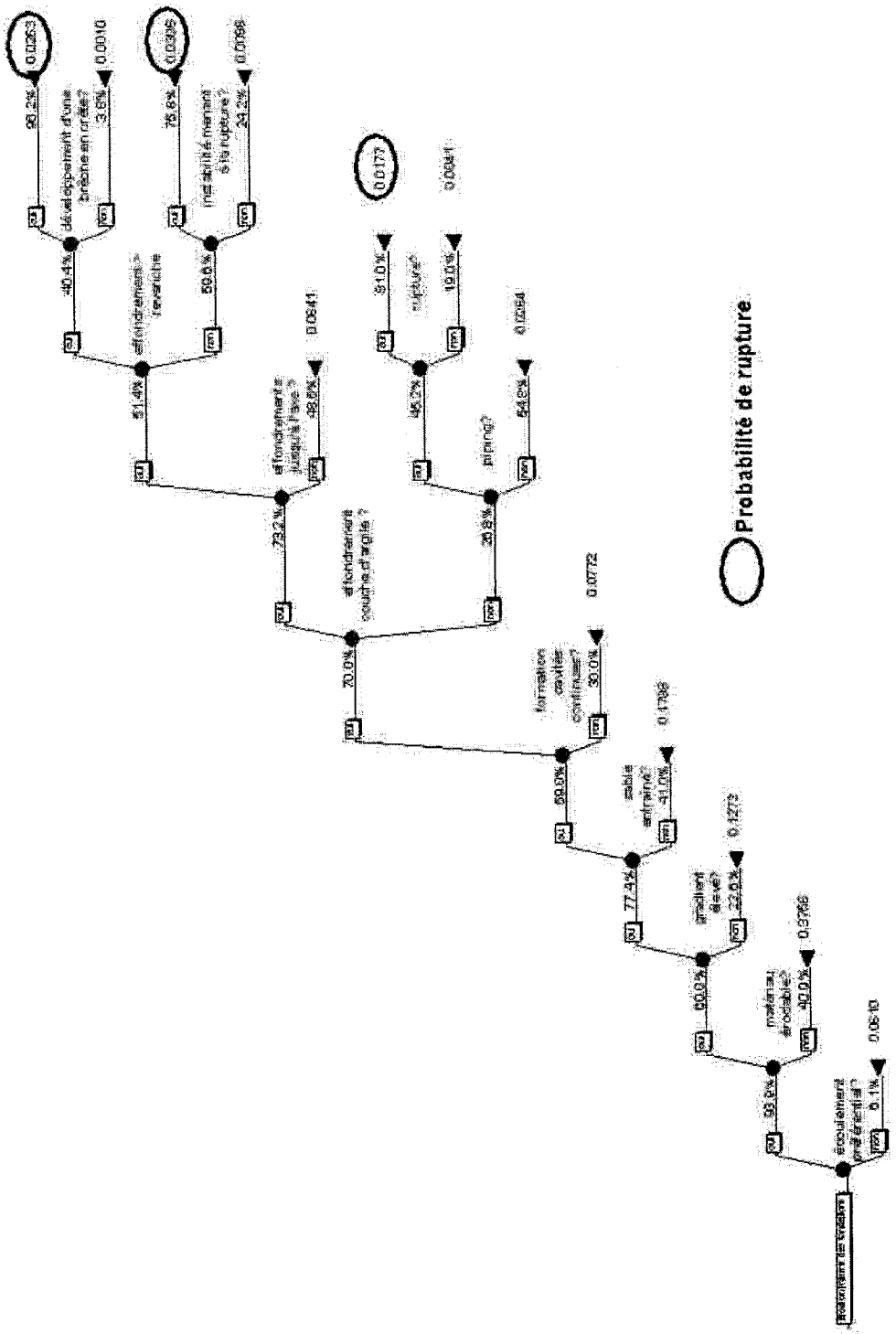


Figure 2.3: Évaluation de la probabilité de rupture par érosion interne à l'aide d'un arbre d'événements

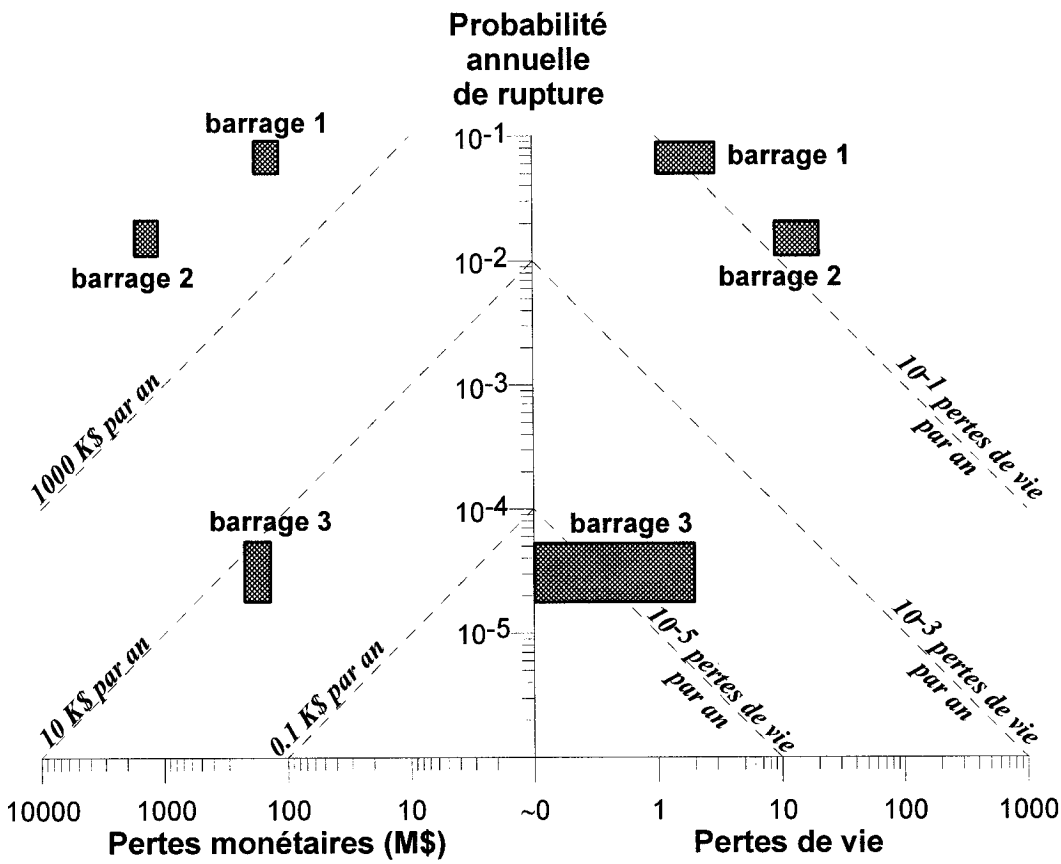


Figure 2.4: Représentation conventionnelle du risque

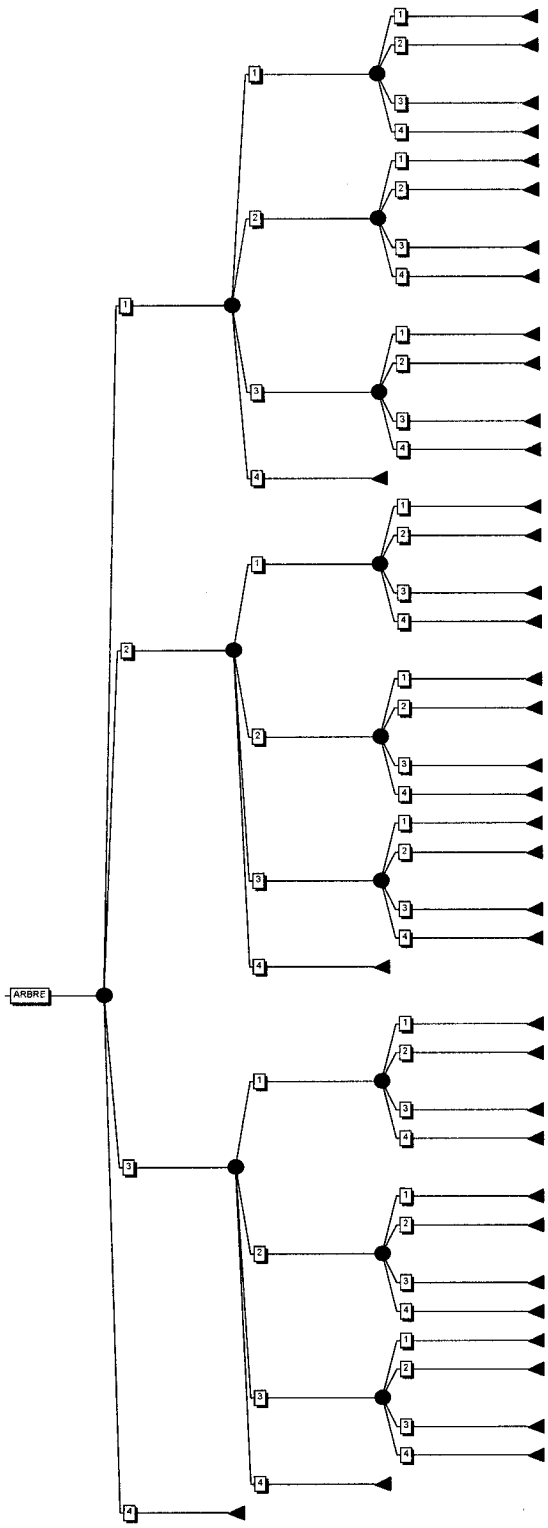


Figure 2.5: Arbre d'événements comportant plusieurs états

CHAPITRE 3

LES RÉSEAUX BAYÉSIENS

3.1 Introduction

La problématique du risque en sécurité des barrages est reliée à la connaissance. Le concept des réseaux bayésiens constitue un outil privilégié pour l'analyse du risque barrage car il permet de traiter la connaissance et l'incertitude plutôt que seulement l'information. Les réseaux bayésiens sont le résultat d'une convergence entre les méthodes probabilistes et l'intelligence artificielle. Ils constituent aujourd'hui l'un des formalismes les plus complets et les plus cohérents pour l'acquisition, la représentation et l'utilisation de connaissances par les ordinateurs (Becker et Nadim 1999).

Les réseaux bayésiens doivent leur nom à Thomas Bayes, mathématicien du 18e siècle, qui a effectué des travaux sur la théorie des probabilités. Le concept des réseaux bayésiens est basé sur des recherches effectuées dans les années 80 par Judea Pearl à l'Université de Californie (Pearl 1988). L'objectif de ces travaux était d'intégrer la notion d'incertitude dans les systèmes experts, une des premières formes d'intelligence artificielle.

Les chercheurs se sont rapidement aperçus que la construction d'un système expert nécessitait presque toujours la prise en compte de l'incertitude dans le raisonnement. En effet, dans la plupart des domaines complexes, un expert humain est capable de porter un jugement sur une situation même en l'absence de toutes les données nécessaires. Le traitement de la connaissance doit donc nécessairement tenir compte des incertitudes.

En sécurité des barrages par exemple, une même combinaison d'indices tels des venues d'eau au pied d'un ouvrage et des fissures en crête peut être observée lorsqu'un ouvrage se comporte normalement mais aussi dans le cas où la rupture est imminente. Les relations incertaines entre les causes, par exemple des fissures et des venues d'eau, et les effets, par exemple une rupture de barrage, sont basées sur les connaissances d'experts à propos du domaine à l'étude (hydrologie, géotechnique etc.) et des caractéristiques propres à l'ouvrage. Ces connaissances intègrent des données et modèles mathématiques avec des facteurs tels le jugement basé sur l'expérience des experts et le contexte de l'étude. Il n'y a donc pas de règles strictes qui permettent de passer systématiquement d'un ensemble d'observations à une prédiction ou un diagnostic.

L'utilisation des réseaux bayésiens permet à des experts de formaliser leurs connaissances présentant des incertitudes sous forme de modèles de causalité indiquant les liens de dépendance entre les variables. Ces liens expriment des relations cause à effet tels: A a une influence sur B; en général, si B est observé, il y a de fortes chances que C se produise; etc. Pour rendre cette connaissance opérationnelle, il faut quantifier les incertitudes c'est-à-dire les convictions que les experts ont des liens entre les faits. Cette quantification se fait à l'aide du concept des probabilités qui permet de faire des calculs et des raisonnements prenant en compte les aspects incertains.

Les réseaux bayésiens sont constitués de deux composantes permettant la représentation qualitative et quantitative des connaissances (Lee 2001, McCabe et Ford 2001). La composante qualitative est formée par un graphe orienté acyclique où les noeuds représentent des variables d'intérêt du domaine et les liens directionnels des relations de dépendance entre ces variables. L'ensemble des nœuds et des liens constitue le modèle de causalité ou la structure du réseau bayésien. La composante quantitative est formée d'une distribution de probabilités pour chaque nœud. L'ensemble de ces distributions constitue la loi de probabilités sous-jacente au réseau.

Ces principes sont illustrés à la Figure 3.1 dans laquelle le modèle causal et la loi de probabilités sous-jacente forment un réseau bayésien à partir duquel des calculs peuvent être réalisés. Cette représentation permet de quantifier les raisonnements faits sur les causalités.

L'utilisation principale des réseaux bayésiens est l'inférence qui consiste en la propagation de l'information au sein d'un réseau par le biais de calculs de probabilités. Après avoir fait une observation sur une variable, il s'agit de déterminer comment l'effet de cette information va se répercuter sur l'état des autres variables. Par exemple, si une venue d'eau est observée au pied d'un barrage, que devient le risque de rupture? Pour ce barrage, entre la présence de venues d'eau et de fissures, quel est l'indicateur de rupture potentielle le plus significatif?

Cependant, les calculs requis pour l'inférence sont complexes et souvent NP-complets: une solution exacte ne peut être trouvée de façon directe car elle requiert un trop grand nombre d'opérations (Charniak 1991). Ces calculs nécessitent des algorithmes efficaces et l'utilisation d'ordinateurs ayant une capacité de traitement suffisante. Ces obstacles ont ralenti le développement d'applications utilisant les réseaux bayésiens. Depuis une dizaine d'années, le développement de méthodes de calcul sophistiquées, en particulier par une équipe de l'Université de Aalborg au Danemark (Lauritzen et Spiegelhalter 1988, Jensen 2001), et l'avènement d'ordinateurs plus puissants ont favorisé l'apparition d'applications pratiques.

Les réseaux bayésiens ont d'abord été utilisés pour des systèmes de diagnostics médicaux et aussi de développement de logiciels (Heckerman, Mamdani et Wellman 1995). D'autres applications ont été ensuite développées pour des domaines aussi variés que l'entretien d'équipements tels les imprimantes (Lee 2001), la détection de fraudes bancaires (Becker et Nadim 1999) et la prédiction des cours du pétrole brut (Abramson et Ng 1993).

Les réseaux bayésiens sont aussi utilisés dans le domaine du génie civil notamment pour la gestion des projets de construction (McCabe, Abourizk et Goebel 1998), l'entretien des routes (Lefebvre, Gendreau, Hébert et Boukari 1995) et les analyses sismiques (Agostinelli et Rotondi 2003).

Dans le cadre de cette recherche, le concept des réseaux bayésiens est utilisé pour la première fois dans le domaine du risque posé par des infrastructures essentielles, plus particulièrement les barrages, et ceci dans le but de développer un outil novateur d'identification et de réduction du risque.

3.2 Composantes d'un réseau bayésien

Un réseau bayésien est un graphe causal où les variables sont représentées par des noeuds et les relations de dépendance par des liens directionnels. La représentation probabiliste sous-jacente permet de quantifier la force de ces dépendances et de réaliser des calculs d'inférence servant d'aide à la décision.

Plus spécifiquement, un réseau bayésien est composé de trois éléments (Cain 2001):

1. Le premier élément est un ensemble de nœuds représentant les variables du domaine étudié. Chacun de ces nœuds comporte un ensemble d'états représentant les valeurs possibles de la variable. La Figure 3.2 montre un exemple de deux variables binaires, A et B, caractérisant un domaine d'étude.

2. Le deuxième élément est un ensemble de liens directionnels, ou flèches, représentant les relations causales entre les nœuds. Le sens de ces liens va de la cause vers l'effet. Par exemple, à la Figure 3.3, si le nœud A est la cause de B, le lien directionnel pointera de A vers B. Le nœud A sera alors le parent de B et le

nœud B le descendant de A. Les liens peuvent aussi représenter des dépendances statistiques. Cet aspect est discuté à la Section 3.5.

3. Le troisième élément est un ensemble de probabilités pour chacun des nœuds spécifiant la possibilité qu'un nœud soit dans un état donné en tenant compte de toutes les combinaisons d'états de ses parents. Par exemple, sur la Figure 3.4, la probabilité que A soit vrai est lue à 0,1 et la probabilité que B soit faux étant donné que A est vrai est lue à 0,8.

La Figure 3.4 est un réseau bayésien sur lequel la réalisation de raisonnements prenant en compte l'incertitude est possible. Ces raisonnements sont quantifiés par des calculs d'inférence réalisés à l'aide d'algorithmes et d'un logiciel de calcul qui sont décrits au Chapitre 4. Ces calculs servent à déterminer les répercussions de l'observation d'une ou plusieurs variables sur l'état des autres variables. L'information relative à l'observation d'une variable est entrée dans le réseau par l'utilisateur en modifiant la table de probabilités du nœud correspondant. La probabilité d'occurrence du nœud observé à un état donné devient égale à 1 c'est-à-dire certaine. La modification de la table de probabilités d'un nœud relatif à une variable observée se nomme instanciation.

Les raisonnements peuvent être inductifs, de l'effet vers la cause, ou déductifs, de la cause vers l'effet. À l'aide du réseau bayésien de la Figure 3.4, il est possible de faire des diagnostics tels que: étant donné B (les probabilités que B soit vrai deviennent égales à 1), quelle est la probabilité de A? À l'inverse, il est aussi possible de faire des prédictions telles que: étant donné l'absence confirmée de A (la probabilité que A soit faux devient égale à 1), quelle est la probabilité de B?

Un des éléments distinctifs des réseaux bayésiens est celui de l'indépendance conditionnelle d'un nœud étant donné ses parents: il devient indépendant de tous les

autres nœuds sauf ses descendants. Il est donc présumé que les parents sont les seuls à pouvoir influencer directement la probabilité du nœud descendant.

3.3 Construction d'un réseau bayésien

La construction d'un réseau bayésien nécessite deux grandes phases (McCabe et Ford 2001). La première, plus qualitative, consiste à mettre en place la structure du graphe c'est-à-dire identifier les variables du modèle et indiquer les liens de dépendance entre ces variables. La deuxième, plus quantitative, consiste à calculer ou évaluer les probabilités nécessaires afin de quantifier les dépendances identifiées précédemment.

Ces deux phases peuvent être effectuées soit en utilisant des modèles mathématiques et des données historiques reliées au domaine d'étude, soit encore à l'aide d'opinions d'experts ou soit par une combinaison des deux.

La structure du réseau bayésien et la loi de probabilités sous-jacente peuvent être évaluées, en tout ou en partie, par des algorithmes d'apprentissage automatique développés afin de permettre la construction d'un réseau à l'aide de données existantes. Ces algorithmes sont surtout utiles dans le cadre d'applications de type "data mining" dans le domaine du marketing ou de la finance où les données disponibles sont nombreuses (Becker et Nadim 1999). Ces applications visent l'extraction automatique, à partir des données existantes, d'informations a priori inconnues et à valeur prédictive. Il est alors possible de déceler des tendances cachées dans une masse de données et ainsi utiliser de façon optimale cette information pour la prise de décision.

Cependant, dans le domaine de la sécurité des barrages, les données n'existent pas en nombre suffisant pour déterminer par apprentissage la structure et toutes les probabilités d'un réseau. Ainsi, en pratique, la construction d'un réseau bayésien incluant les deux

phases décrites précédemment doit se faire en grande partie à l'aide du jugement d'expert. Le rôle joué par les experts et les méthodes facilitant la représentation de leurs connaissances sont décrits au Chapitre 5. Cependant, les probabilités reliées à quelques variables spécifiques, où des données existent en plus grand nombre, peuvent être évaluées en utilisant des techniques statistiques.

La construction d'un réseau bayésien peut être divisée en cinq étapes. Ces étapes sont illustrées à l'aide d'un exemple simplifié où les facteurs géotechniques reliés à la présence de venues d'eau et de glissements pouvant menacer la sécurité d'un barrage en remblai sont étudiés.

La première étape consiste à définir les variables pertinentes au problème à analyser. Cette étape requiert une bonne compréhension du domaine d'étude et de la portée du modèle à construire. Le choix des variables doit faire en sorte que ces dernières contribuent à la logique du problème.

Les venues d'eau au pied d'un barrage en remblai sont causées par le ruissellement de surface suite à des précipitations ou bien par une augmentation des infiltrations dans l'ouvrage suite à la hausse du niveau du réservoir. Le niveau du réservoir et les précipitations peuvent être la cause de glissements dans le parement aval du barrage suite à une augmentation des pressions interstitielles dans ce dernier.

Des variables relatives aux venues d'eau et aux glissements sont définies. Les deux principales causes de ces observations, les précipitations et le niveau du réservoir, sont aussi définies comme variables. Des aspects complémentaires tels la fréquence des inspections visuelles ont une influence sur la détection des observations sur un barrage et donc, indirectement, sur la probabilité d'observer des glissements et des venues d'eau. Ces aspects pourraient faire partie d'un réseau bayésien mais ils ne sont cependant pas

considérés ici car ils ne contribuent pas à une meilleure compréhension des facteurs géotechniques reliés à la présence de venues d'eau et de glissements.

Les nœuds représentant les variables retenues sont montrés à la Figure 3.5.

La deuxième étape consiste à définir les états des noeuds. Les noeuds sont le plus souvent discrets et peuvent avoir des descripteurs numériques (<10, 20 à 30 etc.) ou littéraux (oui/non, petit/moyen/grand etc.). Chacun de ces nœuds comporte un ensemble fini d'états représentant de façon exhaustive et mutuellement exclusive les valeurs possibles de la variable (Lee 2001). Le nombre d'états détermine le nombre de probabilités à évaluer à la cinquième étape. Les noeuds peuvent aussi être continus. Cependant, les algorithmes d'inférence développés à ce jour ne permettent de traiter que les distributions de probabilités normales.

Le nombre de noeuds et d'états définis lors des deux premières étapes doit permettre de modéliser le domaine étudié au niveau de détail requis pour la réalisation d'inférences suffisamment significatives pour servir d'aide à la décision.

La présence de venues d'eau et de glissements est observée ou non, ces noeuds sont donc binaires. Le nombre d'états relatifs au niveau du réservoir correspond aux incréments de charge pour lesquels des modifications du comportement du barrage sont connues. Étant donné les variations relativement faibles du niveau du réservoir et l'absence de zones de faiblesse dans le barrage et sa fondation, comme par exemple un horizon de matériau plus perméable, ce noeud est aussi binaire. Le niveau du réservoir est alors élevé ou non. La cote correspondant à un niveau élevé a été convenue au préalable par les experts.

Les précipitations requises pour influencer le comportement du barrage sont évaluées en tenant compte de l'expérience acquise par l'observation des phénomènes lors du suivi de l'ouvrage. Lorsque les précipitations journalières sont inférieures à 10 mm, aucun effet

n'est remarqué. Le ruissellement de surface influence l'observation de venues d'eau au pied du barrage lorsque les précipitations sont supérieures à 10 mm/jour. Pour des valeurs de plus de 60 mm/jour, des glissements superficiels sont observés sur le parement aval du barrage.

La Figure 3.6 montre les états définis pour chacun des noeuds. Le niveau du réservoir est maintenant modélisé par le nœud *réservoir élevé*.

Les relations causales entre les noeuds sont définies à la troisième étape à l'aide de liens directionnels ou flèches. Les réseaux bayésiens sont des graphes directionnels acycliques. Les graphes sont directionnels dans le sens où chaque lien indique que la variable en aval selon le sens de la flèche est dépendante de la variable en amont. Les dépendances peuvent être causales et/ou statistiques. Le terme acyclique indique que les flèches ne peuvent former une boucle circulaire dans le réseau. Cependant, il peut exister plusieurs chemins entre deux nœuds.

Les précipitations peuvent être la cause des glissements, des venues d'eau et aussi de l'augmentation du niveau du réservoir. Aussi, un niveau de réservoir élevé est la cause des venues d'eau et des glissements. De plus, des venues d'eau sont souvent observées sur un talus après la réalisation d'un glissement. La Figure 3.7 montre les relations causales entre les nœuds.

La quatrième étape consiste à examiner le réseau afin de déterminer si le nombre de variables, d'états et de liens reflètent bien la compréhension des experts en rapport au problème étudié. Le niveau de détail doit être suffisant pour permettre les inférences pouvant servir d'aide à la décision mais sans que le réseau ne devienne trop complexe et difficile à gérer. Bien qu'il n'existe pas de contraintes relatives au nombre de liens à inclure dans un réseau, il est important de faire en sorte que ces liens ne soient pas inutilement nombreux car ils ont une incidence directe sur le nombre de probabilités à

évaluer à l'étape suivante. Par exemple, le réseau de la Figure 3.7, qui ne contient que 4 nœuds, requiert l'évaluation de 45 valeurs de probabilités

Un réseau bayésien est plus compact, facile à utiliser et plus efficace en termes de calculs si le nombre de liens est minimal pour assurer la modélisation adéquate du problème (McCabe 1998) et que ces liens indiquent des relations causales plutôt que statistiques (Jensen 2001). Les liens qui sont moins significatifs pour le problème étudié doivent être examinés et éliminés s'ils ne sont pas essentiels à la modélisation (McCabe et Ford 2001).

Les précipitations peuvent causer une hausse du niveau du réservoir mais compte tenu de la grande taille de ce dernier, l'effet n'est pas significatif et n'a pas à être considéré pour ce problème. Les fortes précipitations peuvent aussi causer des glissements superficiels. Cependant, le type de glissement qui doit être modélisé est le glissement profond qui peut déstabiliser le barrage et menacer sa sécurité. Pour ce barrage, les précipitations n'ont pas d'effets significatifs relatifs à des glissements profonds. Le nombre d'états pour le nœud *précipitations* est donc réduit à deux c'est-à-dire < 10 *mm/jour* et ≥ 10 *mm/jour*.

Bien que la présence de venues d'eau peut être observée momentanément sur une surface de glissement, cette relation n'est pas causale mais statistique. La présence de ces deux variables est plutôt due à une cause commune qui est une augmentation des pressions interstitielles c'est-à-dire un niveau de réservoir élevé. La corrélation n'indique qu'un lien entre des phénomènes qui n'est pas utile à la modélisation du problème.

Le réseau bayésien corrigé est montré à la Figure 3.8

La cinquième étape consiste à évaluer les valeurs qui forment la loi de probabilités sous-jacente au réseau. Il s'agit alors de déterminer une valeur de probabilité pour chacun des

états possibles d'un nœud en tenant compte de toutes les combinaisons d'états de ses parents. Chaque nœud comporte donc une table de probabilités qui exprime le degré d'incertitude des relations causales entre les variables. Il s'agit de probabilités conditionnelles indiquant la possibilité de réalisation d'un descendant étant donné la réalisation préalable de ses parents. Les valeurs associées aux nœuds sans parents sont des probabilités a priori qui sont implicitement conditionnelles aux données disponibles et aux connaissances des experts.

Incidemment, la sémantique à associer aux probabilités contenues dans un réseau bayésien peut référer à l'approche subjectiviste, basée en majeure partie sur des opinions expertes, et/ou à l'approche fréquentielle, basée exclusivement sur des données historiques. Ce point est discuté plus en détail à la Section 4.3.

Les probabilités évaluées pour l'exemple proviennent à la fois d'opinions expertes et de données historiques. Les probabilités a priori associées aux précipitations et au niveau du réservoir sont tirées directement de relations statistiques établies en considérant les nombreuses données historiques recueillies au droit de limnimètres et de pluviomètres automatisés. Toutefois, la valeur de 10 mm/jour pour les précipitations et la valeur numérique associée à l'état *élevé* pour le niveau du réservoir ont été déterminées à partir du jugement des experts basé sur l'observation du comportement de l'ouvrage. Les probabilités associées aux nœuds *glissements* et *venues d'eau* ont été déterminées par jugement d'experts basé à la fois sur des modèles mathématiques d'écoulement et de stabilité de pente et aussi sur leur connaissance des particularités de l'ouvrage et de son comportement.

La Figure 3.9 montre les tables de probabilités évaluées.

Le nombre de valeurs nécessaires pour établir la loi de probabilités sous-jacente au réseau de la Figure 3.8 est de 16 comparativement à 45 pour le réseau initial montré à la

Figure 3.7. Il existe cependant des méthodes permettant de minimiser le nombre de probabilités à évaluer par les experts (voir Section 5.5). En utilisant ces méthodes, la loi de probabilités du réseau de la Figure 3.8 serait entièrement définie par l'estimation de 6 valeurs seulement. Bien qu'elles puissent être utiles pour le réseau simple de cet exemple, ces techniques sont essentielles lorsque les problèmes sont modélisés à l'aide de réseaux plus complexes car le nombre de probabilités requises peut alors être très élevé ce qui fait en sorte que leur évaluation deviendrait impraticable pour des experts.

3.4 Circulation de l'information dans un réseau bayésien

Bien qu'une flèche soit orientée de A vers B, l'information peut circuler dans les deux sens. En d'autres termes, s'il existe une relation causale de A vers B, toute information sur A peut modifier la connaissance de B et réciproquement, toute information sur B peut modifier la connaissance de A. Aussi, l'information entrée dans un réseau bayésien peut avoir des répercussions sur plusieurs nœuds et non seulement sur les nœuds voisins.

Le modèle causal de la Figure 3.8 et les tables de probabilités de la Figure 3.9 forment un réseau bayésien complet sur lequel des calculs d'inférence peuvent être réalisés. Ces calculs sont conformes au raisonnement intuitif qui peut être fait directement sur le réseau car la loi de probabilité sous-jacente permet de rendre quantitatifs les raisonnements sur les causalités (Becker et Nadim 1999, Jensen 2001). Les algorithmes utilisés pour les calculs d'inférence sont décrits au Chapitre 4. Les résultats numériques qui sont présentés dans cette section ont été calculés à l'aide d'un logiciel spécialisé (voir Section 4.8.5) et ne servent qu'à appuyer les conclusions obtenues à l'aide du raisonnement qualitatif réalisé sur le modèle causal de la Figure 3.8.

Si des venues d'eau sont observées, le noeud *venues d'eau* est instancié et la probabilité qu'il soit vrai devient égale à 1 pour toutes les combinaisons d'états de ses parents. Un

raisonnement intuitif fait sur le modèle causal de la Figure 3.8 indique alors que faute d'informations complémentaires, la plausibilité des deux causes doit augmenter. Ceci est confirmé par les calculs d'inférence qui montrent qu'en présence de venues d'eau, la probabilité d'observer des précipitations significatives passe de 0,1 (voir Figure 3.9) à 0,28 alors que la probabilité d'un niveau de réservoir élevé passe de 0,2 (voir Figure 3.9) à 0,66.

Si des glissements sont aussi observés, le raisonnement intuitif indique que la plausibilité d'un niveau de réservoir élevé doit encore augmenter. Cette affirmation est aussi confirmée par calcul alors que la probabilité d'un niveau de réservoir élevé passe maintenant de 0,66 à 0,95. La circulation de l'information à la suite de ces deux observations s'est faite uniquement dans le sens effet→cause.

La probabilité d'un niveau de réservoir élevé ayant augmenté, cette cause devient donc la plus probable pour expliquer la présence de venues d'eau. Ici, la circulation de l'information se fait dans le sens cause→effet. Les calculs indiquent qu'avec une probabilité ayant passé de 0,28 à 0,13, les précipitations deviennent la cause la moins probable des venues d'eau.

En résumé, il a été possible de déduire à partir de l'observation de glissements qu'il n'y a très probablement pas eu de précipitations importantes.

Cet exemple simple montre bien que l'information peut suivre des chemins à première vue contre-intuitifs lorsqu'elle se propage dans un réseau bayésien. Aussi, en présence d'un réseau plus complexe, il est essentiel de conserver à l'esprit que l'information ne circule pas seulement dans le sens des flèches.

Aussi, étant donné que les réseaux bayésiens sont formés à partir d'un graphe orienté acyclique, ils ne peuvent contenir de boucles circulaires qui permettraient de modéliser

directement des phénomènes récursifs comme par exemple l'interaction pression-fissuration dans les barrages en béton. Ces phénomènes doivent être modélisés par la prise en compte de leurs variations temporelles et par l'ajout de variables intermédiaires (Jensen 2001).

3.5 Causalité et statistiques

Les réseaux bayésiens permettent de modéliser les dépendances statistiques et/ou causales entre les variables d'un système. Le raisonnement causal est cependant préconisé car la connaissance est organisée autour de relations causales et non statistiques et le langage des probabilités est insuffisant à lui seul pour capturer ces relations (Pearl 1988). Les réseaux bayésiens formalisent la connaissance en combinant la causalité à l'approche probabiliste.

La signification de la causalité telle qu'utilisée dans les réseaux bayésiens est basée sur les vues du philosophe anglais John Locke (1632-1704) qui considérait la causalité comme une propriété de la réalité plutôt que d'une simple description de la réalité. Ici, la causalité n'est pas seulement une composante de l'expérience mais aussi une forme objective d'interdépendance entre les objets et les événements. À l'inverse, le philosophe écossais David Hume (1711-1776) pensait que la causalité n'est qu'une impression de l'esprit où les causes et les effets sont simplement reliés plutôt que le produit de l'un et de l'autre (Pougeoise 1996).

Ce débat est toujours en cours et la prise en compte de tous ses aspects philosophiques déborde du cadre de cette recherche. Cependant, l'interprétation de la causalité comme étant une propriété de la réalité est la plus intéressante car l'utilisation des réseaux bayésiens mise de l'avant dans cette thèse est basée sur ses capacités de prédiction et de diagnostic en relation aux barrages qui sont des systèmes réels.

La structure causale d'un réseau bayésien permet d'intégrer notre compréhension des processus formant un système et d'encoder les incertitudes reliées à son fonctionnement. Ce principe est en contraste avec l'analyse statistique traditionnelle où la corrélation entre deux variables n'indique qu'un lien phénoménologique.

Cette distinction est un net avantage pour les réseaux bayésiens utilisant la causalité car la structuration de modèles à l'aide de liens causaux est plus naturelle pour un expert. Les raisonnements sont alors plus significatifs et facilement vérifiables avec la réalité (Jensen 2001). À l'inverse, l'utilisation de modèles purement statistiques se fait le plus souvent par le biais de paramètres mathématiques qui n'ont pas toujours de signification physique directe.

Ces considérations montrent l'intérêt d'utiliser une approche causale. Il est nécessaire à présent de définir le concept de causalité qui est utilisé dans cette recherche.

Il est en général considéré que l'un des traits caractéristiques d'une relation causale est sa régularité. En effet, lorsqu'il est observé à plusieurs reprises que lors de l'occurrence d'un événement A un autre événement B survient aussi, il est plausible de s'attendre à observer B dans le futur quand A arrive. La notion de régularité exprime cette propriété. Selon Hume (Pougeoise 1996), dans les mêmes circonstances, on doit avoir les mêmes effets. Si cette propriété tient en théorie, elles est critiquable pour son utilisation dans un cadre pratique (Pearl et Verma 1991). En effet, elle implique que le système étudié soit très bien défini dans le sens où la liste exhaustive des causes de chaque effet est connue.

Étant donné un effet dont certaines causes sont cachées ou ignorées, il est possible d'observer plusieurs fois les mêmes causes connues mais que les causes inconnues soient différentes aboutissant ainsi à un effet différent. La propriété de régularité n'est alors pas appliquée. Or, c'est précisément ce qui arrive dans l'étude des barrages car la complexité des mécanismes en jeu lors du traitement de l'information empêche cette connaissance

presque parfaite des causes. La solution consiste à considérer la régularité d'un point de vue non pas déterministe mais plutôt probabiliste (Pearl et Verma 1991). Cette régularité probabiliste stipule que, la plupart du temps (et non pas toujours), l'observation des causes s'accompagne de celle de l'effet.

La propriété de régularité ne suffit cependant pas à définir complètement la causalité. Ainsi, ce n'est pas parce que deux variables sont corrélées (il y a régularité probabiliste) qu'il existe un rapport de cause à effet. La corrélation peut très bien être due à une troisième variable qui serait la cause des deux autres. La causalité est donc une relation plus forte que la simple dépendance probabiliste qui ne constitue qu'une condition nécessaire à la présence de causalité (Pearl 2000).

Pour que la régularité traduise une relation causale, il faut qu'il y ait bel et bien une relation entre les causes et les effets supposés. L'existence d'une relation est exprimée par la notion de contiguïté. Deux éléments sont contigus s'ils sont en contact ou proche l'un de l'autre, relativement à l'échelle du système étudié, et ce aussi bien au niveau spatial que temporel (Pearl 2000).

Pour qu'une relation soit causale, on doit retrouver à la fois la propriété de régularité et celle de contiguïté. Or, l'analyse statistique ne permet pas à elle seule d'affirmer l'existence de relations causales car cette analyse repose uniquement sur l'observation d'une régularité (Pearl et Verma 1991).

Enfin, une relation causale est également caractérisée par son orientation. La causalité est une relation entre deux éléments orientée de la cause vers l'effet. Cette orientation nécessite la prise en compte de la dimension temporelle d'une relation. Il y a donc ordonnancement temporel car la cause doit précéder l'effet (Pearl et Verma 1991).

Cette contrainte de précédence temporelle de la cause sur l'effet prend forme dans les réseaux bayésiens par l'utilisation de graphes orientés acycliques. La présence d'un cycle orienté signifierait que deux éléments seraient cause l'un de l'autre et il n'y aurait alors pas de précédence temporelle.

Pour considérer qu'un réseau bayésien est causal, il est nécessaire que la décomposition d'un système ne soit pas arbitraire mais soit au contraire réalisée suivant une analyse des mécanismes sous-jacents. Cependant, même en considérant la causalité comme une propriété de la réalité, cela ne signifie pas que différents experts travaillant séparément doivent arriver au même modèle causal pour un système donné. La complexité et la richesse du réseau bayésien sont déterminées par l'expérience de chacun des experts et par la disponibilité de l'information.

Aussi, on peut assumer que pour un système donné il n'existe pas de réseau bayésien unique qui modélise de façon exhaustive toutes les causes et tous les effets. La granularité du modèle est plutôt déterminée par des contraintes pratiques reliées à l'utilisation que l'on veut en faire et par la disponibilité d'expériences, de données et de modèles théoriques en rapport aux phénomènes étudiés.

3.6 Comparaison avec d'autres formes d'intelligence artificielle

L'information n'est pas la connaissance (Becker et Nadim 1999). À mesure que se développent les technologies permettant de stocker, d'échanger de l'information et d'y accéder, la question de l'analyse et de la synthèse de ces informations malgré les incertitudes devient essentielle. Le développement de technologies facilitant le passage de l'information à la connaissance est donc déterminant.

L'intelligence artificielle permet de traiter la connaissance reliée à la problématique du risque en sécurité des barrages. En plus des réseaux bayésiens, d'autres formes d'intelligence artificielle pourraient être utilisées pour modéliser le risque barrage telles les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue. Les réseaux bayésiens représentent cependant la meilleure approche pour traiter les incertitudes et les interrelations entre les variables servant à analyser le risque barrage.

Un système expert reproduit le comportement d'un expert humain accomplissant une tâche intellectuelle dans un domaine précis. La connaissance est formalisée par un ensemble de règles qui sont enchaînées pour simuler le raisonnement de l'expert. Cependant, toutes les expertises ne sont pas facilement formalisables sous forme de règles et ceci plus particulièrement dans un domaine comme la sécurité des barrages où les exceptions sont trop importantes pour être exclues d'un modèle mais trop nombreuses pour être exprimées explicitement. Aussi, les systèmes à base de règles ne gèrent pas adéquatement l'incertitude.

Les diagnostics et les prédictions requis pour l'analyse du risque barrage ne sont pas fixés d'avance. Ces requêtes peuvent être très variées car elles dépendent toujours du contexte spécifique relié à chacun des barrages. De plus, les besoins évoluent dans le temps en fonction des connaissances et des observations faites sur un ouvrage donné.

Les réseaux bayésiens offrent la plus grande flexibilité en ce qui a trait aux inférences qui peuvent être réalisées. Ils représentent la seule forme d'intelligence artificielle à posséder la capacité de pouvoir raisonner facilement dans les deux sens (diagnostic et prédiction) à partir d'observations impliquant une seule ou plusieurs variables simultanément (Pearl et Russell 2000).

Il n'existe pas de variables fixées à l'avance pour l'entrée et la sortie de données dans un réseau bayésien. Il est possible de réaliser des inférences sur une ou plusieurs variables

sans devoir reconfigurer la structure du réseau (McCabe 1997). Compte tenu de la modularité des réseaux bayésiens, des variables peuvent être facilement ajoutées ou retranchées pour tenir compte de nouvelles informations relatives à la structure du modèle (Pearl et Russell 2000). Cette flexibilité ne se retrouve pas dans les systèmes experts qui ont des points fixes d'entrée et de sortie de données et qui, lors d'un changement, doivent être réexaminés afin de contrôler l'effet d'une nouvelle règle sur chacune des règles existantes.

Les réseaux bayésiens sont des représentations directes du fonctionnement de systèmes réels et non le résultat de processus de raisonnement souvent abstraits. Les liens directionnels représentent des relations causales représentatives de la réalité et non le flux d'information relié au processus de raisonnement comme pour les systèmes experts et les réseaux de neurones (Pearl et Russell 2000). Ils sont donc plus intuitifs et, de ce fait, plus faciles à construire et à utiliser. Cet avantage devient encore plus marqué lorsque les variables et leurs interrelations sont nombreuses.

Un réseau de neurones est un outil d'analyse statistique permettant de construire un modèle de comportement à partir de données qui sont des exemples de ce comportement (Sangalli 2001). L'avantage des réseaux de neurones réside dans leur capacité d'apprentissage automatique. Cependant, les données ne sont pas disponibles en assez grand nombre pour pouvoir modéliser les mécanismes de rupture des barrages à l'aide de réseaux de neurones. Aussi, chaque structure étant unique, la transposition directe de modèles de comportement d'un barrage à un autre n'est pas possible. L'apport de jugement d'experts est fondamental dans l'analyse du risque relié aux barrages mais ce type de connaissances ne peut être utilisé dans les réseaux de neurones (Charniak 1991).

De plus, les réseaux de neurones sont de véritables boites noires qui ne permettent pas d'interpréter les modèles construits. Après plusieurs années d'utilisation, leur capacité à "apprendre sans comprendre" perçue au début comme une qualité majeure permettant de

contourner le processus d'acquisition de connaissances, s'est transformée en défaut (Becker et Nadim 1999).

Les humains utilisent souvent des concepts qui possèdent un fort contenu sémantique qui sont matérialisés par des mots plus ou moins vagues (Guyonnet, Côme, Perrochet et Parriaux 1999). La logique floue formalise l'usage des termes vagues dans le but de les rendre manipulables par des ordinateurs. Elle permet de remplacer des modèles mathématiques par des modèles basées sur des descriptions verbales simples (Sangalli 2001).

Ces caractéristiques de la logique floue sont incluses implicitement dans les réseaux bayésiens lorsqu'il s'agit de traduire une information qualitative en une valeur quantitative dans les tables de probabilités. Il existe cependant une différence essentielle entre les deux approches: les réseaux bayésiens s'attachent à la prise en compte de faits précis (les relations cause à effet sont bien connues) mais incertains (Becker et Nadim 1999) alors que la logique floue s'intéresse à la modélisation de faits imprécis (Sangalli 2001). Les applications pratiques de la logique floue touchent surtout des systèmes de contrôle de machines comprenant un nombre relativement faible d'opérations.

Deux des caractéristiques principales du risque, et plus particulièrement du risque barrage, sont la complexité et l'incertitude (Denis 1998). Parmi les formes d'intelligence artificielle permettant de traiter la connaissance reliée au risque barrage, les réseaux bayésiens constituent l'approche la plus appropriée pour intégrer l'incertitude dans le raisonnement. Ils permettent aussi de tenir compte des nombreuses interrelations entre les variables qui définissent les mécanismes de rupture potentiels et donc le risque barrage.

3.7 Résumé

La problématique du risque en sécurité des barrages est reliée à la connaissance. Le concept des réseaux bayésiens constitue un outil privilégié pour l'analyse du risque barrage car il permet de traiter la connaissance et l'incertitude plutôt que seulement l'information.

Un réseau bayésien est un graphe causal où les variables sont représentées par des noeuds et les relations de dépendance par des liens directionnels. La représentation probabiliste sous-jacente permet de quantifier la force de ces dépendances et de réaliser des calculs d'inférence servant d'aide à la décision.

La construction d'un réseau bayésien nécessite deux grandes phases. La première, plus qualitative, consiste à mettre en place la structure du graphe c'est-à-dire identifier les variables du modèle et indiquer les liens de dépendance entre ces variables. La deuxième, plus quantitative, consiste à calculer ou évaluer les probabilités nécessaires afin de quantifier les dépendances identifiées précédemment. Ces deux phases peuvent être effectuées soit en utilisant des modèles mathématiques et des données historiques reliées au domaine d'étude, soit encore à l'aide d'opinions d'experts ou soit par une combinaison des deux.

Les étapes de construction d'un réseau bayésien sont illustrées à l'aide d'un exemple simplifié où les facteurs reliés à la présence de venues d'eau et de glissements sur un barrage sont étudiés. Cet exemple montre aussi que l'information dans un réseau bayésien peut circuler autant dans le sens causes→effets pour la réalisation de prédictions, que dans le sens effets→causes pour la réalisation de diagnostics.

Bien que les dépendances statistiques puissent aussi être modélisées à l'aide des réseaux bayésiens, le raisonnement causal est préconisé. La connaissance est organisée autour de

relations causales et non statistiques et le langage des probabilités est insuffisant à lui seul pour capturer ces relations.

De plus, parmi les formes d'intelligence artificielle permettant de traiter la connaissance reliée au risque barrage, les réseaux bayésiens constituent l'approche la plus appropriée pour intégrer l'incertitude dans le raisonnement.

La quantification des raisonnements est réalisée à l'aide de calculs d'inférence basés sur des concepts et algorithmes qui sont décrits au chapitre suivant.

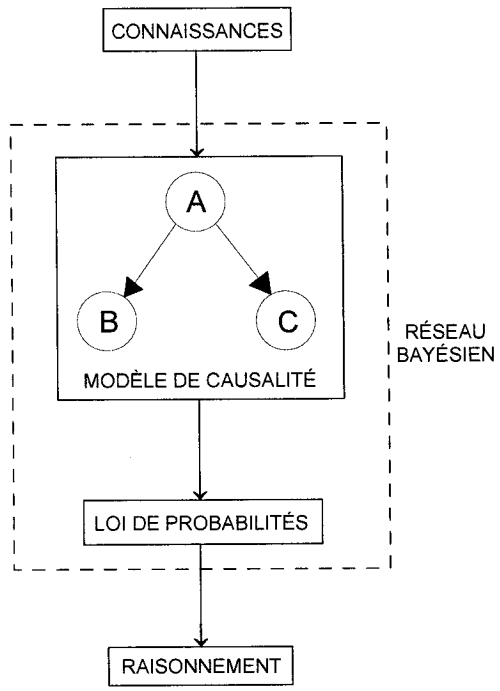


Figure 3.1: Illustration du principe des réseaux bayésiens (Becker et Nadim 1999)



Figure 3.2: Composantes d'un réseau bayésien, nœuds et états



Figure 3.3: Composantes d'un réseau bayésien, liens directionnels



Vrai	0,1
Faux	0,9

Si A =	Vrai	Faux
Vrai	0,2	0,7
Faux	0,8	0,3

Figure 3.4: Composantes d'un réseau bayésien, ensembles de probabilités



Figure 3.5: Construction d'un réseau bayésien, noeuds



oui
non

oui
non

<10 mm/jour
10 à 60 mm/jour
>60 mm/jour

oui
non

Figure 3.6: Construction d'un réseau bayésien, états

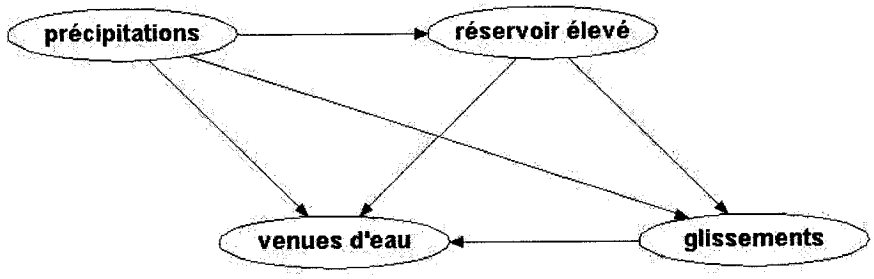


Figure 3.7: Construction d'un réseau bayésien, relations causales

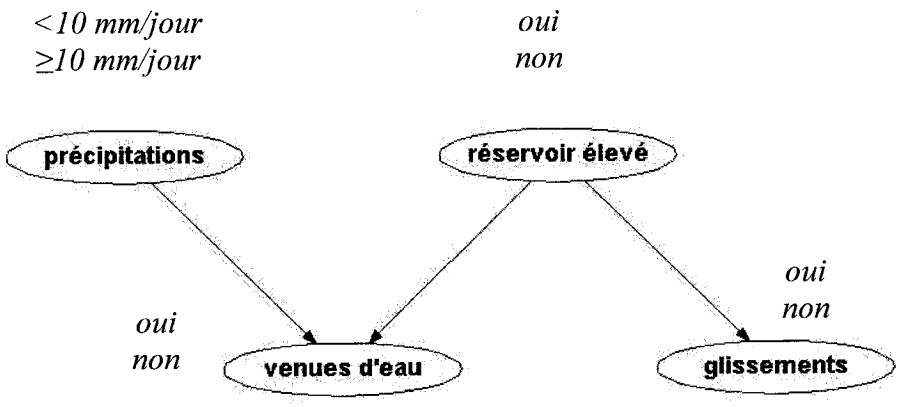


Figure 3.8: Construction d'un réseau bayésien, modèle causal corrigé

précipitations < 10 mm/jour	0,9
précipitations ≥ 10 mm/jour	0,1

réservoir élevé = oui	0,2
réservoir élevé = non	0,8

	RÉSERVOIR ÉLEVÉ	
	oui	non
glissements = oui	0,1	0,01
glissements = non	0,9	0,99

		réservoir élevé			
		oui		non	
	précipitations	<10mm /jour	≥10mm /jour	<10mm /jour	≥10mm /jour
venues d'eau	= oui	0,9	0,99	0,05	0,7
	= non	0,1	0,01	0,95	0,3

Figure 3.9: Construction d'un réseau bayésien, tables de probabilités

CHAPITRE 4

CALCULS D'INFÉRENCE

4.1 Introduction

Le traitement des connaissances et des incertitudes reliées au risque barrage est réalisé dans les réseaux bayésiens par le biais de raisonnements quantifiés à l'aide de calculs d'inférence sur la loi de probabilités sous-jacente à la structure du réseau. L'inférence dans un réseau bayésien consiste à propager l'effet d'une ou plusieurs informations certaines au sein du réseau pour en déduire comment sont modifiées les probabilités concernant les autres nœuds.

Soit un réseau défini par un graphe composé de n nœuds $X = \{ X_1, X_2, \ldots, X_n \}$ et d'une loi de probabilités associée, le problème général de l'inférence est de calculer la probabilité modifiée de X_i étant donné de nouveaux éléments d'information Y appliqués sur un ou plusieurs des autre nœuds. Il faut donc calculer la probabilité de X_i étant donné Y.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les méthodes de calcul utilisées pour l'inférence dans un réseau bayésien. Ces dernières sont fondées sur la règle d'enchaînement, le théorème de Bayes ainsi que la d-séparation. Ces trois concepts sont définis aux Sections 4.5, 4.6 et 4.7.

Les axiomes des probabilités et la définition probabiliste de la dépendance conditionnelle sont revus avant la description des méthodes de calcul. Ce rappel est bref car il a surtout pour objet de clarifier les notations qui seront utilisées dans les chapitres suivants.

4.2 Axiomes des probabilités

4.2.1 Diagrammes de Venn

Les axiomes des probabilités sont inspirés des diagrammes de Venn qui sont utilisés pour établir et représenter les relations entre des événements. Ces événements réfèrent aux issues incertaines relatives à une condition, un état ou à la valeur d'un paramètre. L'ensemble de toutes les issues possibles est appelé univers.

À titre d'exemple, la Figure 4.1 est un diagramme de Venn représentant deux événements A et B. Ces deux événements sont mutuellement exclusifs, les ensembles de la Figure 4.1 sont distincts et ne comportent pas de chevauchement.

Le diagramme de la Figure 4.2 représente le cas où A et B peuvent se produire seuls ou de façon simultanée. Ce dernier cas est représenté par la surface formée par le chevauchement des événements A et B. Ces événements ne sont donc pas mutuellement exclusifs.

Le chevauchement ou l'occurrence mutuelle des événements A et B est exprimé de façon symbolique par $A \cap B$ qui se lit A et B. L'union ou l'addition de ces deux événements est exprimée par $A \cup B$ et se lit A ou B.

4.2.2 Description des axiomes des probabilités

Les trois axiomes des probabilités constituent les fondements des calculs probabilistes. Ils fournissent les outils de base pour manipuler et combiner des probabilités indépendamment des calculs utilisés pour obtenir ces valeurs. Ces axiomes assurent la cohérence des calculs probabilistes sans faire de distinction entre les différentes

interprétations possibles des probabilités (Vick 2002). Deux des principales interprétations des probabilités sont discutées à la Section 4.3.

L'axiome 1 indique que la probabilité d'un événement X, notée $P(X)$, est un nombre plus grand ou égal à zéro mais plus petit ou égal à 1:

$$0 \leq P(X) \leq 1 \tag{4.1}$$

L'axiome 2 indique que la probabilité d'un événement certain X_c est égale à l'unité:

$$P(X_c) = 1 \tag{4.2}$$

Le terme X_c est associé à l'occurrence de tous les événements d'un univers. Par exemple, à la Figure 4.1, $P(A) + P(B) = 1$.

L'axiome 3 indique que la probabilité reliée à l'union de deux événements mutuellement exclusifs X et Y est égale à la somme de leurs probabilités individuelles:

$$P(X \cup Y) = P(X) + P(Y) \tag{4.3}$$

À la Figure 4.2, $P(A_0 \cup B_0) = P(A_0) + P(B_0)$.

Aussi, lorsque X_i est exhaustif, c'est-à-dire qu'il représente tous les événements d'un univers, alors $\sum P(X_i) = 1$.

À la Figure 4.2, $P(A_0) + P(B_0) + P(A \cap B) = 1$.

Ceci implique que des événements complémentaires X et $\neg X$ (qui se lit "non X") sont reliés de la façon suivante:

$$P(\neg X) = 1 - P(X) \tag{4.4}$$

Dans la notation probabiliste, le symbole ∩ peut être remplacé par une virgule. L'expression $P(A \cap B)$ devient alors $P(A,B)$ c'est-à-dire la probabilité d'occurrence des événements A et B.

4.3 Interprétations des probabilités

Il existe un débat sans fin sur la sémantique à associer aux probabilités (Gillies 2000, Bernstein 1996). Deux approches, en général, sont considérées. Les probabilités peuvent référer à la fréquence à laquelle un événement aléatoire se produit suite à une série infinie d'essais similaires. Il s'agit alors d'une propriété du système et non des connaissances ou de l'information disponible. Cependant, pour des événements à caractère unique, les probabilités représentent plutôt la force d'une opinion. Ces interprétations ont donné naissance à deux écoles de pensée: l'approche fréquentielle et l'approche subjectiviste.

L'approche fréquentielle considère que la probabilité est une propriété de l'objet étudié qui a une valeur spécifique mais inconnue. Il y a une "vraie" valeur qui reste à découvrir.

L'approche subjectiviste considère la probabilité comme la force d'une opinion qui peut être appliquée à l'objet étudié. Tous les types d'informations, incluant les statistiques historiques nécessaires aux évaluations fréquentielles, sont admissibles pour la formulation de probabilités subjectives. Celles-ci ne représentent pas une propriété intrinsèque du système étudié qui peut être validée scientifiquement mais une quantité qui varie en fonction du temps, de l'information disponible, de l'état des connaissances et du jugement des évaluateurs (Spetzler et Staël Von Holstein 1975, Von Thun 1998).

Dans l'approche subjectiviste, les probabilités sont le reflet d'opinions et sont uniques d'un individu à l'autre. Deux personnes considérant les mêmes données peuvent arriver à des évaluations différentes car les expériences diffèrent. Donc, il n'y a pas de "vraie" probabilité. Les évaluations reflètent alors l'état des connaissances d'une personne ou d'un groupe de personnes à propos du système (Ayyub 1999).

Les probabilités sont dites subjectives dans le sens où elles réfèrent à une quantité, une plausibilité qui n'existe pas comme telle comme un état de fait mais comme une abstraction de l'esprit. D'autre part, ces probabilités revêtent une certaine objectivité dans le sens où elles ne dépendent que de l'information disponible et non de la personnalité ou l'humeur des personnes qui en font l'évaluation (Kaplan 1993).

L'évaluation des probabilités subjectives se fait au moyen de processus formels qui permettent de recueillir l'information des experts. Cet aspect est traité au Chapitre 5.

Les probabilités associées à des événements uniques comme une rupture de barrage ne peuvent être déterminées à l'aide d'une série infinie d'essais ou en comptant le nombre de réalisations de l'événement dans une population homogène. Les évaluations de probabilités fréquentielles basées sur des statistiques historiques de rupture de barrage ne peuvent pas être utilisées seules pour le calcul du risque barrage car chaque ouvrage est unique au point de vue hydrologie, géologie, géotechnique et structural. Les caractéristiques de conception, de construction et d'exploitation sont elles aussi uniques. L'ensemble des barrages ne constitue donc pas une population homogène.

Les problèmes relatifs au risque barrage ont généralement les propriétés suivantes:

- Caractère dispersé et incertain dans l'espace des caractéristiques des matériaux;
- Imperfection et nombre limité de mesures;
- Caractère dispersé et incertain des sollicitations dans le temps;
- Imperfection des modèles;
- Grand nombre de paramètres.

Cet ensemble fait que l'ingénieur doit résoudre des problèmes complexes dont les données sont incertaines et il ne peut les traiter que par des approximations elles-mêmes incertaines (CIGB 1989).

Dans le cadre d'analyses de risque, lorsque la quantité de données est limitée ou lorsqu'il s'agit de mécanismes mal compris, l'approche subjectiviste est la seule utile pour procéder aux évaluations (Morgan, Henrion et Small 1990). Les probabilités requises pour le calcul du risque barrage doivent donc référer en grande partie à l'interprétation subjectiviste. Les évaluations sont alors basées sur les connaissances d'experts en rapport au domaine étudié et aux caractéristiques spécifiques du barrage étudié.

En plus de pouvoir utiliser l'information provenant de statistiques historiques ou de modèles déterministes, les probabilités subjectives permettent de tenir compte de la meilleure façon possible des données de conception, de construction et de comportement propres à l'ouvrage qui sont, en définitive, les plus importants pour la détermination du risque barrage.

4.4 Probabilités conditionnelles

4.4.1 Considérations générales

Dans les réseaux bayésiens considérés comme modèles de causalité, la notion de probabilité utilisée est principalement la notion subjective de croyance (Becker et Nadim 1999). D'ailleurs, les réseaux bayésiens sont souvent désignés en anglais par le terme "belief networks" qui, traduit littéralement, signifie "réseaux de croyance".

L'interprétation subjectiviste des probabilités repose sur le concept des probabilités conditionnelles (Jensen 2001). Lorsque la probabilité reliée à un événement X est évaluée, celle-ci est toujours basée sur la connaissance préalable d'autres événements. La probabilité de X est donc conditionnelle à la connaissance d'informations I reliées à ces événements préalables. La probabilité de X étant donné les informations I est notée $P(X \mid I)$.

Les probabilités subjectives sont basées sur le jugement d'expert et donc toujours conditionnelles à un contexte représenté par la connaissance d'informations I et ceci même s'il s'agit de probabilités a priori. Le contexte est souvent considéré implicitement pour simplifier la notation.

Par exemple, lors de la réalisation d'un forage, un expert cherche à déterminer la possibilité de retrouver une couche d'argile molle dans une pente qui aurait pour effet de réduire sa stabilité. L'évaluation de *P(argile)* exprime en réalité *P(argile | connaissances géologiques),* la probabilité de retrouver de l'argile étant donné les connaissances de l'expert en géologie et en géotechnique et sa compréhension du mode de formation et de déposition des sols à l'endroit du forage.

4.4.2 Théorème des probabilités conditionnelles

La probabilité d'occurrence de deux événements X et Y dépend de la probabilité de l'événement X, soit $P(X)$, et de la probabilité de l'événement Y étant donné la réalisation préalable de X, soit $P(Y \mid X)$:

$$P(X,Y) = P(Y \mid X) * P(X) \tag{4.5}$$

L'Équation 4.5 est symétrique et peut aussi s'écrire:

$$P(X,Y) = P(Y,X) = P(X \mid Y) * P(Y) \tag{4.6}$$

Lorsque la probabilité de réalisation d'un événement Y ne dépend pas de la réalisation préalable d'un événement X, ces derniers sont considérés indépendants. Dans ce cas:

$$P(Y \mid X) = P(Y) \tag{4.7}$$

La probabilité de réalisation des deux événements indépendants est alors déterminée par la multiplication des probabilités individuelles:

$$P(X, Y) = P(X) * P(Y) \tag{4.8}$$

Les relations de dépendance ou d'indépendance ne sont pas nécessairement des propriétés des événements. Ces relations dépendent plutôt de la portée du problème étudié et du niveau de connaissance de l'expert par rapport aux mécanismes qui influencent la réalisation des événements.

Par exemple, les séismes et un niveau du réservoir élevé sont souvent considérés comme des phénomènes indépendants car, pour la plupart des problèmes pratiques de sécurité

des barrages, il n'y a pas de relation cause à effet significative entre la géologie de la fondation d'un barrage et le niveau du réservoir. Selon l'Équation 4.7:

$$P(séisme \mid réservoir\ élevé) = P(séisme) \tag{4.9}$$

et, selon l'Équation 4.8:

$$P(séisme, réservoir\ élevé) = P(séisme) * P(réservoir\ élevé) \tag{4.10}$$

Cependant, dans certains cas, comme pour l'étude de séismes induits par la mise en eau d'un réservoir, le lien de causalité entre la géologie et le niveau du réservoir doit être considéré de façon explicite car il est essentiel à la compréhension du problème étudié. Les deux événements ne sont alors plus indépendants et leur probabilité d'occurrence est donnée par (voir Équation 4.5):

$$P(séisme, réservoir\ élevé) = P(séisme \mid réservoir\ élevé) * P(réservoir\ élevé) \tag{4.11}$$

Selon l'interprétation subjectiviste des probabilités, la qualification des liens de dépendance entre les événements est un choix fait par l'expert basé sur ses connaissances tout comme l'évaluation quantitative des valeurs de probabilités.

4.4.3 Probabilités marginales

Le calcul des probabilités marginales permet de déterminer $P(X)$ lorsque seul $P(X,Y)$ est connu. Ce calcul est basé sur l'axiome 3 et le théorème des probabilités conditionnelles.

Si les i états possibles de Y sont exhaustifs et mutuellement exclusifs, la marginalisation de X par rapport à Y se fait de la façon suivante:

$$P(X) = \sum_i P(X \mid Y_i) * P(Y_i) \tag{4.12}$$

La sommation est effectuée en considérant les i états de Y. Si Y est un événement de type binaire, la marginalisation de X par rapport à Y est réalisée comme suit:

$$P(X) = P(X \mid Y) * P(Y) + P(X \mid \neg Y) * P(\neg Y) \tag{4.13}$$

L'Équation 4.12 est aussi appelée théorème de probabilité totale.

4.5 Règle d'enchaînement

La distribution de probabilités jointes $P(X_1, X_2, ..., X_n)$ d'un ensemble de n variables aléatoires $X_1, X_2, ..., X_n$ représente de façon exhaustive l'information disponible en rapport à cet ensemble (Charniak 1991). L'inférence dans un réseau bayésien peut donc être réalisée en calculant la distribution de probabilités jointes des n noeuds du réseau. Ce calcul est réalisé en utilisant le théorème des probabilités conditionnelles.

Par exemple, l'application de l'Équation 4.5 pour le réseau bayésien de la Figure 4.3 donne l'équation suivante:

$$P(A,B,C) = P(A \mid B,C) * P(B,C) = P(A \mid B,C) * P(B \mid C) * P(C) \tag{4.14}$$

ou, par symétrie

$$P(A,B,C) = P(C \mid A,B) * P(B \mid A) * P(A) \tag{4.15}$$

La connaissance de B fait en sorte que la connaissance de A n'a plus d'effet sur C. Les noeuds A et C deviennent donc indépendants ou d-séparés (voir Section 4.7). On a alors, pour le réseau de la Figure 4.3:

$$P(C \mid A,B) = P(C \mid B) \tag{4.16}$$

L'Équation 4.15 s'écrit donc:

$$P(A,B,C) = P(C \mid B) * P(B \mid A) * P(A) \tag{4.17}$$

Pour un réseau bayésien comprenant n nœuds, l'Équation 4.17 se généralise par la règle d'enchaînement qui se définit comme suit:

$$P(X_1, X_2, \ldots, X_n) = \prod_i^n P(X_i \mid pa(X_i)) \tag{4.18}$$

Dans l'Équation 4.18, $pa(X_i)$ est l'ensemble des parents de X_i. Si X_i n'a pas de parents, la probabilité a priori $P(X_i)$ est utilisée dans le calcul.

La règle d'enchaînement définit la distribution de probabilités jointes comme le produit des distributions conditionnelles locales et est valide pour toutes les formes de réseau (Becker et Nadim 1999, Charniak 1991, Jensen 2001). Elle permet de limiter les calculs de probabilités grâce aux propriétés d'indépendance des variables dans le réseau. Pour un réseau de n nœuds binaires, le calcul de la distribution de probabilités jointes nécessiterait la manipulation de 2^n valeurs de probabilités. L'utilisation de la règle

d'enchaînement fait en sorte que le nombre de probabilités à considérer dans les calculs est de l'ordre de *2n* (Charniak 1989).

4.6 Théorème de Bayes

Le théorème de Bayes est défini à partir des propriétés de symétrie des probabilités conditionnelles (voir Équations 4.5 et 4.6):

$$P(X,Y) = P(X \mid Y) * P(Y) = P(X) * P(Y \mid X) \tag{4.19}$$

on a donc:

$$P(X \mid Y) = \frac{P(X) * P(Y \mid X)}{P(Y)} \tag{4.20}$$

qui est le théorème de Bayes.

Malgré son apparente simplicité, cette relation décrit de façon mathématique le processus d'acquisition de l'expérience par une personne en calculant l'influence d'une nouvelle information sur ses connaissances préalables. La connaissance a priori est transformée en connaissance a posteriori en fonction de la vraisemblance des nouvelles observations par rapport à la connaissance initiale. De façon littérale on a:

$$\textit{connaissance a posteriori} = \textit{connaissance a priori} * \textit{vraisemblance} \tag{4.21}$$

Dans l'Équation 4.20, $P(X \mid Y)$ représente la connaissance a posteriori, $P(X)$ la connaissance a priori et $P(Y \mid X) / P(Y)$ la vraisemblance.

En termes de relations cause à effet, l'Équation 4.20 s'écrit:

$$P(cause \mid effet) = \frac{P(cause) * P(effet \mid cause)}{P(effet)} \tag{4.22}$$

En plus des calculs de type inductif tels le diagnostic d'une cause étant donné un effet, *P(cause | effet)*, la symétrie du théorème de Bayes permet de faire des calculs de type déductif tels la prédiction d'un effet étant donné la cause, *P(effet | cause)*.

L'Équation 4.20 peut aussi être interprétée en termes de mécanismes pouvant provoquer la rupture du barrage (Vick 2002). La réalisation d'un mécanisme de rupture est une cause qui produit différents effets. Ces effets se manifestent sous forme d'indicateurs de rupture. En principe, il serait possible de déterminer la fiabilité d'un indicateur en examinant la fréquence avec laquelle il est apparu dans des cas de rupture historiques. La fréquence d'apparition de l'indicateur dans les cas où une rupture ne survient pas interviendrait aussi dans le calcul. La probabilité de rupture R d'un barrage étant donné l'observation d'un indicateur I s'écrirait donc:

$$P(R \mid I) = \frac{P(I \mid R) * P(R)}{P(I \mid R) * P(R) + P(I \mid \neg R) * P(\neg R)} \tag{4.23}$$

Le dénominateur de l'Équation 4.23 est *P(I)*, la probabilité d'observer l'indicateur. Cette valeur est obtenue par marginalisation de I par rapport à R (voir Équation 4.13).

En pratique, la probabilité de rupture ne peut être calculée uniquement à l'aide de l'Équation 4.23. Dans le cadre d'analyses de risque en sécurité des barrages, la rupture est une hypothèse qui doit être étudiée en tenant compte des données disponibles. Étant donné le peu de cas de rupture bien documentés et le caractère unique de chaque barrage, les statistiques de rupture sont peu utiles. L'hypothèse de rupture doit donc être

étudiée à la lumière des données recueillies sur le terrain et des connaissances des ingénieurs responsables de la sécurité.

Le théorème de Bayes est le lien qui unit les données et les connaissances. En d'autres termes, le théorème de Bayes permet de déterminer l'apport d'une donnée supplémentaire sur la probabilité d'une hypothèse à partir de connaissances a priori basées sur l'expérience et le jugement.

Dans les calculs effectués selon une interprétation fréquentielle des probabilités, le théorème de Bayes n'est que le résultat de l'application des axiomes des probabilités. Dans les calculs probabilistes de type subjectiviste, ce théorème est considéré comme la relation logique fondamentale qui contrôle le processus d'évaluation des nouvelles connaissances (Kaplan 1993). Le théorème de Bayes offre un cadre formel permettant de combiner des données quantitatives avec des connaissances a priori qui incluent le jugement (Kreuzer 2000). Il est l'expression mathématique de l'apprentissage par l'expérience (Hacking 2001).

4.7 d-séparation

Dans un réseau bayésien, l'impact d'une information certaine entrée à un nœud, ou instanciation, peut être propagé dans l'ensemble du réseau par des connexions en série, convergentes ou divergentes. Selon la structure du réseau et les nœuds instanciés, il est possible que l'information entrée n'ait aucun impact sur certains autres nœuds. Lorsque l'information entrée à un nœud A n'affecte pas un nœud B, il y a blocage d'information entre les nœuds A et B qui sont alors considérés comme d-séparés. En termes probabilistes, A et B deviennent indépendants car $P(A|B) = P(A)$ et $P(B|A) = P(B)$ (voir Équation 4.7).

Le concept de d-séparation (de l'anglais "directional separation") a été développé à partir de la théorie des graphes (Pearl 1988). La d-séparation est un test graphique permettant de déterminer quelles sont les relations d'indépendance conditionnelle inscrites dans la structure d'un graphe. Ce concept fournit la sémantique requise pour caractériser les réseaux bayésiens et révéler les indépendances conditionnelles entre les causes et les effets spécifiés dans un réseau (Jensen 2001). La d-séparation permet de simplifier les calculs d'inférence dans les réseaux bayésiens.

Deux nœuds sont d-séparés si une nouvelle information concernant le premier nœud n'affecte pas la probabilité d'occurrence du deuxième. Les Figures 4.4 à 4.6 montrent les types de connexions pouvant être rencontrées dans un réseau bayésien et permettent d'illustrer le concept de d-séparation.

Le réseau de la Figure 4.4 représente une connexion en série (on néglige pour cet exemple les autres causes possibles d'une augmentation des pressions). L'information peut circuler de *A* à *C* sauf si *B* est instancié. Lorsque *B* est connu, *A* et *C* sont d-séparés. Dans cet exemple, si un augmentation des pressions interstitielles est mesurée dans un barrage, le nœud *augmentation pressions* est instancié et la connaissance du niveau du réservoir n'apporte pas d'informations supplémentaires sur la possibilité d'observer des glissements dans ce barrage.

Le réseau de la Figure 4.5 représente une connexion divergente (on néglige pour cet exemple les autres causes possibles de glissements). L'information peut circuler de *B* à *C* sauf si *A* est instancié. Lorsque *A* est connu, *B* et *C* sont d-séparés. Si le niveau du réservoir est inconnu (le nœud *réservoir élevé* n'est pas instancié) et que des venues d'eau sont observées, la possibilité d'un réservoir élevé augmente tout comme la possibilité d'observer des glissements. Si le niveau du réservoir est connu, l'observation de venues d'eau ne fournit aucune information supplémentaire concernant la possibilité de glissement du barrage.

Le réseau de la Figure 4.6 représente une connexion convergente (on néglige pour cet exemple les autres causes possibles de fissures). L'information peut circuler de A vers B si C est instancié. Lorsque C est inconnu, A et B sont d-séparés. Si des fissures sont notées sur un barrage, la plausibilité des deux causes possibles augmente. Cependant, l'observation de glissements diminue la possibilité que le gel soit la cause des fissures. En d'autres termes, si une des causes communes d'un effet observé devient plus probable, la probabilité des autres causes diminue. À l'inverse, si la présence des fissures est indéterminée, la présence de gel n'affecte pas la possibilité d'observer des glissements. Ces deux phénomènes sont alors indépendants.

La d-séparation est un concept propre au raisonnement humain (Jensen 2001) et permet de préciser dans quelles conditions une information peut être traitée localement, sans perturber l'ensemble du graphe. Si la d-séparation est une propriété purement graphique c'est-à-dire uniquement liée au graphe, son utilisation est liée à la sémantique de causalité qui est attachée à ce graphe. La structure d'un graphe causal doit donc toujours indiquer que lorsque deux nœuds sont d-séparés, une nouvelle information entrée pour un des nœuds n'influence pas la valeur de l'autre.

4.8 Description des algorithmes

L'inférence dans les réseaux bayésiens se développe sur deux dimensions à savoir le type de calcul d'inférence souhaité, appelé aussi requête, et la structure du réseau. La description des algorithmes utilisés pour l'inférence est faite ici en ne considérant que la requête la plus simple qui est la mise à jour de la probabilité associée à un nœud binaire suite à l'instanciation d'un autre nœud binaire.

Ce type de requête est étudié sur des réseaux relativement simples dont les calculs font appel essentiellement au théorème de Bayes, à la règle d'enchaînement et au concept de d-séparation.

Les algorithmes utilisés pour les réseaux plus complexes sont traités de façon qualitative. Ces algorithmes sont utilisés dans des logiciels commerciaux qui permettent de traiter des requêtes impliquant plusieurs nœuds discrets ou continus à la fois.

4.8.1 Réseaux en chaîne

Soit un réseau en chaîne où les connexions sont en série et où les variables sont binaires et peuvent prendre les valeurs *vrai* ou *faux*. Le réseau bayésien de la Figure 4.7 décrit le cas où le nœud X_i est situé en aval du nœud X_j mais n'est pas son descendant direct.

Ce type de réseau est appelé réseau sans boucle car il n'existe qu'un seul chemin entre deux nœuds.

Le calcul de prédiction, *P(effet | cause)* ou $P(X_i \mid X_j)$ sur la Figure 4.7, est basé sur la règle d'enchaînement et le théorème de Bayes et se réalise comme suit:

$$P(X_i \mid X_j) = \sum_{X_{i-1}} P(X_i \mid X_{i-1}) * P(X_{i-1} \mid X_j) \tag{4.24}$$

La sommation est effectuée en considérant tous les états possibles de X_{i-1} c'est-à-dire *vrai* ou *faux*.

Si le nœud X_{i-1} est le descendant direct de X_j, le calcul est terminé (voir l'exemple suivant à la Figure 4.8). Sinon, il suffit de décomposer $P(X_{i-1} \mid X_j)$ de la même façon jusqu'à arriver au descendant direct de X_j.

Par exemple, l'application de l'Équation 4.24 dans le réseau bayésien de la Figure 4.8 s'écrit:

$$P(C \mid A) = \sum_B P(C \mid B) * P(B \mid A)$$
$$= P(C \mid B) * P(B \mid A) + P(C \mid \neg B) * P(\neg B \mid A) \quad (4.25)$$

La valeur de $P(C \mid A)$ peut ainsi être calculée à partir des valeurs entrées dans les tables de probabilités du réseau bayésien de la Figure 4.8.

Dans le cas d'un calcul de diagnostic, $P(cause \mid effet)$ ou $P(X_j \mid X_i)$ dans la Figure 4.7, il faut d'abord utiliser la propagation avant à partir du début de la chaîne pour connaître la probabilité marginale de chaque nœud (Équation 4.12):

$$P(X_{j+1}) = \sum_{X_j} P(X_{j+1} \mid X_j) * P(X_j) \quad (4.26)$$

Cette opération est répétée pour chaque nœud de la chaîne jusqu'à ce que $j + 1 = i$.

Le calcul de $P(X_j \mid X_i)$ est ensuite réalisé à une deuxième étape à l'aide du théorème de Bayes (Équation 4.20):

$$P(X_j \mid X_{j+1}) = \frac{P(X_{j+1} \mid X_j) * P(X_j)}{P(X_{j+1})} \quad (4.27)$$

Si X_j est l'ascendant direct de X_i, le calcul est terminé. Sinon, il suffit de continuer de proche en proche.

Par exemple, le calcul de $P(A \mid C)$ dans le réseau de la Figure 4.8 requiert la détermination des probabilités marginales à l'aide de l'Équation 4.26:

$$P(B) = P(B \mid A) * P(A) + P(B \mid \neg A) * P(\neg A) \tag{4.28}$$

$$P(C) = P(C \mid B) * P(B) + P(C \mid \neg B) * P(\neg B) \tag{4.29}$$

La variable A est sans parents et $P(A)$ est spécifiée dans le réseau. L'application du théorème de Bayes (Équation 4.16) donne:

$$P(A \mid C) = \frac{P(C \mid A) * P(A)}{P(C)} \tag{4.30}$$

où

$$P(C \mid A) = \sum_B P(C \mid B) * P(B \mid A)$$

$$= P(C \mid B) * P(B \mid A) + P(C \mid \neg B) * P(\neg B \mid A) \tag{4.31}$$

qui est l'application de l'Équation 4.24 utilisée précédemment pour les calculs de prédiction.

4.8.2 Réseaux en arbre

Un réseau bayésien en arbre comprend des connexions divergentes et en série. Un réseau en arbre se traite de la même façon qu'un réseau en chaîne en considérant qu'un nœud

situé à un point de jonction peut être doublé pour obtenir deux chaînes (voir Figure 4.9). Les réseaux en arbre sont des réseaux sans boucle car il n'existe qu'un seul chemin entre deux noeuds.

Les calculs de prédiction, tels $P(B \mid A)$, et de diagnostic, tels $P(A \mid B)$, se font en utilisant les équations présentées à la Section 4.8.1.

Il est intéressant de noter que les arbres d'événements peuvent être considérés comme des réseaux bayésiens en arbre. La Figure 4.10 montre un arbre d'événements dans lequel un cas de chargement A peut provoquer une rupture selon deux mécanismes différents représentés par les séquences d'événements A-B-C-D et A-$\neg B$-E-F.

La rupture selon un mécanisme donné ne peut survenir que si tous les événements d'une séquence se réalisent, On a donc:

$$P(\text{rupture 1}) = P(A, B, C, D) \tag{4.32}$$

et

$$P(\text{rupture 2}) = P(A, \neg B, E, F) \tag{4.33}$$

Le calcul des probabilités de rupture dans l'arbre d'événements se fait en multipliant les probabilités évaluées pour chaque événement des deux séquences. Ces probabilités ne sont cependant pas marginales, chacune est conditionnelle à la réalisation de l'événement en amont. La probabilité de rupture selon chacun des deux mécanismes illustrés est alors égale à:

$$P(\text{rupture 1}) = P(A) * P(B \mid A) * P(C \mid B) * P(D \mid C) \tag{4.34}$$

$$P(rupture\ 2) = P(A) * P(B \mid A) * P(E \mid \neg B) * P(F \mid E) \quad (4.35)$$

L'arbre d'événements de la Figure 4.10 peut être représenté par le réseau bayésien de la Figure 4.11.

L'évaluation des probabilités de rupture peut donc se faire en utilisant la règle d'enchaînement (Équation 4.18):

$$P(rupture\ 1) = P(D \mid C) * P(C \mid B) * P(B \mid A) * P(A) \quad (4.36)$$

et

$$P(rupture\ 2) = P(F \mid E) * P(E \mid \neg B) * P(\neg B \mid A) * P(A) \quad (4.37)$$

Ce calcul est semblable à celui effectué dans l'arbre d'événements de la Figure 4.10.

4.8.3 Réseaux en polyarbre

On appelle polyarbre un réseau bayésien dans lequel un nœud peut avoir plusieurs parents. Les réseaux en polyarbre comprennent des connexions divergentes, convergentes et en série. Ce type de réseau est sans boucle car il n'existe qu'un seul chemin entre deux nœuds. La Figure 4.12 montre un exemple de polyarbre.

La propagation de l'information dans un polyarbre est plus complexe que pour un réseau en chaîne ou en arbre car l'information peut circuler d'un parent à l'autre. Cependant, le cas des polyarbres peut se traiter de la même façon c'est-à-dire par propagation locale de proche en proche en faisant appel au théorème de Bayes, à la règle d'enchaînement et au concept de d-séparation.

L'exemple suivant présente les calculs requis pour la résolution d'un problème de diagnostic. Un polyarbre est montré à la Figure 4.12. Les nœuds sont binaires et peuvent prendre les valeurs *vrai* ou *faux* où, par exemple, $P(A)$ correspond à $P(A = vrai)$ et $P(\neg A)$ correspond à $P(A = faux)$.

Le problème est de calculer l'effet sur B de la connaissance de E ou, en notation probabiliste, $P(B \mid E)$. Le calcul doit être développé de façon à ce que les probabilités requises pour l'évaluation puissent être lues directement dans les tables de probabilités du réseau de la Figure 4.12.

Les valeurs à évaluer pour déterminer la loi de probabilités sous-jacente au modèle causal indiquent la possibilité qu'un nœud soit dans un état donné en tenant compte de toutes les combinaisons d'états de ses parents (voir Section 3.2). Le Tableau 4.1 montre les probabilités spécifiées pour le réseau bayésien de la Figure 4.12.

L'application du théorème de Bayes (Équation 4.20) donne:

$$P(B \mid E) = \frac{P(E \mid B) * P(B)}{P(E)} \tag{4.38}$$

$P(B)$ est déjà spécifiée dans le réseau car elle est une probabilité a priori. $P(E)$ est déterminée par marginalisation (Équation 4.13):

$$P(E) = P(E \mid C) * P(C) + P(E \mid \neg C) * P(\neg C) \tag{4.39}$$

Les valeurs de $P(E \mid C)$ et $P(E \mid \neg C)$ ont été spécifiées dans le réseau. $P(C)$ doit être déterminée par marginalisation (Équation 4.12) en considérant toutes les combinaisons de valeurs possibles des parents de C:

$$P(C) = P(C \mid A,B) * P(A,B) + P(C \mid \neg A,B) * P(\neg A,B) + P(C \mid A,\neg B) * P(A,\neg B) + P(C \mid \neg A,\neg B) * P(\neg A,\neg B) \quad (4.40)$$

Dans cette dernière expression, les probabilités conditionnelles ont été spécifiées dans le réseau.

L'examen de la structure du réseau montre que les nœuds A et B sont d-séparés car C est inconnu. Ceci implique que les probabilités $P(A)$ et $P(B)$ sont indépendantes, on a alors (Équations 4.4 et 4.8):

$$P(A,B) = P(A) * P(B) \quad (4.41)$$

$$P(\neg A,B) = (1 - P(A)) * P(B) \quad (4.42)$$

$$P(A,\neg B) = P(A) * (1 - P(B)) \quad (4.43)$$

$$P(\neg A,\neg B) = (1-P(A)) * (1-P(B)) \quad (4.44)$$

$$P(\neg C) = 1 - P(C) \quad (4.45)$$

Les résultats obtenus des Équations 4.41 à 4.44 complètent l'Équation 4.40. Les résultats provenant de cette dernière et de l'Équation 4.45 complètent l'Équation 4.39.

Le dernier terme à évaluer dans l'Équation 4.38 est $P(E \mid B)$ qui est déterminé à partir de l'Équation 4.24 utilisée pour les calculs de prédiction dans les réseaux en chaîne. Il faut alors tenir compte des valeurs possibles de C, le parent de E, et de la condition $B = vrai$ spécifiée implicitement dans $P(B \mid E)$, la requête initiale.

L'application de l'Équation 4.24 donne:

$$P(E \mid B) = P(E \mid C) * P(C \mid B) + P(E \mid \neg C) * P(\neg C \mid B) \quad (4.46)$$

Les valeurs de $P(E \mid C)$ et de $P(E \mid \neg C)$ ont été spécifiées dans le réseau. Les autres probabilités sont calculées par marginalisation (Équation 4.12):

$$P(C \mid B) = P(C \mid A,B) * P(A) + P(C \mid \neg A,B) * P(\neg A) \tag{4.47}$$

et (Équation 4.4):

$$P(\neg C \mid B) = 1 - P(C \mid B) \tag{4.48}$$

Les probabilités requises pour les Équations 4.47 et 4.48 ont été spécifiées dans le réseau. Les résultats obtenus aux Équations 4.47 et 4.48 complètent l'Équation 4.46 qui elle, complète l'Équation 4.38 et termine le problème.

Le développement présenté a permis de déterminer $P(B \mid E)$ à partir des probabilités spécifiées dans la table de probabilités (Tableau 4.1) du réseau bayésien de la Figure 4.12.

Le nombre d'opérations requises pour l'inférence varie linéairement avec le nombre de nœuds dans le réseau et le nombre d'états pour chaque nœud. L'inférence dans les réseaux bayésiens en polyarbre comprenant plusieurs dizaines de nœuds et d'états avec la méthode de propagation vue dans cet exemple est toujours possible mais seulement au prix de calculs laborieux. Des méthodes généralisées, valables pour tous les types de réseaux, ont été mises au point et permettent la résolution efficace des problèmes d'inférence dans les réseaux de grande taille.

4.8.4 Réseaux avec boucle

Un réseau avec boucle comporte des nœuds pouvant avoir plusieurs parents et/ou descendants. Dans ce type de réseau, il peut donc exister plus d'un chemin entre deux nœuds. La Figure 4.13 est un exemple de réseau avec boucle.

Dans ce type de réseau bayésien, les algorithmes et méthodes de calcul utilisés pour les réseaux sans boucle ne fonctionnent pas car l'information peut emprunter différents chemins indépendants pouvant relier une cause à un effet. La propagation locale des probabilités le long de ces différents chemins produit des résultats souvent contradictoires qui ne peuvent se combiner directement (Jensen 2001).

De plus, l'inférence dans un réseau avec boucle est un problème NP-complet pour lequel une solution exacte ne peut être trouvée de façon directe car le nombre d'opérations requises pour l'exécution des calculs varie de façon exponentielle avec le nombre de nœuds (Charniak 1991, Becker et Nadim 1999). D'autres algorithmes ont été développés pour traiter ce problème de façon efficace.

Les principales approches développées pour les problèmes d'inférence relatifs à tous les types de réseaux bayésiens sont les méthodes par conditionnement et les méthodes par regroupement. Les premières ont été développées à la fin des années 80 (Pearl 1988) et ont été optimisées par la suite pour en améliorer les performances (Becker et Geiger 1996).

Cependant, les méthodes par regroupement sont aujourd'hui les plus répandues en partie grâce aux outils informatiques qui sont disponibles pour mettre en œuvre la technique dite de l'arbre de jonction. Cette dernière est considérée aujourd'hui comme le meilleur algorithme connu en terme de performance (Jensen 2001).

L'idée à la base des méthodes par regroupement est simplement d'essayer de se ramener à un réseau sans boucle en créant des nœuds plus complexes qui représentent plusieurs nœuds du graphe original (Becker et Nadim 1999). La technique de l'arbre de jonction consiste à regrouper les nœuds en associant un nœud de l'arbre original avec ses parents. On forme ainsi un arbre reliant des variables plus complexes que les variables initiales.

Les étapes d'application de la technique de l'arbre de jonction sont représentées à la Figure 4.14.

La première étape consiste à construire un arbre de jonction à partir du réseau initial lequel subit des transformations vérifiant plusieurs propriétés mathématiques supplémentaires nécessaires aux calculs. La deuxième étape consiste à effectuer les calculs dans l'arbre de jonction à l'aide des méthodes de propagation utilisées pour les réseaux sans boucle. L'inférence dans le réseau original est ensuite réalisée lors de la troisième étape en tenant compte des calculs réalisés dans le réseau transformé.

Le concept des réseaux bayésiens est utilisé dans cette recherche à titre d'outil permettant de réduire le risque barrage. La description détaillée des algorithmes déborde le cadre de cette thèse. Le lecteur souhaitant obtenir plus de précisions concernant les algorithmes peut consulter Becker et Nadim (1999), Jensen (2001) de même que Lauritzen et Spiegelhalter (1988).

4.8.5 Logiciel de calcul

L'utilisation d'un logiciel de calcul est indispensable pour réaliser les calculs d'inférence dans les réseaux bayésiens. Le logiciel utilisé dans le cadre de cette étude est le programme HUGIN EDUCATIONAL version 6.4 (2004) conçu par la firme danoise

HUGIN EXPERT. Ce logiciel comprend une interface graphique qui permet la construction de réseaux bayésiens et un module pour la spécification des probabilités.

Les calculs d'inférence sont réalisés directement à l'écran. L'exemple de la Figure 4.15 est relié au réseau bayésien de la Figure 3.8. Le résultat mis en évidence montre l'influence de l'observation de venues d'eau et de glissements sur la possibilité d'avoir de plus fortes précipitations ou, en termes probabilistes:

$P(\text{précipitations} \geq 10 \text{ mm/jour} \mid \text{venues d'eau} = \text{oui}, \text{glissements} = \text{oui})$.

L'algorithme utilisé dans le programme est basé sur la technique des arbres de jonction et a été mis au point par deux chercheurs du département de mathématiques de l'Université de Aalborg au Danemark (Lauritzen et Spiegelhalter 1988) et fondateurs de la firme HUGIN EXPERT.

4.9 Résumé

Les méthodes de calcul utilisées pour l'inférence dans un réseau bayésien ont été vues. Ces dernières sont fondées sur la règle d'enchaînement qui définit la distribution de probabilités jointes comme le produit des distributions conditionnelles locales, sur le théorème de Bayes qui peut être considéré comme l'expression mathématique de l'apprentissage par l'expérience, et enfin sur le concept de d-séparation qui révèle les indépendances conditionnelles entre les variables d'un réseau bayésien.

Des exemples de calculs d'inférence sur des réseaux bayésiens simples formés de variables binaires ont été présentés. Les calculs requis pour des réseaux plus complexes nécessitent cependant l'utilisation d'algorithmes plus sophistiqués et de logiciels de calcul basés entre autres sur la technique de l'arbre de jonction.

Les calculs réalisés dans cette recherche sont faits directement à l'écran à l'aide du logiciel HUGIN EDUCATIONAL version 6.4 (2004). Ces calculs utilisent les valeurs numériques incluses dans les tables de probabilités des réseaux bayésiens. Les différents aspects reliés à la détermination des valeurs composant ces tables sont discutés au chapitre suivant.

Tableau 4.1: Probabilités spécifiées pour le réseau bayésien de la Figure 4.12

$P(A)$	$P(\neg A)$		
$P(B)$	$P(\neg B)$		
$P(C \mid A, B)$	$P(C \mid \neg A, B)$	$P(C \mid A, \neg B)$	$P(C \mid \neg A, \neg B)$
$P(\neg C \mid A, B)$	$P(\neg C \mid \neg A, B)$	$P(\neg C \mid A, \neg B)$	$P(\neg C \mid \neg A, \neg B)$
$P(D \mid B)$	$P(D \mid \neg B)$	$P(\neg D \mid B)$	$P(\neg D \mid \neg B)$
$P(E \mid C)$	$P(E \mid \neg C)$	$P(\neg E \mid C)$	$P(\neg E \mid \neg C)$

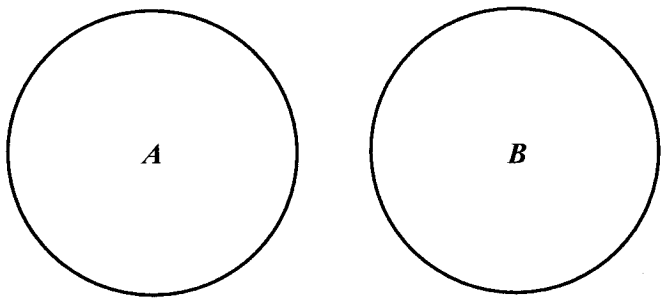


Figure 4.1: Diagramme de Venn, événements mutuellement exclusifs

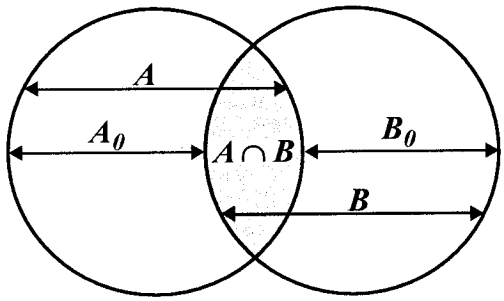


Figure 4.2: Diagramme de Venn, événements non mutuellement exclusifs

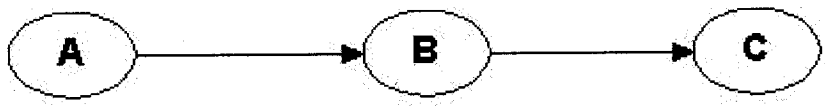


Figure 4.3: Réseau bayésien pour exemple de calcul selon la règle d'enchaînement



Figure 4.4: Connexions en série et d-séparation

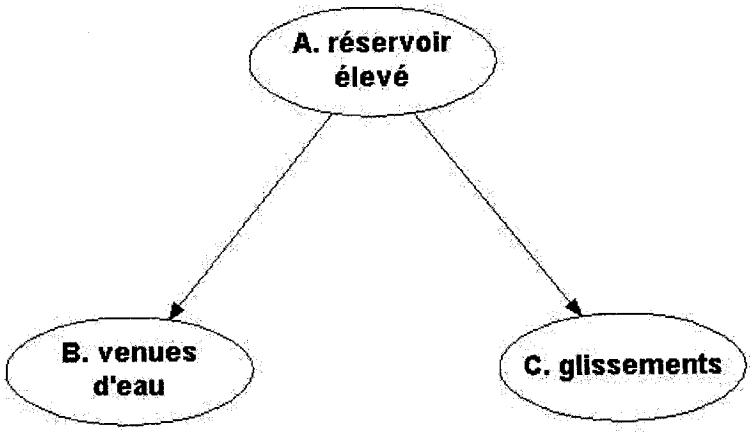


Figure 4.5: Connexions divergentes et d-séparation

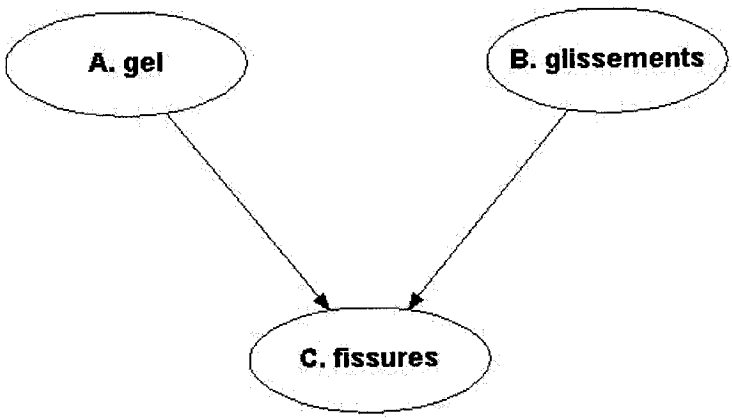


Figure 4.6: Connexions convergentes et d-séparation



Figure 4.7: Réseau bayésien en chaîne, représentation générale

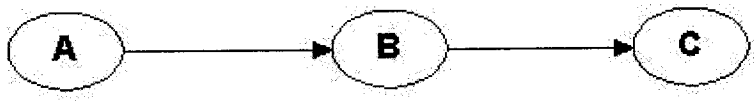


Figure 4.8: Réseau bayésien en chaîne, exemple de calcul

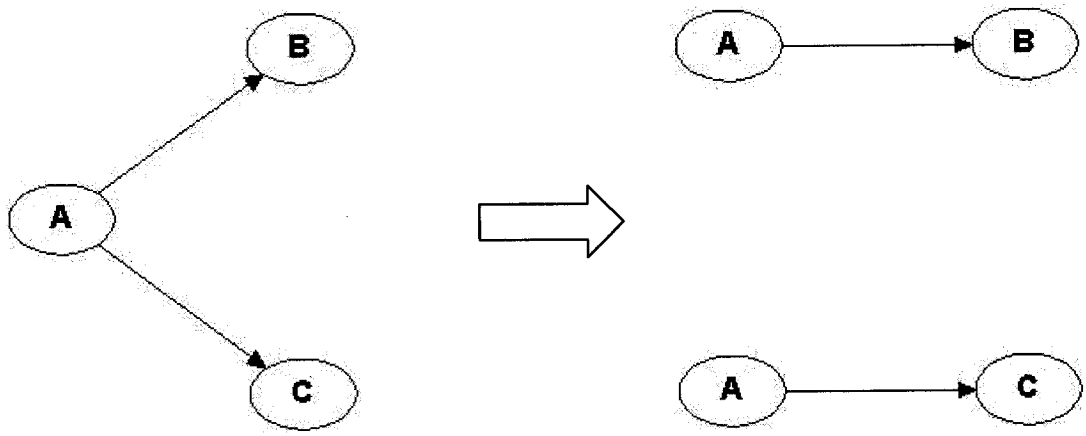


Figure 4.9: Réseau bayésien en arbre

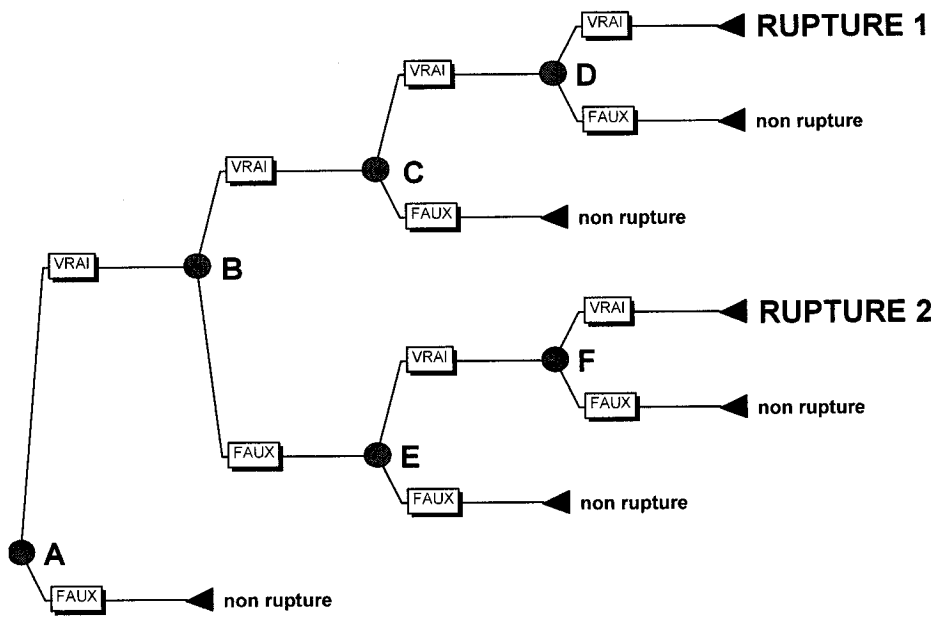


Figure 4.10: Arbre d'événements

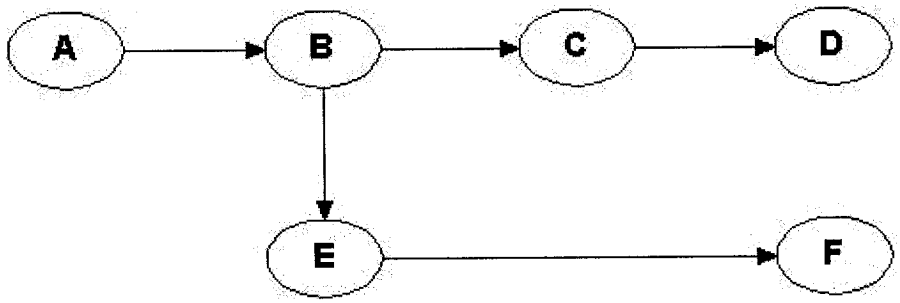


Figure 4.11: Utilisation d'un réseau bayésien pour la modélisation d'un arbre d'événements

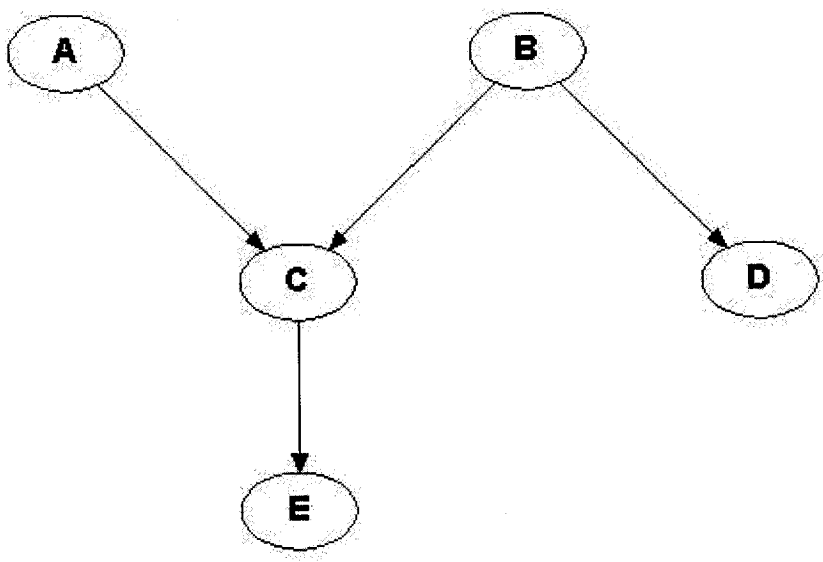


Figure 4.12: Réseau bayésien en polyarbre

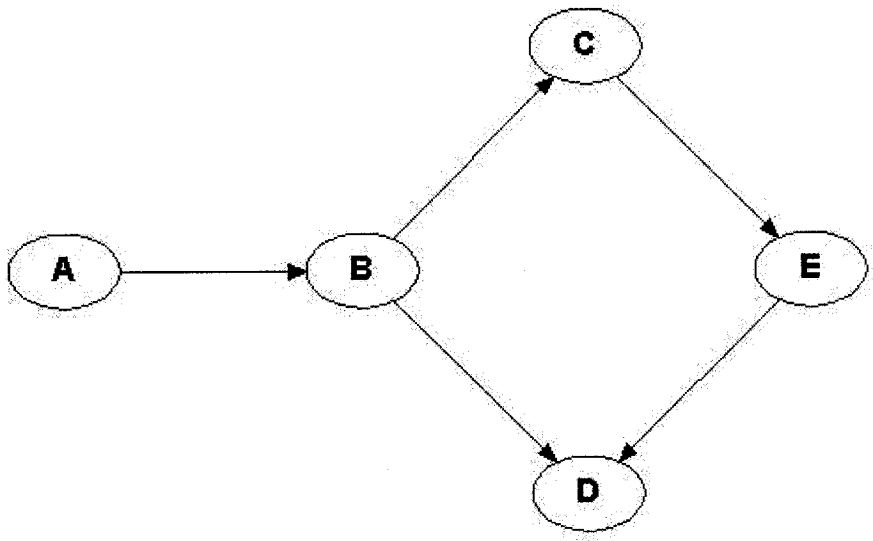


Figure 4.13: Réseau bayésien avec boucle

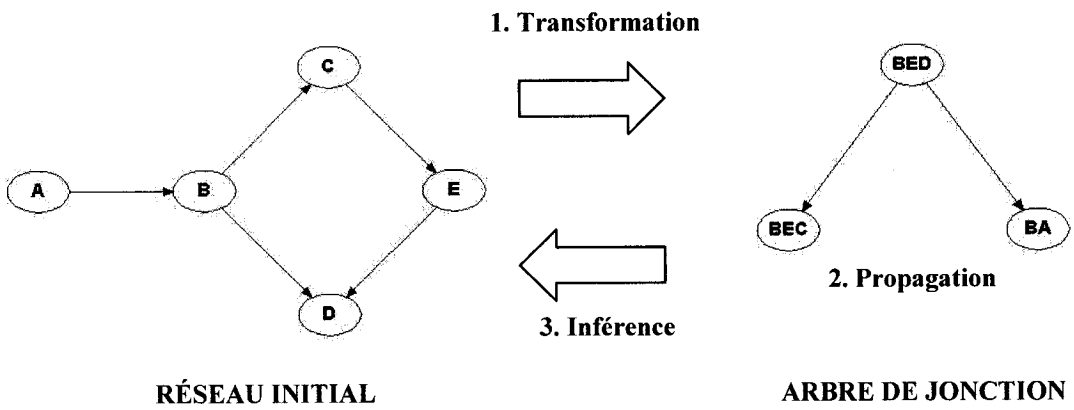
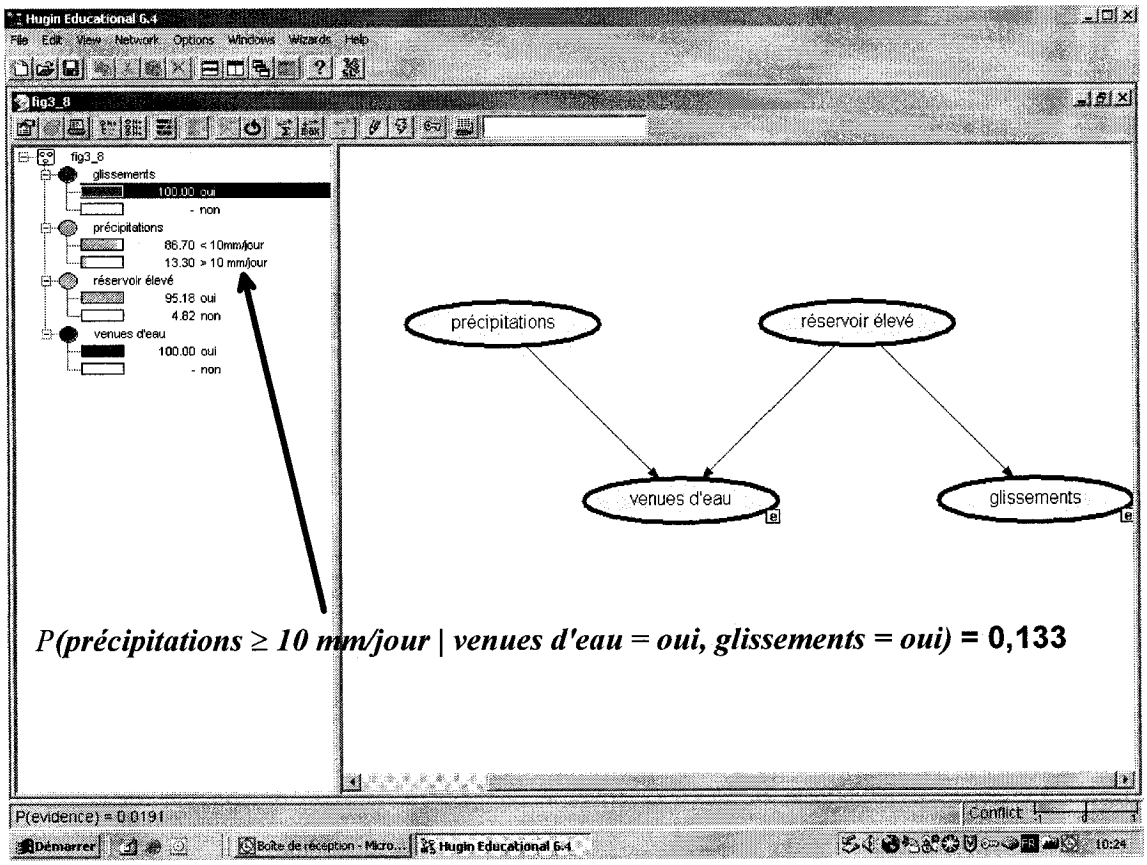


Figure 4.14: Illustration de la technique de l'arbre de jonction



$P(\textit{précipitations} \geq \textit{10 mm/jour} \mid \textit{venues d'eau} = \textit{oui}, \textit{glissements} = \textit{oui}) = \mathbf{0,133}$

Figure 4.15: Exemple d'écran du logiciel de calcul HUGIN

CHAPITRE 5

DÉTERMINATION DES PROBABILITÉS

5.1 Introduction

L'utilisation des réseaux bayésiens permet à l'expert de formaliser ses connaissances incertaines sous forme de graphe dont les nœuds caractérisent les variables d'un système et dont les arcs définissent l'existence de relations entre ces variables. Il est possible de modéliser des dépendances statistiques et/ou causales même si elles ne sont pas absolues. Elles sont alors associées à une probabilité indiquant le degré de croyance de l'expert par rapport à l'événement.

La détermination des probabilités associées à un réseau bayésien est réalisée par l'utilisation de méthodes d'élicitation basées sur des approches mathématiques et psychologiques. Elles ont pour but de quantifier le jugement de l'expert de manière structurée en minimisant l'influence des différentes formes de biais qui affectent souvent les évaluations.

Les points à considérer pour l'établissement d'une méthode d'élicitation des probabilités pouvant servir de base à la phase quantitative de la construction d'un réseau bayésien modélisant un problème de sécurité des barrages sont discutés dans ce chapitre. Cette discussion est cependant précédée par une description des types d'incertitudes et d'un exemple de leur influence sur l'évaluation du risque de rupture.

5.2 Description des types d'incertitudes

Les incertitudes sont présentes dans la plupart des problèmes de génie civil et plus spécifiquement dans le domaine de la sécurité des barrages. Le mot "incertitude" y est utilisé et interprété de plusieurs façons selon les personnes et le type d'application. Dans la plupart des cas, il englobe les concepts d'ambiguïté et de variabilité et est utilisé pour décrire l'état de ce qui ne peut être établi avec exactitude, qui laisse place au doute.

Certains auteurs (Denis 1998) distinguent deux niveaux d'incertitude. Le premier niveau est celui où un individu perçoit qu'il ne peut résoudre un problème à cause d'une trop grande complexité ou d'un manque d'information. Le deuxième niveau est celui où plusieurs individus perçoivent différemment une même situation et proposent des solutions contradictoires.

Les incertitudes présentes dans les problèmes de génie civil proviennent généralement de quatre sources : la variabilité inhérente à certains processus naturels (incertitude aléatoire), la connaissance incomplète (incertitude épistémique), l'incertitude décisionnelle et l'incertitude humaine (Smith, Marche et Robert 2004).

La Figure 5.1 est adaptée d'une étude récente (National Research Council 2000) et représente les quatre types d'incertitude avec leurs composantes principales.

L'incertitude aléatoire traite de la variabilité dans l'espace ou le temps d'un paramètre physique mesurable. Cette variabilité étant inhérente au processus, elle ne peut être complètement éliminée par l'acquisition de données supplémentaires.

L'incertitude épistémique est reliée au manque de connaissances en rapport à un processus ou à une quantité insuffisante de données permettant de déduire certaines conclusions. Cette incertitude peut être réduite ou quelquefois éliminée par des modèles

représentant mieux la réalité, des mesures supplémentaires ou de meilleures méthodes d'échantillonnage et d'analyse pour la quantification des paramètres utilisés dans les modèles.

L'incertitude décisionnelle est reliée aux critères qui sont à la base du processus de décision. Elle comprend surtout des concepts difficilement quantifiables tels que les valeurs personnelles, les imprécisions linguistiques et les avis contradictoires. Cette incertitude ne peut être réduite par des mesures supplémentaires mais plutôt par une définition claire et une meilleure compréhension des enjeux et des critères qui sous-tendent les décisions.

L'incertitude humaine est reliée aux actions de l'humain sur un système. Elle inclut les concepts de négligence et d'erreur humaine. Elle comprend aussi d'autres aléas tels l'influence de la météo sur le déroulement des travaux de construction sur le terrain et donc sur le comportement futur d'une structure. Des problèmes organisationnels tels une mauvaise communication entre le concepteur, le constructeur et le propriétaire d'un ouvrage sont aussi une source potentielle d'incertitude humaine qui est souvent rencontrée en pratique.

L'incertitude humaine influence directement ou à un second degré tous les aspects d'un problème, de sa définition jusqu'au choix d'une solution car le risque est toujours porté et géré par l'humain. Même si l'élément déclencheur d'une rupture est une défaillance technique, l'origine de cette dernière provient souvent d'une action (ou inaction) humaine.

L'analyse des incertitudes requiert leur quantification afin de juger de leur importance relative dans un problème et de vérifier l'effet des mesures de réduction. Le concept des probabilités est le plus souvent utilisé pour quantifier certains types d'incertitudes tels la variabilité.

Cependant, les incertitudes ne peuvent pas toutes être quantifiées. Par exemple, les probabilités sont peu applicables aux incertitudes décisionnelles ou pour juger de la validité d'un modèle. Elles sont donc d'une aide limitée pour déterminer si les modèles ou les critères de décision utilisés sont bons ou sont les meilleurs (Morgan, Henrion et Small 1990). Ce choix ne peut être quantifié et doit être réalisé à l'aide du jugement.

5.3 Exemple de l'influence de l'incertitude sur l'évaluation du risque de rupture

La prise en compte des incertitudes permet d'ajouter une nouvelle dimension à l'interprétation des résultats et au choix de solutions de confortement. L'exemple suivant, basé sur la pratique conventionnelle, montre l'impact de l'incertitude sur les conclusions tirées de l'analyse de la stabilité de deux pentes naturelles.

Souvent, pour juger de la stabilité d'une pente, un coefficient de sécurité est calculé et comparé à une valeur minimale prescrite. Une pente est considérée stable si le coefficient de sécurité, qui est le rapport des forces stabilisantes sur les forces déstabilisantes, dépasse l'unité. La marge de sécurité est acceptable si le coefficient obtenu est égal ou supérieur à la valeur minimale prescrite.

Ces calculs sont couramment faits sans tenir compte des incertitudes. Par la réglementation et la tradition, une même valeur minimale de coefficient de sécurité est souvent prescrite pour des situations impliquant des niveaux d'incertitude très variés (Duncan 2000).

Le concept de coefficient de sécurité utilisé seul n'est pas un indicateur suffisant de la marge de sécurité car les incertitudes ont aussi une influence déterminante sur la probabilité de rupture et donc le risque. Par exemple, une pente ayant un coefficient de

sécurité plus grand peut présenter un risque de rupture plus élevé qu'une pente similaire ayant un coefficient de sécurité plus faible selon les incertitudes présentes dans les deux cas (Christian, Ladd et Baecher 1994).

L'incertitude peut être considérée dans les calculs de coefficient de sécurité par l'utilisation de méthodes probabilistes telles les simulations de Monte Carlo qui traitent les paramètres non pas comme des valeurs fixes mais comme des variables aléatoires dont l'incertitude est décrite à l'aide de distributions de probabilités. Certaines de ces distributions peuvent être caractérisées par la valeur moyenne et par l'écart type qui est un indice de l'étalement de la distribution de probabilités donc de l'incertitude.

À titre d'exemple, l'évaluation de la stabilité d'une pente naturelle (pente 1) a été faite en utilisant un modèle simple et en estimant les valeurs des paramètres significatifs seulement à partir de données publiées (Smith 2002). Les incertitudes épistémiques reliées à ce problème sont donc importantes. Les résultats sont présentés à la Figure 5.2.

La valeur moyenne du coefficient de sécurité est de 1,5 et l'effet de l'incertitude est illustré par l'étalement de la distribution de probabilité autour de la valeur moyenne. La probabilité de rupture est représentée par la surface sous la courbe où le coefficient de sécurité est inférieur à 1 et est égale dans ce cas à 1,4 % ou 0,014.

Une évaluation a aussi été faite pour une autre pente naturelle (pente 2) en utilisant le même modèle mais cette fois en estimant les paramètres à partir des mesures et observations plus détaillées disponibles pour le site. Les incertitudes épistémiques reliées à la deuxième évaluation sont donc moins importantes.

La valeur moyenne du coefficient de sécurité est maintenant de 1,4 mais la probabilité de rupture n'est plus que de 0,3 % ou 0,003. Les incertitudes étant moins importantes, la

variabilité des résultats calculés est plus faible et la distribution de probabilités obtenue est de ce fait moins étalée.

Les calculs montrent qu'a priori la pente 1 devrait être plus stable car le coefficient de sécurité de 1,5 qui a été obtenu est le plus élevé. Cette valeur étant égale à la valeur minimale souvent prescrite en pratique, la pente 1 pourrait donc être jugée stable à long terme. De plus, des travaux de réhabilitation pourraient être envisagés en premier à la pente 2 car le coefficient de sécurité obtenu est inférieur à la valeur prescrite.

Cependant, les incertitudes doivent être considérées dans l'interprétation des résultats car la qualité et la représentativité des données utilisées sont différentes pour les deux pentes. Les importantes incertitudes épistémiques associées à la pente 1 font en sorte qu'en dépit d'un coefficient de sécurité supérieur à celui de la pente 2, la probabilité de rupture y est plus élevée. La prise en compte de l'incertitude et du coefficient de sécurité montre que les travaux devraient plutôt être envisagés en premier à la pente 1.

Dans cet exemple, le coefficient de sécurité a peu de signification physique s'il n'est pas assorti d'une évaluation de l'influence des incertitudes. Leur prise en compte ajoute une nouvelle dimension au diagnostic de sécurité. Si le risque de rupture n'est pas accepté, l'ingénieur se trouve maintenant avec l'option d'augmenter le coefficient de sécurité par des mesures de confortement ou de tenter de réduire l'incertitude par l'ajout d'instruments ou la réalisation d'essais supplémentaires.

5.4 Méthode d'élicitation des probabilités

5.4.1 Importance du jugement d'expert et d'un processus d'élicitation structuré

La prise en compte des incertitudes dans les réseaux bayésiens est réalisée à l'aide du concept des probabilités. Dans le cadre d'un problème d'analyse du risque barrage, l'évaluation de ces probabilités peut être réalisée à l'aide de techniques statistiques lorsque les données sont assez nombreuses. L'utilisation de modèles probabilistes, entre autres pour les analyses de stabilité (voir Section 5.3), permet aussi de déterminer analytiquement pour certains cas particuliers les valeurs de probabilités. Cependant, le recours au jugement d'un expert (ou le plus souvent d'un groupe d'experts) demeure toujours essentiel.

L'importance relative du jugement dans les évaluations est inversement proportionnel à la disponibilité des données et des modèles: lorsqu'ils sont en quantité et en qualité suffisantes, les évaluations sont basées en grande partie sur des résultats obtenus analytiquement. Le jugement d'expert est toutefois toujours requis afin de synthétiser, de valider et de mettre en contexte les résultats. À l'opposé, le jugement d'expert représente la seule source d'information disponible pour les évaluations lorsque les données et les modèles sont inexistants. Le jugement est alors exclusivement basé sur les connaissances et l'expérience des experts.

La quantification du jugement des experts est réalisée à l'aide d'un processus d'élicitation. Cette activité consiste à extraire et à traduire les connaissances de l'expert en termes probabilistes. Les valeurs ainsi évaluées servent à constituer la loi de probabilités sous-jacente au modèle de causalité (voir Figure 3.1).

Cependant, les experts utilisent en général un nombre restreint de règles appelées heuristiques qui réduisent la tâche complexe d'évaluation des probabilités en une tâche simple facilitant la quantification du jugement mais qui introduit souvent des biais dans les évaluations (Tversky et Kahneman 1974). De plus, ces biais sont plus importants lorsque les problèmes sont complexes (Wallsten et Budescu 1983). Cette façon de procéder est une caractéristique du raisonnement humain qui entre en jeu dans tous les types d'évaluation, elle n'est pas spécifique aux analyses de risque.

Des recherches en psychologie expérimentale ont montré que demander de façon informelle à un groupe de personnes des valeurs de probabilités donnait dans presque tous les cas des évaluations biaisées (Kahneman, Slovic et Tversky 1982). Il est essentiel d'utiliser un processus structuré pour minimiser l'influence des différentes formes de biais dans les évaluations. Ce processus est décrit après une discussion des différents types d'heuristiques et de biais.

L'étude des phénomènes cognitifs et psychologiques reliés au jugement est un sujet faisant l'objet de nombreuses recherches dont la teneur dépasse le cadre de cette thèse. Les sections suivantes présentent un résumé des principaux éléments de ce domaine de connaissances qui ont été adaptés au contexte de l'analyse du risque barrage.

5.4.2 Heuristiques et biais

Dans le cadre d'un processus de quantification du jugement, le biais est la différence entre la réponse d'un sujet et ce qui devrait refléter ses connaissances réelles. Les biais peuvent être motivationnels ou cognitifs (Spetzler et Staël Von Holstein 1975) et peuvent influencer l'expert de façon consciente ou inconsciente.

Le biais motivationnel est un ajustement des convictions de l'expert pour satisfaire des objectifs personnels et influencer les conclusions de l'analyse en sa faveur. Par exemple, le concepteur d'un ouvrage peut sous-évaluer les risques qui y sont reliés afin de préserver sa réputation.

Ce type de biais dépend de facteurs externes tels l'environnement dans lequel l'expert évolue et le contexte de l'analyse. L'utilisation d'un groupe d'experts ayant un rôle différent face à la sécurité du barrage (par exemple le concepteur, l'exploitant et un expert externe) permet une certaine forme d'arbitrage qui réduit le biais motivationnel. Aussi, une définition précise de l'apport de l'analyse de risque au processus de décision et la façon dont seront utilisées par le décideur les évaluations d'experts contribue à diminuer le biais motivationnel (Wallsten et Budescu 1983).

Le biais cognitif est un ajustement systématique des convictions de l'expert par l'utilisation de règles simplificatrices ou heuristiques qui facilitent l'évaluation de phénomènes complexes. Ce type de biais dépend surtout des facteurs internes qui régissent le traitement de l'information par l'expert. Il peut être réduit ou même éliminé en informant l'expert de leur existence et ceci dans toutes les étapes du processus d'élicitation (Renooij 2001). Ce rôle peut être joué par chacun des membres du groupe d'experts lors des discussions et/ou par un facilitateur qui anime et dirige les discussions.

Parmi les biais cognitifs les plus courants il existe celui de la disponibilité et de l'ajustement (Tversky et Kahneman 1974, Spetzler et Staël Von Holstein 1975, Roberds 1991, Parkin 2000, Renooij 2001).

Le biais par disponibilité se produit lorsque l'expert ne considère dans ses évaluations que les informations les plus récentes ou celles l'ayant le plus marqué. Par exemple, le risque de submersion d'un barrage a de fortes chances d'être surévalué par un expert ayant été touché récemment par ce type de catastrophe.

Le biais par ajustement se produit lorsque, en se basant sur les premiers éléments d'information considérés, l'expert choisit une certaine valeur comme évaluation initiale et que cette dernière est insuffisamment ajustée en fonction de l'ajout d'éléments d'information additionnels. Par exemple, une probabilité de rupture de barrage peut être évaluée en ne considérant que les statistiques historiques sans faire d'ajustements suffisants permettant de tenir compte de certains facteurs propres à l'ouvrage.

5.4.3 Processus d'évaluation des probabilités

La construction du modèle causal et l'évaluation des probabilités sont réalisés par l'application d'une méthode d'élicitation qui peut être divisée en 5 étapes (Spetzler et Staël Von Holstein 1975, Renooij 2001, Vick 2002):

a) Sélection des experts
b) Entraînement des experts
c) Structuration du problème
d) Élicitation et documentation des jugements d'experts
e) Vérification des résultats

L'utilisation d'un processus formel pour la construction d'un réseau bayésien diminue l'influence des biais et documente les jugements ayant servi aux évaluations. Cette approche favorise la transparence et permet à des tiers, en incluant le décideur, d'évaluer et de critiquer la démarche adoptée et les résultats obtenus.

a) Sélection des experts

L'élicitation devrait être réalisée dans le cadre d'ateliers dirigés par un facilitateur et regroupant un certain nombre d'experts. Ce cadre de travail facilite les échanges, la créativité et réduit les biais motivationnels.

Le terme "expert" s'applique à une personne qui a une expertise substantive appuyée par son éducation, son expérience et ses connaissances et qui a aussi une expertise normative permettant de structurer et transmettre ses connaissances de façon cohérente (Wallsten et Budescu 1983).

L'utilisation de plusieurs personnes ayant des expertises similaires produit le plus souvent une information redondante (Clemen et Winkler 1999), une plus grande variété d'expertises dans le groupe est désirable. De plus, il est préférable de regrouper plusieurs "bons" experts que de ne recourir qu'au "meilleur" expert (Bier, Haimes, Lambert, Matalas et Zimmerman 1999). Différentes études montrent que le nombre idéal d'experts dans un atelier de groupe pour l'élicitation est de trois à cinq sans compter le facilitateur (Clemen et Winkler 1999).

b) Entraînement des experts

L'entraînement des experts est surtout du ressort du facilitateur. Ce dernier explique en premier lieu le contexte de l'analyse et la façon dont seront utilisés les résultats par le décideur. Les experts doivent devenir familiers avec les concepts probabilistes et les réseaux bayésiens. Ils doivent aussi apprendre à exprimer leurs connaissances sous forme de relation causales et de probabilités.

Une partie de l'entraînement comprend des exercices d'évaluation de probabilités vérifiables à l'aide de données historiques (Renooij 2001). Ces évaluations sont complétées par une description des biais pouvant influencer les évaluations. L'identification et le contrôle des biais potentiels sont réalisés à chacune des étapes du processus d'élicitation.

c) Structuration du problème

La structuration du problème consiste tout d'abord à identifier les mécanismes de rupture potentiels à étudier et leurs interrelations. Chacun de ces mécanismes est ensuite décomposé et décrit selon le degré de détail requis par le contexte de l'analyse. La définition des états et des liens causaux en rapport aux variables identifiées permet la construction d'une première version du modèle causal.

Chacune des probabilités à évaluer doit faire l'objet d'une description exprimée sous forme littérale. La Figure 5.3 présente un exemple de description littérale de probabilité associée à un réseau bayésien simple.

Il faut garder à l'esprit que l'analyse du risque barrage est une aide à la décision. Il est donc important de s'assurer que le problème soit structuré de telle sorte qu'il fournisse des informations utiles au décideur. L'analyse doit répondre aux préoccupations du décideur en utilisant des termes dont la signification est la même autant pour ce dernier que pour les experts.

d) Élicitation et documentation du jugement d'experts

L'élicitation est dirigée par le facilitateur qui doit faire en sorte que les descriptions littérales ne soient pas ambiguës et définissent de façon adéquate chacune des probabilités conditionnelles à évaluer. Les informations complémentaires servant à appuyer chacune des évaluations sont notées sous forme de tableaux. Les facteurs contribuant à une augmentation de la probabilité sont inscrits dans la colonne POUR et ceux contribuant à la diminuer sont dans la colonne CONTRE. Un exemple de tableau POUR/CONTRE est montré à la Figure 5.4. Cet exemple est relié à la description littérale de la Figure 5.3.

Une évaluation numérique de la probabilité est ensuite réalisée en fonction de toutes les informations recueillies. Cette dernière est basée sur l'échelle de probabilités qui aura été construite en groupe au début de l'étape d'élicitation.

Des études ont montré que les personnes préfèrent exprimer les incertitudes à l'aide de mots et recevoir l'information incertaine par le biais de valeurs numériques (Bryant et Norman 1980, Merz, Druzdzel et Mazur 1991). Chaque personne a ses propres définitions relatives à des expressions telles "très probable" avec lesquelles elle est familière. Cependant, chacun reconnaît aussi que ces expressions peuvent avoir une signification différente pour quelqu'un d'autre.

La façon la plus efficace pour les experts de raisonner individuellement et ensuite de communiquer leurs évaluations est d'utiliser une échelle de probabilités numériques à laquelle est jointe une série de descripteurs verbaux (Renooij 2001, Kong, Barnett, Mosteller et Youtz 1986). La correspondance entre les valeurs numériques et les descripteurs verbaux est établie au préalable d'un commun accord. La Figure 5.5 montre un exemple d'échelle de probabilités.

Le niveau de détail de l'échelle doit aussi faire l'objet d'un consensus. Il est en effet très difficile pour un évaluateur de juger de la signification d'un faible incrément de probabilité comme par exemple de 0,995 à 0,999 (Wallsten et Budescu 1983). Il est préférable d'utiliser une échelle de probabilités comportant un nombre minimal de subdivisions et de s'en tenir à des valeurs extrêmes incertaines de 0,01 à 0,1 et de 0,9 à 0,99 (Spetzler et Staël Von Holstein 1975).

Lorsque des valeurs de probabilités peuvent être déterminées analytiquement à l'aide de statistiques ou de modèles probabilistes, les résultats obtenus sont considérés dans les tableaux POUR/CONTRE et peuvent être ajustés en fonction d'autres éléments d'information. Ces derniers peuvent inclure par exemple un jugement sur la validité et la qualité des modèles et données utilisés.

Il arrive que les experts ne s'entendent pas sur les valeurs de probabilités évaluées. Ces désaccords ne sont toutefois pas toujours néfastes. La diversité d'opinion peut souvent enrichir les débats et les analyses. L'utilisation de plusieurs experts peut être considérée comme la version subjectiviste d'une augmentation de la taille d'échantillonnage dans une analyse statistique.

La combinaison des jugements dissemblables peut être faite par l'utilisation d'approches mathématiques ou béhaviorales (Clemen et Winkler 1999). La première consiste à déterminer analytiquement une valeur reflétant le mieux le jugement collectif à partir des évaluations individuelles. La seconde préconise plutôt l'interaction entre les experts et l'atteinte d'un consensus. L'approche béhaviorale est favorisée en autant que les discussions ne soient pas dominées par un seul individu (Clemen et Winkler 1999).

e) Vérification des résultats

Le modèle causal et les probabilités sont vérifiées afin de s'assurer qu'ils reflètent bien les connaissances et le jugement du groupe d'experts. En particulier, les probabilités évaluées doivent être bien calibrées (correspondre aux fréquences historiques si elles sont disponibles), conformes aux axiomes de probabilités et basées sur un nombre suffisant d'éléments d'information pour être crédibles (Renooij 2001).

Une indication de la validité des évaluations peut être obtenue en réalisant différentes requêtes dans le réseau bayésien afin de vérifier leurs effets sur certaines variables d'intérêt. Le résultat de ces requêtes doit être conforme au sens commun et exprimer les connaissances des experts. Par exemple, un niveau du réservoir (*NR*) plus élevé devrait causer une augmentation du risque de submersion (*S*) si l'évacuation d'eau (*ÉV*) est nulle. En termes probabilistes, on doit calculer que $P(S \mid NR=élevé, ÉV=0) > P(S \mid NR=bas, ÉV=0)$.

Une vérification de la sensibilité du modèle à ses paramètres, notamment les probabilités conditionnelles, est utile pour les variables jugées plus critiques en rapport à la probabilité de rupture ou dont l'évaluation a fait l'objet de dissensions auprès des experts.

Les évaluations problématiques ainsi identifiées peuvent être modifiées en répétant l'une ou l'autre des étapes du processus d'élicitation. Par exemple, ces modifications peuvent consister en l'établissement d'une version modifiée du modèle causal ou d'une nouvelle évaluation de certaines probabilités.

5.5 Calcul des probabilités avec la technique du "OU Approché"

Le nombre de probabilités à évaluer dans un réseau bayésien peut devenir considérable car il dépend du nombre de nœuds, de parents et d'états possibles pour chaque nœud. Par exemple, la détermination de la table de probabilités d'un nœud binaire ayant n parents binaires nécessite 2^{n+1} valeurs de probabilités. En tenant compte de la complémentarité des états (voir Équation 4.4), il reste 2^n probabilités à évaluer. La détermination de toutes ces valeurs peut donc apparaître comme un problème difficile à résoudre en pratique pour un groupe d'experts.

La technique la plus utilisée pour réduire le nombre de probabilités à estimer est celle du "OU Approché" qui ne s'applique cependant qu'aux variables binaires (Becker et Nadim 1999). Cette méthode permet de calculer entièrement les 2^n probabilités nécessaires en ne spécifiant explicitement que n valeurs.

On suppose que toutes les causes possibles, ou parents pa, du nœud X sont représentées et qu'elles sont indépendantes. En termes probabilistes, on a donc:

$$P(X \mid \neg pa_1, \neg pa_2, \ldots, \neg pa_n) = 0 \tag{5.1}$$

Dans ce cas, l'approximation suivante peut être effectuée:

$$P(X \mid pa_1, pa_2, \ldots, pa_n) = 1 - \prod_j q_j \tag{5.2}$$

où

$$q_j = 1 - P(X \mid pa_j) \tag{5.3}$$

L'indice *j* correspond au nombre de parents *pa* ayant une valeur positive ou vraie.

L'utilisation de la technique du "OU Approché" est montrée à l'aide du réseau bayésien de la Figure 5.6 qui comprend 4 nœuds binaires ayant les états *vrai* et *faux*. On suppose que les trois modes de rupture identifiés à la Figure 5.6 représentent les n causes de rupture du barrage et que ces causes ne sont pas reliées. L'influence des différentes périodes de récurrence pour les séismes et les crues n'est pas prise en compte ici.

La table de probabilités du nœud *rupture du barrage* contient 2^{3+1} soit 16 valeurs. En tenant compte de la complémentarité des états (voir Équation 4.4), il est donc nécessaire de réaliser l'évaluation de 2^3 soit 8 probabilités. L'utilisation du "OU Approché" permet de spécifier toutes les valeurs de la table de probabilités en ne spécifiant que $n = 3$ probabilités.

Si:

$P(rupture \mid submersion) = 0{,}9$	alors	$q_1 = 1 - 0{,}9 = 0{,}1$
$P(rupture \mid séisme) = 0{,}2$	alors	$q_2 = 1 - 0{,}2 = 0{,}8$
$P(rupture \mid érosion\ interne) = 0{,}4$	alors	$q_3 = 1 - 0{,}4 = 0{,}6$

Les opérations effectuées dans le Tableau 5.1 définissent la table de probabilités du nœud *rupture*.

L'utilisation du "OU Approché" fait donc en sorte que le nombre de probabilités à évaluer pour un nœud donné varie linéairement avec le nombre de parents même si le nombre de valeurs nécessaires à la spécification de la table de probabilités varie de façon exponentielle.

5.6 Résumé

La détermination des probabilités associées à un réseau bayésien est réalisée par l'utilisation de méthodes d'élicitation basées sur des approches mathématiques et psychologiques. Elles ont pour but de quantifier le jugement de l'expert de manière structurée en minimisant l'influence des différentes formes de biais qui affectent souvent les évaluations.

Les incertitudes proviennent généralement de quatre sources : la variabilité inhérente à certains processus naturels (incertitude aléatoire), la connaissance incomplète (incertitude épistémique), l'incertitude décisionnelle et l'incertitude humaine. Les probabilités quantifient les deux premiers types d'incertitudes. La prise en compte des incertitudes permet d'ajouter une nouvelle dimension à l'interprétation des résultats et au choix de solutions de confortement.

L'importance relative du jugement dans les évaluations est inversement proportionnelle à la disponibilité des données et modèles. La quantification du jugement est réalisée à l'aide d'un processus d'élicitation comportant 5 étapes:

a) Sélection des experts
b) Entraînement des experts
c) Structuration du problème
d) Élicitation et documentation des jugements d'experts
e) Vérification des résultats

L'utilisation d'un processus formel pour l'élicitation des probabilités diminue l'influence des biais motivationnels et cognitifs tels la disponibilité et l'ajustement et documente les jugements ayant servi aux évaluations. Cette approche favorise la transparence et permet

à des tiers, en incluant le décideur, d'évaluer et de critiquer la démarche adoptée et les résultats obtenus.

La technique du "OU Approché" peut être utilisée lorsque le nombre de probabilités à évaluer pour un nœud binaire est élevé.

Les chapitres suivants présentent des réseaux bayésiens relatifs à un exemple d'application et un exemple pratique d'analyse du risque barrage. Pour chacune des probabilités de ces réseaux, la démarche, les données et les modèles utilisés pour les évaluations faites de façon individuelle sont résumés. En pratique, les évaluations devraient cependant être réalisées par un groupe d'experts utilisant une méthode d'élicitation qui tienne compte des aspects décrits dans ce chapitre.

Tableau 5.1: Calcul des probabilités du nœud *rupture*

Submersion (1)	Séisme (2)	Érosion interne (3)	*P(rupture)*	*P(¬rupture)*
faux	faux	faux	0	1
faux	faux	vrai	0,4	q_3 =0,6
faux	vrai	faux	0,2	q_2 =0,8
faux	vrai	vrai	0,52	q_2*q_3 = 0,48
Vrai	faux	faux	0,9	q_1 =0,1
vrai	faux	vrai	0,94	q_1*q_3 = 0,06
vrai	vrai	faux	0,92	q_1*q_2 = 0,08
vrai	vrai	vrai	0,952	q_1*q_2*q_3 = 0,048

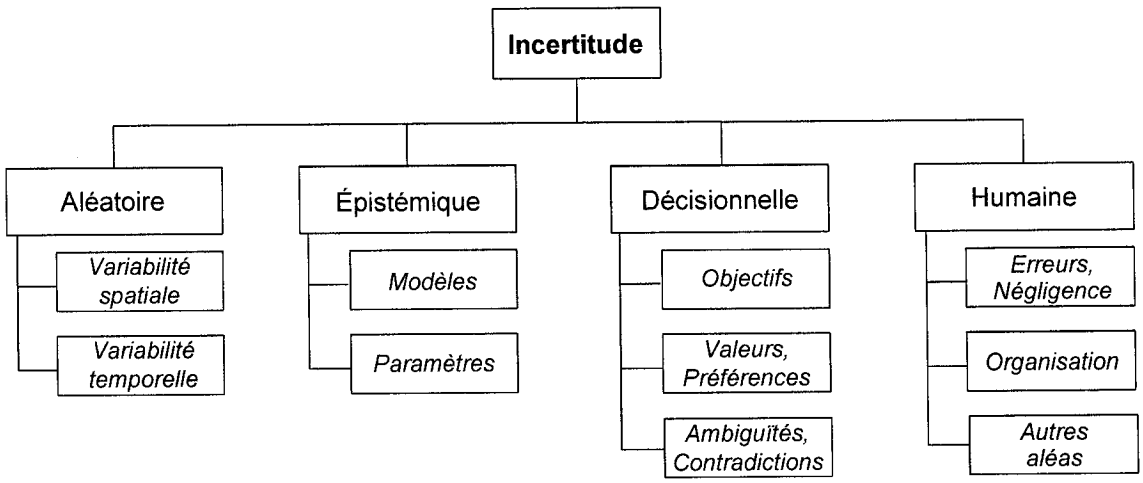


Figure 5.1: Types d'incertitude

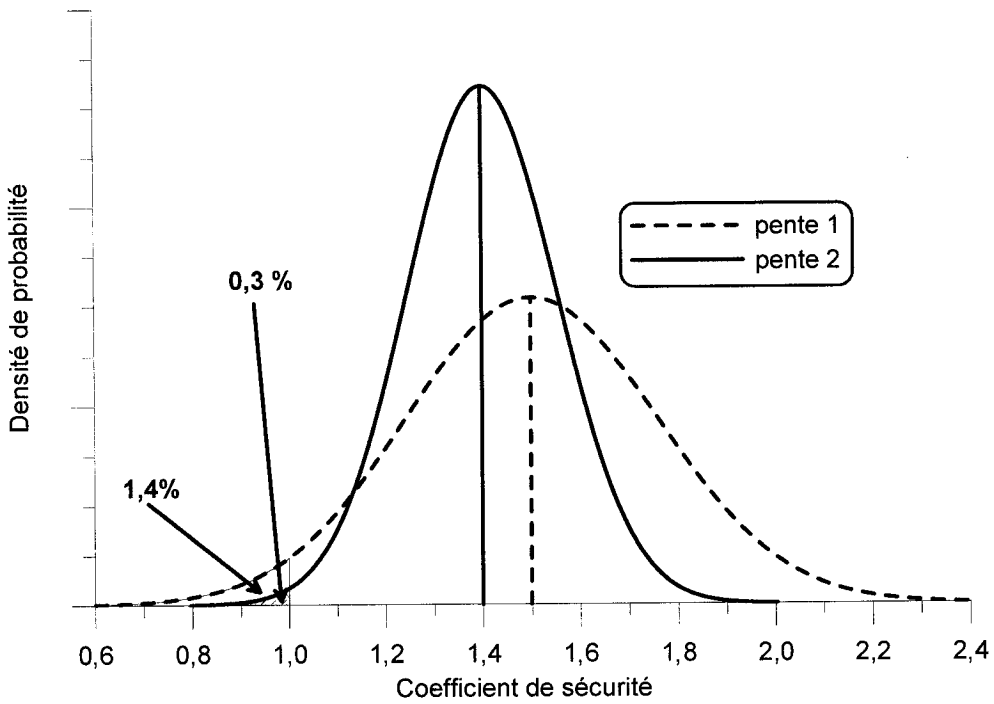


Figure 5.2: Coefficients de sécurité et probabilités de rupture



P(venues d'eau = oui | niveau du réservoir ≥ 200 m) :
Quelle est la probabilité que des venues d'eau soient observées à la surface du parement aval du barrage lorsque le niveau du réservoir s'est maintenu à une valeur égale ou supérieure à 200 m durant au moins une semaine ?

Figure 5.3: Description littérale de probabilité

P(venues d'eau = oui | niveau du réservoir ≥ 200 m)	
POUR ($P \uparrow$)	**CONTRE ($P \downarrow$)**
Présence possible d'une zone perméable dans le remblai	Le drain de pied est jugé efficace
Érosion du remblai imperméable vers le drain de pied rendant ce dernier inefficace	Influence du ruissellement de surface sur les observations
Des venues d'eau ont déjà été observées	Aucun forage réalisé pour confirmer la présence d'une zone plus perméable dans le remblai

Figure 5.4: Exemple de tableau POUR/CONTRE

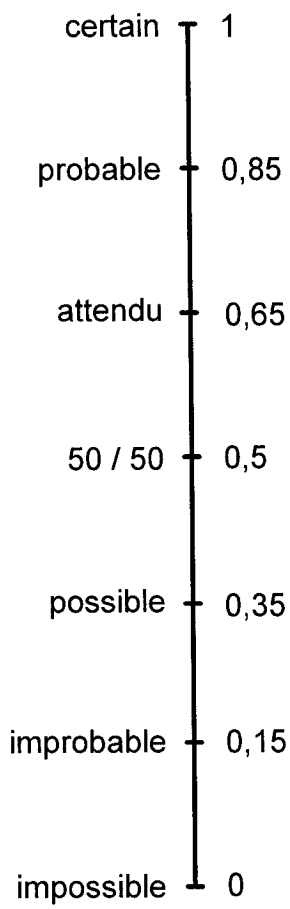


Figure 5.5: Exemple d'échelle de probabilités

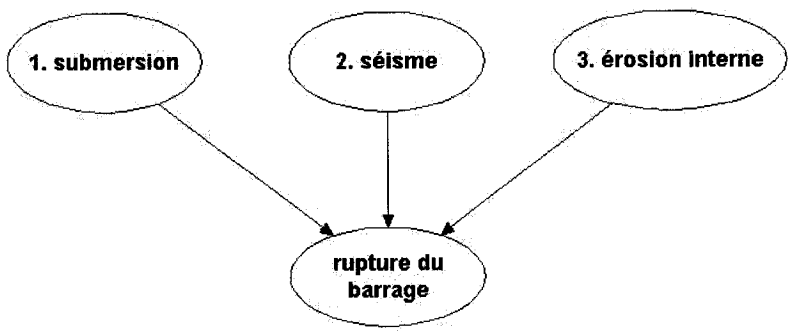


Figure 5.6: Utilisation de la technique du "OU Approché"

CHAPITRE 6

APPLICATION DU CONCEPT DES RÉSEAUX BAYÉSIENS AUX BARRAGES

6.1 Introduction

Les réseaux bayésiens offrent la possibilité de modéliser des systèmes complexes et incertains comportant plusieurs interdépendances entre les variables. Leur utilisation permet une compréhension du problème et des interrelations entre les phénomènes selon une vision holistique plutôt que sur la quantification de valeurs absolues du risque. Il devient alors possible de juger de l'efficacité des mesures de réduction du risque de manière globale.

L'étude du risque barrage doit se faire en examinant un large éventail de mécanismes de rupture plausibles afin de détecter et de prévenir les problèmes d'une manière globale et efficace en termes de coûts. Les problèmes relatifs au comportement d'un barrage sont uniques d'un ouvrage à l'autre et sont fortement interreliés. L'utilisation des réseaux bayésiens pour l'étude du risque barrage permet d'identifier les mécanismes de rupture contribuant le plus au risque global et d'optimiser les mesures de réduction du risque qui sont alors dirigées vers les aspects les plus critiques.

L'application du concept des réseaux bayésiens au domaine du risque barrage est réalisé dans le cadre de cette recherche à l'aide d'un exemple portant sur un ouvrage en remblai présentant des problèmes de comportement pour lesquels des décisions sont requises en rapport à sa sécurité. La formalisation des connaissances et la représentation du risque relié à l'ouvrage sont réalisés par la construction d'un réseau bayésien où les aspects

qualitatifs de la structure du modèle causal et les aspects quantitatifs des évaluations de probabilités annuelles sont décrits.

L'identification des mesures optimales de réduction du risque est faite à l'aide de calculs d'inférence à partir du réseau construit. Cette partie est traitée au Chapitre 7.

L'exemple d'application présenté ne vise pas un ouvrage existant. Il est néanmoins basé sur des problématiques réelles dans lesquelles certaines évaluations quantitatives sont surtout basées sur le jugement à cause du manque de données et du caractère incertain des phénomènes étudiés. La construction du réseau s'appuie en grande partie sur des connaissances en géotechnique et sur le comportement de l'ouvrage tel que décrit dans la définition du problème. L'apport de certains modèles mathématiques et outils statistiques couramment utilisés en pratique est aussi mentionné.

Le but de cette recherche étant de montrer les avantages reliés à l'utilisation des réseaux bayésiens pour la modélisation du risque barrage, le modèle causal utilisé et les méthodes de calcul employées pour la détermination des probabilités n'impliquent pas qu'ils soient les meilleurs ou les seuls pouvant être appliqués dans les circonstances.

6.2 Types de variables

Les mécanismes de rupture de barrages sont initiés par des sollicitations externes qui ont pour conséquence de déclencher des effets dont la progression peut mener à la rupture. Cette progression est décrite par une série de réactions qui doivent se produire selon une séquence précise.

Ces réactions incluent des états et des processus physiques qui sont observés directement ou indirectement. Certains états et processus sont essentiels à la réalisation du

mécanisme de rupture alors que d'autres ne font que faciliter sa progression ou sa détection.

Ces particularités font en sorte que différents types de variables sont définis dans le cadre de cette étude pour la construction de réseaux bayésiens servant à la modélisation du risque barrage. Cette catégorisation des variables a été mise au point afin de refléter leur caractère spécifique en ce qui a trait à leur rôle dans la réalisation d'un mécanisme de rupture et aux méthodes utilisées en pratique pour les mesurer et les observer.

Le réseau bayésien de la Figure 6.1, qui représente de façon très sommaire le mécanisme de rupture par érosion interne, montre les quatre types de variables à considérer pour l'étude du risque barrage à l'aide des réseaux bayésiens. Les variables se regroupent à l'intérieur des catégories suivantes:

1. Initiateurs
2. Indicateurs directs
3. Indicateurs indirects
4. Variables externes

Les initiateurs désignent les conditions de chargements telles la variable *niveau du réservoir* à la Figure 6.1. Les initiateurs font référence aux forces appliquées sur le barrage qui résultent de charges externes. Les charges considérées le plus fréquemment sont le réservoir en condition d'exploitation normale et en crue et un tremblement de terre. Ces charges sont reliées aux trois principaux modes de rupture d'un barrage en remblai qui sont l'érosion interne, la submersion et les séismes (CIGB 1995).

D'autres charges externes peuvent aussi être désignées comme initiateurs. La poussée des glaces ou des débris, le ruissellement de surface suite à de fortes précipitations de même que les sollicitations thermiques peuvent être considérées.

Un initiateur est le plus souvent le premier élément décrivant un mécanisme de rupture. Les probabilités à évaluer sont alors des probabilités a priori car dans un réseau bayésien, les initiateurs n'ont normalement pas de parents.

Dans le domaine de la sécurité des barrages, les initiateurs font très souvent l'objet d'un suivi et de mesures réalisées de façon routinière. Par exemple, les niveaux de réservoir sont contrôlés et mesurés afin d'optimiser la production hydroélectrique, la navigabilité ou les capacités d'irrigation. De la même façon, les séismes et les précipitations sont quantifiés par des réseaux de stations de mesure qui sont gérées par le propriétaire du barrage ou par d'autres organismes. Les données concernant les initiateurs sont donc souvent nombreuses et couvrent une période de temps assez longue pour évaluer les tables de probabilités à l'aide de statistiques.

L'utilisation d'outils statistiques ne signifie cependant pas que les initiateurs soient des événements aléatoires totalement imprévisibles. Les processus qui régissent les apports d'eau, les précipitations et quelquefois les séismes sont assez bien connus. Les initiateurs pourraient donc être évalués de façon déterministe comme par exemple la prévision des crues par la modélisation des conditions météorologiques et d'exploitation du réservoir. En pratique, les connaissances et le temps disponibles pour l'analyse sont limités et les initiateurs de rupture sont modélisés à l'aide d'outils statistiques afin de maximiser la capacité prédictive de l'information disponible (Smith, Marche et Robert 2004).

Les indicateurs directs indiquent de façon explicite la réalisation d'un mécanisme de rupture. Les variables *écoulement* et *rupture* à la Figure 6.1 sont des indicateurs directs.

Ce type de variable représente des événements dont l'occurrence selon une séquence établie décrit les étapes essentielles à la réalisation d'un mécanisme de rupture. L'indicateur direct le plus en aval dans la séquence d'événements est toujours la rupture elle-même.

Dans la majorité des cas, ce type de variable est un processus physique observable visuellement pour lequel des mesures quantitatives directes ne sont pas effectuées de façon habituelle. À la Figure 6.1, la présence d'un écoulement est essentielle à la réalisation du mécanisme de rupture par érosion interne. En pratique, les mesures quantitatives effectuées touchent plutôt les variations de débit, modélisées dans la Figure 6.1 par la variable *augmentation débit mesuré*, qui sont un effet ayant pour cause la présence d'un écoulement.

Il est difficile de réaliser des mesures quantitatives sur les indicateurs directs ou de réaliser des essais répétés sur le terrain. L'établissement des probabilités d'occurrence des indicateurs directs ne peut donc se faire par la seule utilisation des techniques statistiques. La composante subjective est la plus importante dans l'évaluation de ces probabilités. La base de cette évaluation est le jugement fondé sur la connaissance du comportement de l'ouvrage et sur l'utilisation de modèles adaptés au contexte de l'étude.

Les indicateurs directs se produisent après les initiateurs ou après d'autres indicateurs directs. Les valeurs à évaluer sont donc des probabilités conditionnelles à la réalisation d'événements préalables.

Les indicateurs indirects indiquent de façon implicite la réalisation d'un mécanisme de rupture. La variable *augmentation débit mesuré* à la Figure 6.1 est un indicateur indirect.

Ce type de variable représente des phénomènes observés ou mesurés qui sont un effet de la réalisation d'un ou plusieurs indicateurs directs. Les indicateurs indirects fournissent des indices permettant de détecter les indicateurs directs. Ils offrent une information complémentaire pour préciser les diagnostics et les prédictions en rapport à la rupture.

Les indicateurs indirects réfèrent souvent aux mesures d'instrumentation effectuées au droit des barrages pour quantifier certains paramètres tels les débits, les pressions et les

déplacements qui peuvent fournir des indices concernant la progression d'un mécanisme de rupture. Cependant, ces indicateurs sont indirects dans le sens où ces mesures ne sont pas nécessaires et suffisantes pour établir sans équivoque l'existence de la cause c'est-à-dire le mécanisme de rupture.

À la Figure 6.1, un écoulement peut être présent même si des augmentations de débit ne sont pas mesurées au droit d'un déversoir de jaugeage car cet écoulement peut se drainer vers un autre endroit. À l'inverse, les débits mesurés ne sont pas les seuls indicateurs possibles de la présence d'un écoulement. Ces indicateurs peuvent inclure par exemple l'apparition de végétation sur le parement aval d'un barrage en remblai.

Les mesures sur les indicateurs indirects peuvent être quantitatives surtout dans le cas où les données proviennent d'instruments d'auscultation. Les mesures peuvent aussi être qualitatives lorsque les indicateurs indirects sont reliés à la présence de phénomènes physiques observés sur le terrain. L'importance de la composante subjective dans l'évaluation des probabilités est donc variable et dépend du contexte de l'étude.

Les indicateurs indirects se produisent après les initiateurs ou après les indicateurs directs. Les valeurs à évaluer sont donc des probabilités conditionnelles à la réalisation d'événements préalables.

Les variables externes ne dépendent pas d'un mécanisme de rupture. Il s'agit plutôt de phénomènes pouvant influencer la réalisation d'un mécanisme de rupture ou contribuer à sa détection. Ce type de variable représente surtout des états physiques dont la présence est observée ou non. En n'ayant pas de lien direct avec un mécanisme de rupture, la pertinence d'inclure des variables externes dans un modèle est un choix basé sur le contexte de l'étude et le jugement de l'ingénieur.

La variable *horizon perméable* a été incluse à la Figure 6.1 afin de modéliser l'influence d'une zone plus perméable dans le noyau sur la probabilité de rupture par érosion interne.

Il est difficile de quantifier les probabilités reliées aux variables externes à l'aide de mesures car elles visent surtout la présence ou non d'un état physique. La composante subjective est donc la plus importante dans l'évaluation de ces probabilités.

Une variable externe est le plus souvent un élément complémentaire ajouté en amont d'une des variables servant à modéliser un mécanisme de rupture. Les probabilités à évaluer sont alors des probabilités a priori.

6.3 Définition du problème d'application

Le barrage étudié pour cet exemple d'application est un ouvrage en remblai en silt sableux de 50 m de hauteur présentant une revanche de 2 m par rapport au niveau maximum normal d'exploitation du réservoir qui est à la cote 100 m (voir Figure 6.2). Le réservoir alimente une centrale hydroélectrique.

Le drainage interne du barrage est assuré par un drain de pied en sable. Les pentes de cet ouvrage entièrement fondé au roc sont de 1,5H : 1V.

Des venues d'eau sont apparentes sur le parement aval, au dessus du drain de pied, lorsque le réservoir est exploité à la cote maximale. Elles disparaissent lorsque le niveau est inférieur à 90 m ce qui indique que le drain remplit correctement son rôle de rabattement de la surface libre d'écoulement.

Des analyses effectuées en considérant les niveaux piézométriques et les débits mesurés montrent que les venues d'eau sur le parement aval sont dues à la présence d'une zone plus perméable dans la partie supérieure de l'ouvrage. Des forages effectués dans cette zone indiquent la présence d'un matériau sableux qui serait susceptible à la liquéfaction.

La présence de cette zone plus perméable augmente la possibilité de rupture du barrage. Une surface libre d'écoulement plus élevée augmente la possibilité d'érosion interne du barrage par le parement aval qui n'est pas protégé par une zone filtre. Aussi, la position élevée de la surface d'écoulement diminue la stabilité de l'ouvrage face au glissement dans les cas statique et dynamique. Pour ces deux types de sollicitations, le point haut de la surface de glissement la plus critique est à une cote inférieure à celle du niveau maximum d'exploitation ce qui peut provoquer la rupture de l'ouvrage par submersion. Le ruissellement de surface suite à de fortes précipitations contribue aussi à réduire la stabilité du barrage face au glissement.

La zone sableuse dans la partie supérieure du barrage est sujette à la liquéfaction suite à une sollicitation sismique. Ce phénomène peut causer un tassement qui serait suffisant pour provoquer la submersion de l'ouvrage. La submersion pourrait aussi être causée par débordement du réservoir suite à une crue car le mauvais état de certaines composantes de l'évacuateur fait en sorte que ce dernier n'a pas la capacité prévue lors de la conception et nécessite des travaux de réfection.

La présence d'une zone sableuse accroît le risque relié au barrage en augmentant la probabilité d'occurrence des mécanismes de rupture par glissement, par érosion interne, par tassement et par débordement. Ces mécanismes ont pour initiateurs un séisme, un niveau du réservoir élevé et le ruissellement de surface causé par de fortes précipitations. La réalisation de ces mécanismes de rupture est non seulement tributaire de l'occurrence d'un ou plusieurs initiateurs mais aussi de la manifestation d'indicateurs directs et indirects.

Plusieurs de ces indicateurs sont régulièrement contrôlés durant la réalisation des activités de surveillance du barrage. Pour cet exemple, les inspections visuelles permettent de détecter des indicateurs directs comme le transport de particules et des indicateurs indirects comme l'état des piézomètres. Les relevés d'instrumentation servent à détecter les augmentations de débit qui sont un indicateur indirect.

Les variables externes sont aussi contrôlées lors de la réalisation des activités de surveillance. Par exemple, bien qu'elle ne soit pas explicitement reliée à un mécanisme de rupture, la prévention du vandalisme sur les instruments est une activité essentielle à leur bon fonctionnement et à leur capacité de détecter un mécanisme de rupture.

L'état du barrage implique que des travaux de réfection coûteux doivent être envisagés pour diminuer le risque de rupture. On suppose pour cet exemple que le statu quo n'est pas acceptable et que les solutions potentielles sont structurales c'est-à-dire directement reliées aux ouvrages. Les interventions non structurales telles l'optimisation de la gestion du réservoir ne sont pas considérées ici. Il s'agit donc d'identifier les éléments les plus critiques du problème et la solution optimale en termes de coûts et de réduction potentielle du risque.

L'utilisation d'un réseau bayésien permet de formaliser des notions plus générales en géotechnique avec des connaissances spécifiques à l'état et au comportement du barrage en tenant compte des incertitudes et des interrelations entre les mécanismes de rupture, les initiateurs et les indicateurs. Les liens de causalité décrits dans le réseau et leurs probabilités servent à réaliser plusieurs types de requêtes permettant les raisonnements en dépit de la complexité et de l'incertitude.

Ces requêtes répondent aux interrogations suivantes :

1. Quel est l'initiateur le plus critique?
2. Quel est le mécanisme de rupture le plus probable?
3. Quel est l'indicateur indirect le plus pertinent?
4. Quelle est la mesure optimale de réduction du risque?

6.4 Construction du modèle causal (phase qualitative)

6.4.1 Variables

Les variables sont choisies en tenant compte des données et connaissances disponibles relatives à l'ouvrage. Elles doivent contribuer de façon significative à la logique du problème et être en nombre suffisant pour permettre de répondre aux quatre interrogations faites précédemment. Cependant, un trop grand nombre de variables rend plus difficile la compréhension du modèle causal et a pour effet d'augmenter inutilement le nombre de probabilités à évaluer.

Les mécanismes de rupture envisagés dans la définition du problème sont initiés par les sollicitations sismiques, le niveau du réservoir et les fortes précipitations. Ces initiateurs sont modélisés dans le réseau bayésien par les nœuds *séisme*, *niveau du réservoir* et *ruissellement en surface*.

Un initiateur comme le gel peut causer des phénomènes de fissuration qui pourraient théoriquement avoir un effet sur la stabilité du barrage face au glissement. Dans cet exemple, les effets thermiques sont négligeables et ne sont pas considérés dans le modèle causal.

Les indicateurs directs choisis doivent permettre la modélisation des mécanismes de rupture par glissement, par érosion interne, par tassement et par débordement. Le glissement est décrit à l'aide de la variable *glissement de masse*. L'érosion interne sur le parement aval du barrage est décrite par la séquence de variables *venues d'eau parement* et *transport de particules*.

Le mécanisme de rupture par tassement important de la zone sableuse suite à un séisme implique que le niveau de la crête devienne inférieur au niveau du réservoir. La rupture aurait alors lieu par submersion. Les indicateurs directs permettant de modéliser ce mécanisme sont *tassements en crête* et *submersion crête*. Cette dernière variable est aussi utilisée pour le mécanisme de rupture par submersion causée par le débordement du réservoir. Aussi, la rupture par glissement implique que le point haut de la surface de glissement soit inférieur au niveau du réservoir et donc qu'il y ait submersion en crête avant la rupture.

L'indicateur direct le plus en aval est la variable *rupture* qui est commune à tous les mécanismes considérés.

Les indicateurs indirects sont reliés à l'instrumentation installée pour le suivi du comportement du barrage. Les données recueillies au droit du déversoir de jaugeage mesurent les débits d'infiltration qui peuvent être un indice de l'augmentation des venues d'eau sur le parement aval et donc de la progression du mécanisme de rupture par érosion interne. Les données disponibles en rapport au déversoir de jaugeage sont prises en compte à l'aide de l'indicateur indirect *augmentation débit mesuré*.

Le piézomètre à tube ouvert installé dans le barrage mesure des niveaux piézométriques qui varient peu en fonction du niveau du réservoir. Les données disponibles apportent donc peu d'informations supplémentaires permettant de juger de la progression d'un des mécanismes de rupture considérés dans le modèle causal. Cependant, le bris du tubage

de l'instrument peut être un indice d'un mouvement différentiel important dans le barrage. Ce type d'observation est un effet d'un glissement ou d'un tassement important et est pris en compte par la variable *bris piézomètre*.

Certaines informations qui ne sont pas reliées à la réalisation d'un mécanisme de rupture sont aussi considérées afin de tenir compte du contexte spécifique en rapport au barrage étudié. Les problèmes de vandalisme quelquefois rapportés sur le site du barrage n'influencent pas sa sécurité mais peuvent fausser certaines conclusions pouvant être tirées des mesures et observations faites au droit de l'ouvrage. Les tubages des piézomètres peuvent être obstrués ou endommagés intentionnellement ce qui pourrait laisser croire qu'un glissement ou un tassement important s'est produit. La variable externe *vandalisme* permet de considérer cet effet.

L'absence de filtre sur le parement aval du barrage est un état qui ne dépend pas du mécanisme de rupture par érosion interne mais qui contribue à sa réalisation. Cette contribution est quantifiée par la variable externe *sortie non filtrée*.

La liste des variables considérées dans ce problème est présentée au Tableau 6.1. Les caractères inscrits entre parenthèses indiquent les abréviations qui sont souvent utilisées dans la suite du texte pour référer aux nœuds servant à modéliser les variables dans le réseau bayésien.

6.4.2 États

Les initiateurs *ruissellement en surface* et *niveau du réservoir* sont mesurés automatiquement et se prêtent bien à la modélisation à l'aide de variables continues car les données disponibles sont nombreuses. Cependant, ces initiateurs, de même que toutes les autres variables, sont modélisées à l'aide de variables discrètes. Cette approche est retenue même si les algorithmes d'inférence peuvent considérer des variables continues dont les probabilités sont distribuées selon la loi normale.

La nature des contraintes reliées à l'utilisation de variables continues dans la construction du modèle causal est d'ordre logique: une cause exprimée par une variable continue ne peut avoir comme effet une variable discrète (Jensen 2001). Par exemple, à la Figure 6.1, il n'est pas possible de modéliser la présence ou non d'un écoulement si les valeurs du niveau du réservoir sont représentées à l'aide d'une distribution de probabilités continue. Dans ce cas, il devrait y avoir une infinité de valeurs pour la table de probabilités de la variable *écoulement*, comprenant les états *oui* et *non*, qui corresponde à l'infinité de valeurs possibles de la variable *niveau du réservoir*. L'évaluation de la table de probabilités de *écoulement* est alors impossible sauf si cette variable est continue.

La discrétisation des distributions de probabilités continues est une alternative permettant de tirer profit de toutes les données disponibles tout en évitant les contraintes reliées à l'utilisation de variables continues. Il existe des méthodes permettant de discrétiser plusieurs types de distributions de probabilités (Clemen et Reilly 2001) qui peuvent être utilisées à profit pour la modélisation avec des réseaux bayésiens.

L'aspect le plus difficile de la discrétisation n'est cependant pas l'utilisation des techniques numériques mais plutôt la détermination de plages de valeurs significatives par rapport au comportement de l'ouvrage étudié. Les plages de valeurs d'une cause

doivent permettre de modéliser des variations significatives dans les effets. Par exemple, pour l'évaluation de la présence d'un écoulement (l'effet), les valeurs de niveaux du réservoir (la cause) peuvent être répartis en deux groupes, *niveau du réservoir* $< X$ et *niveau du réservoir* $\geq X$, en sachant qu'à la cote X, il existe une zone plus perméable dans le barrage ou sa fondation.

En pratique, les données et les connaissances en rapport au comportement d'un barrage ne sont pas toujours suffisantes pour connaître les Δeffets associés à un grand nombre de Δcauses.

Pour le problème d'application, les variables du réseau bayésien sont binaires. La majorité des variables sont observées ou non, les états correspondants sont donc *oui* et *non*. Les trois initiateurs et un des indicateurs directs sont modélisés à l'aide de deux plages de valeurs qui sont $< X$ et $\geq X$ où X correspond à une valeur à partir de laquelle il est possible d'observer un Δeffet significatif.

Le Tableau 6.1 montre les états possibles de chacune des variables identifiées.

Les états négatifs, ou faux, sont inscrits dans la deuxième colonne du Tableau 6.1 alors que les états positifs, ou vrais, sont inscrits dans la troisième colonne. Par exemple, un niveau du réservoir bas ($RE < 100$ m) correspond à l'état négatif noté $P(\neg RE)$ en termes probabilistes. Inversement, un niveau du réservoir élevé ($RE \geq 100$ m) correspond à l'état positif noté $P(RE)$.

6.4.3 Liens de causalité

Les liens de causalité sont établis en considérant en premier lieu les initiateurs et les indicateurs directs de chacun des mécanismes de rupture devant être modélisés. Ces derniers décrivent le glissement de masse ou l'érosion interne du parement aval et la submersion par tassement important du barrage ou débordement du réservoir. Chacun des mécanismes débute par un initiateur et se termine par la variable *rupture*. La Figure 6.3 montre une première version du modèle causal décrivant les quatre mécanismes de rupture à l'aide des initiateurs et des indicateurs directs.

Le glissement de masse est décrit par un ou plusieurs des trois initiateurs suivis par des noeuds *GM*, *SC* et *R*. L'érosion interne débute par *RE* suivi de *VEP*, *TP* et *R*. Les ruptures par submersion suite à un tassement et à un débordement sont décrites respectivement par les séquences suivantes: *S*, *TC*, *SC*, *R* et *RE*, *SC*, *R*.

La Figure 6.3 est ensuite complétée pour tenir compte des informations supplémentaires obtenues à l'aide des indicateurs indirects et des variables externes.

Le bris du piézomètre est un effet d'un déplacement différentiel important du noyau du barrage causé par un tassement et/ou un glissement de masse. Le noeud *BP* est donc un descendant de *TC* et de *GM*.

Le déversoir de jaugeage mesure les débits de l'eau s'écoulant à la surface du terrain naturel en aval du barrage. Les augmentations de débit peuvent donc être consécutives à l'apparition de venues d'eau sur le parement aval du barrage ou au ruissellement de surface. Le noeud *ADM* est donc un descendant de *VEP* et de *RS*. Il est à noter qu'un ruissellement de surface important peut provoquer un écoulement sur le parement aval du barrage qui peut être confondu avec des venues d'eau. Le nœud *VEP* doit aussi être un descendant de *RS*.

La présence d'une sortie d'écoulement non filtrée influence la réalisation du transport de particules, le nœud *SNF* est alors un parent de *TP*. Le vandalisme ne peut affecter que le piézomètre, le nœud *V* est alors le parent de *BP*.

Le modèle causal final est représenté à la Figure 6.4. Ce modèle est complété à la section suivante par la définition de la loi de probabilités sous-jacente afin de former un réseau bayésien à partir duquel des calculs d'inférence pourront être réalisés.

6.5 Détermination des probabilités (phase quantitative)

6.5.1 Initiateurs

6.5.1.1 Séisme *(S)*

L'envergure des activités sismiques pour différents sites est illustrée sur des cartes de zonage sismique. Ces dernières délimitent géographiquement les différentes zones de risque potentiel induit par un tremblement de terre. Pour cette étude, il est supposé que le barrage est situé dans une zone sujette à une accélération de pointe au rocher de 15% de *g* pour une probabilité de dépassement de 2% dans 50 ans c'est-à-dire une période de récurrence de 2500 ans. L'intensité de ce séisme est considérée comme la limite à partir de laquelle des tassements et des glissements seraient suffisamment importants pour affecter la sécurité de l'ouvrage.

La valeur de *P(S)* où $S \geq 0{,}15$g est donc égale à 0,0004. La table de probabilités du nœud *S* est montrée au Tableau 6.2.

6.5.1.2 Niveau du réservoir *(RE)*

La Figure 6.5 montre les variations de niveau du réservoir depuis fin de la mise en eau du barrage. La figure montre que le réservoir a souvent été exploité à un niveau considéré comme élevé, soit à une cote supérieure au niveau maximum normal d'exploitation de 100 m .

La probabilité que le niveau du réservoir soit égal ou inférieur à une valeur quelconque est déterminée en classant en ordre croissant de niveau du réservoir les données de la Figure 6.5. Pour chaque niveau du réservoir, le nombre de valeurs inférieures à ce niveau est exprimé en pourcentage. La courbe ainsi obtenue représente la distribution cumulative de probabilités. Cette dernière est présentée à la Figure 6.6.

La Figure 6.6 indique que 82,5 % des niveaux du réservoir enregistrés sont inférieurs à 100 m. La valeur de $P(\neg RE)$ est donc de 0,825. La valeur de $P(RE)$ est alors de 0,175.

La table de probabilités du nœud *RE* est montrée au Tableau 6.3.

6.5.1.3 Ruissellement de surface *(RS)*

La Figure 6.7 montre les précipitations journalières en millimètres d'eau au site du barrage. Les précipitations hivernales et l'effet de la fonte des neiges ne sont pas considérées dans ce problème d'application. Les observations visuelles faites au droit du barrage montrent que les débits mesurés et la possibilité d'apparition de phénomènes de glissements sur le talus aval augmentent significativement lorsque les précipitations journalières sont supérieures à 20 mm.

La distribution cumulative de probabilités déterminée à l'aide des données de précipitations de la Figure 6.7 est montrée à la Figure 6.8. Cette dernière indique que la

probabilité de mesurer des précipitations journalières inférieures à 20 mm est de $P(\neg RS) = 0{,}98$. La valeur de $P(RS)$ est donc égale à 0,02. La table de probabilités du nœud *RS* est montrée au Tableau 6.4.

6.5.2 Indicateurs directs

6.5.2.1 Venues d'eau sur le parement aval *(VEP)*

Les venues d'eau sur le parement aval du barrage peuvent être causées par l'écoulement dans la structure ou par le ruissellement de surface qui suit de fortes précipitations. Les inspections réalisées alors que le niveau du réservoir est élevé ($\geq$ 100 m) montrent que, dans presque tous les cas, des venues d'eau apparaissent en quelques jours sur le parement aval. Le délai est relié au temps requis pour l'établissement du régime d'écoulement permanent dans le barrage suite à une variation importante du niveau du réservoir.

Ce délai peut provoquer une certaine confusion lors des inspections. Par exemple, une inspection réalisée peu de temps après une diminution rapide du niveau du réservoir peut révéler la présence de venues d'eau même si le niveau du réservoir est à la cote 90 m. L'inverse est vrai lors des inspections réalisées peu de temps après un remplissage rapide: il peut y avoir absence de venues d'eau pour quelque temps même lorsque le niveau du réservoir est élevé.

Aussi, lors des inspections, le ruissellement de surface peut être confondu pour des venues d'eau. Le ruissellement n'est pas un initiateur du mécanisme de rupture par érosion interne.

Les valeurs de *P(VEP)* étant donné toutes les combinaisons d'états des parents *RS* et *RE* ont donc été estimées de façon subjective à partir des observations faites sur le terrain et de l'analyse des conditions d'écoulement dans le barrage. La table de probabilités du nœud *VEP* est montrée au Tableau 6.5.

6.5.2.2 Tassements en crête *(TC)*

Le tassement en crête est causé par une secousse sismique provoquant la liquéfaction de la zone sableuse et la déformation permanente du reste du remblai. Le phénomène de liquéfaction vise surtout les matériaux non cohérents peu ou moyennement denses. Le tassement dû à la consolidation du remblai a été jugé négligeable en rapport au tassement par liquéfaction.

Selon les statistiques mondiales (CIGB 1995), moins d'une douzaine de ruptures, tous types de barrages confondus, sont attribuables aux séismes. Pour les ouvrages en remblai, l'incident le mieux documenté est le barrage en remblai hydraulique de Lower San Fernando qui s'est affaissé d'environ 9 m suite à la liquéfaction et au glissement de la structure après un fort séisme (Seed, Makdisi, Idriss et Lee 1975). Malgré ce cas extrême, les tassements mesurés suite à un séisme sont presque toujours inférieurs à 2 m (Jansen 1988).

Des essais de laboratoire indiquent que les tassements de remblais lâches suite à une forte sollicitation dynamique sont de l'ordre de 1 à 4% de *H*, la hauteur du remblai, et inférieurs à 0,5 % de *H* pour des remblais compactés (Lee et Albaisa 1974). Ces mesures représentent des tassements de l'ordre de 1 à 2 m pour le barrage modélisé.

Le tassement pourrait donc possiblement être supérieur à 2 m si les matériaux du barrage sont lâches et la secousse sismique importante. La table de probabilités du nœud *TC*

évaluée par jugement à partir des études de cas et des essais publiés est montrée au Tableau 6.6.

6.5.2.3 Transport de particules *(TP)*

Le transport de particules est l'indicateur direct le plus en aval pour le mécanisme de rupture par érosion interne qui est la principale cause de rupture des barrages en remblai (Foster, Fell et Spannagle 2000, CIGB 1995). Le transport de particules est dû à l'écoulement dans le barrage et à l'absence de zones de filtre.

Le transport de particules est favorisé lorsqu'un écoulement localisé est présent dans une zone plus perméable mal compactée de faible indice de plasticité (Fell, Wan Cyganiewicz et Foster 2003). Ces caractéristiques se retrouvent dans la zone plus perméable du barrage dans laquelle des analyses d'écoulement montrent que les gradients de sortie sont relativement élevés (voir position des surfaces libres à la Figure 6.2). Une compilation des statistiques de rupture montre que la possibilité d'érosion interne d'un barrage homogène avec drain de pied est 7 fois plus élevée que pour un remblai zoné (Foster, Fell et Spannagle 2000).

Les probabilités reliées au nœud *TP* sont évaluées par jugement à partir des études de cas, de l'utilisation de modèles numériques d'écoulement et des données historiques d'inspection et d'instrumentation du barrage. La table de probabilités est montrée au Tableau 6.7.

6.5.2.4 Glissement de masse *(GM)*

Le glissement de masse est défini dans cette étude comme l'instabilité d'une partie importante du barrage où la partie supérieure de la surface de rupture est inférieure à la cote 100 m. Ce glissement potentiel doit donc être suffisamment profond pour pouvoir envisager la submersion de la masse de sol déstabilisé. La géométrie type des surfaces de rupture étudiées est montrée à la Figure 6.2.

Étant donné l'absence de fissures sur le parement aval et la nature relativement imperméable de la majeure partie du remblai, le ruissellement de surface *RS* ne devrait causer que des glissements superficiels sans danger pour la sécurité de l'ouvrage. La valeur de *P(GM | RS)* est jugée égale à 0,01 pour tenir compte de la faible possibilité de retrouver des horizons perméables sur une grande surface dans le parement aval.

Des analyses de stabilité ont été réalisées pour un niveau de réservoir maximal en tenant compte de surfaces de rupture profondes. Les valeurs des paramètres nécessaires aux analyses (géométrie, résistance au cisaillement et pressions interstitielles) sont incertaines. Étant donné la faible quantité de mesures réalisées, l'évaluation des incertitudes reliées à ces paramètres est basée sur des valeurs publiées de coefficients de variation (Kulhawy 1992, Duncan 2000).

Les calculs de stabilité face au glissement ont été réalisés à l'aide de simulations de Monte Carlo pour tenir compte des incertitudes. Les résultats de ces analyses servent d'intrants pour la détermination des valeurs de la table de probabilités de la variable *GM*.

La distribution de probabilités obtenue pour le coefficient de sécurité relié à la surface de glissement profond la plus critique est montrée à la Figure 6.9. La probabilité de glissement est égale à la portion de la distribution où le coefficient de sécurité est

inférieur à 1. Selon la Figure 6.9, le coefficient de sécurité moyen (sans séisme) est de 1,6 et la valeur de *P(GM | RE)* est égale à 0,07.

Le même type de calcul a été réalisé en ajoutant l'effet d'un séisme. La méthode pseudo statique a été utilisée afin de tenir compte de la sollicitation dynamique. Cette dernière est considérée comme une force égale au poids de la masse multiplié par un coefficient sismique constant et uniforme sur toute la hauteur du barrage. La distribution de probabilités obtenue est légèrement plus étalée à cause de l'effet de l'incertitude reliée au coefficient sismique (coefficient ± valeur fixée par le groupe d'experts). Selon la Figure 6.9, le coefficient de sécurité moyen (avec séisme) est de 1,5 et la valeur de *P(GM | RE, S)* est égale à 0,13.

L'évaluation des autres valeurs de la table de probabilités du nœud *GM* est faite à l'aide de la technique du "OU Approché" vue à la Section 5.5.

Si:

$P(GM \mid RS) = 0{,}01$	alors	$q_1 = 1 - 0{,}01 = 0{,}99$
$P(GM \mid RE) = 0{,}07$	alors	$q_2 = 1 - 0{,}07 = 0{,}93$
$P(GM \mid RE, S) = 0{,}13 = 1 - q_2 * q_3$	alors	$q_3 = 0{,}94$

Les opérations effectuées au Tableau 6.8 définissent la table de probabilités du nœud *GM*. Les états correspondants aux mentions "faux" et "vrai" du Tableau 6.8 sont présentés respectivement à la deuxième et à la troisième colonne du Tableau 6.1.

La table de probabilités du nœud *GM* est montrée au Tableau 6.9.

6.5.2.5 Submersion en crête *(SC)*

La submersion dépend de la stabilité et du tassement de l'ouvrage. Le niveau du réservoir doit toutefois être connu afin de pouvoir juger de la probabilité de submersion en crête.

Selon les définitions adoptées pour chacune des variables, la submersion est certaine si le niveau du réservoir est supérieur à 100 m et s'il y a occurrence d'un glissement de masse et/ou d'un tassement en crête. Par exemple, en sachant que $GM = oui$ (la cote de la partie supérieure de la surface de rupture est inférieure à 100 m) et que $RE \geq 100\ m$, la submersion est certaine. La valeur de $P(SC \mid GM, RE)$ est donc égale à 1.

Les autres valeurs de probabilités sont évaluées par jugement. Il a été supposé que la probabilité de submersion est de 0 si aucune des causes de submersion n'est observée. Cette probabilité augmente de 0,1 pour chaque cause présente pour tenir compte de l'additivité de leurs effets. Cette dernière hypothèse considère aussi les imprécisions dans les mesures et les observations.

La table de probabilités du nœud *SC* est montrée au Tableau 6.10.

6.5.2.6 Rupture *(R)*

L'évaluation des probabilités de rupture est basée sur des études de cas publiées qui sont adaptées au contexte de l'ouvrage étudié.

L'analyse par différents auteurs d'un grand nombre de cas de rupture par submersion a montré que le temps nécessaire à la formation d'une brèche sur un barrage en remblai varie de 15 minutes à 2½ heures (Dewey et Gillette 1993). Ce délai inclut le temps de submersion avant que la brèche ne commence à se former. Pour un ouvrage en remblai,

les normes adoptées à Hydro-Québec spécifient que le développement de la brèche débute dès que le niveau du réservoir atteint la cote de la crête de l'ouvrage (Hydro-Québec 2001).

Dans le cas de la submersion de l'ouvrage étudié, ces délais sont trop courts pour permettre une intervention efficace telle que la diminution rapide du niveau du réservoir par l'ouverture de l'évacuateur de crue. La probabilité de rupture étant donné la submersion en crête est donc considérée égale à l'unité.

L'analyse de nombreux cas de rupture publiés (Foster, Fell et Spannagle 2000) montre que la probabilité de rupture historique moyenne par érosion interne pour un ouvrage en remblai comprenant un drain de pied est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2}. Cette valeur ne comprend que les cas où le transport de particules n'a pas été observé. Si cet ouvrage est constitué de silt de faible plasticité comme dans le cas du barrage étudié, cette probabilité est environ 2,5 fois supérieure. La valeur de $P(R \mid \neg TP, \neg SC)$ serait donc considérée égale à 0,02.

Cependant, l'ouvrage fait l'objet d'une surveillance hebdomadaire qui permettrait de détecter à temps plusieurs problèmes potentiels de comportement et ainsi permettre une intervention efficace avant la rupture par érosion interne. Il a été jugé que cette capacité d'intervention pouvait réduire de moitié la valeur de $P(R \mid \neg TP, \neg SC)$.

Aussi, lorsque des venues d'eau avec transport de particules sont observées, la probabilité historique de rupture devient 10 fois supérieure (Foster, Fell et Spannagle 2000). La valeur de $P(R \mid TP, \neg SC)$ serait donc égale à 0,2. Les études de cas publiées montrent que le temps de rupture est de l'ordre de quelques heures à quelques jours après l'initiation du transport de particules (Fell, Wan, Cyganiewicz et Foster 2003). Les possibilités d'intervention durant ce délai sont réelles mais tout de même assez faibles étant donné que l'ouvrage n'est pas inspecté et ausculté de façon continue. Il a donc été

jugé que la fréquence de surveillance actuelle ne permettait une intervention efficace que dans 25 % des cas. La valeur de $P(R \mid TP, \neg SC)$ est donc considérée égale à 0,15.

La table de probabilités du nœud *R* est montrée au Tableau 6.11. Les évaluations prennent en compte de façon implicite plusieurs des facteurs permettant la détection des phénomènes de transport de particules avant qu'ils ne dégénèrent en rupture. Parmi ces facteurs on retrouve la fréquence et la qualité des inspections, la facilité d'accès au site ainsi que la capacité d'intervention rapide en cas de problèmes.

6.5.3 Indicateurs indirects

6.5.3.1 Bris de piézomètre *(BP)*

Des piézomètres à tube ouvert métallique sont installés dans le corps du barrage et sont lus à partir de la crête. Leur crépine est installée sous la cote 90 m afin de pouvoir mesurer les pressions interstitielles dans le barrage même lorsque le niveau du réservoir est à sa cote minimale.

Les tubes des piézomètres seraient très probablement sectionnés dans le cas d'un glissement de masse car la partie inférieure demeurerait fixe alors que la partie supérieure serait emportée avec le sol instable. La valeur de $P(BP \mid GM)$ est estimée à 0,95. La rigidité des tubes métalliques pourrait cependant être suffisante pour subir un tassement en crête, la valeur de $P(BP \mid TC)$ est estimée à 0,5.

Les piézomètres peuvent être l'objet d'actes de vandalisme qui comprennent le plus souvent leur obturation avec du sable ou le bris de la partie extérieure des tubages. Dans ces cas, les instruments peuvent être réparés assez facilement par injection d'eau sous pression ou par le remplacement des sections supérieures des tubages. Il est cependant

possible que les instruments ne puissent être remis en service après ces interventions. La valeur de $P(BP \mid V)$ est évaluée à 0,2 pour tenir compte de cette dernière possibilité.

L'évaluation de la table des probabilités est réalisée en utilisant la technique du "OU Approché" vue à la Section 5.5 qui requiert que les causes (*TC*, *GM* et *V*) de la variable étudiée (*BP*) soient indépendantes. Cependant, les nœuds *TC* et *GM* ne sont pas indépendants car ils ont le nœud *S* comme cause commune (voir Figure 6.4). Dans une connexion divergente, lorsque la cause est inconnue, les effets ne sont pas d-séparés (voir Section 4.7).

Néanmoins, l'indépendance de *TC* et *GM* est supposée car des calculs de vérification de la sensibilité du modèle causal montrent la faible influence du nœud *S* sur les variations possibles des probabilités des nœuds *TC* et *GM*.

Donc, si:

$P(BP \mid GM) = 0{,}95$	alors	$q_1 = 1 - 0{,}95 = 0{,}05$
$P(BP \mid TC) = 0{,}50$	alors	$q_2 = 1 - 0{,}50 = 0{,}50$
$P(BP \mid V) = 0{,}20$	alors	$q_3 = 1 - 0{,}20 = 0{,}80$

Les opérations effectuées dans le Tableau 6.12 définissent la table de probabilités du nœud *BP* qui est montrée au Tableau 6.13. Les états correspondants aux mentions "faux" et "vrai" du Tableau 6.12 sont présentés respectivement à la deuxième et à la troisième colonne du Tableau 6.1.

6.5.3.2 Augmentation du débit mesuré *(ADM)*

Un déversoir de jaugeage est installé à une centaine de mètres en aval du barrage dans un canal réalisé pour le drainage du terrain naturel. La pluie affecte donc très souvent cet instrument. L'expérience montre qu'au site du barrage étudié, un ruissellement de surface important est suivi dans 90% des cas d'une augmentation significative des débits mesurés. Lorsque des venues d'eau sont aussi apparentes sur le parement aval, ce pourcentage passe à 95%.

Environ 70% seulement des venues d'eau présentes sur le parement aval s'écoulent vers le déversoir de jaugeage car le drainage du pied aval n'est pas réalisé de façon optimale pour le suivi du comportement de l'ouvrage. Pour cette même raison, des vallées secondaires situées hors de la zone d'influence du barrage sont drainées vers le déversoir et occasionnent des débits parasites dans 20% des cas où le ruissellement de surface est faible et qu'il n'y a pas de venues d'eau observées sur le barrage.

Les venues d'eau provenant du drain de pied sont toutes interceptées par le déversoir de jaugeage.

La table de probabilités du nœud *ADM* est montrée au Tableau 6.14.

6.5.4 Variables externes

6.5.4.1 Vandalisme *(V)*

Le barrage est localisé à plusieurs kilomètres des zones urbaines et n'est visité de façon illégale que durant quelques périodes dans l'année correspondant aux saisons de chasse et de pêche. Les actes de vandalisme qui sont perpétrés ne sont jamais graves et touchent

surtout les panneaux de signalisation. Les instruments sont protégés par des boîtiers verrouillés. Selon l'expérience acquise sur le site durant les années passées, les piézomètres sont susceptibles d'être vandalisés dans seulement 10% des cas.

La table de probabilités du nœud *V* est montrée au Tableau 6.15.

6.5.4.2 Sortie non filtrée *(SNF)*

Le drain de pied en sable a été conçu selon des critères géotechniques inconnus. L'écoulement provenant de cette partie du barrage est probablement filtré car les venues d'eau ont toujours été claires à cet endroit. Aussi, le roc de fondation est considéré imperméable, il n'y a donc pas de lignes d'écoulement non filtrées passant sous le barrage.

Selon les analyses d'écoulement réalisées (voir Figure 6.2), l'écoulement non filtré serait possible sur le parement aval du barrage au dessus du drain de pied lorsque le niveau du réservoir est plus élevé. De plus, le matériau du remblai pourrait ne pas être autofiltrant (Kenney et Lau 1985). La possibilité de rencontrer un point de sortie d'écoulement non filtré est évaluée subjectivement à 0,75. La table de probabilités du nœud *SNF* est montrée au Tableau 6.16.

6.6 Résumé

Le concept des réseaux bayésiens est utilisé dans un problème d'application afin de modéliser le risque relié à un barrage pour lequel des décisions sont requises en rapport à sa sécurité. La modélisation du risque barrage comporte une phase qualitative et une

autre quantitative qui consistent respectivement à construire le modèle causal et à déterminer les probabilités.

La construction du modèle causal a permis de représenter les nombreuses interrelations entre les différents mécanismes potentiels de rupture pouvant affecter le barrage tels la submersion et l'érosion interne. Ce modèle consiste en une série de variables, d'états de ces variables et de liens de causalité entre celles-ci. Une catégorisation des variables a été mise au point afin de refléter leur caractère spécifique en ce qui a trait à leur rôle dans la réalisation d'un mécanisme de rupture et aux méthodes utilisées en pratique pour les mesurer et les observer.

La détermination des probabilités conditionnelles pour chacune des variables en rapport à leurs causes a ensuite été réalisée afin de compléter le réseau bayésien pour le barrage du problème d'application. Lorsque les données relatives à une variable sont disponibles en plus grand nombre, les probabilités sont déterminées à l'aide d'outils statistiques. Lorsque les données sont moins nombreuses ou absentes, l'utilisation de modèles mathématiques, d'observations faites sur le terrain et d'études de cas publiées sont considérées afin d'établir les valeurs de probabilités à l'aide du jugement d'ingénieur.

Le modèle causal et la loi de probabilités sous-jacente déterminés dans ce chapitre forment un réseau bayésien qui synthétise et formalise les connaissances incertaines en rapport au barrage étudié. Des calculs d'inférence peuvent alors être réalisés au chapitre suivant à partir de ce réseau afin d'identifier les facteurs contribuant le plus au risque ainsi que les mesures optimales de minimisation de ce risque.

Tableau 6.1: Variables et états servant à définir l'exemple d'application

	États	
	Négatif (faux)	Positif (vrai)
Initiateurs		
niveau du réservoir (RE)	*< 100 m*	*≥ 100 m*
ruissellement en surface (RS)	*< 20 mm/jr*	*≥ 20 mm/jr*
séisme (S)	*< 0,15g*	*≥ 0,15g*
Indicateurs directs		
glissement de masse (GM)	*non*	*oui*
rupture (R)	*non*	*oui*
submersion crête (SC)	*non*	*oui*
tassements en crête (TC)	*< 2 m*	*≥ 2 m*
transport de particules (TP)	*non*	*oui*
venues d'eau parement (VEP)	*non*	*oui*
Indicateurs indirects		
augmentation débit mesuré (ADM)	*non*	*oui*
bris piézomètre (BP)	*non*	*oui*
Variables externes		
sortie non filtrée (SNF)	*non*	*oui*
vandalisme (V)	*non*	*oui*

Tableau 6.2: Table de probabilités du nœud *S*

S < 0,15g	0,9996
S ≥ 0,15g	0,0004

Tableau 6.3: Table de probabilités du nœud *RE*

RE < 100m	0,825
RE ≥ 100m	0,175

Tableau 6.4: Table de probabilités du nœud *RS*

RS < 20 mm/jr	0,98
RS ≥ 20 mm/jr	0,02

Tableau 6.5: Table de probabilités du nœud *VEP*

	RS < 20 mm/jr		*RS* ≥ 20 mm/jr	
	RE < 100 m	*RE* ≥ 100 m	*RE* < 100 m	*RE* ≥ 100 m
VEP = oui	0,1	0,9	0,2	0,99
VEP = non	0,9	0,1	0,8	0,01

Tableau 6.6: Table de probabilités du nœud *TC*

	S < 0,15g	*S* ≥ 0,15g
TC < 2 m	0,99	0,9
TC ≥ 2 m	0,01	0,1

Tableau 6.7: Table de probabilités du nœud *TP*

	VEP = oui		*VEP* = non	
	SNF = oui	*SNF* = non	*SNF* = oui	*SNF* = non
TP = oui	0,9	0,1	0,05	0,01
TP = non	0,1	0,9	0,95	0,99

Tableau 6.8: Calcul des probabilités du nœud *GM*

RS	*RE*	*S*	*P(GM)*	*P(¬GM)*
faux	faux	faux	0	1
vrai	faux	faux	0,01	q_1 = 0,99
faux	vrai	faux	0,07	q_2 = 0,93
faux	vrai	vrai	0,13	$q_2 * q_3$ = 0,87
vrai	vrai	faux	0,08	$q_1 * q_2$ = 0,92
faux	faux	vrai	0,06	q_3 = 0,94
vrai	faux	vrai	0,07	$q_1 * q_3$ = 0,93
vrai	vrai	vrai	0,13	$q_1 * q_2 * q_3$ = 0,87

Tableau 6.9: Table de probabilités du nœud *GM*

	S < 0,15 g				*S* ≥ 0,15 g			
	RS < 20 mm/jr		*RS* ≥ 20 mm/jr		*RS* < 20 mm/jr		*RS* ≥ 20 mm/jr	
	RE < 100 m	*RE* ≥ 100 m	*RE* < 100 m	*RE* ≥ 100 m	*RE* < 100 m	*RE* ≥ 100 m	*RE* < 100 m	*RE* ≥ 100 m
GM = oui	0	0,07	0,01	0,08	0,06	0,13	0,07	0,13
GM =non	1	0,93	0,99	0,92	0,94	0,87	0,93	0,87

Tableau 6.10: Table de probabilités du nœud *SC*

	RE < 100 m				*RE* ≥ 100 m			
	TC < 2 m		*TC* ≥ 2 m		*TC* < 2 m		*TC* ≥ 2 m	
	GM = oui	*GM* = non	*GM* = oui	*GM* = non	*GM* = oui	*GM* = non	*GM* = oui	*GM* = non
SC = oui	0,1	0	0,2	0,1	1	0,1	1	1
SC = non	0,9	1	0,8	0,9	0	0,9	0	0

Tableau 6.11: Table de probabilités du nœud *R*

	TP = oui		*TP* = non	
	SC = oui	*SC* = non	*SC* = oui	*SC* = non
R = oui	1	0,15	1	0,01
R = non	0	0,85	0	0,99

Tableau 6.12: Calcul des probabilités du nœud *BP*

GM	*TC*	*V*	*P(BP)*	*P(¬BP)*
faux	faux	faux	0	1
faux	faux	vrai	0,2	$q_3 = 0,8$
faux	vrai	faux	0,5	$q_2 = 0,5$
faux	vrai	vrai	0,6	$q_2 * q_3 = 0,4$
vrai	faux	faux	0,95	$q_1 = 0,05$
vrai	faux	vrai	0,96	$q_1 * q_3 = 0,04$
vrai	vrai	faux	0,975	$q_1 * q_2 = 0,025$
vrai	vrai	vrai	0,98	$q_1 * q_2 * q_3 = 0,02$

Tableau 6.13: Table de probabilités du nœud *BP*

	TC < 2 m				*TC* ≥ 2 m			
	V = oui		*V* = non		*V* = oui		*V* = non	
	GM = oui	*GM* = non	*GM* = oui	*GM* = non	*GM* = oui	*GM* = non	*GM* = oui	*GM* = non
BP = oui	0,96	0,2	0,95	0	0,98	0,6	0,975	0,5
BP = non	0,04	0,8	0,05	1	0,02	0,4	0,025	0,5

Tableau 6.14: Table de probabilités du nœud *ADM*

	RS < 20 mm/jr		*RS* ≥ 20 mm/jr	
	VEP = oui	*VEP* = non	*VEP* = oui	*VEP* = non
ADM = oui	0,7	0,2	0,95	0,9
ADM = non	0,3	0,8	0,05	0,1

Tableau 6.15: Table de probabilités du nœud *V*

V = oui	0,1
V = non	0,9

Tableau 6.16: Table de probabilités du nœud *SNF*

SNF = oui	0,75
SNF = non	0,25

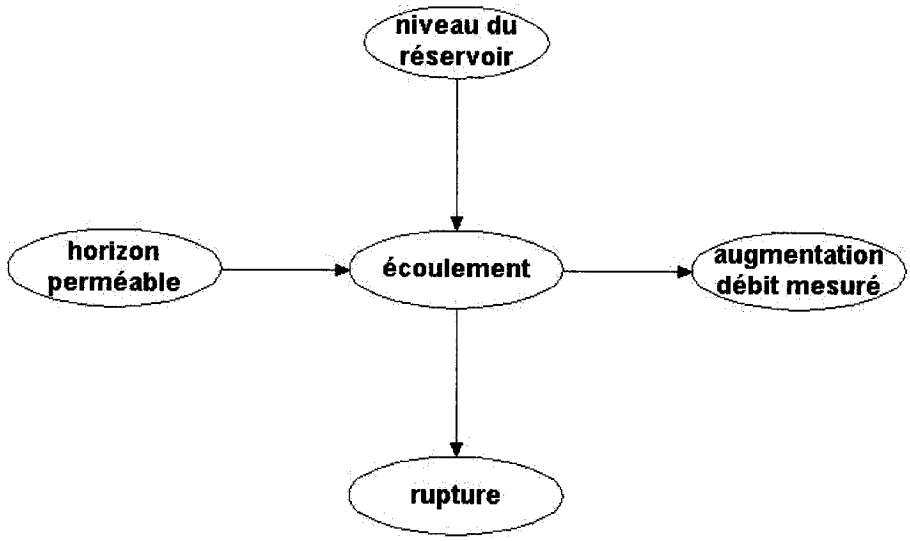


Figure 6.1: Types de variables dans un réseau bayésien

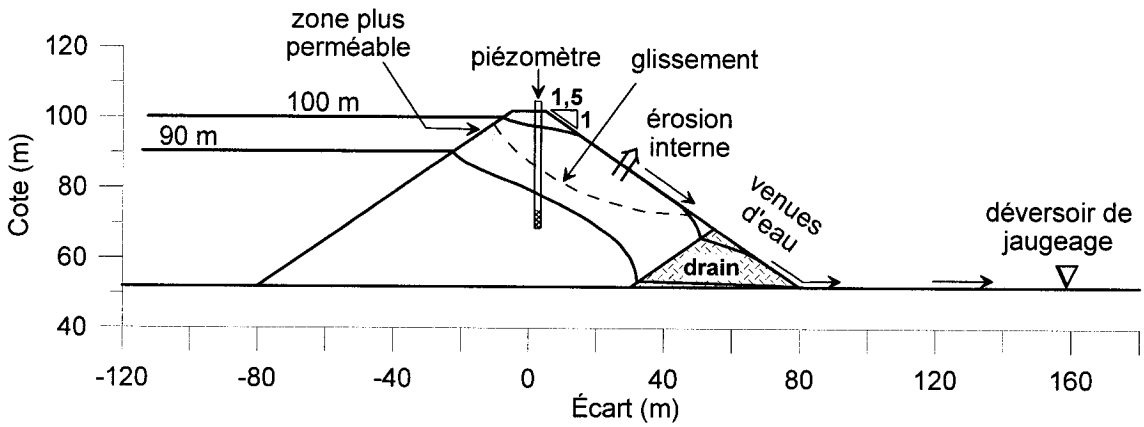


Figure 6.2: Coupe du barrage étudié dans le problème d'application

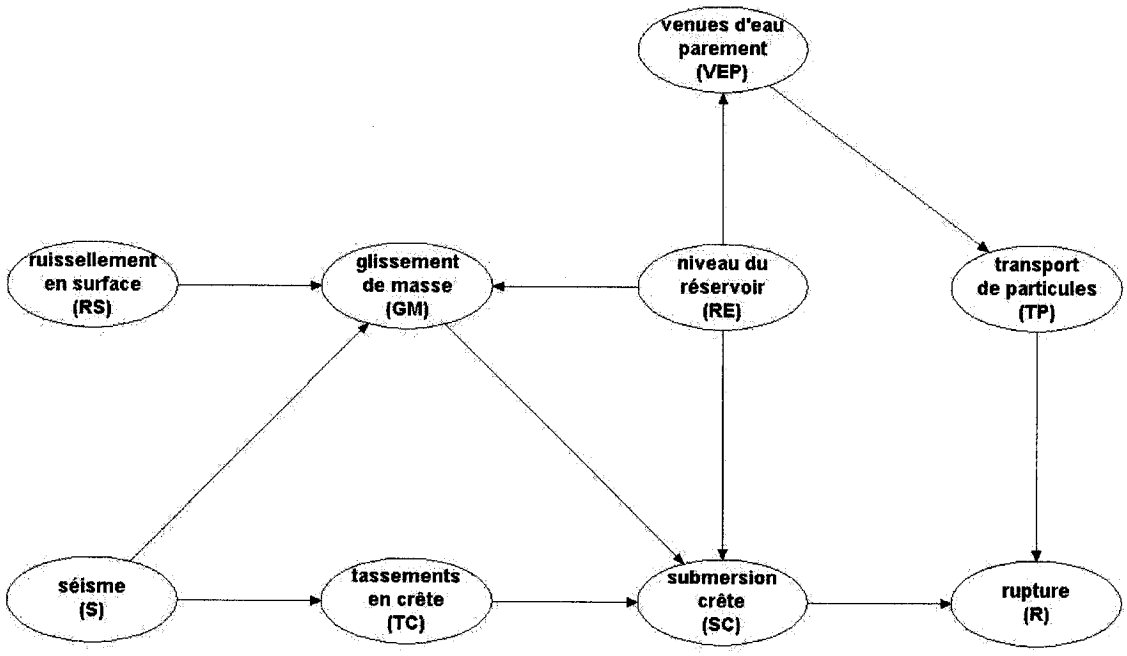


Figure 6.3: Première version du modèle causal pour l'exemple d'application

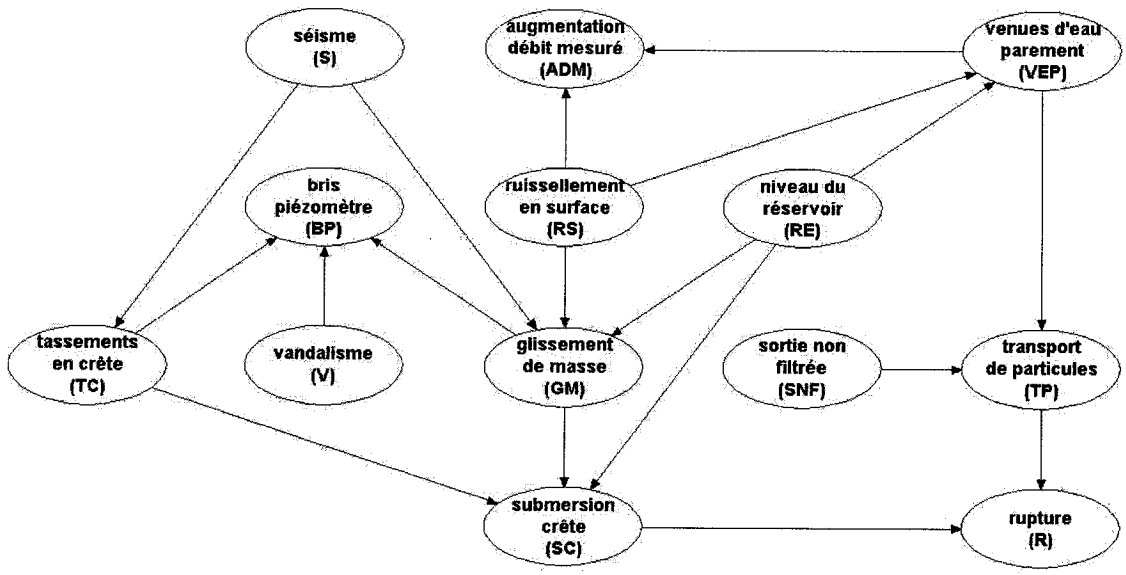


Figure 6.4: Modèle causal pour l'exemple d'application

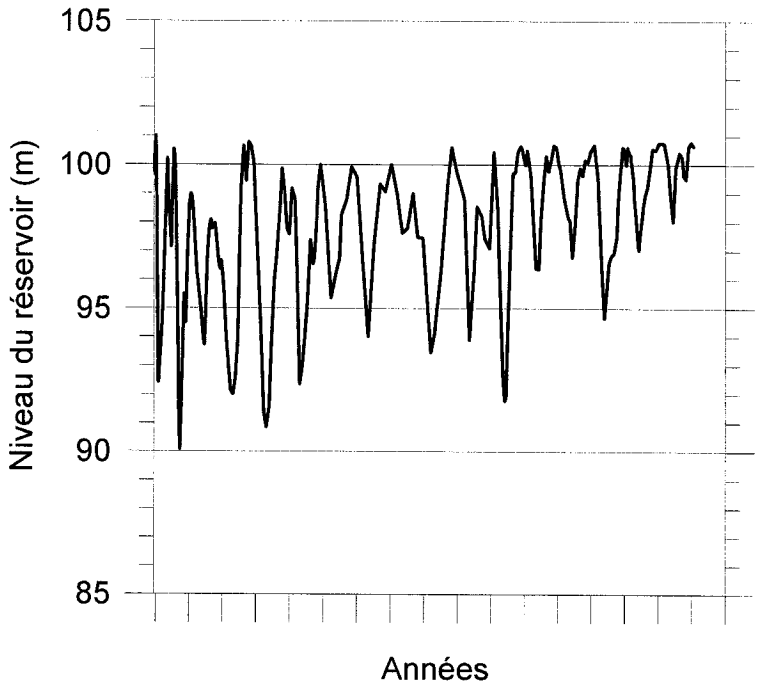


Figure 6.5: Variations du niveau du réservoir

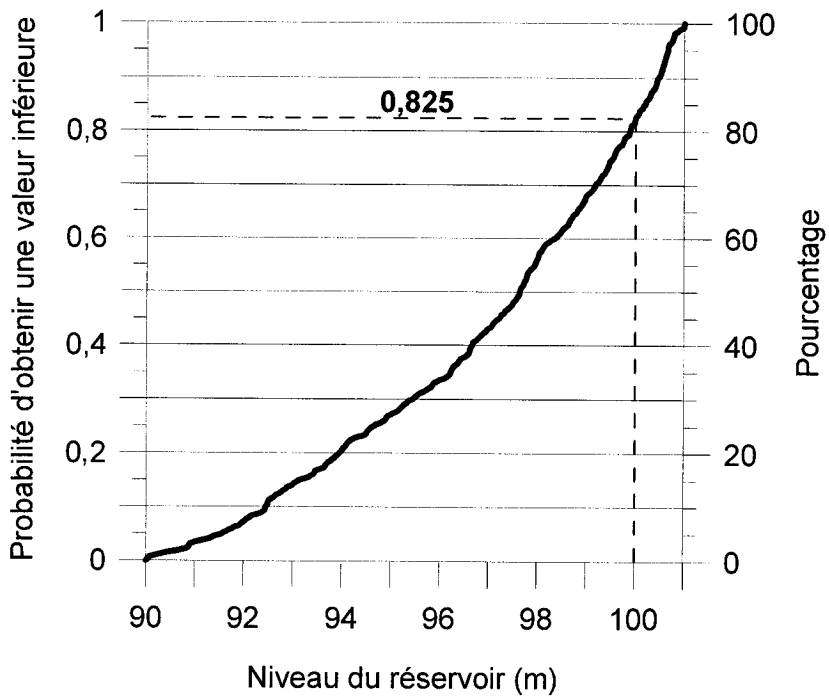


Figure 6.6: Distribution cumulative de probabilités de *RE*

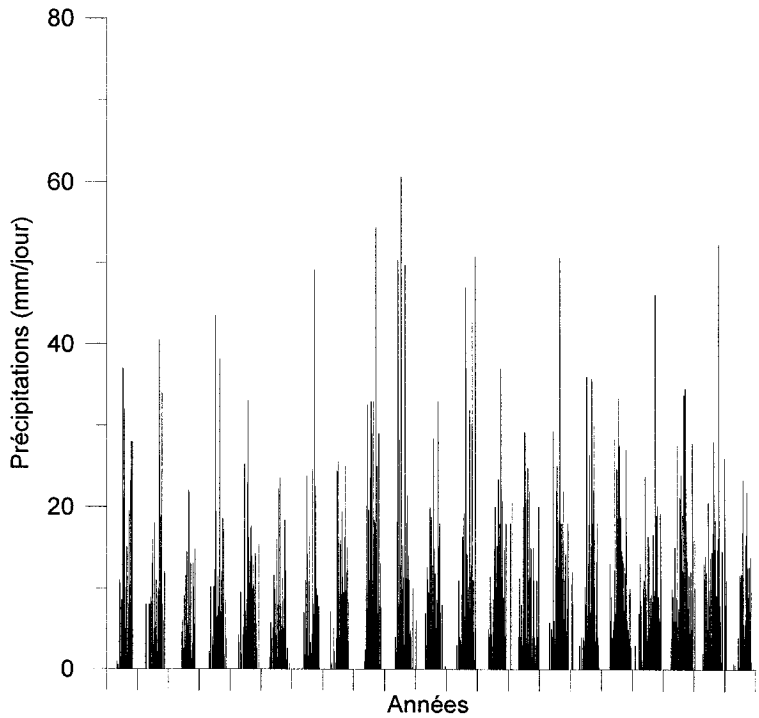


Figure 6.7: Précipitations journalières au site du barrage

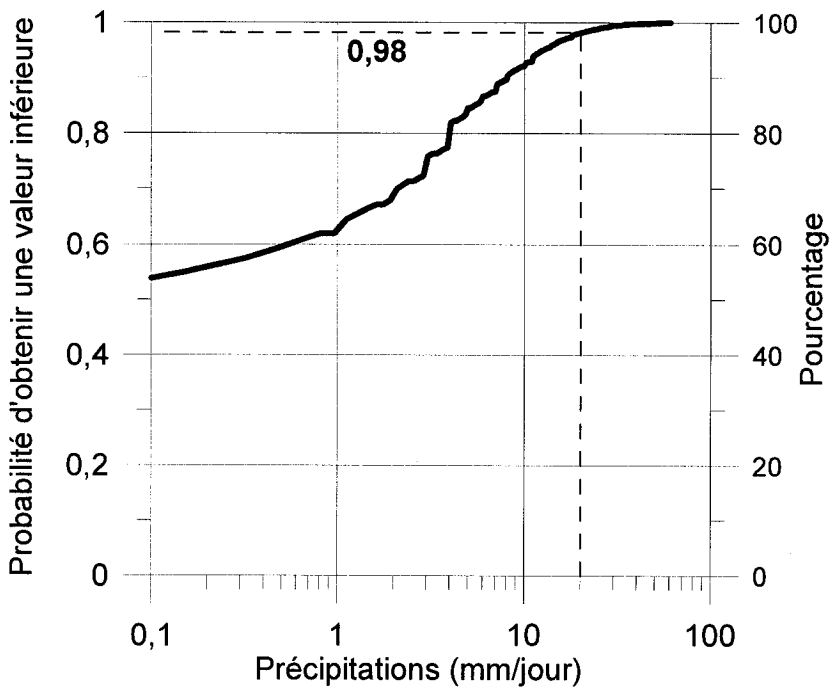


Figure 6.8: Distribution cumulative de probabilités de *RS*

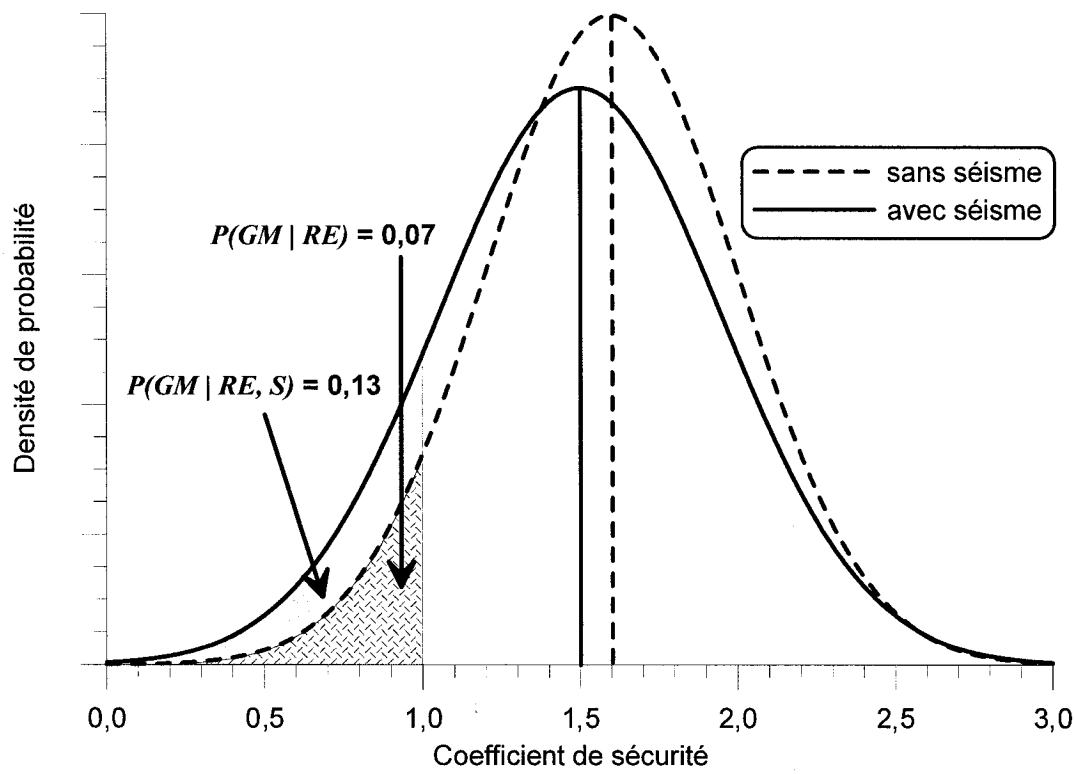


Figure 6.9 Distribution de probabilités des coefficients de sécurité face au glissement de masse

CHAPITRE 7

DÉTERMINATION DES MESURES OPTIMALES DE RÉDUCTION DU RISQUE

7.1 Introduction

L'utilisation première d'un réseau bayésien est l'inférence qui consiste à propager l'effet d'une ou plusieurs informations modifiées au sein du réseau pour en déduire comment sont modifiées les probabilités concernant les autres variables.

Un réseau bayésien consiste en une distribution de probabilités factorisée suivant les relations d'indépendance représentées par le graphe composant le réseau (Becker et Nadim 1999). Cette représentation permet de quantifier les raisonnements faits sur les causalités. L'inférence se ramène donc à effectuer des requêtes sur cette distribution de probabilités. L'interprétation pratique des requêtes est dynamique, il s'agit d'une mise à jour indiquant comment une nouvelle information e change la probabilité d'une hypothèse H.

La propagation de l'effet des changements dans les probabilités est basée sur le théorème de Bayes. La connaissance a priori contenue dans le réseau est transformée en connaissance a posteriori en fonction de la vraisemblance des nouvelles informations par rapport aux informations initiales. Dans un contexte de sécurité des barrages, ces nouvelles informations peuvent provenir d'un fait nouveau dans le comportement d'un ouvrage ou de l'effet de l'implantation d'une mesure structurale ou non structurale.

Les possibilités offertes par les algorithmes d'inférence permettent d'envisager plusieurs formes de requêtes dans les réseaux bayésiens. Aussi, pour certains problèmes particuliers, des requêtes spécifiques peuvent être exprimées à l'aide d'une combinaison de requêtes élémentaires.

Les types de requêtes proposées dans les sections suivantes permettent l'identification des facteurs contribuant le plus au risque barrage, qui est exprimé dans le cadre de cette recherche par la probabilité de rupture, de même que la mise en place des mesures optimales en termes de coûts et de potentiel de réduction du risque. Ces requêtes sont regroupées en deux catégories : la mise à jour des probabilités et les analyses de sensibilité.

De façon générale, la mise à jour des probabilités rend possible la détermination de la conclusion la plus probable reliée à des faits observés. Cette catégorie de requêtes sert à la réalisation de prédictions et de diagnostics.

Les analyses de sensibilité permettent d'identifier les variables dont la connaissance apporterait le maximum d'information. Cette catégorie de requête est utilisée pour déterminer l'action la plus appropriée à effectuer ou l'information la plus pertinente à rechercher.

Les requêtes pour la détermination des mesures optimales de réduction du risque relié au barrage décrit dans l'exemple d'application sont réalisées en utilisant le réseau bayésien construit au Chapitre 6 (voir Figure 6.4 et Tableaux 6.1 à 6.16). Tous les calculs d'inférence présentés dans ce chapitre ont été effectués directement à l'écran à l'aide du logiciel HUGIN EDUCATIONAL (voir Section 4.8.5). L'algorithme utilisé dans ce programme est basé sur la technique des arbres de jonction qui a été décrite à la Section 4.8.4.

7.2 Mise à jour des probabilités

7.2.1 Généralités

Les réseaux bayésiens sont une représentation directe de notre compréhension d'un système et non d'un processus de raisonnement (Pearl et Russell 2000). Les flèches orientées du diagramme représentent des liens causaux et non le flux d'information utilisé pour effectuer les raisonnements. Ces derniers s'opèrent dans les réseaux bayésiens par la propagation d'information dans n'importe laquelle direction.

Il n'y a donc pas d'entrées ni de sorties dans un réseau bayésien. Le réseau peut être utilisé pour déterminer la valeur la plus probable d'un nœud en fonction d'informations connues c'est-à-dire réaliser une prédiction en raisonnant dans le sens cause → effet. Le réseau peut également être utilisé pour connaître la cause la plus probable d'informations connues c'est-à-dire réaliser un diagnostic en raisonnant dans le sens effet → cause (voir Figure 7.1). La symétrie du théorème de Bayes permet cette réversibilité pour les raisonnements entre les effets et les causes.

Le type de requête le plus élémentaire est la détermination de probabilités marginales. Cependant, l'application la plus utile des réseaux bayésiens est le calcul des probabilités conditionnelles d'événements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet.

7.2.2 Probabilités marginales

La détermination de probabilités marginales a pour but de calculer la probabilité d'observer une ou plusieurs variables. La réalisation et l'interprétation de ces calculs sont possibles pour tous les types de variables utilisés dans un contexte de risque barrage. Les

probabilités marginales sont déterminées par le logiciel de calcul en prenant en compte toutes les combinaisons de valeurs possibles des parents des variables considérées.

Par exemple, la probabilité d'observer une augmentation du débit mesuré, *P(ADM)*, est égale à 0,3319. Cette valeur dépend des parents de l'indicateur indirect *ADM* (voir Figure 6.4) qui sont le ruissellement en surface *RS*, qui est un initiateur, et la présence de venues d'eau sur le parement aval *VEP*, qui est un indicateur direct. Cette dernière variable dépend à son tour de l'initiateur niveau du réservoir *RE*, son unique parent.

De la même façon, la probabilité de rupture du barrage est de $P(R) = 0{,}0658$. Cette valeur dépend de tous les noeuds, sauf *V*, et de leurs différentes combinaisons d'état car ils décrivent les mécanismes pouvant mener à la rupture *R*. La présence ou non de vandalisme n'a pas d'effets sur la probabilité de rupture car les nœuds *V* et *R* sont d-séparés si aucun autre noeud n'est instancié dans le réseau.

Il est à noter que la probabilité marginale d'un initiateur tel que *RS* ou *RE* est égale à la probabilité spécifiée dans les tables de probabilités car les initiateurs n'ont normalement pas de parents. Par exemple, la probabilité marginale de *RE* est égale à 0,175 qui est la valeur spécifiée pour *P(RE)* dans la table de probabilités de *RE* (voir Tableau 6.3).

Les calculs de probabilités marginales peuvent aussi être utiles pour tenir compte de plusieurs variables à la fois. Il est alors possible de calculer la probabilité d'occurrence des variables formant un mécanisme de rupture spécifique. Par exemple, la probabilité de rupture du barrage par submersion de la crête suite à un débordement est donnée par $P(RE, SC, R) = 0{,}03$.

De plus si les variables sont indépendantes, c'est-à-dire d-séparées, la probabilité d'occurrence conjointe de ces variables est égale au produit des probabilités marginales individuelles.

Les probabilités marginales pourraient aussi être utilisées à des fins de comparaison. La probabilité de transport de particules *P(TP)* est égale à 0,1997 alors que la probabilité de submersion en crête *P(SC)* est égale à 0,0309. Ces résultats pourraient justifier une intervention prioritaire sur le mécanisme de rupture par érosion interne au détriment de la submersion étant donné la probabilité d'occurrence plus élevée de *TP*. Cependant, dans un contexte de gestion du risque en sécurité des barrages, cette interprétation n'est pas valide.

Étant donné les nombreuses interrelations entre les variables utilisées pour la représentation du risque barrage, les probabilités marginales ne peuvent être utilisées seules pour prioriser les interventions servant à réduire le risque. Dans le cadre de cette recherche, le risque est défini à l'aide de la probabilité de rupture d'un barrage. Les mesures les plus efficaces de réduction du risque sont donc celles qui ont la plus grande influence sur la probabilité de rupture *P(R)*.

Un calcul utilisant les probabilités conditionnelles montre que malgré sa probabilité d'occurrence plus grande, la présence du phénomène de transport de particules a beaucoup moins d'effet sur la probabilité de rupture que la submersion en crête. La probabilité de rupture passe de $P(R) = 0{,}0658$ à $P(R \mid TP) = 0{,}2316$ lorsque le transport de particules est observé alors qu'elle devient certaine, $P(R \mid SC) = 1$, lorsqu'il y a submersion en crête.

La détermination des mesures de réduction du risque les plus efficaces requiert l'établissement d'un classement prioritaire des interventions possibles. Ce classement doit être un exercice de comparaison qui s'appuie sur une base commune à chacune des variables considérées et qui est définie à partir du type de décision à prendre. Pour cette recherche, l'analyse de risque sert d'aide à la décision concernant les interventions à réaliser afin de réduire le risque c'est-à-dire la probabilité de rupture d'un barrage. Ces interventions doivent donc être comparées selon *P(R)*, la probabilité de rupture. Cette

comparaison se fait à l'aide de probabilités conditionnelles et permet de prioriser les interventions en fonction de leur effet sur la rupture. On cherche donc à mettre en parallèle *P(R | intervention1)* et *P(R | intervention2)*.

Ceci implique que la probabilité de rupture n'est pas considérée de façon absolue pour juger du risque posé par un ouvrage. Elle est plutôt considérée comme base de comparaison, ou dénominateur commun, servant à déterminer l'importance relative de chaque élément incertain pouvant causer la rupture et servant à juger de l'efficacité potentielle des mesures structurales ou non structurales envisageables.

L'utilisation de *P(R)* comme dénominateur commun est faite à l'aide de requêtes basées sur les probabilités conditionnelles et lors de la réalisation d'analyses de sensibilité.

7.2.3 Probabilités conditionnelles

7.2.3.1 Prédictions et diagnostics

Dans un contexte de risque barrage, la détermination des probabilités conditionnelles a pour but de calculer la probabilité modifiée d'une hypothèse *H*, constituée d'une ou plusieurs variables, suite à l'observation d'un ensemble de faits nouveaux *e*, constitués d'une ou plusieurs observations dans le comportement d'un barrage et/ou de l'implantation d'une ou plusieurs mesures structurales ou non structurales. En termes probabilistes, il s'agit de calculer *P(H | e)*.

Par exemple, la probabilité d'observer une augmentation du débit mesuré étant donné un niveau de réservoir élevé est donnée par *P(ADM | RE)* = 0,656. Dans ce cas, le raisonnement est de type prédictif (de la cause vers l'effet, de *RE* vers *ADM*, voir Figure 6.4). De la même façon, la probabilité qu'une augmentation de débit soit causée par un

niveau du réservoir élevé est donnée par $P(RE \mid ADM) = 0{,}3458$. Il s'agit alors d'un raisonnement de type diagnostic (de l'effet vers la cause, de *ADM* vers *RE*, voir Figure 6.4).

Les prédictions et diagnostics peuvent aussi se réaliser en considérant plusieurs variables à la fois. Ces calculs sont réalisés à l'aide du théorème des probabilités conditionnelles où la probabilité d'occurrence de deux événements dépendants X et Y est donnée par $P(X, Y) = P(X \mid Y) * P(Y)$ (voir Équation 4.5).

Il est alors possible de prédire la probabilité d'un mécanisme de rupture étant donné un ou plusieurs initiateurs. Par exemple, étant donné un niveau de réservoir élevé et la présence de ruissellement en surface, la probabilité de rupture du barrage par glissement de masse (ce mécanisme est décrit par les indicateurs directs *GM*, *SC* et *R*) est donnée par l'Équation 7.1:

$$P(GM,SC,R \mid RE,RS) = \frac{P(GM,SC,R,RE,RS)}{P(RE,RS)} = \frac{2{,}8*10^{-4}}{3{,}5*10^{-3}} = 0{,}08 \qquad (7.1)$$

Le théorème des probabilités conditionnelles permet aussi de faire des calculs de diagnostic. Par exemple, si l'hypothèse de rupture est faite, la probabilité qu'elle soit causée par un glissement de masse suite à un séisme est donnée par l'Équation 7.2:

$$P(S,GM,SC \mid R) = \frac{P(S,GM,SC,R)}{P(R)} = \frac{1{,}1*10^{-5}}{0{,}0658} = 1{,}7*10^{-4} \qquad (7.2)$$

Les propriétés de d-séparation des variables d'un réseau influencent les calculs de probabilités conditionnelles. Par exemple, à la Figure 6.4, si *VEP* est connu alors *RE* et *TP* sont d-séparés car dans une connexion en série, lorsqu'une variable intermédiaire est connue, les parents et les descendants de cette variable sont indépendants. Dans ce cas,

on a $P(TP \mid VEP) = P(TP \mid VEP, RE)$. Basé sur le modèle causal de la Figure 6.4, si des venues d'eau sont observées sur le parement aval, la connaissance du niveau du réservoir n'apporterait aucune information supplémentaire sur la possibilité d'observer un phénomène de transport de particules.

7.2.3.2 Suffisance et redondance

L'observation de chacune des variables d'un réseau n'est pas toujours requise pour obtenir un gain d'information significatif par rapport à une autre variable. Il est nécessaire d'identifier les variables apportant le maximum d'information car les coûts et les efforts requis en pratique pour leur observation peuvent être considérables. Le défi consiste alors à trouver le fait e', un sous-ensemble de e, qui permette un gain maximum d'information par rapport à l'hypothèse H.

Ce type d'analyse, nommé inférence intercausale (Becker et Nadim 1999), est utile afin d'évaluer l'influence des causes d'un effet commun. Les concepts de suffisance et de redondance sont utilisés pour l'inférence intercausale et permettent de choisir les observations à réaliser en priorité pour l'obtention d'un gain d'information maximal.

Étant donné un ensemble de causes e, le sous-ensemble e' est considéré suffisant si $P(H \mid e')$ ne diffère de $P(H \mid e)$ que dans une faible proportion. Il est minimal suffisant si aucun sous-ensemble de e' n'est suffisant.

Le concept de suffisance peut s'appliquer de la façon suivante: après avoir observé un séisme et un niveau de réservoir élevé, est-il nécessaire d'observer aussi un ruissellement en surface afin de prédire de façon plus fiable un glissement de masse? Le problème revient à comparer $P(GM \mid S, RS, RE) = 0{,}13$ avec $P(GM \mid S, RE) = 0{,}13$. Dans ce cas, le sous-ensemble $e' = \{S, RE\}$ est suffisant et l'observation de RS, le ruissellement en

surface, n'est pas requis pour la prédiction. Le sous-ensemble e' est aussi minimal suffisant car ni S ou RE considérés individuellement ne sont suffisants. L'observation de S et RE est donc requise mais suffisante pour faire la prédiction d'un glissement de masse de la façon la plus fiable possible.

Aussi, si deux sous-ensembles e' et e'' du fait e sont suffisants et que $P(H \mid e')$ ne diffère de $P(H \mid e'')$ que dans une faible proportion, alors les éléments qui ne sont pas communs à e' et e'' sont redondants.

Par exemple, les causes d'un bris de piézomètre forment l'ensemble $e = \{TC, V, GM\}$ dans lequel les sous-ensembles $e' = \{V, GM\}$ et $e'' = \{TC, GM\}$ sont suffisants. En sachant que $P(BP \mid V, GM) \approx P(BP \mid TC, GM)$, il est possible de conclure que V et TC sont redondants. Donc, étant donné un glissement de masse, l'observation d'un tassement important en crête et du vandalisme n'apporte pas plus d'information pour la prédiction d'un bris de piézomètre. Un maximum d'information peut être obtenu, après avoir observé un glissement de masse, en observant soit TC seulement ou soit V seulement.

7.2.3.3 Explication la plus probable

Les algorithmes d'inférence permettent de rechercher la combinaison de valeurs des variables non observées qui maximise leur probabilité d'occurrence ou qui maximise la probabilité des variables observées. Ce type de requête est surtout utilisé pour rechercher l'explication la plus probable des observations réalisées. L'algorithme est le même que celui utilisé pour les prédictions et les diagnostics sauf qu'il comporte en plus des fonctions servant à générer automatiquement des combinaisons de valeurs et d'autres permettant de maximiser les probabilités.

Il est alors possible de prédire la combinaison d'observations ayant la probabilité d'occurrence maximale et ainsi d'identifier le mécanisme de rupture le plus probable. Aussi, en faisant l'hypothèse d'une rupture, il est possible d'identifier le mécanisme contribuant le plus au risque de rupture et ainsi d'établir le diagnostic le plus probable.

Par exemple, la combinaison de valeurs la plus probable permettant de prédire une rupture est donnée par *RE, VEP*, *TP* et *R* qui représente le mécanisme de rupture par érosion interne. La probabilité de rupture par érosion interne est égale à $P(RE, VEP, TP, R) = 0{,}0327$. L'application du théorème des probabilités conditionnelles permet aussi de calculer qu'étant donné une rupture, la probabilité que cette dernière soit causée par érosion interne est donnée par:

$$P(RE,VEP,TP \mid R) = \frac{P(RE,VEP,TP,R)}{P(R)} = \frac{0{,}0327}{0{,}0658} = 0{,}497 \tag{7.3}$$

Donc, en termes prédictifs, le mécanisme de rupture le plus probable est l'érosion interne avec une probabilité de 0,0327 et le diagnostic le plus probable d'une rupture serait l'érosion interne avec une probabilité de 0,497.

Il faut noter que dans ce dernier exemple, le mécanisme de rupture le plus probable n'est décrit en ne considérant que l'initiateur et les indicateurs directs car ces types de variables sont les seuls à être indispensables à la réalisation du mécanisme. Cependant, les valeurs de probabilités de l'indicateur indirect *ADM* et la variable externe *SNF* (voir Figure 6.4) influencent aussi les probabilités calculées car ces variables ne sont pas d-séparées de *RE* et des indicateurs directs servant à décrire le phénomène d'érosion interne. La valeur de $P(RE, VEP, TP, R) = 0{,}0327 = P(e)$ tient compte des 4 combinaisons d'état de *ADM* et *SNF* de la façon suivante:

$$P(e) = \sum_{ADM,SNF} P(e, ADM, SNF) \tag{7.4}$$

7.2.4 Conflits potentiels entre les observations et le réseau bayésien

Lorsque plusieurs variables sont instanciées dans un réseau bayésien, il existe une possibilité que les observations saisies soient en contradiction avec les valeurs de probabilités spécifiées dans les tables. Il y a alors conflit potentiel entre les observations et la logique contenue dans le réseau bayésien.

Si l'observation e_1 augmente fortement la probabilité d'occurrence de l'observation e_2, alors $P(e_1, e_2) > P(e_1) * P(e_2)$. Pour n observations, il peut y avoir un conflit entre le modèle causal et les observations lorsque (Lauritzen et Spiegelhalter 1988):

$$P(e_1, e_2, ..., e_n) < \prod_{i=1}^{n} P(e_i) \tag{7.5}$$

Par exemple, à la Figure 6.4, l'observation des causes *RE*, *RS* et *S* augmente la probabilité de l'effet *GM*. Si *GM* est observé malgré l'absence confirmée de *RE* et de *RS*, il y a possibilité de conflit car selon l'Équation 7.5:

$$P(\neg RE, \neg RS, GM) < P(\neg RE) * P(\neg RS) * P(GM) \tag{7.6}$$

$$1{,}94 * 10^{-5} < 0{,}825 * 0{,}98 * 0{,}012$$

La valeur de $P(\neg RE, \neg RS, GM)$ indique la faible probabilité d'occurrence des observations faites sur *GM*, *RE* et *RS*. Les observations doivent donc être vérifiées afin de déterminer s'il s'agit d'un conflit réel ou de l'occurrence d'une rare combinaison d'événements.

Dans ce dernier exemple, le conflit pourrait être résolu par l'observation de *S* qui est la troisième et dernière cause possible de *GM*:

$$P(\neg RE, \neg RS, GM, S) > P(\neg RE) * P(\neg RS) * P(GM) * P(S) \quad (7.7)$$

$$1{,}94 * 10^{-5} > 0{,}825 * 0{,}98 * 0{,}012 * 0{,}0004$$

Avec l'absence confirmée de *S*, la valeur de P(GM | ¬RE, ¬RS, ¬S) serait égale à zéro car selon le réseau bayésien, il est impossible d'observer un glissement de masse sans observer au moins une des trois causes potentielles (voir Tableau 6.9).

Si *GM* était quand même observé malgré l'absence des trois causes possibles, il s'agirait alors d'un conflit car selon l'Équation 7.5:

$$P(\neg RE, \neg RS, \neg S, GM) < P(\neg RE) * P(\neg RS) * P(\neg S) * P(GM) \quad (7.8)$$

$$0 < 0{,}825 * 0{,}98 * 0{,}9996 * 0{,}0125$$

Ce conflit ne peut être résolu par l'observation d'une autre variable du réseau. Il représente alors une inconsistance entre la réalité et le réseau qui doit être un modèle de la réalité. Dans ce cas, la résolution du conflit requiert la modification du modèle causal pouvant comprendre l'ajout des causes manquantes d'un glissement de masse.

L'identification de conflits potentiels est réalisée automatiquement par le logiciel HUGIN lors de l'instanciation des variables pour la réalisation de requêtes.

7.3 Analyses de sensibilité

7.3.1 Généralités

Les calculs d'inférence peuvent également être utilisés pour effectuer des analyses de sensibilité qui permettent de juger de l'impact des observations et de choisir les alternatives maximisant le gain d'information.

Dans un contexte d'exploitation sécuritaire des barrages, les analyses de sensibilité sont essentielles pour déterminer l'action ou la séquence d'actions les plus appropriées afin de diminuer la probabilité de rupture *P(R)*. Aussi, les calculs d'inférence contribuent à l'identification de la solution optimale en termes de coûts et d'effet sur la réduction de *P(R)*. Les concepts d'impact, de criticité et d'indice de priorité ont été mis au point afin d'identifier les facteurs contribuant le plus au risque ainsi que les mesures optimales de minimisation de ce risque.

7.3.2 Impact, criticité et indice de priorité

Étant donné un fait $e = \{e_1, e_2, ..., e_n\}$ composé d'une série d'observations e_n dans un réseau bayésien, l'analyse de sensibilité revient à calculer l'impact du fait e sur la probabilité de l'hypothèse H relative à la réalisation ou la non réalisation d'une ou plusieurs variables du réseau. Pour les calculs reliés à la réduction du risque barrage, l'hypothèse H est normalement la rupture de l'ouvrage. Les calculs d'impact sont donc réalisés en considérant $H = R$. Le fait e comprend des variables en rapport au risque de rupture sur lesquelles des interventions peuvent être envisagées.

L'impact d'un fait e sur l'hypothèse de rupture R peut se formaliser de la façon suivante:

$$impact(e,R) = \frac{P(R) - P(R \mid e)}{P(R)} \tag{7.9}$$

où

$0 < impact\ (e,R) \leq 1$	lorsque le fait observé diminue la probabilité de rupture
$impact\ (e,R) = 0$	lorsque le fait n'a pas d'influence sur la rupture
$impact\ (e,R) < 0$	lorsque le fait observé augmente la probabilité de rupture

Le concept d'impact peut aider un propriétaire de barrages à déterminer quelles sont les actions à prendre pour diminuer le risque de rupture de façon optimale. La détermination de ces actions se fait normalement en deux étapes successives qui sont l'identification des variables les plus significatives et le choix des interventions à réaliser pour réduire le risque.

Les valeurs d'impact ne peuvent cependant pas être utilisées seules pour prioriser les interventions servant à diminuer le risque. Normalement, celles-ci doivent non seulement être envisagées en premier sur les variables les plus significatives en termes d'impact mais aussi sur celles qui sont les plus susceptibles de survenir. Le concept de criticité tient compte de l'impact d'un fait et de sa probabilité d'occurrence et permet l'identification de variables nécessitant une intervention prioritaire.

$$criticité(e,R) = \mid impact(e,R) * P(e) \mid \tag{7.10}$$

Dans un premier temps, les variables sur lesquelles des mesures de réduction du risque devraient être envisagées initialement sont identifiées par les calculs d'impact et de criticité. L'hypothèse de rupture a un caractère non désirable, les variables les plus

critiques sont donc reliées aux faits *e* qui augmentent *P(R)*. Dans ce cas, l'impact recherché est négatif et est noté $impact^{-}(e,R)$ dans les Équations 7.9 et 7.10. Ces équations permettent alors d'identifier les variables contribuant le plus à la possibilité de rupture. Un impact maximal négatif et une criticité maximale indiquent les variables sur lesquelles des interventions pourraient être envisagées en priorité.

Dans un deuxième temps, les calculs doivent permettent de juger l'effet potentiel d'une mesure structurale ou non structurale sur l'hypothèse de rupture. Les interventions les plus efficaces sont alors reliées aux faits *e* qui diminuent le plus *P(R)*. Dans ce cas, l'impact recherché devient positif et est noté $impact^{+}(e,R)$ dans l'Équation 7.9. Cette dernière permet alors d'identifier les variables sur lesquelles des interventions ont le meilleur potentiel de réduction du risque de rupture.

Le calcul de la criticité n'est cependant pas utile dans cette deuxième étape. Lors de la détermination des interventions potentiellement les plus efficaces, la valeur de *P(e)* est toujours égale à 1 ou à 0 car l'analyse de sensibilité a alors pour but d'étudier la réalisation ou la non réalisation des interventions.

En pratique, la réalisation d'interventions servant à réduire le risque comporte toujours des coûts. Normalement, un propriétaire de barrages cherche à optimiser ses investissements en réalisant en priorité les travaux offrant le plus grand potentiel de réduction du risque pour un coût minimum. L'intervention optimale est donc celle qui maximise l'indice de priorité c'est-à-dire le ratio entre l'impact positif de l'intervention et son coût de réalisation.

$$indice\_priorité(e,R) = \frac{impact^{+}(e,R)}{coût(e)} \tag{7.11}$$

L'importance des analyses de sensibilité est illustrée dans les sections suivantes par des exemples basés sur le réseau bayésien de la Figure 6.4.

Bien que dans la suite du texte seule l'hypothèse de rupture soit considérée, les analyses de sensibilité peuvent se réaliser pour une hypothèse H quelconque reliée à la réalisation ou non réalisation d'une ou plusieurs variables du réseau. L'interprétation des valeurs d'impact, de criticité et de priorité doit alors tenir compte du caractère désirable ou non désirable de l'hypothèse formulée.

7.3.3 Détermination de l'impact et de la criticité des variables

La détermination de la mesure optimale de réduction du risque de rupture requiert en premier lieu l'identification des variables les plus critiques par rapport à l'hypothèse $H = R$. Selon les calculs déjà réalisés à la Section 7.2.2, la probabilité marginale de rupture $P(R)$ est égale à 0,0658. L'observation d'une des autres variables du réseau peut modifier à divers degrés cette probabilité.

Le Tableau 7.1 montre l'impact et la criticité de faits e qui augmentent la valeur de $P(R)$. Pour cet exemple, les faits e ne concernent que l'observation individuelle de chacune des variables du réseau. Les résultats sont classés en ordre décroissant de criticité et les initiateurs de rupture sont indiqués en caractères gras.

Les résultats obtenus montrent que l'initiateur le plus critique et aussi celui ayant le plus grand impact sur la probabilité de rupture est *RE*, le niveau du réservoir. Le ruissellement et les séismes sont beaucoup moins critiques. En première analyse, les mesures de réduction de risque devraient donc surtout être dirigées vers les mécanismes de rupture initiés par le niveau du réservoir.

La submersion en crête *SC* et le glissement de masse *GM* sont les variables ayant l'impact négatif le plus important sur la probabilité de rupture. Ce résultat provient de l'hypothèse faite lors de la définition de *SC* qui spécifie une rupture certaine en cas de submersion (voir Tableau 6.11). Aussi, les probabilités évaluées pour *GM* font en sorte qu'en cas de glissement, la probabilité de submersion, et donc de rupture, devient très grande (voir Tableau 6.10). Cependant, étant donné leur faibles probabilités d'occurrence, il n'est peut être pas avantageux de réaliser en priorité des interventions n'ayant un effet direct que sur ces variables.

Les trois variables les plus critiques sont des indicateurs directs reliés aux mécanismes de rupture par érosion interne (*VEP* et *TP*) et l'initiateur de ce mécanisme (*RE*). La submersion de l'ouvrage (*SC*) et les deux indicateurs indirects (*ADM* et *BP*) figurent aussi parmi les variables les plus critiques.

7.3.4 Variables ayant le plus grand potentiel de réduction du risque

Une intervention sur chacune des variables les plus critiques permettrait de réduire de façon significative la probabilité de rupture. L'impact positif de la réalisation de ces travaux sur la probabilité de rupture est indiqué au Tableau 7.2. Il arrive souvent qu'une intervention influence plusieurs variables qui ont chacune à leur tour un effet sur la probabilité de rupture. Les calculs prennent toujours en compte les effets combinés des interventions sur la probabilité de rupture.

Le Tableau 7.2 indique que les travaux servant à prévenir les venues d'eau sur le parement aval auraient un effet maximal sur la réduction du risque de rupture. La prévention du transport de particules, d'un niveau de réservoir élevé et de la submersion en crête auraient aussi un effet significatif.

Une intervention sur l'initiateur (*RE*) et les indicateurs directs (*VEP*, *TP* et *SC*) aurait une influence directe sur la probabilité de rupture et donc la sécurité de l'ouvrage. Cependant, les impacts positifs calculés pour les indicateurs indirects (*ADM* et *BP*) doivent être interprétés différemment car une intervention sur ces derniers ne prévient pas le déroulement d'un mécanisme de rupture et ne rend donc pas l'ouvrage plus sécuritaire. L'effet des interventions sur les indicateurs indirects est vu à la Section 7.3.6.

7.3.5 Alternatives de réduction du risque

Les paragraphes suivants décrivent les interventions, désignées par I_n, pouvant être envisagées sur les initiateurs, les indicateurs directs et les variables externes afin de réduire la probabilité de rupture de l'ouvrage. Il est supposé que les travaux réalisés en relation avec une variable annulent la possibilité d'occurrence de cette variable. Cette hypothèse pourrait être assouplie en pratique dans certains cas où des statistiques de fiabilité sont disponibles. Par exemple, la probabilité de défaillance est de l'ordre de 10^{-4} pour des vannes d'évacuateur en bon état (Australian Committee on Large Dams [ANCOLD] 2001).

La prévention de venues d'eau sur le parement aval du barrage s'effectue en imperméabilisant l'ouvrage ou en réduisant la cote maximale d'exploitation du réservoir à 90 m (I_1). L'imperméabilisation peut être réalisée par la construction d'un parement amont en béton sur toute la hauteur de l'ouvrage (I_2) ou par la mise en place d'une paroi plastique en coupure partielle par excavation en tranchée à partir de la crête jusqu'à une cote inférieure à 90 m (I_3). Il faut noter que le réservoir doit être vidangé lors de la réalisation de I_2. Aussi, la réalisation de I_3 a pour effet d'augmenter la résistance au cisaillement de la partie supérieure de la crête et ainsi annuler la possibilité de glissement de masse.

L'excavation de la zone plus perméable (voir Figure 6.2) et la reconstruction de la partie supérieure de l'ouvrage (I_4) prévient aussi l'apparition de venues d'eau sur le parement aval. Le niveau du réservoir doit être abaissé durant les travaux. L'intervention I_4 a aussi pour effet d'annuler la possibilité de tassements en crête supérieurs à 2 m car les matériaux liquéfiables ne seraient plus présents dans l'ouvrage.

Normalement, la prévention de phénomènes de transport de particules (*TP*) se fait en utilisant les deux lignes de défense qui sont le contrôle des gradients d'écoulement dans l'ouvrage et la présence de filtres aux points de sortie de l'écoulement. La réalisation d'une ou plusieurs des interventions décrites précédemment pour la prévention des venues d'eau a aussi pour effet de contrôler les gradients d'écoulement. La filtration de l'écoulement peut être réalisée en intervenant sur la variable sortie non filtrée (*SNF*) par la mise en place d'une zone filtre sablonneuse recouvrant tout le parement aval de l'ouvrage (I_5). La réalisation de I_5 en utilisant une pente plus douce de 2H : 1V a aussi pour effet d'augmenter le coefficient de sécurité face au glissement et d'annuler la probabilité d'occurrence de *GM*.

Même si les gradients et la filtration de l'écoulement sont contrôlés, il existe une faible possibilité de transport de particules car la valeur de $P(TP \mid \neg VEP, \neg SNF)$ a été évaluée à 0,01 (voir Tableau 6.7). Cette probabilité tient compte de facteurs externes tels l'influence négative sur l'écoulement et la sécurité de l'ouvrage de la pénétration de racines d'arbres dans le parement aval. La réalisation de travaux de contrôle de la végétation (I_6) en plus des interventions relatives à l'écoulement (I_1 à I_4) et à la filtration (I_5) permet d'annuler la possibilité de transport de particules.

Le contrôle du niveau du réservoir se fait principalement à l'aide d'un évacuateur de crue. Des travaux de réfection aux mécanismes de levage des vannes de l'évacuateur (I_7) permettent de réagir plus rapidement et efficacement lors d'une crue et empêchent le

dépassement de la cote maximale de 100 m du niveau du réservoir. Le niveau du réservoir doit être abaissé durant la réalisation de ces travaux.

Le maintien du niveau du réservoir à une cote égale ou inférieure à 90 m, c'est-à-dire sous la zone plus perméable du barrage, nécessite la construction d'un nouvel évacuateur de crue (I_1) impliquant une vidange partielle du réservoir durant les travaux. Comme mentionné précédemment, la réalisation de cette intervention annule la possibilité de venues d'eau sur le parement aval et de submersion en crête. Le maintien du réservoir à une cote égale ou inférieure à 90 m a aussi pour effet de diminuer de façon permanente la quantité d'énergie produite par la centrale hydroélectrique située près du barrage.

La probabilité de submersion en crête est considérablement réduite lorsque le niveau du réservoir ne dépasse pas la cote 100 m (I_7). Cette probabilité devient nulle si en plus, un seuil déversant est construit sur une section de l'ouvrage. Le remblai au droit du seuil résisterait à l'érosion par la mise en place d'une protection en béton et/ou gabions en surface de la crête, du parement aval et du pied aval (I_8). Le niveau du réservoir doit être abaissé durant la réalisation de ces travaux. Il a été jugé que le contrôle du niveau du réservoir ne peut être réalisé uniquement par un seuil déversant. Aussi, un seuil n'est pas nécessaire si le réservoir est maintenu à une cote égale ou inférieure à 90 m (I_1).

Le Tableau 7.3 résume les interventions possibles et présente une évaluation de leur coût de construction. Certaines interventions impliquent une baisse du niveau du réservoir lors de la réalisation des travaux. Les pertes de revenus liées à la diminution de la production hydroélectrique durant la réalisation des interventions sont ajoutées au coût de construction. Les pertes récurrentes reliées à I_1 ne sont pas prises en compte.

La réalisation d'une ou plusieurs des interventions correspond à une alternative A qui permet d'annuler la probabilité d'occurrence de certaines variables Va ce qui a pour effet de diminuer la probabilité de rupture. En termes probabilistes, l'effet des alternatives est

quantifié par $P(R \mid \neg Va)$. Cette dernière valeur est utilisée pour le calcul de l'impact positif de la réalisation de chacune des alternatives sur le risque de rupture. Le coût total d'une alternative est ensuite considéré afin de calculer l'indice de priorité qui sert à déterminer l'alternative optimale c'est-à-dire celle offrant le plus grand potentiel de réduction du risque pour le coût minimal.

Le Tableau 7.4 montre les alternatives considérées et leur effet, en termes probabilistes, sur la probabilité de rupture. Le Tableau 7.5 montre les valeurs d'impact positif déterminés à l'aide des probabilités calculées au Tableau 7.4. Les indices de priorité ont ensuite été calculés avec le coût total en M$.

Les alternatives optimales en termes de coûts et de potentiel de réduction du risque de rupture sont celles qui ont les indices de priorité les plus élevés. Elles sont résumées au Tableau 7.6.

La mesure optimale de réduction du risque est la réfection de l'évacuateur de crue. Le coût relativement faible de cette intervention de même que son effet important sur le maintien de la cote maximale d'exploitation à 100 m expliquent en grande partie ce résultat.

Cependant, une analyse technique et économique plus détaillée de A_6 pourrait révéler que la réfection de l'évacuateur implique non seulement des travaux sur les mécanismes de levage des vannes mais aussi des modifications au niveau de l'accès à la structure et une diminution du niveau du réservoir sur une période plus longue que prévue ce qui entraînerait des coûts de construction et des pertes en production supplémentaires. Ces coûts plus importants pourraient même rendre l'alternative A_6 moins attrayante.

La Figure 7.2 montre les variations de l'indice de priorité en fonction du coût total pour les trois premières alternatives du Tableau 7.6. La Figure 7.2 considère des variations de

± 1 M$ par rapport aux coûts totaux indiqués au Tableau 7.5. La Figure 7.2 indique que si les coûts de réfection de l'évacuateur dépassent 2,4 M$, la mise en place d'un filtre aval peut devenir l'alternative optimale en termes de coûts et de réduction du risque.

La construction d'un filtre aval et d'une paroi plastique figurent aussi parmi les mesures optimales de réduction du risque. Même si ces alternatives ont un indice de priorité moins élevé que A_6, elles ont l'avantage de pouvoir être réalisées sans réduire le niveau du réservoir. Les contraintes environnementales reliées à une diminution du niveau du réservoir, comme par exemple une navigabilité réduite ou la perte de zones de frai, seraient donc éliminées ce qui pourrait faire en sorte que les alternatives A_3 et A_5 soient privilégiées.

L'alternative A_5 est plus facile à réaliser que l'alternative A_3 car la mise en place d'un filtre ne requiert que de l'équipement lourd conventionnel alors que l'excavation d'une paroi plastique nécessite de l'équipement et du personnel plus spécialisé. Aussi, des travaux d'excavation dans un barrage en exploitation peuvent avoir des impacts négatifs au niveau de la sécurité de l'ouvrage. Ces facteurs peuvent faire en sorte que A_5 soit privilégiée au dépens de A_3 même si les indices de priorité sont à peu près semblables pour les deux alternatives.

L'impact positif de deux alternatives réalisées conjointement n'est pas nécessairement égal à la somme des impacts individuels. Pour l'exemple étudié, l'impact positif conjoint de A_5 et A_6, désigné par A_{15}, est plus faible que la somme des impacts individuels (voir Tableau 7.5).

De plus, la réduction optimale du risque en terme de coûts ne se fait pas toujours en réalisant des alternatives qui touchent le plus grand nombre possible de variables. Par exemple, l'alternative A_7 touche 5 variables (voir Tableau 7.4) et a le plus grand potentiel de diminution de la probabilité de rupture. En dépit de ce fait, l'indice de priorité obtenu

est parmi les plus faibles à cause des coûts relativement élevés reliés à A_7 (voir Tableau 7.5).

En général, en ne considérant que les aspects techniques et financiers d'un problème, la réalisation de travaux ciblés est plus efficace en termes de réduction du risque que la réalisation de toutes les alternatives envisageables car les coûts et les effets sur le risque ne sont pas nécessairement additifs.

En effet, il peut arriver que les coûts d'un ensemble d'interventions soient différents de la somme des coûts individuels. Par exemple, il a été vu que les pertes en énergie reliées à I_4 et I_7 n'ont pas a être comptabilisées deux fois (voir Tableau 7.5) car il a été supposé que les travaux reliés à ces interventions pouvaient être réalisés simultanément.

Le concept de suffisance vu à la Section 7.2.3.2 est utile pour le choix des interventions à inclure dans les alternatives à considérer pour les calculs d'indices de priorité. Par exemple, le Tableau 7.4 montre que la valeur de $P(R \mid \neg RE, \neg VEP)$, (alternative A_1), est égale à celle de $P(R \mid \neg RE, \neg VEP, \neg GM)$, (alternative A_{12}), indiquant que le fait $e = \{\neg RE, \neg VEP\}$ est suffisant. Le fait e est même minimal suffisant car $\neg RE$ et $\neg VEP$ ne sont pas suffisants. Les noeuds *RE* et *VEP* devraient donc être considérées ensemble sans tenir compte de *GM* ce qui simplifierait les analyses économiques requises pour les calculs d'indices de priorité car A_{12} n'aurait pas à être étudiée.

Cependant, même si les notations probabilistes reliées à A_1 et A_{12} semblent similaires, leur signification pratique est différente car la réalisation de ces alternatives implique des interventions différentes. Le contrôle du niveau du réservoir ($\neg RE$) pour A_1 est réalisé par la construction d'un nouvel évacuateur alors que seule une réfection est considérée dans A_{12}. De la même manière, les venues d'eau sur le parement aval ($\neg VEP$) sont prévenues dans A_1 par une réduction du niveau du réservoir et dans A_{12} par une paroi plastique. Ces deux alternatives sont donc très différentes malgré la similitude des

termes probabilistes. Ces considérations sont aussi valables pour la redondance. Les concepts de suffisance et de redondance doivent donc toujours être utilisés en tenant compte de l'interprétation pratique de la notation probabiliste adoptée.

7.3.6 Alternatives de réduction du risque pour les indicateurs indirects

7.3.6.1 Concepts

Les indicateurs indirects permettent la détection implicite de la réalisation d'un mécanisme de rupture. Ils ont donc surtout pour but d'offrir une information complémentaire pour les diagnostics et les prédictions en rapport à la rupture.

Contrairement aux initiateurs, aux indicateurs directs et quelquefois aux variables externes, une intervention sur un indicateur indirect ne prévient pas le déroulement d'un mécanisme de rupture et ne rend donc pas l'ouvrage plus sécuritaire. Cette intervention peut cependant améliorer la capacité de détection de problèmes et ainsi augmenter indirectement la sécurité de l'ouvrage.

Par exemple, des travaux pour empêcher le bris des piézomètres n'affecteront pas en pratique la sécurité de l'ouvrage. En termes probabilistes, la valeur de $P(R \mid \neg BP)$ serait égale à celle de $P(R)$. Le Tableau 7.2 indique pourtant qu'une intervention pour empêcher le bris des piézomètres a un impact bénéfique sur la probabilité de rupture car $P(R \mid \neg BP) = 0{,}0537$ alors que $P(R) = 0{,}0658$. Cette diminution du risque ne doit cependant pas être interprétée comme un effet direct de l'intervention sur la probabilité de rupture.

Dans le cas des indicateurs indirects, les valeurs d'impacts soulignent plutôt l'importance relative de ces derniers en ce qui a trait à la détection d'autres phénomènes reliés à un

mécanisme de rupture. L'influence sur ce mécanisme et donc sur la probabilité de rupture est représentative de la pertinence ou du poids de l'information tirée d'un indicateur indirect dans les diagnostics ou les prédictions de rupture. Dans l'exemple précédent, le bris d'un piézomètre indique la présence possible de phénomènes de glissement de masse et de tassements en crête qui eux sont des indicateurs directs ayant une influence importante sur la probabilité de rupture. Les concepts d'impact, de criticité et d'indice de priorité vus précédemment doivent donc être adaptés pour tenir compte des particularités des indicateurs indirects.

La pertinence d'un indicateur indirect peut être calculée en considérant l'influence de l'observation et de la non observation de celui-ci sur la probabilité d'une hypothèse *H*. Pour cette étude, l'hypothèse considérée est la rupture ce qui implique $H = R$.

L'information tirée d'un indicateur indirect pertinent doit contribuer significativement aux diagnostics et prédictions en rapport au risque de rupture. La pertinence d'un indicateur indirect dépend donc de son influence sur *P(R)* et de la fréquence à laquelle il peut être utile pour la détection des mécanismes de rupture.

Le concept de pertinence peut se formaliser de la façon suivante:

$$pertinence(i.ind., R) = \frac{\left|P(R \mid i.ind.) - P(R \mid \neg i.ind.)\right|}{P(R)} * P(i.ind.) \qquad (7.12)$$

L'indicateur indirect le plus pertinent obtient la valeur de *pertinence (i.ind.,R)* la plus élevée. Théoriquement, la valeur de *pertinence(i.ind.,R)* peut varier de 0 à $1/P(R)$.

La réalisation de travaux sur les indicateurs indirects a pour objet d'améliorer la capacité de détection des mécanismes de rupture. Le but visé est donc d'augmenter la pertinence des indicateurs indirects.

En pratique, la réalisation de ces interventions comporte toujours des coûts. L'optimisation des investissements se fait en réalisant en priorité les travaux offrant le plus grand potentiel d'augmentation de la pertinence pour un coût minimum. L'intervention optimale est donc celle qui maximise l'indice de priorité c'est-à-dire le ratio entre la variation de la pertinence et les coûts de réalisation.

$$indice\_priorité(i.ind., R) = \frac{\Delta pertinence(i.ind., R)}{coûts(i.ind.)} \tag{7.13}$$

Étant donné que la présence ou l'absence d'un indicateur indirect n'influence pas *P(R)* en termes de sécurité de l'ouvrage, le concept de criticité développé pour les autres types de variables (voir Équation 7.10) n'est pas applicable ici.

7.3.6.2 Alternatives améliorant la pertinence des indicateurs indirects

Le calcul de la pertinence de *ADM* et *BP*, les deux indicateurs indirects du réseau bayésien de la Figure 6.4, est réalisé en comparant à l'aide de l'Équation 7.12 l'effet de leur présence et de leur absence sur la probabilité de rupture. Les résultats sont présentés au Tableau 7.7.

L'augmentation des débits mesurés (*ADM*) est l'indicateur indirect le plus pertinent car même si les variations de probabilités de rupture sont relativement faibles, la probabilité d'observer ce phénomène est plus élevée. L'observation ou non du bris de piézomètres (*BP*) a une influence plus grande sur la probabilité de rupture mais cet indicateur indirect a une faible probabilité d'occurrence ce qui explique une pertinence moins élevée.

Une intervention sur chacun des deux indicateurs indirects permettrait d'accroître leur pertinence et leur capacité de détecter la réalisation de mécanismes de rupture.

Le bris du piézomètre est un effet de *GM* et *TC* sur lequel aucun contrôle n'est possible à partir d'une intervention sur l'instrument. La prévention du bris du piézomètre ne peut se faire par son remplacement ou par l'ajout de dispositifs annulant les effets des glissements de masse ou des tassements importants sur le tubage de l'instrument. Aucune intervention directe n'est donc envisageable sur *BP* c'est-à-dire sur l'instrument lui-même.

La seule possibilité d'intervention reliée à l'indicateur indirect *BP* est la prévention du vandalisme. En annulant la probabilité d'occurrence de la variable externe *V* (en fixant $P(V) = 0$), le bris d'un piézomètre indiquerait alors sans équivoque la présence d'un phénomène grave pouvant mener à la rupture.

La prévention du vandalisme peut se faire en rendant l'instrument inaccessible au personnel non autorisé. L'installation de barrières de sécurité empêchant l'accès au site du barrage de même que la pose d'un boîtier protecteur au droit de l'instrument peuvent être envisagées.

En ce qui a trait à l'augmentation du débit mesuré (*ADM*), l'amélioration du drainage de surface et la canalisation vers le déversoir de jaugeage des venues d'eau provenant du barrage permettrait d'améliorer la fiabilité de cet instrument et donc d'augmenter la pertinence de *ADM*. L'installation d'un système d'acquisition automatique des niveaux d'eau du déversoir de jaugeage et d'un pluviomètre au droit de l'instrument permettrait de déterminer l'effet du ruissellement en surface sur les débits mesurés. Ces travaux élimineraient le plus possible l'effet des débits parasites et feraient en sorte que toutes les infiltrations provenant du barrage soient mesurées.

La répercussion de ces interventions ne serait pas d'éliminer ou de rendre certaine en toutes circonstances l'occurrence de *ADM* mais plutôt de modifier la table de

probabilités reliée à ce noeud. La réalisation des travaux ferait en sorte que *P(ADM)* serait égal à zéro ou à 1 selon les valeurs de *RS* et de *VEP*, les parents de *ADM*.

La table des probabilités modifiée de *ADM* est présentée au Tableau 7.8 dans lequel les valeurs montrent que suite à la réalisation des interventions suggérées, la présence de venues d'eau sur le parement aval entraînerait toujours une augmentation correspondante des débits mesurés où l'effet du ruissellement en surface serait éliminé. À l'inverse, l'absence de venues d'eau ne causerait jamais d'augmentation des débits mesurés et ceci indépendamment de la présence ou non du ruissellement en surface car cet effet parasite sur les débits serait éliminé.

L'effet des interventions sur les indicateurs indirects se traduit donc en termes probabilistes par $P(V) = 0$ et par une nouvelle table des probabilités pour *ADM*. La réalisation de ces interventions ne modifie pas la probabilité de rupture qui demeure à $P(R) = 0{,}0658$. Cependant, après avoir complété les travaux, l'observation ou non des indicateurs indirects a une influence sur la probabilité de rupture.

Les valeurs initiales de pertinence sont présentées au Tableau 7.7. Ces valeurs sont modifiées pour tenir compte de l'effet potentiel de la réalisation des interventions. Elles sont ensuite considérées avec leurs coûts de réalisation pour la détermination des indices de priorité à l'aide de l'Équation 7.13. Les résultats de ces calculs sont présentés au Tableau 7.9.

La protection des piézomètres contre le vandalisme a un effet négatif sur la pertinence de *BP*. L'effet de ces travaux sur la probabilité de rupture est significatif mais la probabilité d'occurrence de *BP* devient très faible ce qui explique la diminution de la pertinence de cet indicateur indirect.

Une intervention reliée sur *ADM*, même si elle est plus onéreuse, permettrait d'augmenter de façon optimale la quantité d'information provenant de cet indicateur indirect. La réalisation de travaux de drainage et de canalisation de même que l'installation d'un système d'acquisition de données et d'un pluviomètre permettrait de maximiser au meilleur coût la capacité de détection des indicateurs indirects. La réalisation de ces travaux, sans diminuer la probabilité de rupture, améliore néanmoins les diagnostics et les prédictions en rapport à la rupture.

7.4 Modélisation spécifique

Bien qu'elle ne représente pas une forme de requête en soi, la modélisation spécifique permet de juger l'effet sur le risque de l'ajout d'une ou plusieurs variables supplémentaires servant à décrire avec plus de détails une variable ou un mécanisme déjà contenu dans un réseau bayésien.

Les probabilités reliées à certaines variables incluent l'effet de plusieurs facteurs qui ne sont pas modélisés explicitement en première analyse. Il est souvent requis d'étudier un problème complexe de façon plus globale d'abord afin d'identifier les aspects les plus critiques et augmenter ensuite le niveau de détail seulement sur ces derniers. Cette approche est décrite à l'aide d'un exemple qualitatif basé sur le réseau bayésien de la Figure 6.4 où le mécanisme de rupture par érosion interne contribue le plus à la probabilité de rupture (voir Section 7.2.3.3).

La plupart des activités régulières de surveillance en sécurité des barrages visent à détecter le plus tôt possible les phénomènes pouvant indiquer la réalisation de mécanismes de rupture. Une détection rapide permet des interventions d'urgence plus efficaces afin de stopper les mécanismes en cours.

Le potentiel de détection et la capacité d'intervention ont été pris en compte implicitement dans l'évaluation de la table de probabilités de *TP* et *R*. Il arrive en pratique que les potentiels de détection et d'intervention doivent être considérés explicitement pour prioriser la réalisation de mesures non structurales. La modélisation spécifique permet, à l'aide des types de requêtes décrits dans les sections précédentes, de déterminer les moyens de détection et d'intervention optimums en termes de coûts et de réduction du risque.

Les activités de surveillance servent surtout à la détection et sont le plus souvent réparties entre l'auscultation instrumentale et les inspections visuelles. Les réseaux bayésiens peuvent être utilisés pour déterminer, entre autres, l'influence sur le risque de l'ajout de nouveaux instruments ou d'une augmentation des fréquences d'inspection.

De plus, certaines activités ne sont pas réalisées directement dans un cadre de surveillance des barrages mais sont néanmoins importantes en ce qui à trait à leur sécurité. La disponibilité d'équipements et de matériaux et la rapidité d'exécution des travaux d'urgence dans le cas où un mécanisme de rupture est en cours peuvent avoir une grande influence sur le risque barrage.

Le potentiel de détection de phénomènes reliés à l'érosion interne et la capacité d'intervenir avant la rupture peuvent être modélisés à l'aide du réseau bayésien de la Figure 7.3 qui représente une portion de la Figure 6.4.

L'indicateur indirect *O* désigne l'observation d'un phénomène de transport de particules nécessitant une intervention d'urgence avant la rupture. Les valeurs de probabilités reliées à *O* doivent être évaluées en tenant compte de plusieurs facteurs externes qui influencent la détection du transport de particules tels l'accès au site de même que la qualité et la fréquence des inspections.

Cependant, les inspections visuelles ne préviennent pas à elles seules la rupture. La détection des phénomènes menaçant la sécurité de l'ouvrage doit être suivie d'une intervention sur les initiateurs ou les indicateurs directs afin de prévenir la rupture. La variable *O* n'a donc pas d'effets importants sur *P(R)* si elle n'est pas suivie d'une variable servant à modéliser la capacité d'intervenir afin de stopper le mécanisme de rupture en cours. Le noeud *IR* est ajouté au réseau bayésien et permet de mesurer l'effet de la capacité d'intervention sur *P(R)* (voir Figure 7.3).

Une intervention suite à l'observation de transport de particules est considérée comme une intervention d'urgence car elle a pour but d'interrompre un mécanisme de rupture à ses dernières étapes de réalisation. Les probabilités reliées à *IR* dépendent de facteurs externes permettant une réaction rapide et efficace. Ces facteurs incluent entre autres la capacité de mobiliser de l'équipement, la disponibilité des matériaux et l'implantation diligente des mesures de confortement. Ces dernières pourraient inclure la construction d'un filtre sur le parement aval de l'ouvrage.

Il est à noter que l'évaluation de l'effet de *IR* sur *P(R)* est réalisée en considérant une réaction à une situation d'urgence où un mécanisme de rupture est déjà en cours et où une rupture serait imminente sans une intervention à court terme. Les alternatives de réduction du risque identifiées à la Section 7.3.5 ont été définies dans un cadre d'exploitation normale mais en prévision d'une situation d'urgence. Donc, l'effet sur le risque d'un filtre aval implanté à titre préventif est quantifié par $P(R \mid \neg SNF, \neg GM)$ (voir alternative 5, Tableau 7.4) et n'a pas la même signification pratique que $P(R \mid IR)$ qui quantifie l'effet du même filtre aval mais qui serait réalisé en réaction à une urgence.

Les variables externes considérées implicitement dans les évaluations de probabilités reliées à *O* et *IR* peuvent être modélisées de façon explicite si leurs effets sur le risque doivent être comparés. À l'aide des types de requêtes développés précédemment, il est possible d'identifier la variable externe reliée à la détection et à l'intervention qui a le

plus grand impact sur *P(R)* et qui a un indice de priorité maximal. Le réseau bayésien de la Figure 7.4 montre les relations entre *O*, *IR* et ces variables externes.

Un problème courant en pratique est de quantifier l'influence d'une surveillance plus serrée sur la sécurité d'un ouvrage. En ce qui concerne le mécanisme de rupture par érosion interne, les effets sur la rupture d'inspections hebdomadaires ou mensuelles peuvent être comparés en calculant les valeurs de *P(R | FI=1/sem)* et *P(R | FI=1/mois)*. Le potentiel de détection des inspections visuelles peut aussi être évalué en comparant *P(FI=1/sem) | O)* et *P(FI=1/mois | O)*. Il est alors possible d'établir la fréquence d'inspection optimale en tenant compte des coûts en main-d'œuvre reliés aux inspections, de l'importance relative de l'érosion interne par rapport aux autres mécanismes de rupture potentiels et de l'effet de *FI* sur le risque.

Le réseau bayésien de la Figure 7.4 permet aussi de prioriser certaines mesures non structurales. La décision concernant la meilleure alternative entre la réfection de routes d'accès et la mise en place de piles de réserve de matériaux peut être prise en comparant *indice_priorité(AS, R)* et *indice_priorité(DM, R)*.

7.5 Résumé

Le réseau bayésien de la Figure 6.4 a été construit afin de modéliser les interdépendances et les incertitudes reliées aux mécanismes de rupture du barrage étudié dans le cadre du problème d'application. Les calculs d'inférence réalisés dans ce chapitre ont consisté à propager l'effet de la modification d'une ou plusieurs informations au sein du réseau pour en déduire comment sont modifiées les probabilités concernant les autres variables.

Les possibilités offertes par les algorithmes d'inférence contenus dans le logiciel de calcul utilisé pour cette recherche ont permis de réaliser plusieurs formes de requêtes. Ces dernières sont regroupées en deux catégories:

1. La mise à jour des probabilités qui rend possible la détermination de la conclusion la plus probable reliée à l'observation réelle ou hypothétique de faits. Cette catégorie de requête sert à la réalisation de prédictions et de diagnostics.
2. Les analyses de sensibilité qui ont permis d'identifier les variables dont la connaissance apporte le maximum d'information. Cette catégorie de requête a été utilisée pour déterminer l'action la plus appropriée à effectuer ou l'information la plus pertinente à rechercher.

Pour la réalisation d'analyses de sensibilité, les concepts d'impact, de criticité, d'indice de priorité et de pertinence ont été mis au point afin d'identifier les facteurs contribuant le plus au risque ainsi que les interventions optimales en termes de coûts et de potentiel de réduction de ce risque. Aussi, la modélisation spécifique permet de détailler certains aspects plus critiques d'un problème et de comparer, entre autres, l'effet de mesures non structurales sur la probabilité de rupture

L'utilisation de ces concepts a permis de répondre aux quatre interrogations de la Section 6.3 en relation au risque posé par le barrage de l'exemple d'application:

1. L'initiateur le plus critique est le niveau du réservoir (voir Section 7.3.3).
2. Le mécanisme de rupture le plus probable est l'érosion interne (voir Section 7.2.3.3).
3. L'indicateur indirect le plus pertinent est l'augmentation du débit mesuré (voir Section 7.3.6.2).
4. La mesure optimale de réduction du risque est la réfection de l'évacuateur de crue (voir Section 7.3.5).

Aussi, il a été remarqué qu'en général, en ne considérant que les aspects techniques et financiers d'un problème, la réalisation de travaux ciblés est plus efficace en termes de réduction du risque que la réalisation de toutes les alternatives envisageables car les coûts et les effets sur le risque ne sont pas nécessairement additifs.

Les concepts mis de l'avant pour l'application des réseaux bayésiens aux barrages et la détermination des mesures optimales de réduction du risque sont mis à profit au chapitre suivant dans le cadre de l'analyse d'un barrage existant servant à l'irrigation.

Tableau 7.1: Calcul de l'impact négatif et de la criticité

			$P(R) = 0,0658$	
e	$P(R \mid e)$	$P(e)$	$impact^{-}(e,R)$	$criticité(e,R)$
VEP = oui	0,2082	0,242	-2,16	0,524
TP = oui	0,2316	0,1996	-2,52	0,503
***RE* ≥ 100m**	0,2535	0,175	-2,85	0,499
SC = oui	1	0,0308	-14,20	0,437
ADM = oui	0,117	0,3319*	-0,78*	0,258*
BP = oui	0,3861	0,0364*	-4,87*	0,177*
GM = oui	0,9871	0,0124	-14,00	0,174
SNF = oui	0,0729	0,75	-0,11	0,081
TC ≥ 2m	0,2761	0,01	-3,20	0,032
***RS* ≥ 20 mm/jr**	0,0766	0,02	-0,16	0,003
***S* ≥ 0,15g**	0,0974	0,0004	-0,48	0

*l'interprétation de ces valeurs pour les indicateurs indirects est vue à la Section 7.3.6

Tableau 7.2: Interventions ayant un impact positif sur $P(R)$

	$P(R) = 0,0658$
$P(R \mid e)$	$impact^{+}(e,R)$
$P(R \mid \neg VEP) = 0,0204$	0,69
$P(R \mid \neg TP) = 0,0245$	0,63
$P(R \mid \neg RE) = 0,026$	0,60
$P(R \mid \neg SC) = 0,0361$	0,45
$P(R \mid \neg ADM) = 0,0404$	0,39*
$P(R \mid \neg BP) = 0,0537$	0,18*

*l'interprétation de ces valeurs pour les indicateurs indirects est vue à la Section 7.3.6

Tableau 7.3: Coûts reliés aux interventions possibles

Intervention	Coût de construction (M$)	Pertes en production (M$)	Coût total (M$)
I_1 : nouvel évacuateur	10	2	12
I_2 : parement amont de béton	6	5	11
I_3 : paroi plastique	3	0	3
I_4 : excavation/reconstruction	3	1	4
I_5 : filtre aval	2	0	2
I_6 : contrôle de la végétation	0,1	0	0,1
I_7 : réfection de l'évacuateur	1	1	2
I_8 : seuil déversant	3	1	4

Tableau 7.4: Effet de la réalisation des alternatives proposées sur $P(R)$

Alternative : Interventions	$P(R \mid A_n)$
$A_1 : I_1$	$P(R \mid \neg RE, \neg VEP) = 0{,}0166$
$A_2 : I_2$	$P(R \mid \neg VEP) = 0{,}0204$
$A_3 : I_3$	$P(R \mid \neg VEP, \neg GM) = 0{,}0188$
$A_4 : I_4$	$P(R \mid \neg VEP, \neg TC) = 0{,}0193$
$A_5 : I_5$	$P(R \mid \neg SNF, \neg GM) = 0{,}0327$
$A_6 : I_7$	$P(R \mid \neg RE) = 0{,}026$
$A_7 : I_1 I_5 I_6$	$P(R \mid \neg TP, \neg RE, \neg VEP, \neg SNF, \neg GM) = 0{,}011$
$A_8 : I_2 I_5 I_6$	$P(R \mid \neg TP, \neg VEP, \neg SNF, \neg GM) = 0{,}0133$
$A_9 : I_3 I_5 I_6$	$P(R \mid \neg TP, \neg VEP, \neg SNF, \neg GM) = 0{,}0133$
$A_{10} : I_4 I_5 I_6$	$P(R \mid \neg TP, \neg VEP, \neg TC, \neg SNF, \neg GM) = 0{,}0121$
$A_{11} : I_3 I_5$	$P(R \mid \neg VEP, \neg GM, \neg SNF) = 0{,}0146$
$A_{12} : I_3 I_7$	$P(R \mid \neg VEP, \neg GM, \neg RE) = 0{,}0166$
$A_{13} : I_4 I_5$	$P(R \mid \neg VEP, \neg TC, \neg SNF, \neg GM) = 0{,}0135$
$A_{14} : I_4 I_7$	$P(R \mid \neg VEP, \neg TC, \neg RE) = 0{,}0156$
$A_{15} : I_5 I_7$	$P(R \mid \neg SNF, \neg GM, \neg RE) = 0{,}0137$
$A_{16} : I_7 I_8$	$P(R \mid \neg RE, \neg SC) = 0{,}025$

Tableau 7.5: Calcul de l'impact positif et de l'indice de priorité

	$P(R)$ = 0,0658		
Alternative	$impact^{+}$ (A_n,R)	Coût total (M$)	$indice\_priorité\ (A_n,R)$
A_1	0,748	12	0,0623
A_2	0,690	11	0,0627
A_3	0,714	3	0,2381
A_4	0,707	4	0,1767
A_5	0,503	2	0,2515
A_6	0,605	2	0,3024
A_7	0,833	14,1	0,0591
A_8	0,798	13,1	0,0609
A_9	0,798	5,1	0,1564
A_{10}	0,816	6,1	0,1338
A_{11}	0,778	5	0,1556
A_{12}	0,748	5	0,1495
A_{13}	0,795	6	0,1325
A_{14}	0,763	5*	0,1526
A_{15}	0,792	4	0,1979
A_{16}	0,620	5*	0,1240

* Les pertes en énergie ne sont pas additives

Tableau 7.6: Alternatives optimales

Alternative	Interventions	$indice\_priorité\ (A_n,R)$
A_6	• réfection évacuateur	0,3024
A_5	• filtre aval	0,2515
A_3	• paroi plastique	0,2381
A_{15}	• filtre aval • réfection évacuateur	0,1979
A_4	• excavation/reconstruction	0,1767

Tableau 7.7: Calcul de la pertinence

	$P(R) = 0{,}0658$			
i.ind.	$P(R \mid i.ind.)$	$P(R \mid \neg i.ind.)$	*P(i.ind.)*	*pertinence*
ADM	0,1170	0,0404	0,3319	0,3864
BP	0,3861	0,0537	0,0365	0,1844

Tableau 7.8: Table de probabilités modifiées du noeud *ADM*

	RS < 20 mm/jr		*RS* ≥ 20 mm/jr	
	VEP = oui	*VEP* = non	*VEP* = oui	*VEP* = non
ADM = oui	1	0	1	0
ADM = non	0	1	0	1

Tableau 7.9: Calcul de l'indice de priorité

i.ind.	$P(R \mid i.ind.)$	$P(R \mid \neg i.ind.)$	*P(i.ind.)*	*pertinence*	Coût	*Indice_priorité* ($* 10^6$)
ADM	0,2082	0,0204	0,242	0,6907	50 K$	6,07
BP	0,7749	0,0537	0,0151	0,1655	30 K$	< 0

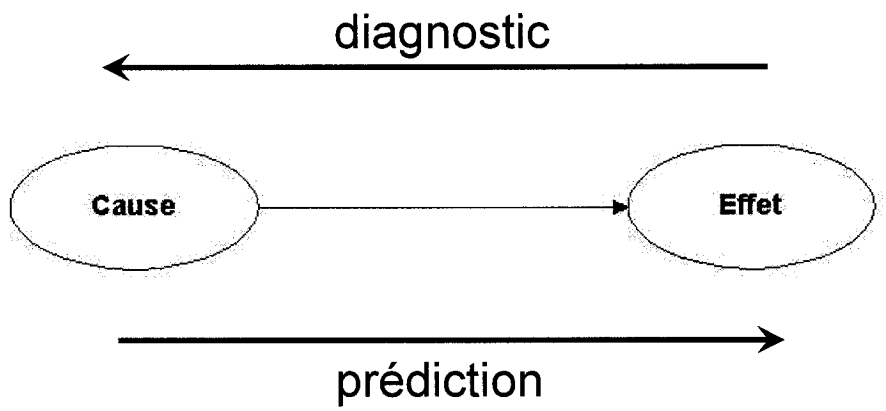


Figure 7.1: Types de raisonnements

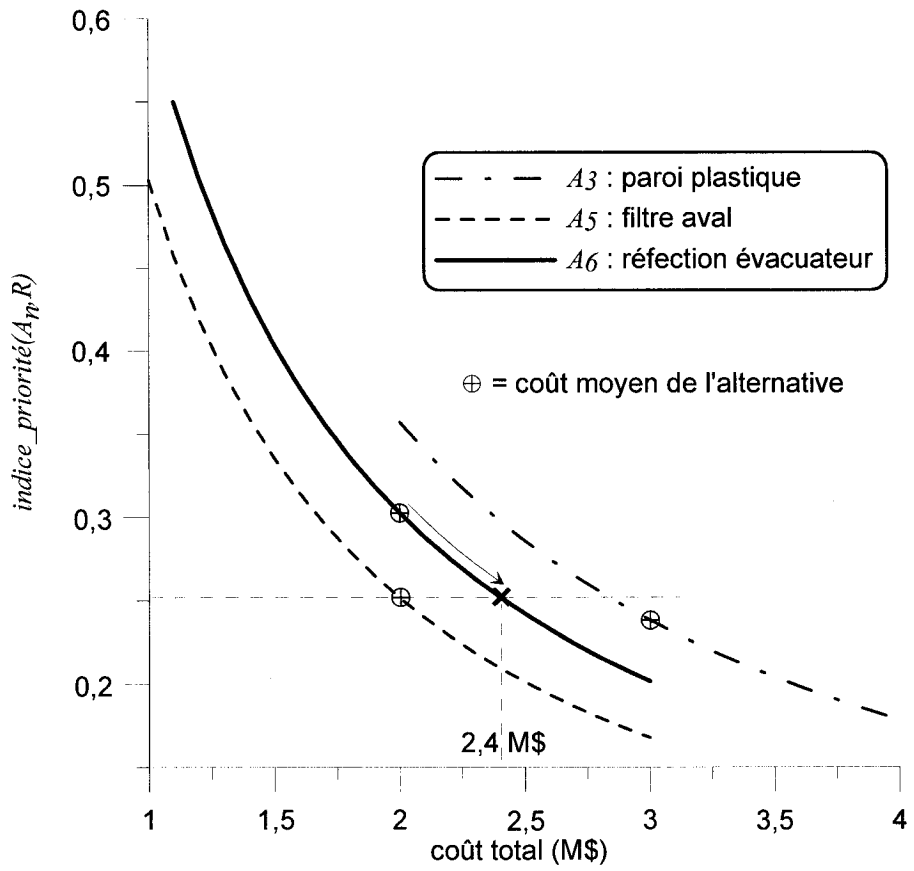


Figure 7.2: Variations de l'indice de priorité en fonction du coût total

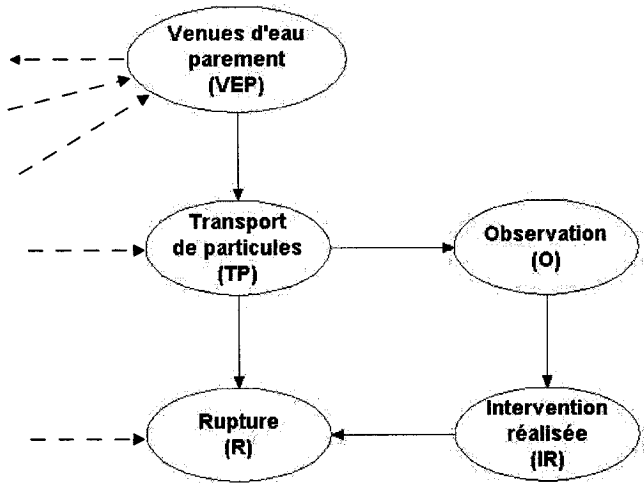


Figure 7.3: Modélisation spécifique pour la capacité de détection et d'intervention relative à l'érosion interne

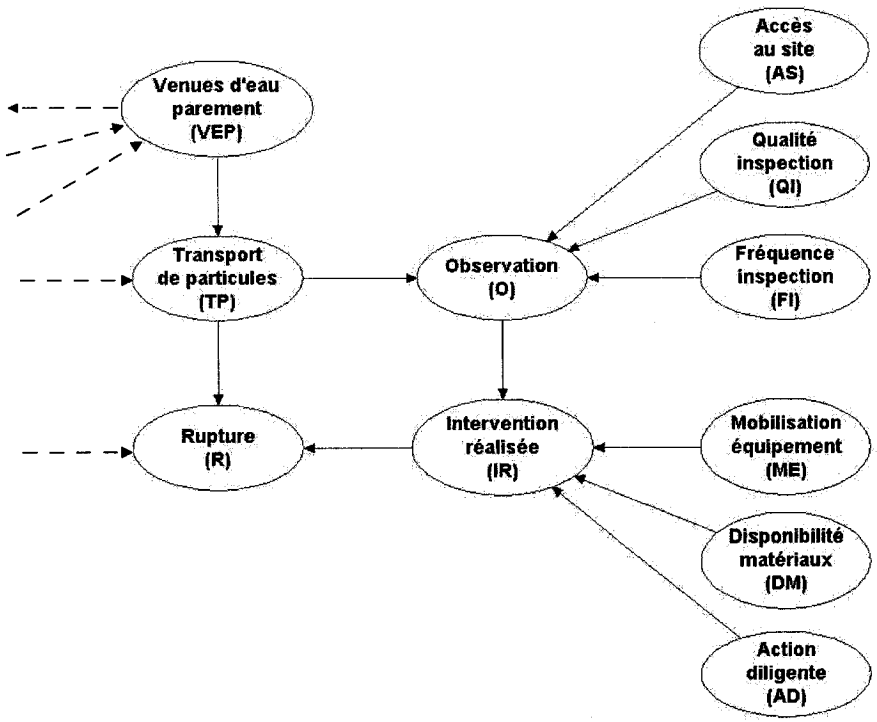


Figure 7.4: Modélisation spécifique des facteurs influençant la capacité de détection et d'intervention relative à l'érosion interne

CHAPITRE 8

EXEMPLE PRATIQUE

8.1 Introduction

Ce chapitre décrit l'application du concept des réseaux bayésiens à une problématique réelle rencontrée par l'auteur dans le cadre d'un mandat d'étude de sécurité d'un barrage réalisé au Vietnam en 2004 pour la Banque Mondiale à titre de consultant de Hydro-Québec International. Ce mandat fait partie du programme de mitigation des désastres naturels mis en place par la Banque Mondiale et qui a pour but de sauver des vies et de protéger les biens en cas de désastres.

Selon le "Disaster Management Unit" du Vietnam, entre 1995 et 2002, le coût des désastres naturels s'est élevé à plus de 1,5 milliards de dollars. À eux seuls, les typhons et les inondations ont entraîné la mort de 3342 personnes au cours de cette période. Les désastres naturels reliés aux crues ont augmenté tant en fréquence qu'en intensité au cours des dernières années au point qu'ils représentent aujourd'hui la première cause de pauvreté dans de nombreuses régions du Vietnam.

Une expertise a été réalisée sur le barrage en remblai de Vuc Mau propriété du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural du Vietnam. Cette expertise consistait à faire un diagnostic technique concernant des problèmes d'infiltrations dans le barrage pouvant menacer à court terme sa sécurité. Des recommandations relatives à l'implantation de mesures de confortement et de suivi du comportement ont aussi été émises.

Le rapport d'expertise (Smith 2004) couvre les aspects géotechniques du problème et a souligné la précarité de la sécurité du barrage et la nécessité de réaliser des travaux de confortement afin de diminuer la possibilité de rupture par érosion interne. Cependant, l'augmentation de la capacité de l'évacuateur de crue et l'amélioration de son opérabilité ont aussi été envisagées par le propriétaire du barrage afin d'augmenter la sécurité de l'ouvrage et éviter la submersion de la crête, donc la rupture, lors d'une crue importante. Les risques géotechnique, hydrologique et ceux reliés à la fiabilité de l'évacuateur sont importants. Ces risques doivent être connus et priorisés car le propriétaire du barrage ne dispose pas de ressources suffisantes pour procéder à la réfection complète de l'aménagement en un seul projet.

Les nombreux facteurs influençant les risques de même que leurs interrelations ne peuvent être pris en compte et priorisés à l'aide des méthodes d'analyse disponibles. Une étude globale du problème est requise pour identifier ses éléments les plus critiques afin d'optimiser l'allocation des ressources et faciliter le financement des travaux.

Les concepts mis de l'avant dans cette recherche rendent possible la comparaison des risques hydrologique, géotechnique et ceux reliés à la fiabilité de l'évacuateur à l'aide d'un modèle causal et de probabilités annuelles. Leur utilisation permet de déterminer le mécanisme de rupture contribuant le plus au risque barrage et la priorisation des interventions visant à augmenter la sécurité à long terme du barrage Vuc Mau.

8.2 Description de l'aménagement Vuc Mau

L'aménagement Vuc Mau est situé sur la rivière Hoang Mai dans la province de Nghe An au centre nord du Vietnam à environ 300 km au sud de Hanoi, la capitale (voir Figures 8.1 et 8.2).

L'aménagement Vuc Mau, qui comprend un barrage et un évacuateur de crue, a été construit pour l'irrigation d'environ 5000 ha de terres agricoles situées en aval du barrage. L'irrigation est réalisée par le biais d'une conduite en béton et d'un pertuis vanné traversant la base de l'ouvrage en rive droite. À la sortie du pertuis, un réseau de plus de 20 km de canaux est en place afin d'acheminer l'eau vers les champs et les rizières (voir Figure 8.3).

L'eau sert aussi à alimenter une cimenterie située plus en aval et à fournir de l'eau potable aux villages avoisinants. La régularisation du débit de la rivière Hoang Mai a grandement contribué au développement de la région dont l'économie est surtout basée sur l'agriculture. Plus de 115000 personnes bénéficient de la présence du réservoir Vuc Mau dont environ 22000 demeurent à moins de 10 km en aval du barrage.

Le barrage Vuc Mau (voir Figure 8.4) est un remblai argileux de 25 m de hauteur et de 857 m de longueur fondé sur des sols de même type recouvrant des alluvions sablonneux dans le lit de la rivière Hoang Mai au droit de la section maximale de l'ouvrage. Aucun drain ou zone de filtre n'ont été installés à l'intérieur ou à l'extérieur du barrage. Les documents de conception des ouvrages, s'ils existent, n'ont pu être consultés. Quelques données relatives aux crues et à la météo sont disponibles et sont présentées dans les sections suivantes.

La construction du barrage et de l'évacuateur s'est déroulée sporadiquement de 1976 à 1986 selon les ressources matérielles et humaines disponibles. La mise en place du matériau argileux constituant le barrage a été faite sans utiliser de machinerie lourde. Le contrôle de la qualité du remblai (teneur en eau, compacité etc.) était inexistant. Les ouvrages ne comprennent pas d'instrumentation et n'ont jamais fait l'objet d'un suivi de leur comportement.

La crête du barrage était initialement à la cote 24,7 m, elle a été rehaussée à 25,7 m pour augmenter la sécurité face aux risques de submersion de la crête lors de crues. Cependant, il a été remarqué durant l'inspection de l'ouvrage en 2004 que le tassement du remblai du barrage est considérable et s'est réalisé de façon inégale. Des relevés topographiques montrent que la cote minimale actuelle de la crête du barrage Vuc Mau est de 24,85 m. Cette valeur est utilisée pour l'analyse du risque de submersion. Le niveau maximum normal du réservoir est de 21 m.

Un évacuateur de crue est localisé en rive gauche du barrage (voir Figures 8.3 et 8.5). L'évacuateur comprend trois vannes de 8 m de largeur et de 5,5 m de hauteur. Le seuil des vannes est à la cote 15,5 m. La partie supérieure des vannes est à la cote 21 m ce qui correspond au niveau maximum normal du réservoir. La capacité d'évacuation est de 878 m^3/s pour une crue centennale.

Le levage des vannes est réalisé manuellement à l'aide d'un treuil fixé à une grue portique mobile. Un moteur électrique, alimenté par une ligne de transmission passant sur le parement aval du barrage (voir Figure 8.4), est disponible pour faciliter les opérations de levage. Le manque de fiabilité de l'alimentation électrique fait en sorte que ce moteur n'est pas utilisé fréquemment. La voie d'accès principale pour l'évacuateur passe par la rive droite, sur le parement aval du barrage (voir Figure 8.4). La voie d'accès par la rive gauche devient impraticable lorsque l'évacuateur est en opération.

8.3 Définition du problème

Depuis la fin de la mise en eau en 1986, des problèmes d'écoulement sont présents au pied aval du barrage et sur la partie inférieure du parement aval lorsque le niveau du réservoir est supérieur à 18 m. La présence de cavités au droit de venues d'eau brouillées

ayant un débit de plusieurs litres/seconde indique que le processus d'érosion interne du barrage et/ou de sa fondation est en cours.

Des remblais de quelques m^3 d'enrochement tout-venant ont été placés il y a quelques années sur les zones les plus affectées par l'érosion interne. Ces dernières sont surtout situées dans l'ancien lit de la rivière Hoang Mai, à la section maximale du barrage (voir Figure 8.6). Les matériaux utilisés n'étant pas filtrants, cette mesure est probablement inutile pour assurer la sécurité du barrage face à l'érosion interne.

Aussi, des procédures ont été mises en place afin que le réservoir ne soit jamais exploité à un niveau supérieur à 18 m. Cette contrainte influence à la baisse les gradients hydrauliques dans le barrage réduisant ainsi la propension à l'érosion interne. La baisse du niveau du réservoir diminue cependant de façon significative la capacité d'irrigation. Cette mesure, quoique relativement efficace pour ralentir la dégradation de l'ouvrage par érosion interne, doit être considérée comme temporaire seulement car la sécurité à long terme du barrage n'est pas assurée.

Pour garder le niveau du réservoir à une cote inférieure ou égale à 18 m, l'évacuateur doit être ouvert durant toute la saison des pluies alors que les agriculteurs n'ont pas besoin d'irriguer leurs champs. L'eau est ainsi déversée à perte. À l'inverse, durant la saison sèche, le volume d'eau dans le réservoir (la réserve utile sous la cote 18 m) est insuffisant pour l'irrigation. De ce fait, plus de 50% des 5000 ha irrigables présentement par le réservoir Vuc Mau ne sont pas cultivés de façon optimale privant une bonne partie de la population de travail et de revenus.

De plus, la capacité d'évacuation ne permet d'accommoder que les crues de l'ordre de 1:100 ans ce qui est en deçà des normes vietnamiennes qui exigent une période de récurrence de 500 ans pour la crue de sécurité. Les normes de la Banque Mondiale exigent une période de récurrence de 10000 ans. La crue de sécurité est celle pour

laquelle il est considéré comme acceptable que le barrage ainsi que l'évacuateur soient à la limite de la rupture mais présentent encore un fonctionnement sûr.

En plus d'une capacité insuffisante de l'évacuateur, les vannes, le mécanisme de levage et son alimentation électrique sont en mauvais état et comportent plusieurs problèmes de fiabilité. De plus, en période de forts vents, la grue portique est presque inutilisable car elle devient instable. La possibilité de ne pas pouvoir ouvrir les vannes est donc suffisamment grande pour poser un risque supplémentaire de submersion même lors d'une crue moins importante.

Le risque posé par les ouvrages et les inconvénients reliés à une diminution de la capacité d'irrigation ont été jugés inacceptables non seulement par le propriétaire des ouvrages mais aussi par la population pouvant bénéficier de leur présence. Des travaux de réhabilitation sont donc requis pour assurer la sécurité des ouvrages, de la population et des biens en aval de même que pour rétablir la capacité d'irrigation.

Ces travaux visent les mécanismes de rupture par submersion et par érosion interne. Le choix des travaux à réaliser en premier n'est cependant pas évident a priori car les deux mécanismes sont fortement interreliés. Un niveau du réservoir élevé augmente non seulement la possibilité de submersion mais aussi la propension à l'érosion interne. Aussi, le niveau du réservoir lors d'une crue dépend à la fois de l'intensité des précipitations reçues et du fonctionnement de l'évacuateur. L'influence des vagues générées sur le réservoir par les forts vents, qui peuvent souffler à différentes périodes de l'année, représente aussi un paramètre important pour la sécurité de l'ouvrage et l'opérabilité de l'évacuateur. De plus, les données disponibles en rapport à l'hydrologie et la géotechnique sont peu nombreuses et incertaines.

Les travaux de réhabilitation envisagés dans la phase d'avant-projet sont les suivants:

1. Réfection des vannes et du mécanisme de levage
2. Ajout d'une quatrième vanne à l'évacuateur pour augmenter sa capacité
3. Mise en place de bermes filtrantes au pied du barrage
4. Rehaussement de la crête du barrage

Les investissements nécessaires pour réaliser tous ces travaux ont été évalués sommairement par le propriétaire à environ 5,5 M$ ce qui représente une somme considérable en rapport à l'économie de la région. Cependant, les pertes humaines et matérielles reliées à une rupture du barrage seraient beaucoup plus considérables. Aussi, la situation actuelle cause des pertes agricoles qui affectent déjà la population et continueront de l'affecter pour les années à venir jusqu'à ce que la capacité d'irrigation soit restaurée par une diminution du risque barrage.

Le décision n'est donc pas reliée à la réalisation ou non des travaux mais à leur optimisation en rapport au potentiel de réduction du risque et aux coûts.

L'utilisation du concept des réseaux bayésiens permet d'aborder de façon globale les problèmes techniques reliés à la probabilité de rupture du barrage Vuc Mau en décrivant les interrelations entre les mécanismes de rupture et en tenant compte des nombreuses incertitudes. L'analyse fournit des réponses aux interrogations suivantes :

1. Quels sont les facteurs contribuant le plus au risque?
2. Quels sont les travaux de réfection à réaliser en priorité?

La modélisation du risque relié aux ouvrages de l'aménagement Vuc Mau implique la réalisation de calculs afin de déterminer certaines valeurs de probabilités à partir des données disponibles et des informations recueillies sur le terrain. Les résultats obtenus

doivent être interprétés comme une première approximation des phénomènes en cause car les données disponibles sont peu nombreuses et incertaines.

Le but de ce chapitre étant de montrer l'utilité des réseaux bayésiens dans un cas pratique d'analyse du risque barrage, le modèle causal utilisé et les méthodes de calcul employées pour la détermination des probabilités n'impliquent pas qu'ils soient les meilleurs ou les seuls pouvant être appliqués dans les circonstances.

8.4 Calcul de l'hydrogramme unitaire

L'analyse des risques de submersion et d'érosion interne du barrage Vuc Mau requiert le calcul des niveaux maximum du réservoir atteints durant les crues. La première des deux étapes nécessaires à la réalisation de ce calcul est la détermination de l'hydrogramme correspondant à chacune des périodes de récurrence étudiées.

Étant donné l'absence de données historiques de précipitations, de niveaux du réservoir et de débits, les calculs sont réalisés à l'aide d'un hydrogramme unitaire synthétique. Ce concept permet une évaluation approximative de l'hydrogramme généré par 1 mm de précipitation effective à l'aide de certaines caractéristiques physiques du bassin versant.

La méthode développée par le United States Soil Conservation Service (Serrano 1997) considère un hydrogramme unitaire moyen développé à partir de l'analyse d'un grand nombre d'hydrogrammes calculés pour des bassins de superficies et de localisations diverses. Cet hydrogramme unitaire moyen est adimensionnel et a en y les valeurs de débits exprimées par un ratio basé sur le débit de pointe Q_P et a en x les valeurs exprimées par un ratio basé sur T_P, le temps requis pour atteindre Q_P. Ces ratios sont montrés aux deux premières colonnes du Tableau 8.1.

Le temps au pic est donné par:

$$T_P = \frac{T_S}{2} + T_L \tag{8.1}$$

où

T_P = temps au pic à partir du début des précipitations effectives (heures)

T_S = durée des précipitations effectives (heures)

T_L = décalage entre $T_S / 2$ et T_P (heures)

Le décalage peut être calculé par:

$$T_L = C_1 (L L_C)^{0,3} \tag{8.2}$$

où

T_L = décalage (heures)

C_1 = coefficient basé sur le type de terrain, varie de 1,4 à 1,7 (heures/km$^{0.6}$)

L = longueur du cours d'eau principal, du point étudié jusqu'à la limite amont du bassin versant (km)

L_C = longueur, le long du cours d'eau principal, du point le plus près du centre de gravité du bassin versant jusqu'au point étudié (km)

Selon la Figure 8.2, L = 17,4 km et L_C = 7,2 km. Le coefficient C_1 est supposé égal à la valeur minimale de 1,4 heures/km^{0,6} pour tenir compte de l'effet de la déforestation observée en amont du barrage. L'Équation 8.2 donne un décalage de T_L = 6 heures.

Les régions côtières du centre nord du Vietnam connaissent leurs précipitations les plus importantes durant la saison de la mousson qui dure de septembre à janvier approximativement. La quantité totale de pluie tombée durant cette période est en moyenne d'environ 2100 mm. Les pluies torrentielles surviennent surtout en septembre et sont dues à des typhons provenant de la mer de Chine.

La durée moyenne des pluies torrentielles est de l'ordre de 24 heures. Les infiltrations dans le sol peuvent être considérées comme négligeables car le sol demeure saturé durant la mousson. La durée supposée des précipitations effectives est donc de T_S = 24 heures. L'Équation 8.1 donne un temps au pic de T_P = 18 heures.

Le débit de pointe est alors égal à:

$$Q_P = 0{,}208\frac{A}{T_P} \tag{8.3}$$

où

Q_P = débit de pointe (m^3/s par mm de précipitations)
A = superficie du bassin versant qui est égale à 215 km^2
T_P = temps au pic à partir du début des précipitations effectives (heures)

L'Équation 8.3 donne un débit de pointe de Q_P = 2,5 m^3/s par mm.

Les deux premières colonnes du Tableau 8.1 sont multipliées par T_P et Q_P respectivement pour déterminer t et Q qui définissent l'hydrogramme unitaire au droit du barrage Vuc Mau (voir Tableau 8.1).

L'hydrogramme unitaire 24 heures ainsi calculé est présenté à la Figure 8.7 et est utilisé à la section suivante pour les calculs de laminage des crues.

8.5 Laminage des crues

Les calculs de laminage des crues constituent la deuxième et dernière étape nécessaire à la détermination des niveaux atteints lors de différentes périodes de récurrence.

Les données et études ayant pu servir à la conception de l'évacuateur de crue et à fixer la cote de la crête du barrage ne sont pas disponibles. Les seuls éléments d'information recueillis en rapport aux crues sont résumés au Tableau 8.2. Ces données proviennent de rapports techniques préparés pour le propriétaire du barrage. Les méthodes de calcul utilisées sont inconnues.

Quoique peu nombreuses, ces données sont toutefois suffisantes pour réaliser les calculs de laminage et ainsi déterminer en première approximation les niveaux du réservoir atteints lors des crues ce qui permettra l'évaluation des probabilités de submersion et de la propension à l'érosion interne.

La méthode puls modifiée (United States Army Corps of Engineers [USACE] 1994) est utilisée pour les calculs de laminage. Cette méthode est basée sur l'équation de continuité donnée par:

$$I(t) - O(t) = \frac{dS(t)}{dt} \tag{8.4}$$

où

$I(t)$	=	débit entrant (Inflow) au temps t (m^3/s)
$O(t)$	=	débit évacué (Outflow) au temps t (m^3/s)
$S(t)$	=	volume du réservoir (Storage) au temps t (m^3)
dt	=	intervalle de temps (s)

Les valeurs contenues dans l'Équation 8.4 sont calculées pour des intervalles de temps fixés à $\Delta t = 2$ heures. Cette équation peut aussi être représentée par:

$$\frac{I_i + I_{i+1}}{2} - \frac{O_i + O_{i+1}}{2} = \frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} \tag{8.5}$$

où

I_i	=	débit entrant à l'intervalle i (m^3/s)
O_i	=	débit évacué à l'intervalle i (m^3/s)
S_i	=	volume du réservoir à l'intervalle i (m^3)

La méthode puls modifiée peut être utilisée si l'évaporation et les infiltrations dans le sol sont négligeables et que la surface du réservoir demeure horizontale ce qui est le cas pour le réservoir Vuc Mau durant la mousson. Aussi, pour obtenir une relation unique entre O et S, l'ouverture des vannes de l'évacuateur doit être constante. Pour cette étude, il est supposé que chacune des vannes fonctionnelles soient ouvertes à 100% au temps $t = 0$, c'est-à-dire le début des précipitations, et qu'elles demeurent ouvertes pour toute la durée de la crue.

Le réservoir est présentement exploité à une cote maximale de 18 m. Le niveau du réservoir à $t = 0$ est donc supposé égal à 18 m.

Les valeurs connues de l'Équation 8.5 sont I_i et I_{i+1} qui sont déterminées à l'aide de l'hydrogramme unitaire de la Figure 8.7. Pour le premier intervalle $i = 1$, les valeurs de O_i et S_i sont aussi connues. La détermination de O_{i+1} et S_{i+1} requiert l'établissement d'autres relations entre ces variables.

Le débit évacué O est une fonction de $H^{1,5}$, la hauteur d'eau au dessus du seuil des vannes. Cette valeur est ensuite multipliée par la largeur d'évacuation et différents coefficients de débit et de forme qui ne sont cependant pas disponibles.

La capacité de l'évacuateur est de 878 m³/s pour une crue centennale ce qui correspond d'après le Tableau 8.2 à un niveau du réservoir de 23,38 m. À l'aide de la cote du seuil des vannes, qui est égale à 15,5 m, une relation entre le débit évacué et le niveau du réservoir peut être déterminée de la façon suivante:

$$878 \text{ m}^3/\text{s} = K * (23{,}38 \text{ m} - 15{,}5 \text{ m})^{1,5} \tag{8.6}$$

La valeur de K est égale à 39,7 $\text{m}^{1,5}/\text{s}$ et est valide dans le cas où les trois vannes sont fonctionnelles. Cependant, étant donné le mauvais état des vannes et des mécanismes de levage, il est nécessaire de modéliser aussi l'incidence d'une ouverture partielle (1 ou 2 vannes sur 3 fonctionnelles) ou nulle (aucune vanne fonctionnelle) sur le risque.

Lorsqu'une ou plusieurs vannes ne sont pas fonctionnelles, celles-ci sont submergées lorsque le niveau du réservoir dépasse la cote 21 m qui correspond au sommet des vannes en position fermée. La submersion des vannes a pour effet de contribuer au débit évacué pour un niveau de réservoir supérieur à 21 m. La relation entre O et le niveau du réservoir est donc donnée par:

$$O = \frac{39{,}7n(NR_1 - 15{,}5)^{1{,}5}}{3} + \frac{39{,}7(3-n)(NR_2 - 21)^{1{,}5}}{3} \tag{8.7}$$

où

O = débit évacué (m^3/s)

n = nombre de vannes fonctionnelles ($0 \leq n \leq 3$)

NR_1 = niveau du réservoir (m)

NR_2 = niveau du réservoir (m), égal à 21 si $NR_1 \leq 21$ m

Le résultat des calculs réalisés à l'aide de l'Équation 8.7 est montré à la Figure 8.8.

Le volume du réservoir S peut être déterminé pour différents niveaux de réservoir à l'aide des données présentées au Tableau 8.2. La courbe d'emmagasinement ainsi obtenue est montrée à la Figure 8.9

La relation entre S et O est déterminée en comparant les valeurs indiquées aux Figures 8.8 et 8.9 pour un niveau de réservoir donné. Cette relation est montrée à la Figure 8.10.

Le laminage des crues selon la méthode puls modifiée consiste en l'application répétitive de l'Équation 8.5 qui peut être manipulée afin de retrouver les inconnues à gauche du signe d'égalité:

$$\left(\frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{O_{i+1}}{2}\right) = \frac{S_i}{\Delta t} + \frac{O_i}{2} - O_i + \frac{I_i + I_{i+1}}{2} \tag{8.8}$$

Les valeurs à droite de l'Équation 8.8 sont connues pour $i = 1$. Une valeur de O_{i+1} peut ensuite être calculée en utilisant la Figure 8.11 qui est construite à l'aide des relations montrées à la Figure 8.10.

Enfin, la valeur de S_{i+1} correspondant à O_{i+1} peut être trouvée à l'aide de la Figure 8.10. Le niveau du réservoir atteint à l'intervalle $i + 1$ peut alors être déterminé à l'aide de O_{i+1} (voir Figure 8.8) ou S_{i+1} (voir Figure 8.9). La répétition de ces calculs permet de connaître les variations du niveau du réservoir lors d'une crue de récurrence donnée.

Les calculs nécessaires au laminage des crues ont été programmés dans un chiffrier électronique où les relations montrées aux Figures 8.8 à 8.11 ont été modélisées à l'aide de régressions polynomiales. Ces calculs sont basés sur l'hydrogramme unitaire 24 heures de la Figure 8.7. La principale variable modifiable pour la réalisation des calculs est donc la quantité de précipitations en $T_s = 24$ heures.

Les quantités de précipitations pour différentes périodes de récurrence ne sont pas disponibles. Cependant, les niveaux du réservoir maximum 1:100 ans et 1:500 ans sont connus. Il est supposé que ces valeurs ont été déterminées pour les cas où les trois vannes sont fonctionnelles et sont complètement ouvertes dès le début de la crue alors que le niveau du réservoir est égal au maximum normal d'exploitation de 21 m (voir Tableau 8.2). Les quantités de précipitations en 24 heures requises pour atteindre les niveaux spécifiés ont été déterminées par itération à l'aide du chiffrier électronique développé pour le laminage des crues. Ces valeurs sont montrées à la Figure 8.12.

Par extrapolation à la Figure 8.12, il est possible de connaître les précipitations pour d'autres périodes de récurrence. Ces dernières sont montrées au Tableau 8.3 avec les débits maximum entrant (I) et évacué (O). Il est supposé qu'une précipitation journalière de près de 195 mm survient à chaque année. Cette hypothèse est conforme aux informations recueillies sur le terrain.

Les valeurs de précipitations présentées au Tableau 8.3 sont ensuite utilisées pour les calculs de laminage en fixant à 18 m le niveau du réservoir à $t = 0$. Étant donné le mauvais état des composantes électriques et mécaniques de l'évacuateur, les niveaux

maximum atteints en cas d'ouverture partielle ou nulle sont aussi calculés. Le laminage de la crue 1:100 ans est montré à la Figure 8.13 à titre d'exemple.

Les niveaux maximum obtenus pour toutes les périodes de récurrence considérées sont présentés à la Figure 8.14 qui est utilisée pour l'évaluation des probabilités requises pour l'analyse du risque de submersion.

8.6 Remontée des vagues dues au vent

Le talus amont des barrages en remblai est soumis aux effets de l'attaque dynamique des vagues générées par le vent. Ces effets comprennent l'érosion du talus et le déferlement en crête qui peuvent endommager suffisamment un barrage pour provoquer sa rupture. Les ouvrages doivent donc être protégés par une couche d'enrochement de protection et une revanche adéquate.

La revanche est définie comme la différence entre la cote de la crête du barrage et le niveau maximal normal d'exploitation. Le point bas de la crête du barrage Vuc Mau est de 24,85 m alors que le niveau maximum normal du réservoir est de 21 m. La revanche disponible est donc de 3,85 m.

La hauteur de revanche doit être suffisante pour contenir la surélévation du plan d'eau causée par l'effet du vent soufflant de façon soutenue dans une même direction et la remontée des vagues due à leur déferlement sur le talus amont:

$$R_v = S_u + R_u \tag{8.9}$$

où

R_v = remontée totale due au vent (m)

S_u = surélévation du plan d'eau (m)

R_u = remontée des vagues (m)

Le calcul de la remontée totale due au vent est réalisé pour le barrage Vuc Mau car ce paramètre a une influence sur la possibilité de submersion et donc sur le risque de rupture du barrage. Même si le niveau maximum atteint par le réservoir lors d'une crue est inférieur à la cote de la crête, l'attaque répétée des vagues sur l'ouvrage peut quand même l'éroder suffisamment pour créer une brèche dont le point bas est inférieur au niveau du réservoir provoquant ainsi la rupture du barrage par submersion de la crête.

Le calcul de la remontée totale due au vent est basé sur les données de vitesse des vents disponibles pour la région de Vuc Mau et sur une méthodologie développée pour les barrages de la Baie James (Société d'Énergie de la Baie James [SEBJ] 1997).

Les données disponibles relatives aux vitesses des vents sont présentées au Tableau 8.4 et montrées à la Figure 8.15. La direction et la durée de ces vents sont inconnues. Pour cette étude, les données du Tableau 8.4 sont supposées être représentatives de vents d'une durée de l'ordre d'une heure soufflant sur l'eau selon une direction quelconque.

La surélévation du plan d'eau est calculée selon l'équation suivante:

$$S_u = 1{,}6 * 10^{-5} \frac{U^2 F_d}{d} \tag{8.10}$$

où

S_u = surélévation du plan d'eau (m)
U = vitesse du vent (km/h)
F_d = fetch direct (km)
d = profondeur d'eau moyenne le long du fetch direct (m)

Le fetch direct correspond à la longueur du plan d'eau devant l'ouvrage dans la direction du vent qui génère la vague maximale. Le fetch direct maximum pour le réservoir Vuc Mau est de 3,5 km provenant de l'ouest-sud-ouest (voir Figure 8.3). La valeur de d est supposée égale à 15 m.

Le calcul de la remontée des vagues nécessite au préalable la détermination de leur hauteur maximale observée lorsque le régime permanent des vagues est établi. La hauteur est donnée par:

$$H_s = 1{,}917 * 10^{-3} F_d^{0,45} U^{1,353} \tag{8.11}$$

où

H_s = hauteur maximale des vagues (m)
F_d = fetch direct (km)
U = vitesse du vent (km/h)

La hauteur de remontée des vagues est alors donnée par:

$$R_u = 1{,}95(\cot\alpha)^{-0,44} H_s \tag{8.12}$$

où

R_u = remontée des vagues (m)

cot α = pente du parement amont du barrage

H_s = hauteur maximale des vagues (m)

La pente moyenne de la partie supérieure du parement amont du barrage Vuc Mau est de 1,8H : 1V ce qui donne une valeur de cot α égale à 1,8.

L'application des Équations 8.9 à 8.12 avec les données du Tableau 8.4 permet le calcul de la remontée totale due au vent pour différentes périodes de récurrence. Les résultats sont montrés au Tableau 8.5 et à la Figure 8.15.

La remontée totale due au vent est considérée avec le niveau maximum atteint lors d'une crue pour juger du risque de submersion du barrage Vuc Mau.

8.7 Construction du réseau bayésien

8.7.1 Interrelations entre les mécanismes de rupture et les initiateurs

Les mécanismes de rupture envisagés dans la définition du problème sont l'érosion interne et la submersion. Ces derniers sont affectés par le fonctionnement de l'évacuateur qui a donc une incidence sur la probabilité de rupture. Les liens de causalité reliant ces trois éléments sont montrés à la Figure 8.16 et constituent les composantes du risque de rupture du barrage Vuc Mau.

Les initiateurs reliés aux trois composantes du risque sont les précipitations, le niveau du réservoir et la vitesse des vents. Ces initiateurs sont modélisés dans le réseau bayésien

par les variables (nœuds) suivants: *précipitations en 24 heures (P24)*, *niveau maximal du réservoir (NMR)* et *vitesse du vent (VV)*. Les relations causales entre les initiateurs et les composantes du risque sont montrés à la Figure 8.17. Le risque est modélisé par la variable (nœud) *rupture (R)*.

Dans la suite du texte, la construction du réseau bayésien pour le barrage Vuc Mau est réalisée de façon modulaire en considérant en premier lieu chacune des trois composantes du risque de rupture de façon individuelle. Celles-ci seront ensuite combinées selon le modèle causal global de la Figure 8.17 pour former le réseau bayésien à partir duquel seront comparés les risques hydrologique et géotechnique de même que le risque relié à la fiabilité de l'évacuateur.

8.7.2 Fonctionnement de l'évacuateur

8.7.2.1 Modélisation des arbres de défaillance à l'aide des réseaux bayésiens

Le concept des arbres de défaillance est un outil permettant de calculer la fiabilité d'un système comportant plusieurs éléments distincts reliés entre eux par de liens logiques. L'événement devant être analysé, tel la rupture du système, est placé au sommet de l'arbre. Les causes possibles de cet élément sont identifiées et sont décomposées en séquence, des effets vers les causes, jusqu'aux causes initiales pour lesquelles des probabilités a priori doivent être évaluées. La probabilité de rupture du système peut être calculée en considérant les probabilités évaluées pour les causes initiales et les liens logiques entre les éléments (Bobbio, Portinale, Minichino et Ciancamela 2001, Hartford, Baecher, Dise, Smith et Zielinski 2004).

Le concept des arbres de défaillance est basé sur les hypothèses suivantes:

- Les éléments sont binaires (en fonction/hors fonction)
- Les causes initiales sont indépendantes
- Les relations entre les éléments sont le plus souvent représentées par des opérateurs logiques du type "ET" et "OU"

Les arbres de défaillance ont été utilisés entre autres pour calculer la fiabilité de centrales nucléaires (Denis 1998, Hartford, Baecher, Dise, Smith et Zielinski 2004) et de réseaux électriques (Limin, Yongli et Gaofeng 2002). Ces applications touchent surtout des systèmes où les éléments sont constitués de pièces mécaniques et électriques dont les composantes peuvent être bien identifiées et dont les interrelations sont sans équivoque. Aussi, les données relatives à la fiabilité des causes initiales sont souvent disponibles en nombre suffisant pour permettre l'évaluation des probabilités de défaillance à partir de statistiques.

Le fonctionnement de l'évacuateur pourrait être modélisé à l'aide d'un arbre de défaillance car les opérations de levage des vannes sont réalisées par des systèmes mécaniques et électriques comportant des interrelations bien déterminées. L'arbre de défaillance de la Figure 8.18 montre de façon globale l'influence sur la fiabilité de l'évacuateur des composantes communes à toutes les vannes et des composantes spécifiques à chacune des vannes.

Les composantes communes regroupent le système de levage des vannes alors que les composantes individuelles sont liées à l'état de chacune des vannes. L'évacuateur ne peut fonctionner si le mécanisme de levage est défaillant "OU" si l'état des vannes fait en sorte qu'elles ne peuvent être levées. L'arbre de défaillance de la Figure 8.18 est représenté avec plus de détails à la Figure 8.19.

Le mécanisme de levage est composé d'une grue portique qui se déplace afin de se mettre en position vis-à-vis chacune des vannes. Le levage des vannes est réalisé à l'aide d'un treuil fixé à la grue portique. Le mécanisme de levage est défaillant si la grue portique "OU" le treuil sont défaillants.

Le treuil est actionné manuellement ou à l'aide d'un moteur électrique. Le treuil est défaillant s'il ne peut être actionné manuellement "ET" si le moteur électrique est défaillant. Les vannes sont défaillantes si chacune des vannes ne peut être levée. Les problèmes pouvant affecter les vannes incluent les déficiences dans leur structure et dans les systèmes de roulement et de translation.

L'arbre de défaillance de la Figure 8.19 ne modélise pas le fonctionnement partiel de l'évacuateur. L'analyse du risque de rupture du barrage Vuc Mau doit non seulement considérer les cas d'ouverture totale (3 vannes fonctionnelles) et nulle (aucune vanne fonctionnelle) mais aussi les cas d'ouverture partielle où 1 ou 2 vannes sont fonctionnelles.

L'influence du vent sur le fonctionnement de la grue portique ne peut être prise en compte dans l'arbre de défaillance. Cet élément n'est pas binaire, le nombre d'états est obtenu à l'aide de la discrétisation de la distribution des valeurs de vitesse des vents enregistrées sur le site et qui varient de 0 à plus de 140 km/h (voir Figure 8.15).

De plus, l'interdépendance entre la vitesse du vent et le fonctionnement de l'évacuateur et le risque de submersion (voir Figure 8.17) ne peut être modélisée de façon compacte et intuitive à l'aide d'un arbre de défaillance.

Aussi, les arbres de défaillance sont peu flexibles en ce qui a trait aux types de requêtes pouvant être effectuées. La fiabilité du système peut être calculée mais les analyses de

sensibilité pour la détermination de l'élément contribuant le plus au risque sont difficiles (Limin, Yongli et Gaofeng 2002).

La notion d'indépendance des causes initiales qui sous-tend le concept des arbres de défaillance ne permet pas de modéliser les nombreuses interrelations entre les éléments contribuant au risque (Torres-Toledano et Sucar 1998). De plus, les relations logiques entre les éléments sont déterminées et sans équivoque dans les arbres de défaillance (fonctionnement ou défaillance avec une probabilité égale à 1) alors que dans le domaine de la sécurité des barrages elles sont la plupart du temps incertaines.

Le concept des réseaux bayésiens peut être utilisé pour profiter des fonctionnalités des arbres de défaillance tout en considérant mieux les aspects complexes et incertains reliés au risque de rupture.

Les connexions en "OU" peuvent être modélisées dans un réseau bayésien à l'aide d'une connexion convergente où tous les nœuds sont binaires et où les causes situées à un niveau inférieur d'un arbre de défaillance sont les parents de l'élément au niveau supérieur (voir Figure 8.20).

Les probabilités associées aux causes sont les mêmes valeurs a priori utilisées dans l'arbre de défaillance. L'opération logique "OU" est réalisée dans la table de probabilités de l'effet. La probabilité d'occurrence de ce nœud est de 1 si une ou plusieurs des causes sont présentes alors qu'elle est égale à zéro si aucune des causes ne survient. La table de probabilités résultante est montrée à la Figure 8.20.

Les connexions en "ET" peuvent aussi être modélisées à l'aide d'une connexion convergente (voir Figure 8.21).

La particularité de la Figure 8.21 par rapport à la Figure 8.20 se situe au niveau de la table de probabilités associée à l'effet. L'opération logique "ET" est réalisée en spécifiant une probabilité d'occurrence de 1 seulement si toutes les causes sont présentes. La table de probabilités résultante est montrée à la Figure 8.21.

La modélisation du fonctionnement, et non de la défaillance, de l'évacuateur réalisée dans les prochaines sections est basée en partie sur l'arbre de défaillance de la Figure 8.19 qui est transformé en réseau bayésien à l'aide des principes illustrés aux Figures 8.20 et 8.21. Les variables, leurs états, les liens de causalité et les probabilités sont déterminés pour tenir compte des interdépendances et des incertitudes reliées à l'influence du fonctionnement de l'évacuateur sur le risque de rupture du barrage Vuc Mau.

8.7.2.2 Construction du modèle causal

Les variables servant à décrire le fonctionnement de l'évacuateur n'indiquent pas de façon implicite ou explicite la réalisation d'un mécanisme de rupture. Elles constituent toutefois un ensemble de phénomènes et d'états pouvant influencer le risque de submersion et d'érosion interne. Le modèle causal pour le fonctionnement de l'évacuateur est donc réalisé à l'aide de variables externes reliées à l'initiateur *VV* (voir Figure 8.17).

Les six causes initiales identifiées dans l'arbre de défaillance de la Figure 8.19 sont représentées à la Figure 8.22 par six nœuds binaires. Ces derniers indiquent le fonctionnement ou non de la grue portique (*GP*), de l'alimentation électrique (*AE*) et du système manuel (*SM*) de même que de chacune des trois vannes (*V1*, *V2* et *V3*). Ces nœuds comprennent les états *oui* et *non*.

Le fonctionnement du mécanisme de levage est modélisé par le nœud binaire *ML* comprenant les états *oui* et *non* auquel sont reliés les causes *GP*, *AE* et *SM*.

Les nœuds indiquant le fonctionnement du mécanisme de levage et de chacune des vannes sont les causes reliées à la variable *fonctionnement de l'évacuateur* modélisée par le nœud *FE* comprenant les états *aucune vanne*, *1 vanne*, *2 vannes* et *3 vannes*. Ces états tiennent compte des quatre possibilités concernant le nombre de vannes fonctionnelles.

Le réseau bayésien modélisant le fonctionnement de l'évacuateur est montré à la Figure 8.22. La vitesse des vents influence directement le fonctionnement de la grue portique. Le nœud *VV* est donc un parent du nœud *GP*. Le nombre d'états du nœud *VV* est déterminé à partir des données disponibles et des informations recueillies lors de la visite sur le site concernant le fonctionnement de la grue portique durant les périodes de grands vents. Le nombre d'états doit aussi permettre de modéliser avec suffisamment de détail l'effet du vent sur la remontée des vagues. Les intervalles associés au nœud *VV* sont les suivants (en km/h): $VV < 80$, $80 \leq VV < 110$, $110 \leq VV < 140$ et $VV \geq 140$. Ces valeurs correspondent à des remontées des vagues de 2, 3 et 4 m respectivement (voir Tableau 8.5).

8.7.2.3 Détermination des probabilités

La table de probabilités reliée au nœud *VV* est déterminée à partir de la Figure 8.15 et est montrée au Tableau 8.6.

Les probabilités a priori reliées aux six nœuds modélisant les causes initiales de l'arbre de défaillance de la Figure 8.19 sont déterminées par jugement à partir d'études de cas sur d'autre aménagements et de l'inspection visuelle réalisée au site de Vuc Mau.

Le Comité Australien des Grands Barrages (ANCOLD) a colligé des données concernant des études de fiabilité réalisées sur plusieurs évacuateurs. Cette étude (ANCOLD 2001) a montré que la probabilité de défaillance des vannes et des systèmes auxiliaires faisant l'objet d'un entretien minimal est de l'ordre de 0,01 à 0,1. Compte tenu de la mauvaise condition de l'évacuateur Vuc Mau, la probabilité est fixée à 0,1 pour chacun des nœuds modélisant les causes initiales de défaillance. La table des probabilités des nœuds *AE*, *SM*, *V1*, *V2* et *V3* est montrée au Tableau 8.7.

Le fonctionnement de la grue portique étant affecté par les vents, la probabilité de défaillance de 0,1 est considérée valable pour le cas où les vents sont les plus faibles (< 80 km/h). L'expérience des opérateurs de la grue portique indique que celle-ci est presque inutilisable lorsque les vents sont très forts (≥ 140 km/h). La probabilité de défaillance dans ce cas est fixée à 0,9. Les probabilités pour les états intermédiaires varient proportionnellement entre les valeurs extrêmes. La table de probabilités du nœud *GP* est montrée au Tableau 8.8.

Le fonctionnement du mécanisme de levage (*ML*) requiert le fonctionnement de la grue portique (*GP*) "ET" du treuil. Ce dernier requiert le fonctionnement du système de levage manuel (*SM*) "OU" électrique (*AE*). Les probabilités reliées au nœud *ML* sont déterminées à partir des relations logiques entre les nœuds et des principes illustrés aux Figures 8.20 et 8.21. La table de probabilités du nœud *ML* est montrée au Tableau 8.9.

Le fonctionnement de l'évacuateur est déterminé à partir de l'état du mécanisme de levage et de chacune des trois vannes. Lorsque le mécanisme de levage ne fonctionne pas (*ML = non*), l'évacuateur est aussi hors fonction c'est-à-dire que la valeur de *P(FE = aucune vanne)* est égale à 1. Lorsque le mécanisme de levage fonctionne (*ML = oui*), l'état du nœud *FE* dépend du nombre de vannes fonctionnelles. Cette valeur est déterminée à partir de l'état des nœuds *V1*, *V2* et *V3*. La table de probabilités du nœud *FE* est montrée au Tableau 8.10.

8.7.3 Submersion de la crête

8.7.3.1 Construction du modèle causal

Ce mécanisme de rupture comprend le risque de submersion causé par un niveau du réservoir supérieur à la cote minimale de la crête qui est égale à 24,85 m et aussi le risque de déferlement en crête causé par les vagues générées par le vent. Le déferlement se produit lorsque la somme du niveau du réservoir et de la hauteur de remontée totale due au vent est supérieure à 24,85 m.

Les initiateurs reliés au mécanisme de rupture par submersion comprennent le niveau maximal du réservoir atteint lors d'une crue (*NMR*), la quantité de précipitations tombées en 24 heures (*P24*) et la vitesse des vents (*VV*). Les relations entre les initiateurs sont montrées à la Figure 8.17.

Les états reliés à *P24* sont basés sur les résultats des calculs de laminage de crues (voir Tableau 8.3), les intervalles sont les suivants (mm en 24 heures): $195 \leq P24 < 416$, $416 \leq P24 < 636$, $636 \leq P24 < 790$, $790 \leq P24 < 890$, $890 \leq P24 < 1000$ et enfin $P24 \geq 1000$. Les valeurs des intervalles proviennent des résultats correspondant aux périodes de récurrence considérées.

Même si *NMR* n'est pas un nœud comportant des probabilités a priori, ce dernier est quand même considéré comme un initiateur car il est le premier élément permettant de décrire de façon explicite le mécanisme de submersion.

Pour la majorité des réservoirs, les données concernant leur niveau font l'objet d'un suivi routinier. Les données sont alors disponibles en assez grand nombre pour réaliser des analyses statistiques permettant de trouver les périodes de récurrence correspondant à différents niveaux durant des événements de crues. Bien qu'ils soient des causes des

variations du niveau du réservoir, les facteurs tels les précipitations sont souvent inclus implicitement dans les évaluations de niveaux en fonction de périodes de récurrence.

Dans le cas de l'aménagement Vuc Mau, étant donné l'absence de données relatives aux niveaux du réservoir et la présence de quelques statistiques de précipitations, ces dernières sont modélisées explicitement à l'aide du nœud *P24* qui devient une des deux causes du nœud *NMR* (voir Figure 8.23).

Les états correspondants à *NMR* prennent en compte le niveau maximum actuel du réservoir qui est de 18 m et le niveau minimum de la crête mesuré à 24,85 m. Ces valeurs sont les niveaux extrêmes considérés, les valeurs ne sont jamais inférieures à 18 m avant les périodes de crues et les niveaux supérieurs à 24.85 m provoquent le rupture du barrage. Cette plage de valeurs a été divisée en intervalles d'environ 1,5 m: $18 \leq NMR < 19{,}5$, $19{,}5 \leq NMR < 21$, $21 \leq NMR < 22{,}5$, $22{,}5 \leq NMR < 24{,}85$ et enfin $NMR \geq 24{,}85$. Ces valeurs correspondent aux états du nœud *NMR*.

Le nombre de vannes fonctionnelles a une incidence directe sur le niveau du réservoir, la possibilité de submersion est donc aussi affectée par le fonctionnement de l'évacuateur qui est alors la deuxième cause du niveau maximum atteint en période de crue (voir Figure 8.23).

La submersion de la crête et le déferlement qui définissent le mécanisme de rupture par submersion sont modélisés à l'aide d'indicateurs directs décrivant de façon explicite ces deux phénomènes.

L'effet de la vitesse des vents provoque une remontée du réservoir qui est modélisée à l'aide de la variable *remontée des vagues* qui comprend les intervalles suivants (en m): $RV < 2$, $2 \leq RV < 3$, $3 \leq RV < 4$ et $RV \geq 4$. Ces intervalles correspondent aux résultats montrés au Tableau 8.5.

La possibilité de submersion est modélisée à l'aide de la variable *submersion ou déferlement* qui prend en compte les deux causes possibles de ce phénomène. Le nœud *SD* a donc pour causes les nœuds *RV* et *NMR* et a pour effet la rupture (*R*) (voir Figure 8.23). Les nœuds *SD* et *R* sont binaires et comprennent les états *oui* et *non*.

8.7.3.2 Détermination des probabilités

La table de probabilités reliée au nœud *P24* est déterminée à partir de la Figure 8.12 et est montrée au Tableau 8.11.

Les probabilités reliées au nœud *NMR* sont déterminées à partir de la Figure 8.14 qui est le résultat final des calculs de laminage de crues effectués à la Section 8.5. Les intervalles associés au nœud *P24* correspondent à chacun des segments de droite de la Figure 8.14. Par exemple, le segment de droite correspondant à *FE = 0 vanne* et 195 mm $\leq$ *P24* < 416 mm est décrit par les points (1, 22) et (0,1, 24) selon l'axe *x* supérieur. La probabilité que *NMR* soit compris entre 21 et 22,5 m est de 0,522 selon l'axe *x* supérieur. La table de probabilités du nœud *NMR* est montrée au Tableau 8.12.

La table de probabilités du nœud *RV* qui est montrée au Tableau 8.13 est basée sur les résultats des calculs de remontée des vagues présentés au Tableau 8.5. Par exemple, les calculs indiquent une remontée de 2 m et 3 m pour des vents de 80 et 110 km/h respectivement. La valeur de *P(2 m* $\leq$ *RV* < *3 m)* est donc égale à 1 pour 80 km/h $\leq$ *VV* < 110 km/h.

Les probabilités de submersion ou déferlement (*SD*) sont déterminées en faisant la somme du niveau maximum du réservoir (*NMR*) et de la remontée des vagues (*RV*). Si la somme est supérieure à la cote de la crête, qui est de 24,85 m, la valeur de *P(SD = oui)* est égale à 1. Si la somme est inférieure à 24,85 m, alors *P(SD = oui)* = 0. Par exemple,

si 2 m $\leq RV <$ 3 m et 19,5 m $\leq NMR <$ 21 m, la somme de ces deux paramètres varie de 21,5 à 24 m et *P(SD = oui)* est donc égale à 0.

Dans les cas où la somme de *RV* et *NMR* peut être à la fois inférieure et supérieure à 24,85 m, la valeur de *P(SD)* est déterminée à l'aide de simulations de Monte Carlo. La Figure 8.24 montre un exemple de calcul pour $RV <$ 2m et 22,5 m $\leq NMR <$ 24,85 m où les simulations indiquent que $P(SD < 24{,}85\ m) = 0{,}5766$ donc que *P(SD = oui)* est égale à 0,4234. La table de probabilités du nœud *SD* est montrée au Tableau 8.14.

La rupture du barrage Vuc Mau dépend à la fois du risque de submersion et d'érosion interne (voir Figure 8.17). Les probabilités reliées au nœud *R* sont donc aussi tributaires du modèle causal pour l'érosion interne. La table de probabilités du nœud *R* est évaluée à la Section 8.8.

8.7.4 Érosion interne

8.7.4.1 Construction du modèle causal

L'écoulement de l'eau dans un barrage génère des forces érosives qui tendent à arracher les particules de sol. Le transport du sol érodable le long de zones plus perméables crée des vides dans le barrage et/ou sa fondation. Si ces derniers sont continus et en contact avec le réservoir, la rupture est imminente.

La propension à l'érosion interne dépend des caractéristiques locales les plus défavorables en ce qui a trait à la présence d'horizons perméables, de sol érodable et de gradients d'écoulement élevés. L'absence de zone de filtre a aussi une incidence très importante sur la propension à l'érosion interne. Le calcul d'un coefficient de sécurité par rapport à l'érosion interne est impraticable à cause de l'importance des discontinuités et

des gradients hydrauliques locaux qui ne peuvent être modélisés dans tous leurs détails (Peck 1991).

L'approche utilisée dans cette étude est de considérer les pires conditions envisageables pour le barrage Vuc Mau compte tenu des informations disponibles et de l'inspection réalisée.

Le phénomène d'érosion interne peut être décrit en 4 étapes (Fell, Wan, Cyganiewicz et Foster 2003):

1. Initiation à travers une zone plus perméable. Cette dernière peut résulter de l'hétérogénéité entre les couches de sol mises en place durant la construction, de la mauvaise compaction du remblai et de la présence de structures rigides dans le barrage.
2. Poursuite de l'érosion. Le transport de particules de sol érodable se réalise en l'absence de filtres efficaces lorsque le gradient hydraulique local au droit de la zone plus perméable est suffisamment élevé.
3. Progression de l'érosion. Le transport de particules de sol érodable s'accélère et il y a formation de vides.
4. Formation d'une brèche. La rupture survient lorsque les vides sont continus et en contact avec le réservoir.

L'initiateur relié au mécanisme de rupture par érosion interne est le niveau maximal du réservoir atteint lors d'une crue (*NMR*). La relation entre cet initiateur et l'érosion interne est montrée à la Figure 8.17. Le modèle causal pour ce mécanisme de rupture est basé sur les étapes nécessaires à sa réalisation.

L'érosion interne est décrite de façon explicite par la présence d'un gradient hydraulique suffisamment élevé pour provoquer un transport de particules de sol. Ces deux

phénomènes sont représentés par les indicateurs direct *gradient maximum* (*GM*) et *transport de particules* (*TP*).

En tenant compte des densités typiques de l'argile faiblement compactée, le gradient théorique critique provoquant des phénomènes de boulance est de l'ordre de 0,85. La boulance se produit lorsque les forces d'écoulement dirigées vers le haut sont égales au poids de la colonne de sol. Les contraintes effectives tendent alors vers zéro et le risque de transport de particules devient très grand. Le gradient hydraulique dont il est question ici est le gradient global qui est égal à la perte de charge sur la longueur d'écoulement et qui présuppose un sol homogène.

En pratique, le gradient critique réel est en grande partie contrôlé par des phénomènes locaux tels la présence de discontinuités et de variations de perméabilité dans le sol qui sont propres à chaque ouvrage. La prédiction d'un gradient critique est donc problématique car elle doit tenir compte de phénomènes très variables et difficiles à quantifier.

L'expérience du USACE avec des digues de protection dans la vallée du Mississipi (Mansur, Postol et Salley 2000) montre que des problèmes sévères d'érosion interne sont observés lorsque le gradient est supérieur à 0,58. La pratique usuelle au Québec est de limiter les gradients de sortie à 0,3 pour tenir compte des incertitudes reliées à la au risque d'érosion interne. Une étude réalisée sur les ruptures par érosion interne (Foster, Fell et Spannagle 2002) a montré que plusieurs des ouvrages qui se sont rompus présentaient des gradients variant de 0,1 à 1,0. Certains ouvrages composés d'argiles dispersives se sont même rompus alors que les gradients étaient inférieurs à 0,1.

Les états correspondants au nœud *GM* sont déterminés en considérant les valeurs dont il est question dans la littérature et celles qui sont utilisées en pratique. Les valeurs

possibles pour le gradient hydraulique local maximum sont divisées selon les intervalles suivants: $GM < 0{,}1$, $0{,}1 \leq GM < 0{,}3$ et $GM \geq 0{,}3$.

Après le nœud *GM*, la séquence de phénomènes décrivant de façon explicite l'érosion interne se poursuit avec les variables *transport de particules* (*TP*) et *rupture* (*R*). Les nœuds *TP* et *R* sont binaires et comprennent les états *oui* et *non*. Les liens causaux entre l'initiateur et les indicateurs directs sont montrés à la Figure 8.25.

D'autres informations dont la présence ne dépend pas de l'occurrence du mécanisme d'érosion interne mais qui contribuent à sa réalisation sont modélisées à l'aide de variables externes.

La présence d'une zone plus perméable est prise en compte à l'aide de la variable *zone perméable* (*ZP*). Cette zone peut se situer dans le corps du barrage et/ou dans sa fondation ou être adjacente à la conduite de béton dans le remblai servant à l'irrigation ou au contact du mur de soutènement droit de l'évacuateur. Ces endroits constituent des points faibles par rapport au danger d'érosion interne. La zone plus perméable est considérée comme continue de l'amont vers l'aval. La présence de cette zone influence le gradient maximum *GM*.

En plus du nœud *GM*, les causes du transport de particules incluent la présence de sol érodable et l'absence de filtres efficaces. Ces deux paramètres sont modélisés à l'aide des variables *sol érodable* (*SE*) et *sortie non filtrée* (*SNF*).

Les trois variables externes, représentées par les nœuds *ZP*, *SE* et *SNF*, sont binaires et comprennent les états *oui* et *non*. Le modèle causal pour le risque d'érosion interne est montré à la Figure 8.25.

8.7.4.2 Détermination des probabilités

La présence dans le barrage d'une zone perméable continue de l'amont à l'aval dépend entre autres des procédures utilisées lors de la construction. Des essais géotechniques sur des sites voisins du barrage Vuc Mau ont montré que les argiles sableuses avec un peu de gravier qui composent les barrages et leurs fondations dans cette région ont une plasticité moyenne. Ce matériau est donc sujet à la contraction et à la fissuration lorsqu'il s'assèche.

La construction du barrage s'est déroulée sur une période de dix ans entrecoupée de longs arrêts dus aux nombreuses contraintes logistiques et économiques de l'époque. La présence d'horizons fissurés aux cotes correspondantes à l'avancement des travaux durant les arrêts prolongés est donc possible. De plus, la faible compaction du remblai peut favoriser la formation d'horizons plus perméables au contact de la conduite de béton pour l'irrigation et du mur de l'évacuateur. La table de probabilités reliée au nœud *ZP* est montrée au Tableau 8.15, les valeurs numériques ont été évaluées par jugement.

Les gradients hydrauliques dans le barrage et sa fondation sont calculés à l'aide d'analyses d'écoulement par éléments finis. La section maximale a été utilisée (voir Figure 8.6) car cet endroit a été le plus affecté par l'érosion interne avant l'imposition des contraintes d'exploitation du réservoir. La géométrie du barrage a été déterminée sur place par arpentage. Les caractéristiques géotechniques des sols ont été estimées globalement à partir des observations faites sur le terrain.

Les analyses d'écoulement ont été faites pour différents niveaux de réservoir. Il est supposé que le temps requis pour atteindre les conditions d'écoulement permanent dans le remblai suite à une hausse du niveau du réservoir est nul. La présence de zones perméables a été prise en compte dans les analyses en supposant une perméabilité

horizontale du remblai dix fois plus élevée que la perméabilité verticale. La Figure 8.26 montre un exemple de réseau d'écoulement calculé.

Les probabilités reliées au nœud *GM* sont basées sur les résultats des calculs qui montrent que le gradient de sortie maximum est localisé au bas du remblai. La table de probabilités est montrée au Tableau 8.16. Les valeurs indiquées sont évaluées par jugement et tiennent compte du modèle d'écoulement et de l'incertitude dans les résultats.

L'érodabilité d'un sol dépend de sa cohésion qui peut offrir une certaine résistance à l'érosion causée par un écoulement ayant un gradient de l'ordre de ceux considérés dans cette étude. La présence de sol érodable dans le barrage ou sa fondation implique un horizon plus sablonneux s'étendant de l'amont vers l'aval. Cet horizon pourrait se retrouver dans la fondation alluvionnaire au droit du lit de la rivière Hoang Mai. Aussi, une zone d'argile desséchée et mal compactée, possiblement localisée au contact de la conduite d'irrigation ou de l'évacuateur, serait moins résistante à l'érosion. Les probabilités reliées au nœud *SE* sont évaluées par jugement et sont montrées au Tableau 8.17.

Le barrage et sa fondation ne comprennent pas de zones filtres. Cependant, si les sols ont une granulométrie étalée et continue, ces derniers peuvent présenter certaines caractéristiques d'auto-filtration. Le potentiel d'auto-filtration peut être évalué en estimant si la fraction grossière du sol peut agir comme filtre pour la fraction fine (Kenney et Lau 1985). L'argile sableuse avec un peu de gravier composant le remblai et sa fondation pourrait peut être avoir les caractéristiques d'un matériau auto-filtrant. Il a été jugé que ces dernières ne pouvaient cependant pas offrir à elles seules une filtration efficace de l'écoulement. Les probabilités reliées au nœud *SNF* sont évaluées par jugement et sont montrées au Tableau 8.18.

Les probabilités reliées au transport de particules indiquent la possibilité que ce phénomène se réalise et progresse vers l'amont en formant des vides continus. Selon une étude récente (Fell, Wan, Cyganiewicz et Foster 2003), lorsque le transport de particules est initié, le temps requis pour que le phénomène progresse jusqu'au réservoir est de l'ordre de quelques jours.

Lors d'une crue, le niveau du réservoir est à une valeur supérieure à 18 m pour une durée pouvant varier de un à sept jours environ (voir un exemple à la Figure 8.13). Même si toutes les conditions requises sont présentes, il est possible que le transport de particules ne se produise pas si la surcharge hydraulique n'a pas été appliquée sur une assez longue période.

Dans le cas où l'écoulement est filtré (*SNF* = non), la probabilité de transport de particules est égale à 0. Aussi, le nœud *TP* est jugé moins probable (< 0,5) pour des gradients inférieurs à 0,3 et plus probable dans le cas contraire. Les probabilités reliées au nœud *TP* sont évaluées par jugement et sont montrées au Tableau 8.19.

8.8 Réseau bayésien pour le barrage Vuc Mau

Les réseaux bayésiens construits pour les trois composantes du risque de rupture, c'est-à-dire le fonctionnement de l'évacuateur et les risques de submersion et d'érosion interne, sont combinés selon le modèle causal global de la Figure 8.17. Le réseau bayésien ainsi obtenu est présenté à la Figure 8.27 et est utilisé pour comparer les risques hydrologique, géotechnique et de fiabilité de l'évacuateur.

Avant de réaliser les requêtes qui serviront à prioriser les interventions visant à augmenter le sécurité à long terme du barrage Vuc Mau, la table de probabilités reliée à

la rupture doit être évaluée en tenant compte de l'occurrence des deux mécanismes de rupture considérés.

L'analyse d'études de cas de submersion a montré que la rupture survient en moins de 2 heures environ (Dewey et Gillette 1993). Ce délai est relativement court par rapport à la durée des crues envisagées (voir un exemple à la Figure 8.13). Aussi, même lorsque le niveau maximum atteint est inférieur à la crête, les dommages potentiels causés par les vagues devraient être très grands étant donné l'absence de protection en enrochement ou en béton sur les parements du barrage. Pour ces raisons, il est supposé que la probabilité de rupture est de 1 s'il y a submersion ou déferlement.

En l'absence de transport de particules et de submersion ou déferlement, la probabilité de rupture est supposée égale à la probabilité de rupture historique moyenne estimée selon la méthode de l'Université du New South Wales en Australie (Foster, Fell et Spannagle 2000). Cette valeur est de l'ordre de 0,01 pour un remblai homogène ayant une faible compaction, comprenant une conduite dans l'ouvrage et où des phénomènes de transport de particules n'ont pas été observés.

Une probabilité de rupture de 0,7 est attribuée dans le cas où le transport de particules progresse et forme des vides continus. Cette valeur tient compte de la possibilité que le transport de particules n'ait pas le temps de progresser jusqu'au réservoir suite à une augmentation du niveau du réservoir lors d'une crue ou que cette progression soit stoppée par un effondrement du matériau saturé au dessus des vides formés. La table de probabilités reliée au nœud *R* est montrée au Tableau 8.20.

8.9 Détermination des mesures optimales de réduction du risque

Les requêtes réalisées sur le réseau bayésien de la Figure 8.27 doivent permettre d'identifier les facteurs contribuant le plus au risque et de prioriser les travaux de réfection. Les options analysées sont les travaux déjà envisagés pour réduire le risque de rupture du barrage Vuc Mau. Ces travaux sont décrits au Tableau 8.21 avec une évaluation sommaire des coûts de réalisation.

La réfection des vannes et du mécanisme de levage (option 1) consiste au remplacement des toutes les pièces mécaniques et électriques de l'évacuateur. L'ajout d'une quatrième vanne (option 2) requiert l'excavation de la paroi rocheuse en rive gauche afin d'installer les équipements et d'élargir le canal de fuite de même que l'agrandissement de la structure de béton de l'évacuateur. Le coût comprend aussi de nouveaux équipements électro-mécaniques pour la quatrième vanne. En pratique, l'option 2 ne peut être réalisée sans la réfection des trois autres vannes et du mécanisme de levage (option 1). Le coût de l'option 2 est de 2,5 M$ et comprend les travaux à réaliser pour l'option 1 qui s'élèvent à 1,5 M$.

L'option 3 consiste à mettre en place des toiles géotextiles et des remblais stabilisants au pied du barrage, surtout dans la section du lit de la rivière. L'option 4 est réalisée par la mise en place d'un parapet de béton auquel s'ajoute un parement de protection en enrochement et en béton. Ce parement aurait pour rôle de protéger le barrage contre l'attaque des vagues.

La première étape à réaliser pour la détermination de l'option optimale en termes de coûts et d'effet sur la réduction de $P(R)$ est l'identification, à l'aide des concepts d'impact (Équation 7.9) et de criticité (Équation 7.10), des variables les plus significatives par rapport à la probabilité de rupture. Ces variables sont reliées aux faits e qui augmentent

P(R). Un impact maximal négatif et une criticité maximale indiquent les variables sur lesquelles des interventions pourraient être envisagées en priorité.

Le Tableau 8.22 montre les nœuds et les états les plus critiques. Compte tenu du modèle causal de la Figure 8.27 et de la loi de probabilités sous-jacente, la probabilité marginale de rupture calculée est de $P(R) = 0{,}2468$.

Les quatre nœuds les plus critiques sont reliés au mécanisme de rupture par submersion. Par convention, lorsque le noeud *SD* est égal à *oui*, la rupture est certaine ce qui explique son impact négatif important. La valeur de $P(SD) = 0{,}1524$ comprend le risque de défaillance de l'évacuateur, la remontée du niveau du réservoir due aux précipitations et l'effet des vagues.

De façon spécifique, la composante la plus critique du risque de submersion est le fonctionnement de l'évacuateur. De plus, la criticité des nœuds *FE* et *ML* est fortement reliée à l'état du nœud *GP*. En effet, lorsque *GP* = non, les valeurs de *P(ML = non)* et de *P(FE = 0 vanne)* sont égales à l'unité ce qui est conforme à la logique illustrée dans l'arbre de défaillance de la Figure 8.19 et qui a été reprise dans le réseau bayésien de la Figure 8.27. La fiabilité de la grue portique est l'aspect le plus critique dans le fonctionnement du mécanisme de levage car celle-ci est directement affectée par le vent ce qui augmente sa probabilité de défaillance. Une intervention ciblée sur la grue portique aurait donc la meilleure possibilité de réduire le risque de rupture du barrage par submersion en crête.

Le transport de particules, relié au mécanisme de rupture par érosion interne, est aussi une composante critique du risque de rupture. Cependant, les interventions relatives au transport de particules ne se font pas directement sur le nœud *TP* mais plutôt sur ses trois causes qui sont *GM*, *SE* et *SNF*. Par exemple, la réduction du gradient peut se réaliser par l'imperméabilisation du remblai par injection. Cette solution aurait aussi pour

avantage d'annuler la possibilité d'érosion du sol. La probabilité de transport de particules passerait donc de $P(TP) = 0{,}158$ à $P(TP \mid GM < 0{,}1, SE = non) = 0{,}04$.

Cependant, la meilleure façon d'intervenir sur le nœud *TP* est de mettre en place des zones de filtres qui annuleraient la possibilité de retrouver des points de sortie d'écoulement non filtrés. La probabilité de transport de particules passe alors de 0,158 à $P(TP \mid SNF = non) = 0$. Une intervention ciblée sur *SNF* par la mise en place de zones de filtres offrirait donc une possibilité efficace de réduire le risque de transport de particules et donc de rupture du barrage.

En conclusion, le risque de submersion est légèrement supérieur au risque d'érosion interne car $P(SD, R) = 0{,}1524$ et $P(TP, R) = 0{,}12$. Les nœuds individuels sur lesquels une intervention directe est possible et diminue le plus $P(R)$ sont *GP* pour la submersion et *SNF* pour l'érosion interne.

Cependant, les quatre options envisagées n'impliquent pas nécessairement des interventions sur des nœuds individuels. La traduction de l'effet de ces options sur le risque de rupture en termes probabilistes est requise avant la priorisation.

La réfection des vannes et du mécanisme de levage implique le remplacement de toutes les pièces mécaniques et électriques de l'évacuateur et non seulement de la grue portique. Étant donné le très mauvais état de l'évacuateur, cette réfection ne peut être réalisée partiellement. Les trois vannes (*V1*, *V2* et *V3*) doivent être changées de même que la grue portique (*GP*) et les systèmes permettant d'actionner le mécanisme de levage (*AE* et *SM*).

La probabilité de défaillance de vannes et d'équipements de levage récents et bien entretenus est de l'ordre de 10^{-4} (ANCOLD 2001). En première approximation, cette probabilité est supposée nulle. Selon les relations logiques illustrées à la Figure 8.19 et

reprises dans le réseau bayésien de la Figure 8.27, l'effet sur la rupture de la fonctionnalité des nœuds *V1*, *V2*, *V3*, *GP*, *AE* et *SM* est le même que l'imposition de l'état *3 vannes* pour le fonctionnement de l'évacuateur. L'effet sur la rupture de l'option 1 est donc désignée en notation probabiliste par $P(R \mid FE = 3\ vannes)$.

L'ajout d'une vanne vise l'augmentation de la capacité de l'évacuateur afin que la probabilité de submersion devienne nulle et ceci en tenant compte de l'effet du vent. Des calculs hydrauliques basés sur des données plus représentatives pourraient indiquer qu'une cinquième vanne serait nécessaire pour annuler le risque de submersion ce qui influence les coûts à la hausse. Toutefois, en première approximation, cette option est analysée en supposant qu'une quatrième vanne soit suffisante. L'effet sur la rupture de l'option 2 est donc désignée en notation probabiliste par $P(R \mid \neg SD)$.

L'effet sur la rupture de la mise en place de bermes filtrantes (option 3) se traduit en termes probabilistes par $P(R \mid \neg SNF)$.

Le rehaussement de la crête du barrage est réalisé à l'aide d'un parapet de béton dont la hauteur est suffisante pour annuler le risque de submersion. L'effet sur la rupture de l'option 4 est donc désignée en notation probabiliste par $P(R \mid \neg SD)$.

Le Tableau 8.23 montre les options considérées et leur impact positif sur la probabilité de rupture. Les indices de priorité ont été calculés avec le coût en M$.

La mesure optimale de réduction du risque est la mise en place de bermes filtrantes (option 3) suivi de près par la réfection de l'évacuateur de crue (option 1). Compte tenu des nombreuses incertitudes reliées aux données disponibles, ces deux options pourraient être considérées équivalentes. La construction d'un parapet pourrait possiblement être une solution avantageuse si le risque de rupture est encore jugé trop

élevé après avoir réalisé les options 1 et 3. L'augmentation de la capacité de l'évacuateur n'apparaît pas comme une solution optimale pour réduire le risque.

Cette analyse permet de répondre aux interrogations posées lors de la définition du problème (voir Section 8.3). Le mécanisme de rupture contribuant le plus au risque est la submersion. Ce mécanisme est contrôlé surtout par le fonctionnement de l'évacuateur et en particulier de la grue portique. La mise en place de bermes filtrantes diminue le risque de façon optimale et est à réaliser en priorité.

Cependant, étant donné l'incertitude considérable associée aux informations disponibles et l'absence de données de base telles les niveaux du réservoir, il est possible de conclure à partir des résultats obtenus que la première tâche à réaliser ne devrait pas être la réduction du risque mais plutôt la réduction des incertitudes. Les enjeux reliés à ce problème sont importants: ils incluent la sécurité du barrage (près 22000 personnes à risque) et les pertes agricoles et économiques récurrentes. Les décisions concernant la réduction du risque doivent donc s'appuyer sur des évaluations réalistes afin d'assurer la sécurité du barrage et des personnes et aussi d'optimiser les investissements. Un investissement d'environ 5% du coût des travaux prévus (selon des ordres de grandeur typiques) pour la collecte de données supplémentaires et la mise à jour des calculs permettrait de prendre une décision basée sur des informations plus conformes à la situation réelle.

Les valeurs de probabilités du réseau bayésien de la Figure 8.27 proviennent de données météorologiques et géotechniques partielles et incertaines. Les calculs de laminage de crues et les analyses d'écoulement sur lesquels reposent les évaluation des risques de submersion et d'érosion interne mériteraient d'être mis à jour à l'aide de données plus représentatives. Cette réduction des incertitudes permettrait non seulement de mieux évaluer les probabilités mais aussi de mieux définir l'envergure des travaux à réaliser et ainsi obtenir une évaluation des coûts plus précise.

La réalisation de quelques forages permettrait de connaître la stratigraphie du barrage et de sa fondation ainsi que les propriétés géotechniques des matériaux. Ces données influencent les évaluations reliées à la présence d'une ou plusieurs zones perméables (*ZP*) et de sol érodable (*SE*). Les données serviraient aussi à construire un modèle plus détaillé pour les analyses d'écoulement (voir Figure 8.26). Ce modèle serait calé avec les mesures faites à l'aide de piézomètres à installer dans les forages. Les évaluations des gradients maximum (*GM*) et leur localisation permettraient de modifier les évaluations de probabilités et d'identifier les zones les plus critiques du barrage et de sa fondation où des travaux sont requis ce qui influence aussi les coûts des travaux.

La collecte de données météorologiques et topographiques plus complètes permettrait d'établir un hydrogramme de crue qui servirait de base à la mise à jour des calculs de laminage. Ces données et calculs influencent les évaluations faites pour les précipitations et leur durée (*P24*), la vitesse des vents (*VV*) et enfin les niveaux maximum du réservoir atteints lors de crues (*NMR*).

8.10 Résumé

Le concept des réseaux bayésiens a contribué à la solution d'une problématique réelle rencontrée par l'auteur. Le barrage et l'évacuateur de l'aménagement Vuc Mau au Vietnam ont été construits pour l'irrigation de rizières et la protection contre les crues. Ces structures présentent plusieurs problèmes techniques pouvant menacer à court terme leur sécurité.

Les études et observations réalisées sur le barrage montrent que le processus d'érosion interne est amorcé et continue de s'aggraver à cause de l'absence de filtres dans la structure et sa fondation. Les restrictions mises en place en rapport au niveau d'exploitation maximal ont permis d'empêcher la progression de l'érosion interne mais

ont aussi eu pour effet de diminuer de façon importante le volume d'eau disponible pour l'irrigation

La capacité d'évacuation actuelle est en deçà des normes vietnamiennes et mondiales. De plus, les composantes mécaniques et électriques sont en mauvais état et peu fiables. La possibilité de ne pas pouvoir ouvrir les vannes est suffisamment grande pour poser un risque supplémentaire de submersion.

Des travaux sont requis pour assurer la sécurité des ouvrages, de la population et des biens en aval de même que pour rétablir la capacité d'évacuation. Compte tenu de l'importance des travaux et des nombreuses interrelations entre les mécanismes de rupture potentiels, une optimisation des options disponibles doit être faite en rapport à leur potentiel de minimisation du risque et de leur coût. Ce travail ne peut être réalisé avec les méthodes d'analyse de risque existantes.

L'utilisation des réseaux bayésiens a permis d'aborder de façon globale les problèmes techniques reliés à la probabilité de rupture du barrage en décrivant les interrelations entre les mécanismes de rupture par submersion et par érosion interne. Il a été possible de comparer, selon le dénominateur commun qu'est la probabilité de rupture, les risques géotechnique et hydrologique de même que le risque relié à la fiabilité des composantes mécaniques/électriques de l'évacuateur. L'analyse réalisée a ainsi permis d'identifier les facteurs contribuant le plus au risque et les travaux de réfection à réaliser en priorité.

La construction du modèle causal a permis de représenter l'influence des précipitations et de la fiabilité des composantes de l'évacuateur sur le niveau du réservoir. En plus d'affecter directement la propension à l'érosion interne, le niveau du réservoir, conjugué à la remontée des vagues dues au vent, sert aussi à définir le risque de submersion. Les états possibles des variables du modèle causal ont été déterminées à l'aide de calculs hydrologiques et hydrauliques, d'études de cas publiées et des données et observations

recueillies sur le terrain. Ces informations ont aussi été utilisées pour la détermination des probabilités conditionnelles pour chacune des variables en fonction de ses causes.

L'utilisation des concepts d'impact, de criticité et d'indice de priorité a permis d'identifier la submersion comme mécanisme de rupture le plus probable. La composante la plus critique du risque de submersion est le fonctionnement de l'évacuateur qui est en majeure partie tributaire de la fiabilité de la grue portique. Le transport de particules, relié au mécanisme de rupture par érosion interne, contribue aussi de façon significative au risque de rupture.

La mesure optimale de réduction du risque est la mise en place de bermes filtrantes suivie de près par la réfection de l'évacuateur. En considérant les nombreuses incertitudes reliées aux données disponibles, ces deux options pourraient être considérées équivalentes. L'ajout d'une quatrième vanne à l'évacuateur et le rehaussement de la crête du barrage n'apparaissent pas comme des options optimales en termes de coûts et de potentiel de réduction du risque.

Cependant, la réduction des incertitudes reliées aux données devrait être considérée en priorité. Cette activité comprend la réalisation de forages, l'installation d'instruments et la collecte de données météorologiques et topographiques. Une évaluation économique plus détaillée des options disponibles est aussi requise.

La réalisation de ces recommandations permettrait de réviser les tables de probabilités sous-jacentes au modèle causal afin de calculer de nouvelles valeurs d'impact, de criticité et d'indice de priorité. Les options de réduction du risque seraient alors priorisées selon un niveau de détail suffisant par rapport à l'importance des investissements requis et des enjeux reliés à la sécurité des ouvrages.

Tableau 8.1: Hydrogramme unitaire

Temps t / T_P	Débit Q / Q_P	Temps t (heures)	Débit Q (m^3/s par mm)
0	0	0	0
0,1	0,015	1,8	0,04
0,2	0,075	3,59	0,19
0,3	0,16	5,39	0,4
0,4	0,28	7,19	0,7
0,5	0,43	8,98	1,07
0,6	0,6	10,78	1,49
0,7	0,77	12,57	1,92
0,8	0,89	14,37	2,22
0,9	0,97	16,17	2,41
1	1	17,96	2,49
1,1	0,98	19,76	2,44
1,2	0,92	21,56	2,29
1,3	0,84	23,35	2,09
1,4	0,75	25,15	1,87
1,5	0,66	26,95	1,64
1,6	0,56	28,74	1,39
1,8	0,42	32,33	1,05
2	0,32	35,93	0,8
2,2	0,24	39,52	0,6
2,4	0,18	43,11	0,45
2,6	0,13	46,7	0,32
2,8	0,098	50,3	0,24
3	0,075	53,89	0,19
3,5	0,036	62,87	0,09
4	0,018	71,85	0,04
4,5	0,009	80,84	0,02
5	0,004	89,82	0,01
10	0	179,63	0

Tableau 8.2: Caractéristiques du réservoir

Niveau du réservoir (m)	Volume du réservoir (10^6 m³)	Commentaire
12,5	11,5	réserve morte
15,5		seuil de l'évacuateur
18		maximum actuel
21	74,1	maximum normal
23,38	108,2	niveau 1:100 ans avec évacuation maximale
24,32	127,1	niveau 1:500 ans avec évacuation maximale

Tableau 8.3: Précipitations et débits en fonction de la période de récurrence (le niveau du réservoir à $t = 0$ est égal à 21 m pour ce calcul)

Récurrence (années)	Précipitations (mm en 24 heures)	Débit maximum entrant (m³/s)	Débit maximum évacué (m³/s)
1	195	486	512
10	416	1036	609
100	636	1584	878
500	790	1967	1038
1000	890	2216	1116
5000	1000	2490	1186

Tableau 8.4: Vitesse des vents

Récurrence (années)	Vitesse du vent (km/h)
2	75
25	125
50	140
100	155

Tableau 8.5: Remontée totale due au vent

Vitesse du vent (km/h)	Remontée totale due au vent (m)
80	2
110	3
140	4

Tableau 8.6: Table de probabilités du nœud *VV*

VV < 80 km/h	0,6667
80 km/h ≤ *VV* < 110 km/h	0,2424
110 km/h ≤ *VV* < 140 km/h	0,0665
VV ≥ 140 km/h	0,0244

Tableau 8.7: : Table de probabilités des nœuds *x* = *AE, SM, V1, V2* et *V3*

x = oui	0,9
x = non	0,1

Tableau 8.8: Table de probabilités du nœud *GP*

	VV < 80 km/h	80 km/h ≤ *VV* < 110 km/h	110 km/h ≤ *VV* < 140 km/h	*VV* ≥ 140 km/h
GP = oui	0,9	0,6333	0,3667	0,1
GP = non	0,1	0,3667	0,6333	0,9

Tableau 8.9: Table de probabilités du nœud *ML*

	GP = oui				*GP* = non			
	SM = oui		*SM* = non		*SM* = oui		*SM* = non	
	AE = oui	*AE* = non	*AE* = oui	*AE* = non	*AE* = oui	*AE* = non	*AE* = oui	*AE* = non
ML = oui	1	1	1	0	0	0	0	0
ML = non	0	0	0	1	1	1	1	1

Tableau 8.10: Table de probabilités du nœud *FE*

	ML = oui							
	V3 = oui				*V3* = non			
	V2 = oui		*V2* = non		*V2* = oui		*V2* = non	
	V1 = oui	*V1* = non	*V1* = oui	*V1* = non	*V1* = oui	*V1* = non	*V1* = oui	*V1* = non
FE = aucune vanne	0	0	0	0	0	0	0	1
FE = 1 vanne	0	0	0	1	0	1	1	0
FE = 2 vannes	0	1	1	0	1	0	0	0
FE = 3 vannes	1	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 8.10 (suite): Table de probabilités du nœud *FE*

	ML = non							
	V3 = oui				*V3* = non			
	V2 = oui		*V2* = non		*V2* = oui		*V2* = non	
	V1 = oui	*V1* = non	*V1* = oui	*V1* = non	*V1* = oui	*V1* = non	*V1* = oui	*V1* = non
FE = aucune vanne	1	1	1	1	1	1	1	1
FE = 1 vanne	0	0	0	0	0	0	0	0
FE = 2 vannes	0	0	0	0	0	0	0	0
FE = 3 vannes	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 8.11: Table de probabilités du nœud *P24*

195 mm ≤ *P24* < 416 mm	0,9
416 mm ≤ *P24* < 636 mm	0,09
636 mm ≤ *P24* < 790 mm	0,008
790 mm ≤ *P24* < 890 mm	0,001
890 mm ≤ *P24* < 1000 mm	0,0008
P24 ≥ 1000 mm	0,0002

Tableau 8.12: Table de probabilités du nœud *NMR*

	195 mm ≤ *P24* < 416 mm				416 mm ≤ *P24* < 636 mm			
FE	0 v.	1 v.	2 v.	3 v.	0 v.	1 v.	2 v.	3 v.
18 ≤ *NMR* < 19,5 m	0	0	0	0	0	0	0	0
19,5 ≤ *NMR* < 21 m	0	0,33	0,72	0,93	0	0	0	0
21 ≤ *NMR* < 22,5 m	0,52	0,6	0,28	0,07	0	0	0,51	0,89
22,5 ≤ *NMR* < 24,85 m	0,48	0,07	0	0	0,89	1	0,49	0,11
NMR ≥ 24,85	0	0	0	0	0,11	0	0	0

	636 mm ≤ *P24* < 790 mm				790 mm ≤ *P24* < 890 mm			
FE	0 v.	1 v.	2 v.	3 v.	0 v.	1 v.	2 v.	3 v.
18 ≤ *NMR* < 19,5 m	0	0	0	0	0	0	0	0
19,5 ≤ *NMR* < 21 m	0	0	0	0	0	0	0	0
21 ≤ *NMR* < 22,5 m	0	0	0	0	0	0	0	0
22,5 ≤ *NMR* < 24,85 m	0	0,67	1	1	0	0	0,4	1
NMR ≥ 24,85	1	0,33	0	0	1	1	0,6	0

	890 mm ≤ *P24* < 1000 mm				*P24* ≥ 1000 mm			
FE	0 v.	1 v.	2 v.	3 v.	0 v.	1 v.	2 v.	3 v.
18 ≤ *NMR* < 19,5 m	0	0	0	0	0	0	0	0
19,5 ≤ *NMR* < 21 m	0	0	0	0	0	0	0	0
21 ≤ *NMR* < 22,5 m	0	0	0	0	0	0	0	0
22,5 ≤ *NMR* < 24,85 m	0	0	0	0,88	0	0	0	0
NMR ≥ 24,85	1	1	1	0,13	1	1	1	1

Tableau 8.13: Table de probabilités du nœud *RV*

	VV < 80 km/h	80 km/h ≤ *VV* < 110 km/h	110 km/h ≤ *VV* < 140 km/h	*VV* ≥ 140 km/h
RV < 2 m	1	0	0	0
2 m ≤ *RV* < 3 m	0	1	0	0
3 m ≤ *RV* < 4 m	0	0	1	0
RV ≥ 4 m	0	0	0	1

Tableau 8.14: Table de probabilités du nœud *SD*

	RV < 2 m				
	18 ≤ *NMR* < 19,5 m	19,5 ≤ *NMR* < 21 m	21 ≤ *NMR* < 22,5 m	22,5≤*NMR* <24,85 m	*NMR* ≥ 24,85 m
SD = oui	0	0	0	0,4234	1
SD = non	1	1	1	0,5766	0

	2 m ≤ *RV* < 3 m				
	18 ≤ *NMR* < 19,5 m	19,5 ≤ *NMR* < 21 m	21 ≤ *NMR* < 22,5 m	22,5≤*NMR* <24,85 m	*NMR* ≥ 24,85 m
SD = oui	0	0	0,1422	0,9741	1
SD = non	1	1	0,8578	0,0259	0

	3 m ≤ *RV* < 4 m				
	18 ≤ *NMR* < 19,5 m	19,5 ≤ *NMR* < 21 m	21 ≤ *NMR* < 22,5 m	22,5≤*NMR* <24,85 m	*NMR* ≥ 24,85 m
SD = oui	0	0,0079	0,7604	1	1
SD = non	1	0,9921	0,2396	0	0

	RV ≥ 4 m				
	18 ≤ *NMR* < 19,5 m	19,5 ≤ *NMR* < 21 m	21 ≤ *NMR* < 22,5 m	22,5≤*NMR* <24,85 m	*NMR* ≥ 24,85 m
SD = oui	0	0,3225	1	1	1
SD = non	1	0,6775	0	0	0

Tableau 8.15: Table de probabilités du nœud *ZP*

ZP = oui	0,7
ZP = non	0,3

Tableau 8.16: Table de probabilités du nœud *GM*

	ZP = oui				
	18 ≤ *NMR* < 19,5 m	19,5 ≤ *NMR* < 21 m	21 ≤ *NMR* < 22,5 m	22,5≤*NMR* <24,85 m	*NMR* ≥ 24,85 m
GM < 0,1	0,5	0	0	0	0
0,1 ≤ *GM* < 0,3	0,5	0,7	0,3	0,1	0,05
GM ≥ 0,3	0	0,3	0,7	0,9	0,95

	ZP = non				
	18 ≤ *NMR* < 19,5 m	19,5 ≤ *NMR* < 21 m	21 ≤ *NMR* < 22,5 m	22,5≤*NMR* <24,85 m	*NMR* ≥ 24,85 m
GM < 0,1	0,95	0,9	0,5	0	0
0,1 ≤ *GM* < 0,3	0,05	0,1	0,5	0,95	0,9
GM ≥ 0,3	0	0	0	0,05	0,1

Tableau 8.17: Table de probabilités du nœud *SE*

SE = oui	0,2
SE = non	0,8

Tableau 8.18: Table de probabilités du nœud *SNF*

SNF = oui	0,8
SNF = non	0,2

Tableau 8.19: Table de probabilités du nœud *TP*

	SE = oui					
	GM < 0,1		0,1 ≤ *GM* < 0,3		*GM* ≥ 0,3	
	SNF = oui	*SNF* = non	*SNF* = oui	*SNF* = non	*SNF* = oui	*SNF* = non
TP = oui	0,1	0	0,2	0	0,7	0
TP = non	0,9	1	0,8	1	0,3	1

	SE = non					
	GM < 0,1		0,1 ≤ *GM* < 0,3		*GM* ≥ 0,3	
	SNF = oui	*SNF* = non	*SNF* = oui	*SNF* = non	*SNF* = oui	*SNF* = non
TP = oui	0,05	0	0,1	0	0,3	0
TP = non	0,95	1	0,9	1	0,7	1

Tableau 8.20: Table de probabilités du nœud *R*

	TP = oui		*TP* = oui	
	SD = oui	*SD* = non	*SD* = oui	*SD* = non
R = oui	1	0,7	1	0,01
R = non	0	0,3	0	0,99

Tableau 8.21: Coût des options envisagées pour la réduction du risque

option	coût (M$)
1. Réfection des vannes et du mécanisme de levage	1,5
2. Ajout d'une quatrième vanne à l'évacuateur	2,5
3. Mise en place de bermes filtrantes au pied du barrage	1
4. Rehaussement de la crête du barrage	2

Tableau 8.22: Calcul de l'impact et de la criticité

			$P(R) = 0,2468$	
e	$P(R \mid e)$	$P(e)$	$impact^{-}(e,R)$	$criticité(e,R)$
SD = oui	1	0,1524	-3,052	0,465
FE = 0 vanne	0,6323	0,2282	-1,562	0,356
ML = non	0,6330	0,2274	-1,565	0,356
GP = non	0,6403	0,2196	-1,594	0,350
TP = oui	0,7636	0,1580	-2,094	0,331

Tableau 8.23: Calcul de l'impact positif et de l'indice de priorité

		$P(R) = 0,2468$		
option	$P(R \mid option)$	$Impact^{+}(option_n, R)$	coût (M$)	$indice\_priorité(option_n, R)$
1	$P(R \mid FE = 3\ vannes) = 0,1219$	0,5061	1,5	0,3374
2	$P(R \mid \neg SD) = 0,1114$	0,5486	2,5	0,2195
3	$P(R \mid \neg SNF) = 0,1609$	0,3481	1	0,3481
4	$P(R \mid \neg SD) = 0,1114$	0,5486	2	0,2743

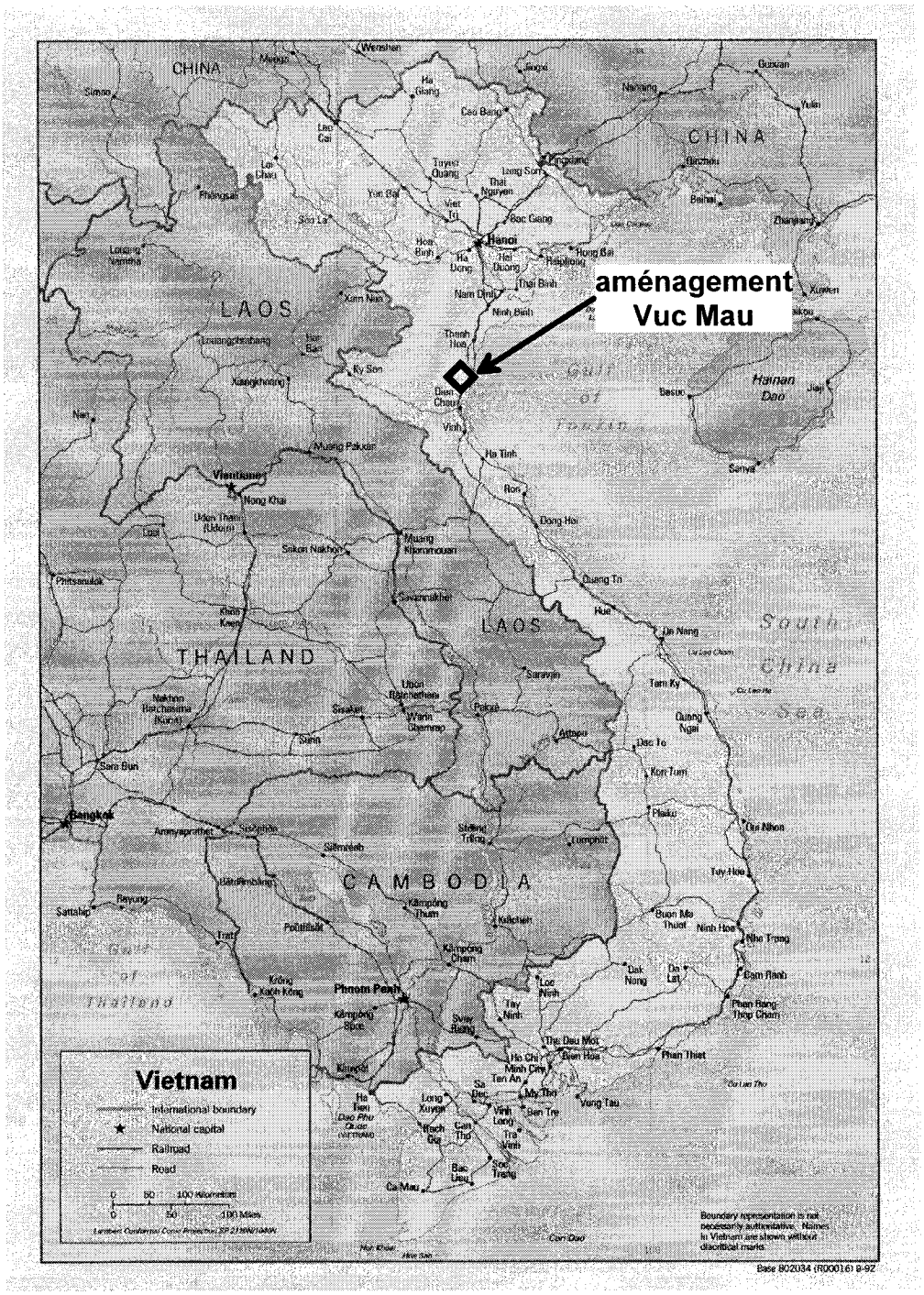


Figure 8.1: Localisation de l'aménagement Vuc Mau (Vietnam)

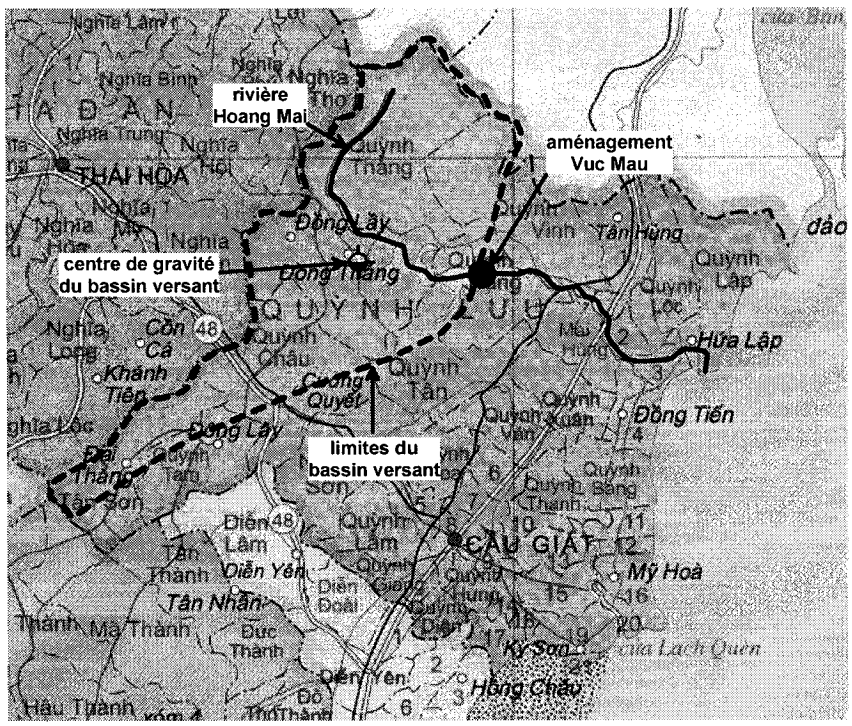


Figure 8.2: Localisation de l'aménagement Vuc Mau (province de Nghe An)

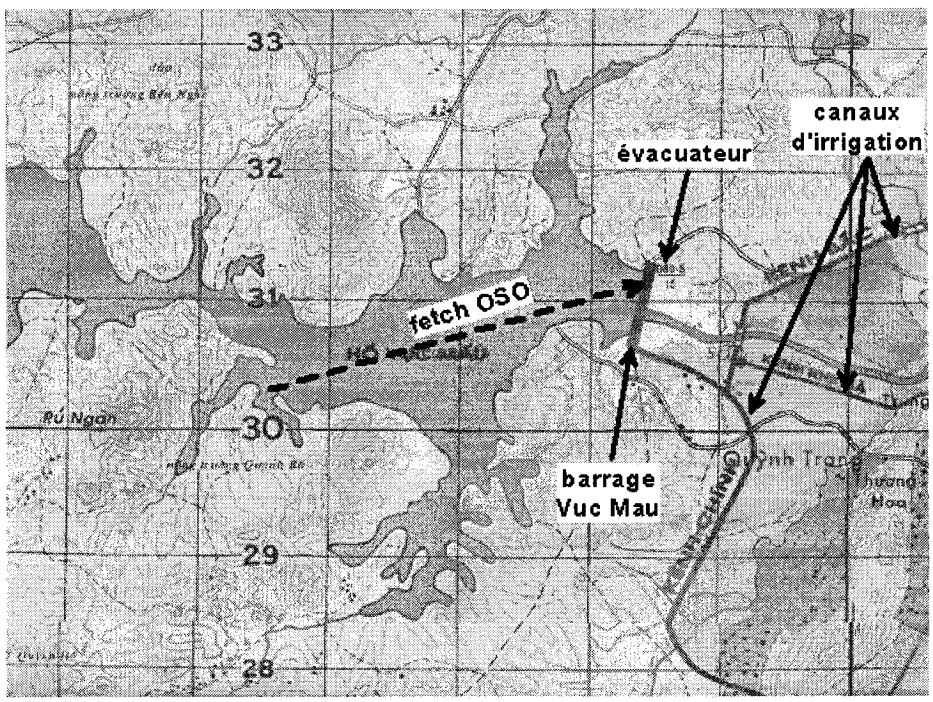


Figure 8.3: Localisation des ouvrages de Vuc Mau

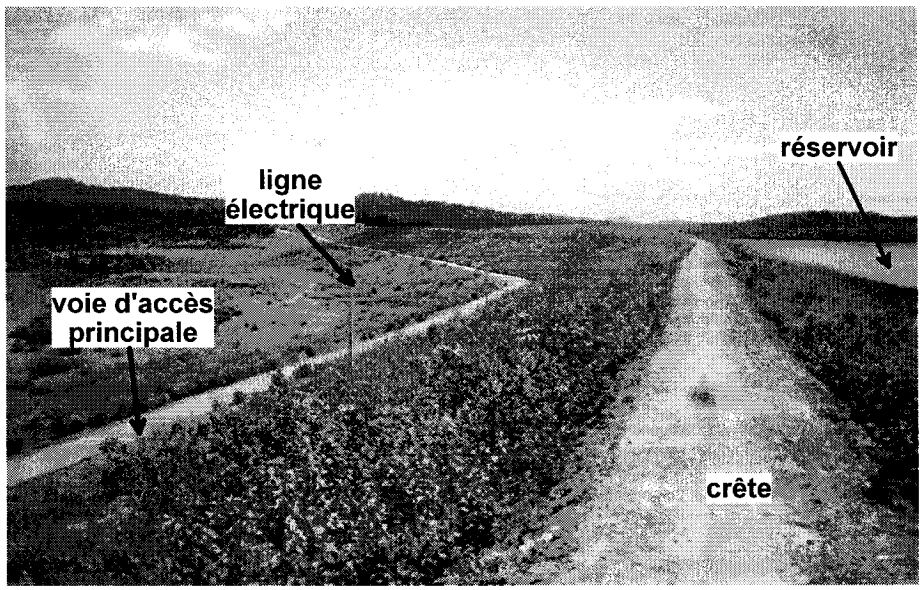


Figure 8.4: Barrage Vuc Mau



Figure 8.5: Évacuateur Vuc Mau

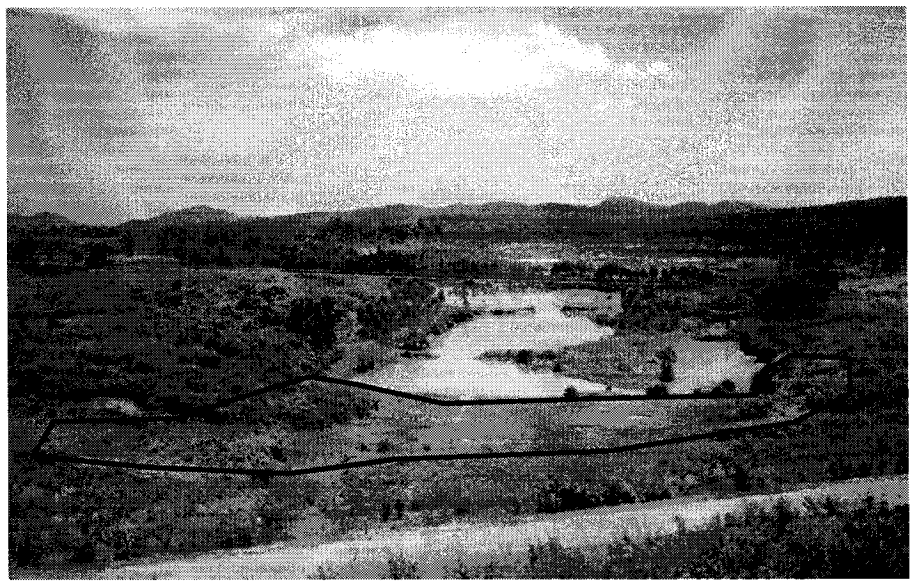


Figure 8.6: Zones les plus affectées par l'érosion interne

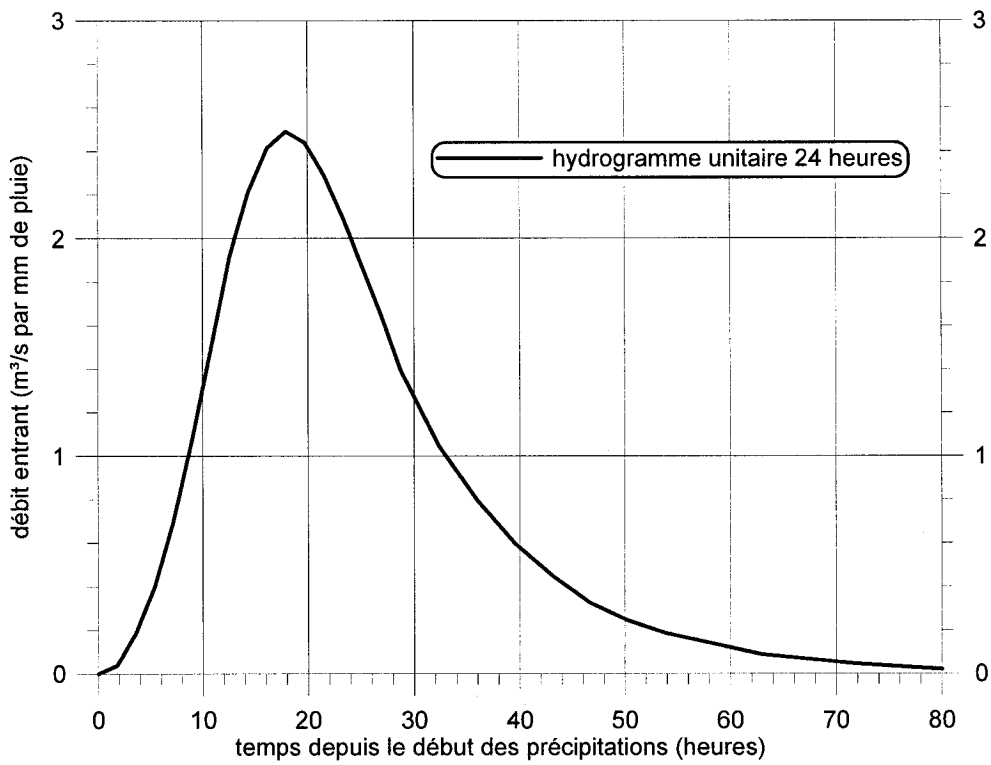


Figure 8.7: Hydrogramme unitaire 24 heures calculé

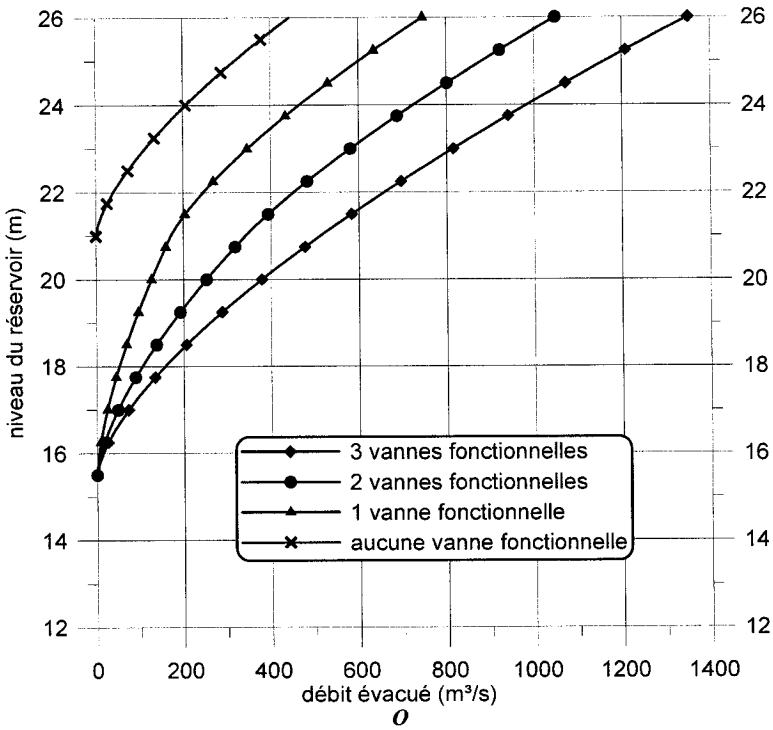


Figure 8.8: Débit évacué en fonction du niveau du réservoir

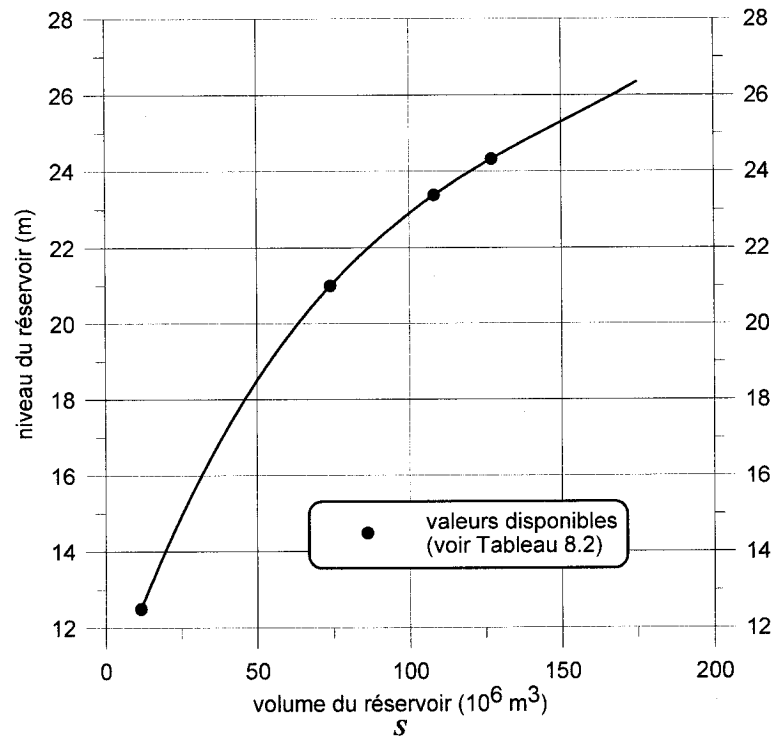


Figure 8.9: Courbe d'emmagasinement du réservoir Vuc Mau

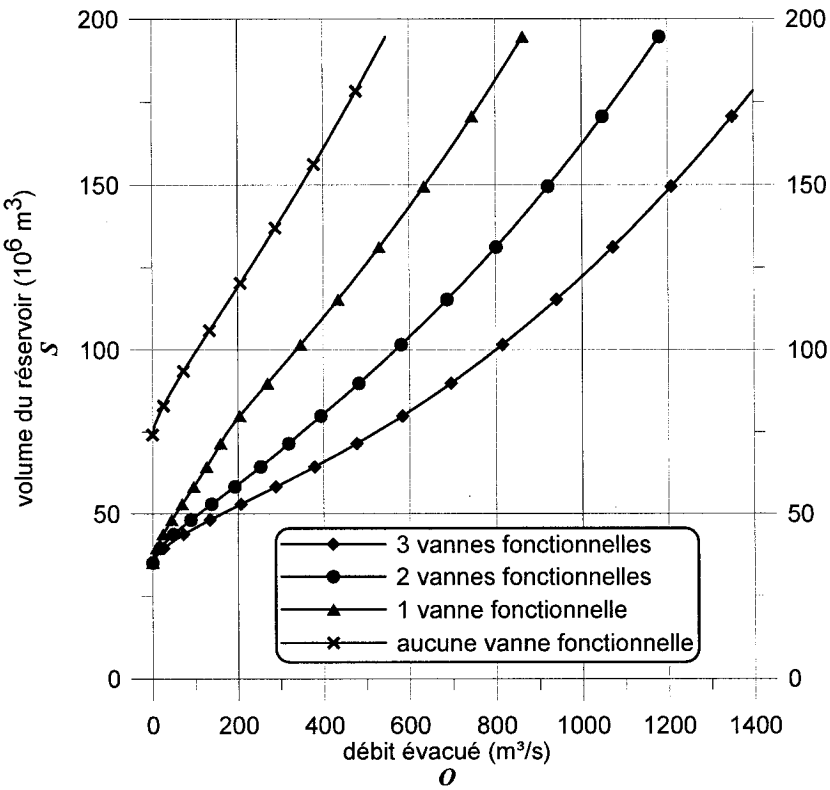


Figure 8.10: Relation Volume-Débit du réservoir Vuc Mau

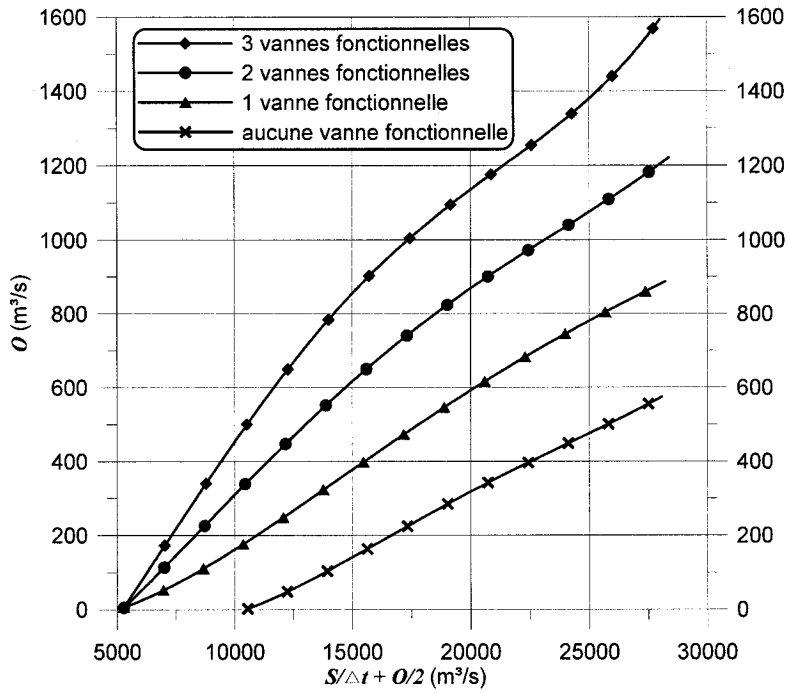


Figure 8.11: Résolution de l'équation de continuité

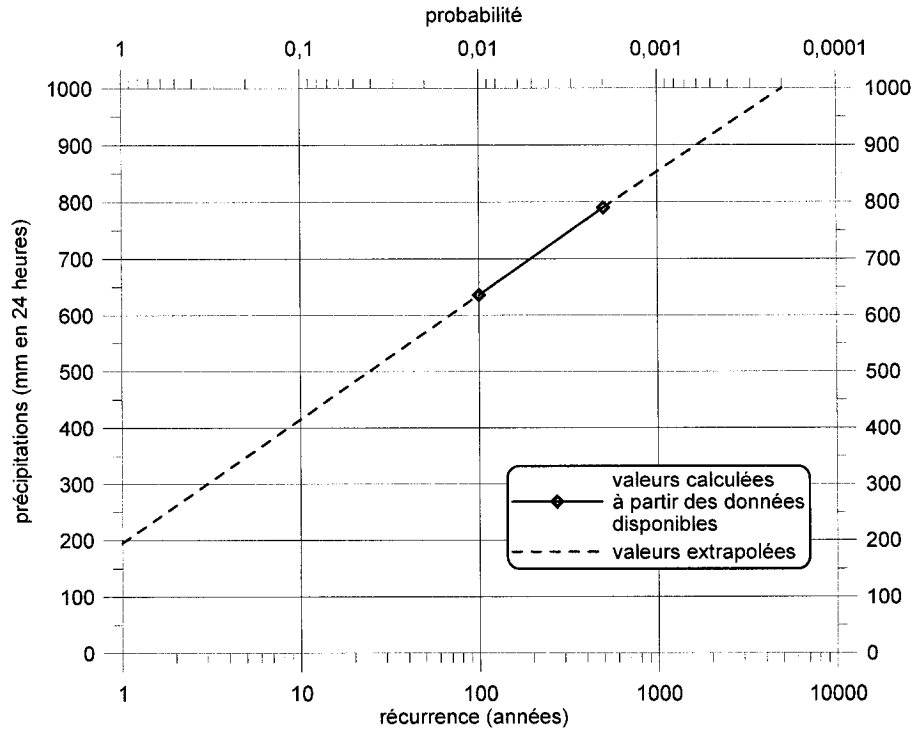


Figure 8.12: Précipitations en 24 heures

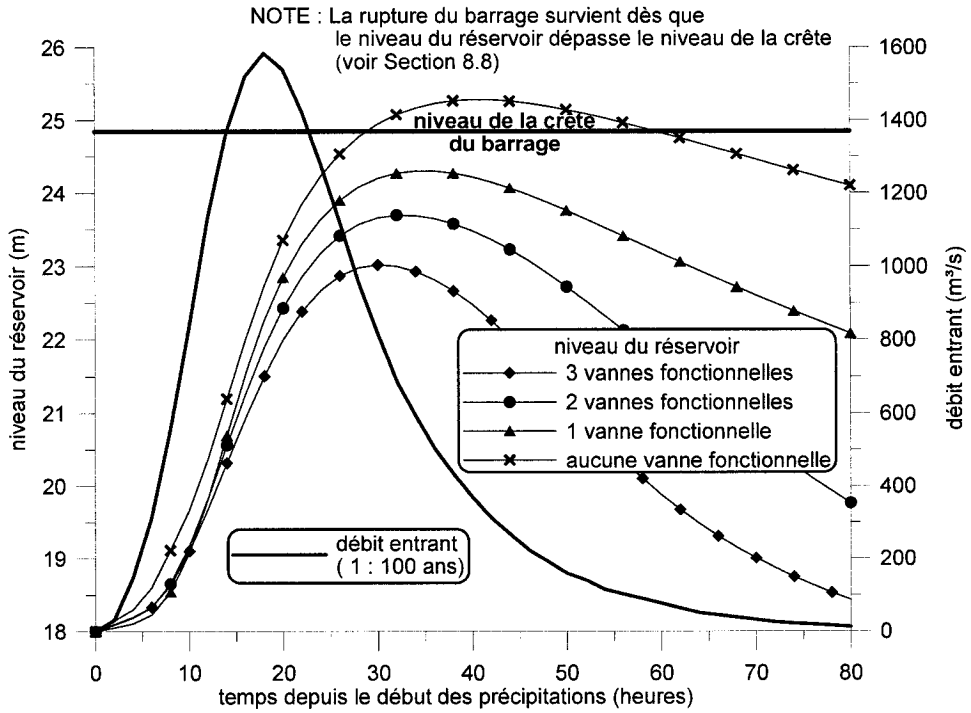


Figure 8.13: Hydrogramme et variations du niveau du réservoir pour une crue centennale

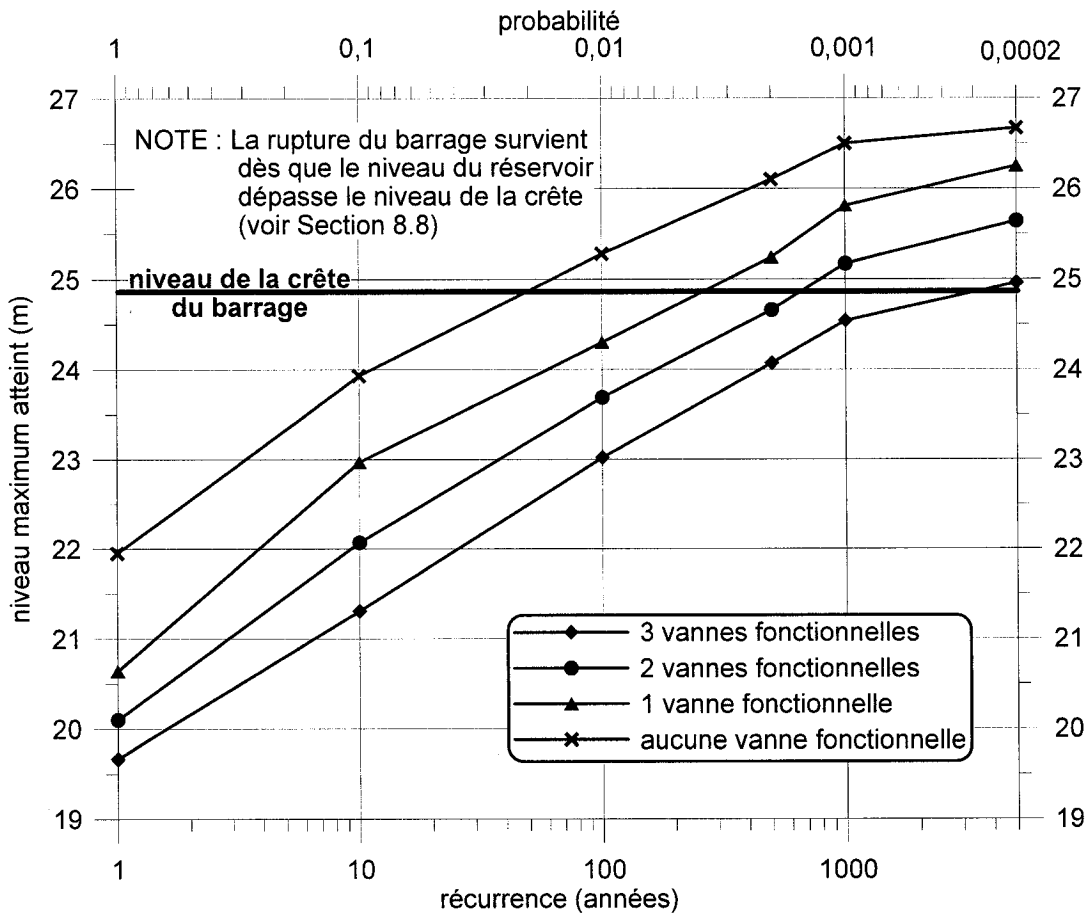


Figure 8.14: Niveau maximum du réservoir atteint pour différentes périodes de récurrence

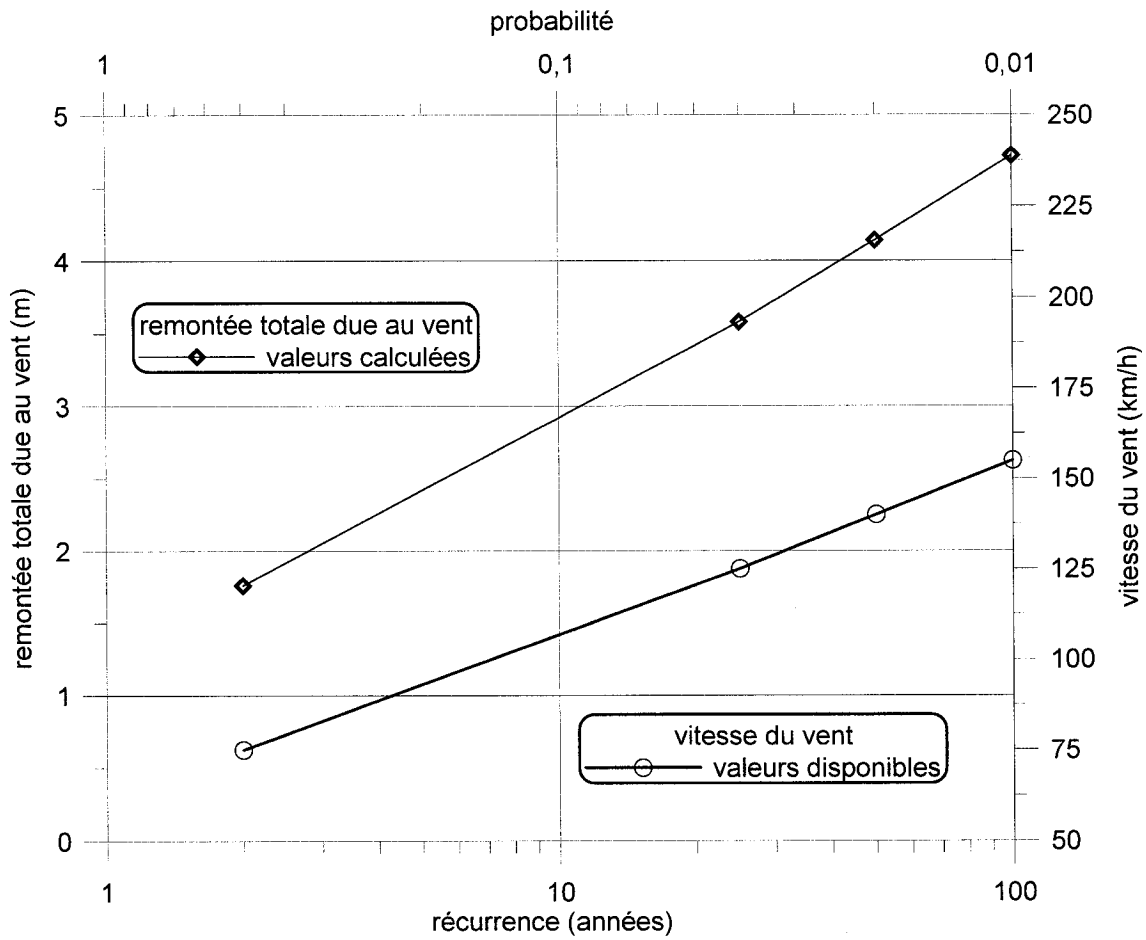


Figure 8.15: Remontée totale due au vent

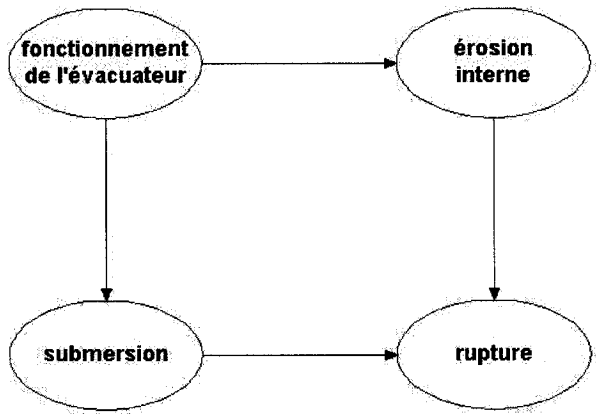


Figure 8.16: Interrelations entre les composantes du risque de rupture

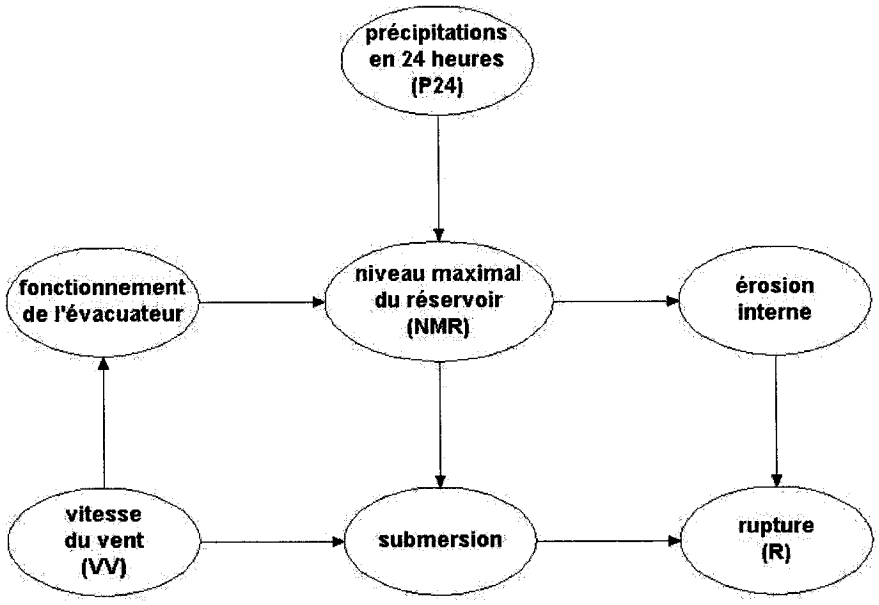


Figure 8.17: Modèle causal global

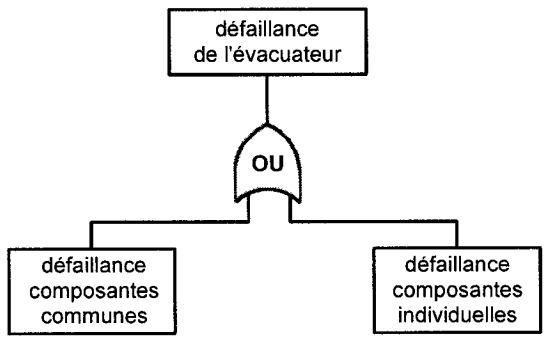


Figure 8.18: Arbre de défaillance global pour l'évacuateur

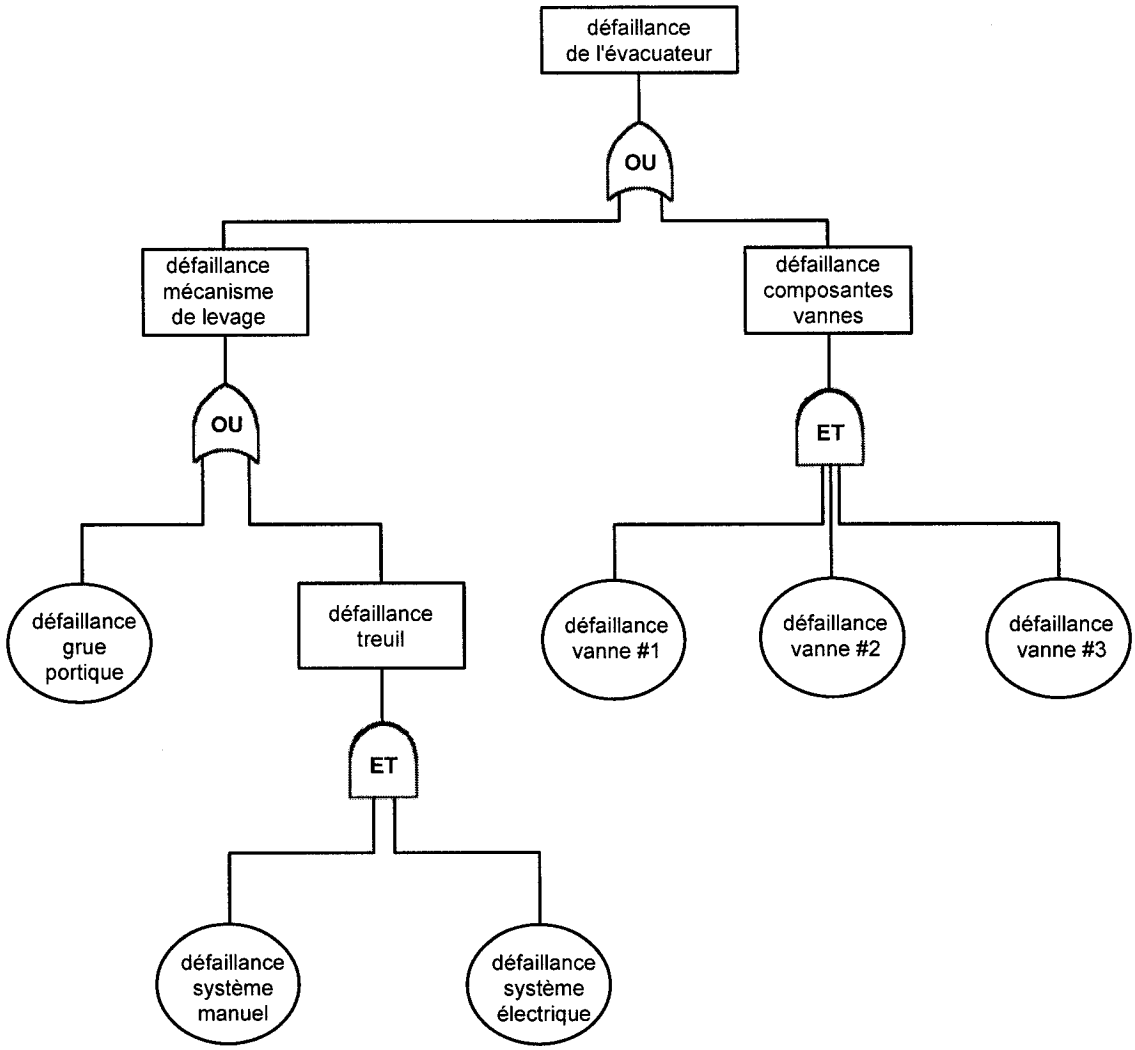
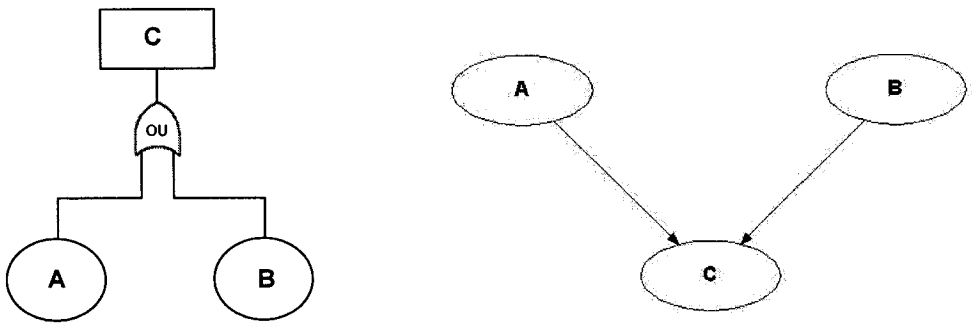
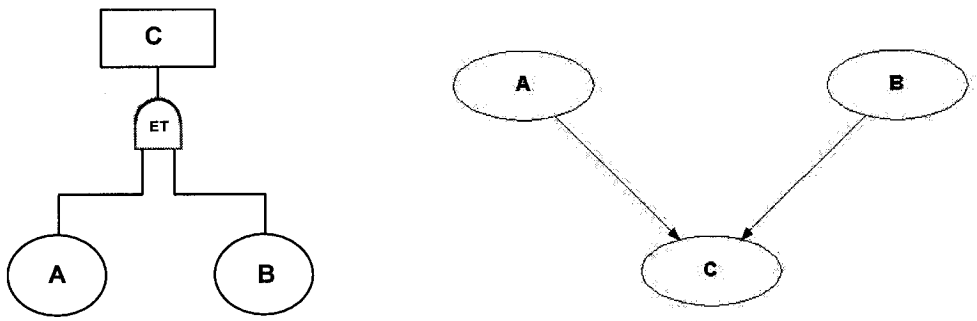


Figure 8.19: Arbre de défaillance pour l'évacuateur



		A			
		oui		non	
	B	oui	non	oui	non
C	oui	1	1	1	0
	non	0	0	0	1

Figure 8.20: Modélisation des connexions en "OU"



		A			
		oui		non	
	B	oui	non	oui	non
C	oui	1	0	0	0
	non	0	1	1	1

Figure 8.21: Modélisation des connexions en "ET"

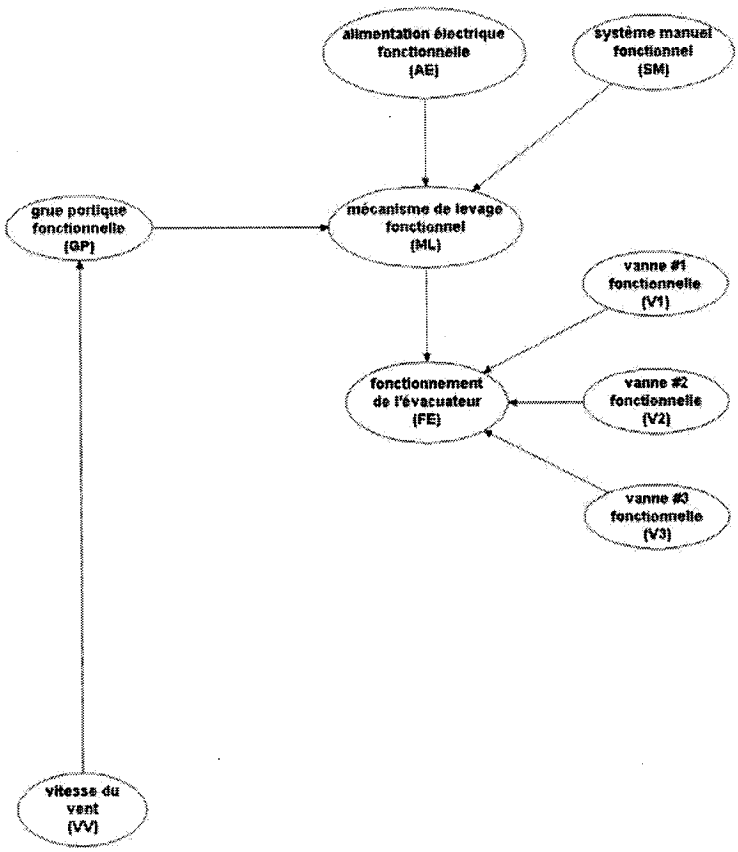


Figure 8.22: Modèle causal pour le fonctionnement de l'évacuateur

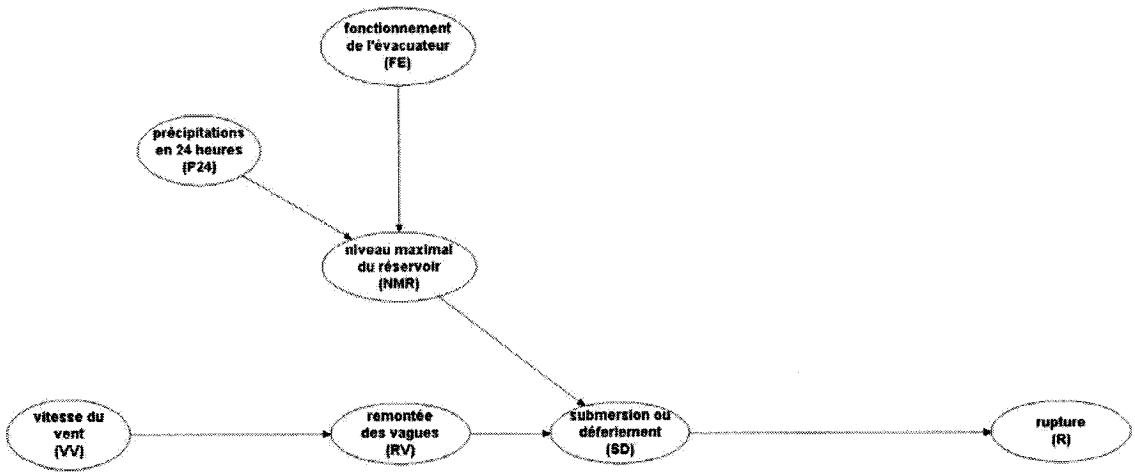


Figure 8.23: Modèle causal pour le risque de submersion

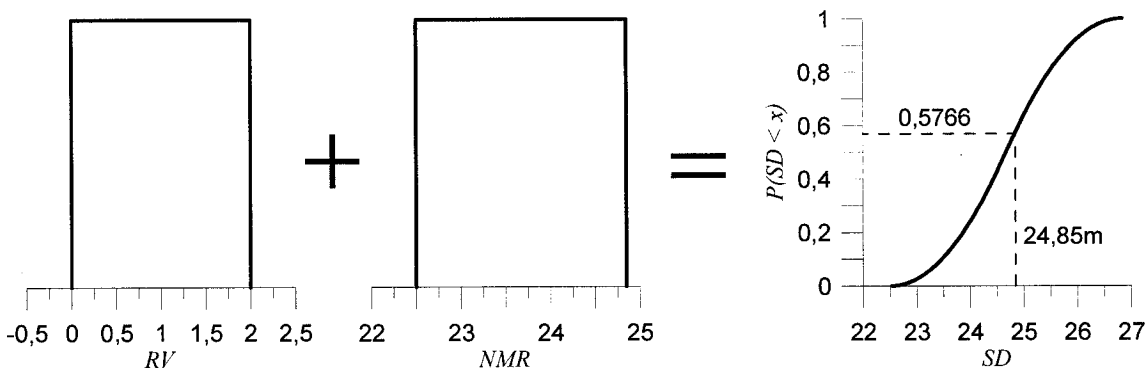


Figure 8.24: Exemple de simulations de Monte Carlo

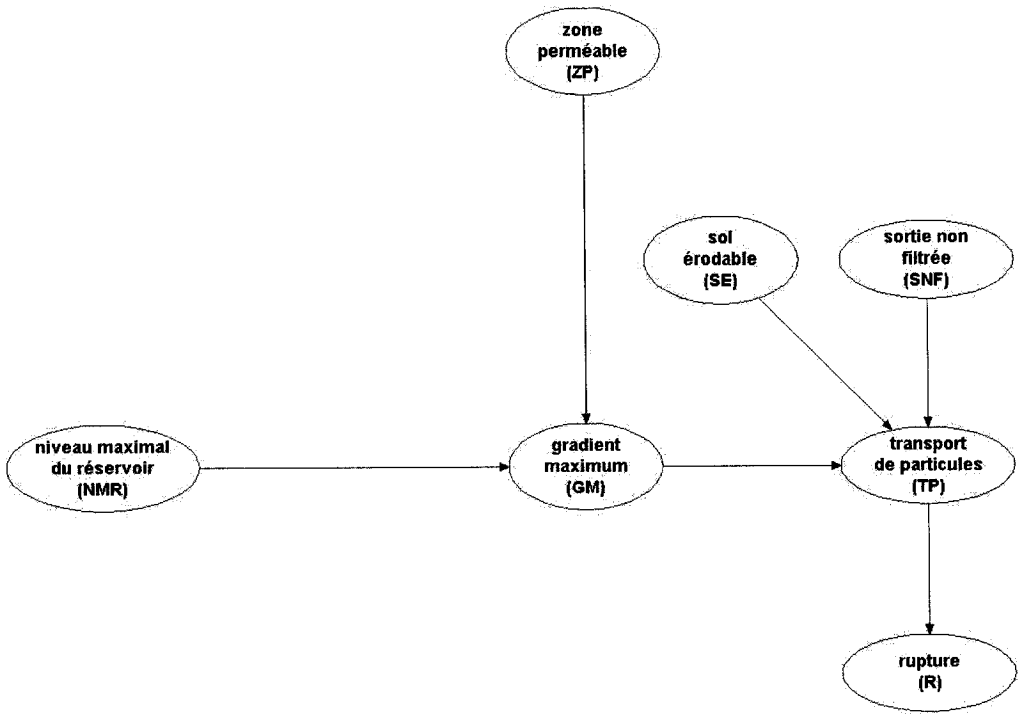


Figure 8.25: Modèle causal pour le risque d'érosion interne

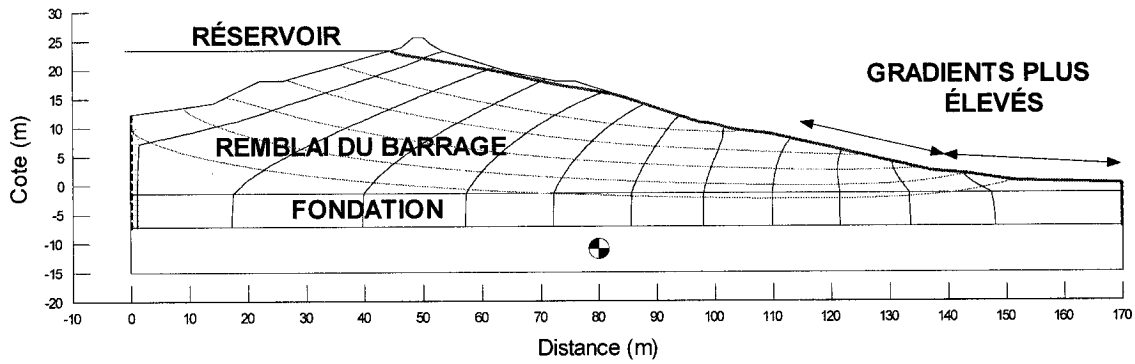


Figure 8.26: Exemple de réseau d'écoulement calculé pour le barrage Vuc Mau

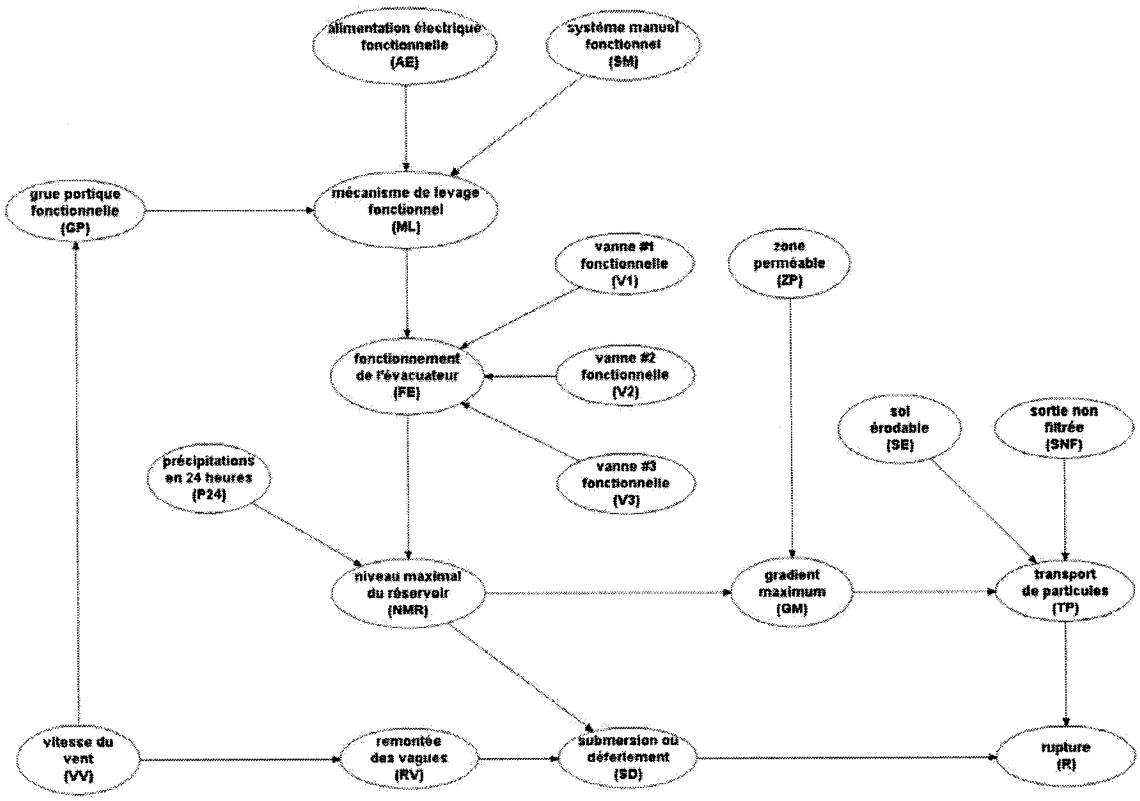


Figure 8.27: Réseau bayésien pour le barrage Vuc Mau

CHAPITRE 9

CONCLUSION

9.1 Résultats, contributions originales et limitations

L'utilisation des réseaux bayésiens et des concepts mis de l'avant dans cette recherche a permis de prendre en compte de façon inédite la complexité et les incertitudes reliées au risque barrage modélisé à l'aide de la probabilité de rupture. Le modèle de causalité et la loi de probabilités sous-jacente forment un réseau bayésien à partir duquel peuvent être prises en compte respectivement la complexité et l'incertitude (voir Figure 9.1).

Le risque est un danger qui provoque une action réfléchie (Weil 1962). Cette citation est à l'origine des deux objectifs principaux de cette recherche qui sont premièrement, d'établir le danger en question et deuxièmement, de déterminer l'action la plus appropriée (voir Figure 9.1). L'atteinte de ces objectifs a contribué à l'avancement des connaissances concernant l'étude des risques reliés à des infrastructures essentielles par le développement de concepts remplaçant la vision actuelle sectorielle par une vision plus globale.

Le premier objectif de cette thèse a été atteint par la constitution, à l'aide de réseaux bayésiens, d'un portrait actualisé du risque barrage en tenant compte des nombreuses interrelations entre les mécanismes de rupture, des incertitudes et des jugements d'experts qui sont toujours présents dans les analyses (voir Figure 9.1). Une catégorisation des variables a aussi été mise au point afin de refléter leur caractère spécifique en ce qui a trait à leur rôle dans la réalisation d'un mécanisme de rupture et aux méthodes utilisées en pratique pour les mesurer et les observer.

La représentation du risque barrage pour un exemple d'application a permis d'examiner de façon originale à l'aide d'un modèle de causalité les liens entre les risques de submersion et d'érosion interne à partir de sollicitations reliées au réservoir, aux séismes et au ruissellement en surface. L'établissement d'une loi de probabilités a permis de quantifier les incertitudes en tenant compte à la fois de statistiques et du jugement d'expert basé sur des données, des modèles et des connaissances reliées à l'ouvrage.

Le nombre et la sévérité des problèmes techniques associés au barrage Vuc Mau au Vietnam font en sorte que la détermination du risque posé par cet ouvrage n'est pas possible à l'aide des outils d'analyse actuels. Les concepts novateurs mis de l'avant dans cette recherche ont permis de surmonter ces difficultés en considérant simultanément les mécanismes de rupture géotechniques, hydrauliques et structuraux de même que leurs nombreuses interrelations en tenant compte des incertitudes et du jugement d'expert. La représentation du risque selon l'approche globale et multidisciplinaire proposée est essentielle à la détermination des mesures optimales de réduction du risque posé par ce barrage.

Contrairement aux méthodes existantes, la démarche présentée dans cette recherche caractérise le risque sans passer par une interprétation absolue de la probabilité de rupture qui cause plusieurs problèmes reliés à sa signification et à son utilisation. La probabilité de rupture est plutôt considérée comme base de comparaison, ou dénominateur commun, servant à déterminer l'importance relative de chaque élément incertain pouvant causer la rupture et servant à juger de l'efficacité potentielle des mesures structurales ou non structurales envisageables.

Cette interprétation de la probabilité de rupture a servi de base à l'atteinte du deuxième objectif de cette thèse. La flexibilité des réseaux bayésiens rend possible de nombreux types de diagnostics et de prédictions à partir desquels ont pu être identifiés les éléments les plus critiques des exemples présentés. L'analyse de risque devient alors un outil

d'aide à la décision beaucoup plus puissant et polyvalent. L'établissement de critères pour la détermination des mesures optimales de réduction du risque rend possible l'identification de l'action la plus appropriée du point de vue technique (voir Figure 9.1).

L'utilisation des concepts d'impact et de criticité a permis d'identifier les variables les plus significatives en rapport à la probabilité de rupture et les plus susceptibles de survenir. L'indice de priorité a servi à optimiser les investissements en identifiant les interventions offrant le plus grand potentiel de réduction du risque pour un coût minimum. Ces concepts ont été adaptés selon qu'il s'agisse d'une intervention structurale, qui a un effet direct sur la réalisation des mécanismes de rupture, ou d'une intervention non structurale, qui améliore la capacité de détecter ces mécanismes.

L'utilisation de ces notions pour l'exemple d'application a permis d'identifier le mécanisme de rupture le plus probable, l'initiateur le plus critique de même que la mesure optimale de réduction du risque qui vise l'évacuateur de crue. L'effet combiné de la réfection de cette structure sur le risque de submersion et d'érosion interne a pu être quantifié ce qui ne peut être réalisé avec les méthodes d'analyse actuelles qui considèrent chaque mécanisme de rupture de façon indépendante. En général, la réalisation de travaux ciblés est plus efficace que la réalisation de toutes les alternatives envisageables car les coûts et les effets sur le risque ne sont pas nécessairement additifs.

Les nombreux problèmes techniques du barrage Vuc Mau ont été abordés de façon globale par la réalisation de requêtes qui ont permis d'identifier la fiabilité de l'évacuateur comme facteur contribuant le plus au risque. Cependant, les travaux de réfection à réaliser en priorité visent à la fois le risque d'érosion interne, qui est présent durant toute l'année, et le remplacement des équipements électriques/mécaniques de l'évacuateur afin de réduire le risque de submersion présent surtout durant la saison des pluies. L'augmentation de la capacité d'évacuation était envisagée au départ mais cette option n'apparaît pas comme une solution optimale pour réduire le risque.

L'utilisation des réseaux bayésiens comporte toutefois certaines difficultés reliées à la représentations des connaissances et à l'interprétation des données et résultats en termes probabilistes.

Les calculs sont fortement dépendants du modèle de causalité employé. Une mauvaise connaissance des phénomènes étudiés mène souvent à un modèle contenant des relations cause à effet erronées ou non significatives qui peuvent biaiser les résultats des diagnostics, prédictions et analyses de sensibilité. Les réseaux bayésiens modélisent efficacement des systèmes incertains mais dont les mécanismes sont connus de façon relativement précise à l'échelle du problème étudié. La logique floue serait mieux adaptée pour l'analyse de faits imprécis (Sangalli 2001).

L'utilisation des probabilités n'est pas toujours très intuitive. La formalisation du jugement en termes quantitatifs et même l'interprétation de données statistiques peut causer des difficultés qui doivent être considérées à toutes les étapes de l'analyse (voir en particulier le Chapitre 5). Aussi, la traduction en termes probabilistes de requêtes formulées de façon littérale n'est pas toujours évidente. Cependant, en général, les résultats des calculs dans un réseau bayésien dépendent plus du modèle causal adopté que des valeurs numériques entrées dans les tables de probabilités (Jensen 2001).

De plus, les réseaux bayésiens étant formés à partir d'un graphe orienté acyclique, ils ne peuvent modéliser directement des phénomènes récursifs. Ces derniers doivent être pris en compte par l'ajout de variables intermédiaires et de variables temporelles qui rendent la modélisation plus complexe.

En tenant compte de ces limitations, les concepts novateurs d'analyse du risque barrage proposés dans cette thèse surmontent les difficultés identifiées dans la revue de la littérature et suite à la réalisation d'expériences pratiques d'analyses. Leur application sur

des exemples touchant des problématiques réelles a permis de confirmer leur efficacité pour la modélisation simultanée de la complexité et de l'incertitude inhérentes au risque.

9.2 Perspectives de recherche

La démarche proposée a permis de combiner des expertises de différents domaines du génie appliqués à la problématique des risques. L'application des réseaux bayésiens et des concepts mis de l'avant dans cette thèse à des analyses de risque plus globales constitue un des axes de recherche les plus prometteurs.

En plus des ressources techniques nécessaires à la modélisation de la probabilité de rupture d'un barrage, d'autres expertises reliées entre autres à l'environnement, à la protection civile de même qu'aux aspects sociaux pourraient être mises à contribution pour la modélisation des conséquences de rupture. Un portrait plus global du risque barrage serait ainsi établi à partir duquel les interventions structurales et non structurales pourraient être comparées non seulement en fonction de la probabilité de rupture mais aussi, par exemple, en fonction des pertes de vie potentielles.

Le concept des méta-réseaux permet d'étudier des systèmes complexes à l'aide d'entités représentées par des nœuds globaux qui réfèrent chacun à un système modélisé par un sous-réseau.

La Figure 9.2 montre un réseau bayésien qui regroupe plusieurs des variables ayant une influence directe ou indirecte sur le nombre de pertes de vie potentielles suite à une rupture de barrage. La possibilité de rupture est modélisée à l'aide du nœud *RUPTURE (R)* qui est un nœud global représentant le réseau bayésien de la Figure 6.4. Le nœud *niveau du réservoir (RE)* n'est pas inclus dans le nœud *RUPTURE (R)* car il affecte directement une variable influençant le nombre de pertes de vie.

Le méta-réseau de la Figure 9.2 permettrait l'établissement de requêtes grâce auxquelles il serait possible de comparer par exemple l'effet de la construction d'un filtre aval (voir alternative A_5 aux Tableaux 7.3 et 7.4) et de routes d'évacuation sur le nombre de pertes de vie potentielles. En termes probabilistes, il s'agirait de comparer les valeurs suivantes:

P(pertes de vie | ¬SNF, ¬GM) et *P(pertes de vie | routes d'évacuation = oui).*

Pour cet exemple, l'interprétation des concepts d'impact, de criticité, d'indice de priorité et de pertinence devraient cependant être modifiée pour tenir compte de l'aspect plus global de la nouvelle base de comparaison.

Les méta-réseaux pourraient aussi contribuer à mieux représenter le risque relié à plusieurs types d'infrastructures en étudiant leurs dépendances et leurs interrelations. Par exemple, la Figure 9.3 montre un réseau bayésien modélisant la vulnérabilité du système d'approvisionnement en eau domestique d'une municipalité en rapport aux séismes. Les interrelations entre les différentes infrastructures sont représentées à l'aide de nœuds globaux à l'intérieur desquels de retrouvent des sous-réseaux. Des nœuds globaux tels *FONCTIONNEMENT CONDUITES AQUEDUC* et *ALIMENTATION ÉLECTRIQUE* pourraient représenter des modèles basés sur des arbres de défaillance incluant les système redondants. Il serait alors possible de prioriser les activités de maintenance en identifiant l'infrastructure et ses composantes les plus critiques en rapport à l'approvisionnement en eau.

Le concept des réseaux bayésiens est un outil puissant pour l'analyse de problèmes où les variables sont fortement interreliées et dont l'étude requiert différents types d'expertises. Les réseaux bayésiens sont particulièrement bien adaptés aux problèmes d'ingénierie actuels qui doivent davantage tenir compte des aspects sociaux et environnementaux en plus des éléments techniques et économiques.

Dans une perspective plus large, la gestion intégrée des ressources, en particulier les ressources en eau, est primordiale pour la mise en place d'une stratégie de développement durable. Cette notion s'articule autour de trois dimensions reliées entre elles et indissociables: environnement, société et économie. Son application implique une approche transdisciplinaire et plurisectorielle où la concertation est un élément central.

Les réseaux bayésiens fournissent un cadre où les préoccupations des parties prenantes peuvent être considérées de façon globale par la construction de modèles de causalité prenant en compte les variables critiques de chacun des aspects du problème étudié. L'impact des mesures de réduction du risque peut être déterminé à l'aide de calculs d'inférence intégrant les dimensions environnementales, sociales et économiques définies dans le problème.

Par exemple, le Conseil Mondial des Barrages (World Commission on Dams 2000) a constaté qu'il n'existe que très peu d'approches permettant d'assurer la transparence des décisions relatives aux projets de modification de barrages. L'utilisation des réseaux bayésiens contribuerait à considérer les populations touchées par les barrages comme des partenaires ayant des droits dans le processus de planification et à leur donner les moyens de participer à ce processus.

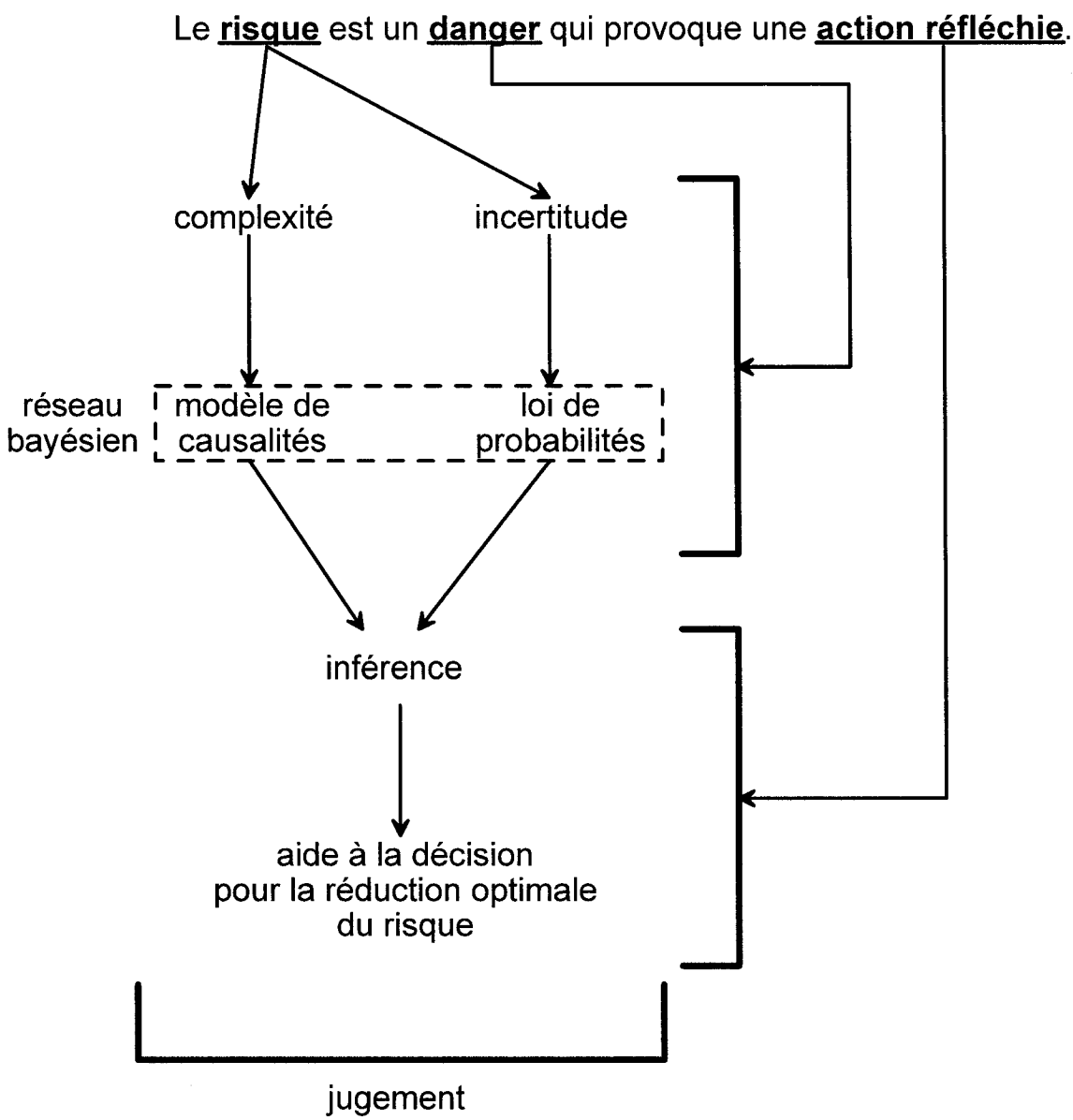


Figure 9.1: Schéma conceptuel de l'approche proposée

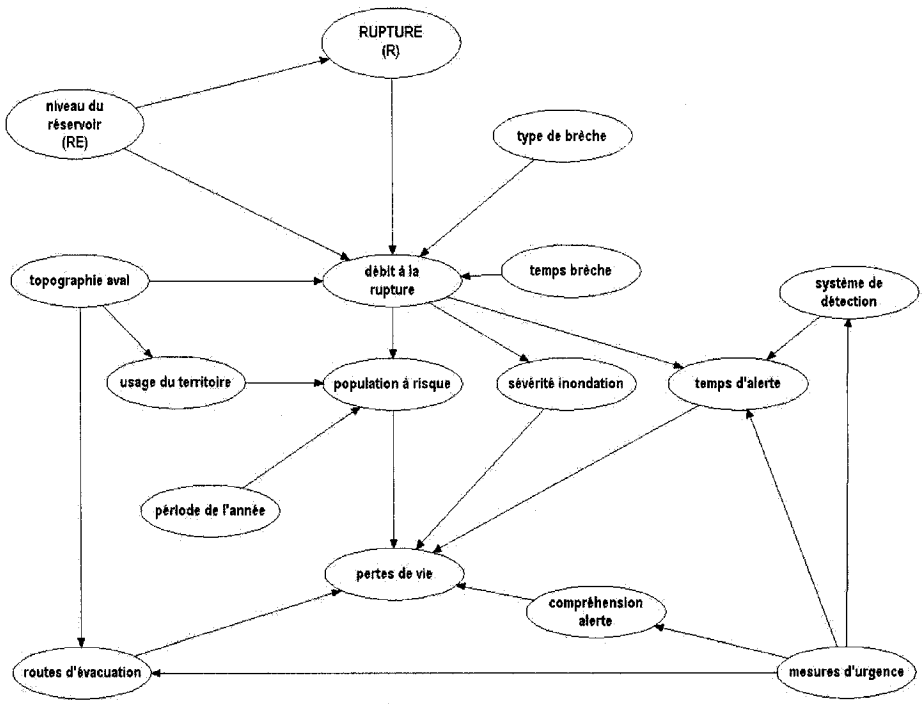


Figure 9.2: Modélisation des conséquences de rupture

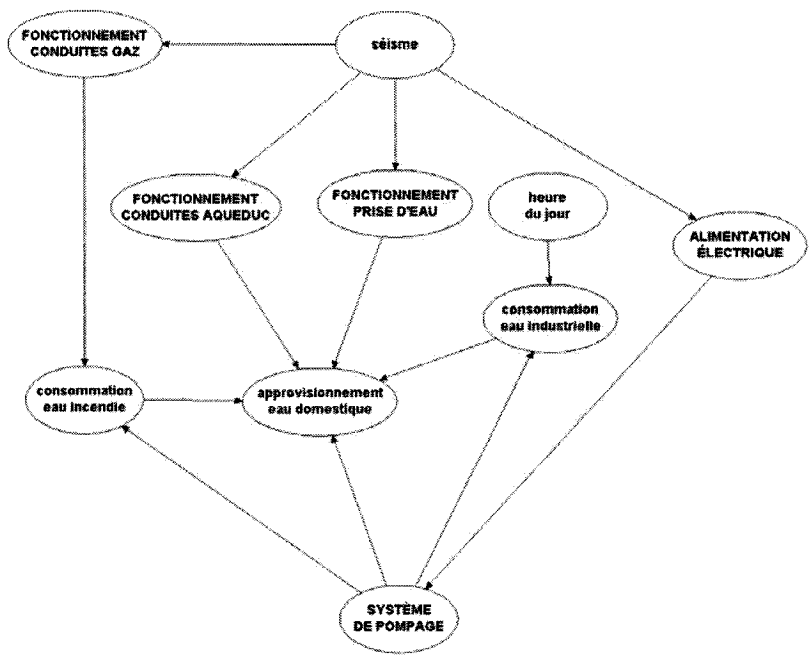


Figure 9.3: Modélisation du risque relié à plusieurs types d'infrastructures

RÉFÉRENCES

ABRAMSON, B., NG, K.C. 1993 . «Toward an art and science of knowledge engineering : a case for belief networks». *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 5:4. 705-712.

AGOSTINELLI, C., ROTONDI, R. 2003. «Using bayesian belief networks to analyse the stochastic dependence between interevent time and size of earthquakes». *Journal of Seismology*. 7:3. 281-299.

ANDERSEN, G.R., CHOUINARD, L.E., BOUVIER, C., BACK, W.E. 1999. «Ranking procedure on maintenance tasks for monitoring of embankment dams». *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 125:4. 247-259.

ANDERSEN, G.R., CHOUINARD, L.E., HOVER, W.H., COX, C.W. 2001. «Risk indexing tool to assist in prioritizing improvements to embankment dam inventories». *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 127:4. 325-334.

AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS 2001. «ANCOLD Guidelines on Risk Assessment: spillway gates and outlet works». *ANCOLD risk workshop*. Launceston, Australia : ANCOLD.

AYYUB, B.M. 1999. *Guidelines on expert-opinion elicitation of probabilities and consequences for Corps facilities.* Fort Belvoir: United States Army Corps of Engineers. 89p. DACW72-94-D-0003.

BECKER, A., GEIGER, D. 1996 . "Optimization of Pearl's method of conditioning and greedy-like approximation algorithms for the vertex feedback set problem". *Artificial Intelligence*. 83. 167-188.

BECKER, A., NADIM, P. 1999. *Les réseaux bayésiens*. 1ère éd. Paris : Eyrolles. 204p.

BERNSTEIN P.L. 1996. *Against the gods: the remarkable story of risk*. New York : John Wiley and Sons. 383p.

BIER, V.M., HAIMES, Y.Y., LAMBERT, J.H., MATALAS, N.C., ZIMMERMAN, R. 1999. «A survey of approaches for assessing and managing the risk of extremes». *Risk Analysis*. 19:1. 83-94.

BOBBIO, A., PORTINALE, L., MINICHINO, M., CIANCAMELA, A. 2001. «Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into bayesian networks». *Reliability Engineering and System Safety*. 71:3. 249-260.

BOIVIN, R. 1994. *La sécurité des barrages. Les risques et les mesures préventives.* Évaluation environnementale du projet Grande Baleine. Bureau de soutien de l'examen public du projet Grande Baleine. 53p. Dossier synthèse no. 6.

BOWLES, D.S. 2000. «Advances in the practice and use of portfolio risk assessment». *Australian Committee on Large Dams Annual Meeting*. Cairns : Australian Committee on Large Dams. 1-12.

BOWLES, D.S., ANDERSON, L.R., EVELYN, J.B., GLOVER, T.F., VANDORPE, D.M. 1999. «Alamo dam demonstration risk assessment». *Australian Committee on Large Dams Annual Meeting*. Jindabyne : Australian Committee on Large Dams.

BOWLES, D.S., ANDERSON, L.R., GLOVER, T.F. 1998. «The practice of dam safety risk assessment and management : its roots, its branches and its fruit». *1998 United States Committee on Large Dams Annual Lecture*. Buffalo : United States Committee on Large Dams. 79-93.

BOWLES, D.S., ANDERSON, L.R., GLOVER, T.F., CHAUHAN, S.S. 1998. «Portfolio risk assessment : a tool for dam safety risk management». *1998 United States Committee on Large Dams Annual Lecture*. Buffalo : United States Committee on Large Dams. 317-334.

BRYANT, G.D., NORMAN, G.R. 1980. «Expressions of probability : words and numbers». *New England Journal of Medicine*. 302:7. 411.

CAIN, J. 2001. *Guidelines for using bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond.* Wallingford: Centre for Ecology and Hydrology. 124p.

CHARNIAK, E. 1991. «Bayesian networks without tears». *AI Magazine*. 12:4. 50-63.

CHRISTIAN, J.T., LADD, C.C., BAECHER, G.B. 1994. «Reliability applied to slope stability analysis». *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*. 120:12. 2180-2207.

CLEMEN, R.T., REILLY, T. 2001. *Making hard decisions with Decision Tools*. 2nd Pacific Grove : Duxbury. 733p.

CLEMEN, R.T., WINKLER, R.L. 1999. "Combining probability distributions from experts in risk analysis". *Risk Analysis*. 19:2. 187-203.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES . 1977. *Rapport du comité des risques aux tiers découlant des grands barrages*. Bulletin 29. Paris : Commission Internationale des Grands Barrages. 78p.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES . 1989. *Économies dans la construction des barrages - Réflexions et suggestions*. Bulletin 73. Paris : Commission Internationale des Grands Barrages. 136p.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES. 1995. *Rupture de barrages, analyse statistique*. Bulletin 99. Paris : Commission Internationale des Grands Barrages. 58p.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES. 2001a. *Non-structural risk reduction measures - Benefits and costs for dams*. Bulletin E02. Paris : Commission Internationale des Grands Barrages. 50p.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (COMITÉ SUR LA SÉCURITÉ DES BARRAGES). 2001b. «Current draft of bulletin on risk assessment, version 2.1». PUBLICATION A VENIR EN 2005.

CONFERENCE REPORT : PART TWO. 1998. «Risk-based dam safety evaluations». *Hydropower and Dams*. 5:1. 73-82.

DARBRE, G.R. 2000. «Probabilistic safety assessment of dams». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, Rapport 13, 185-195.

DE CEA AZANEDO, J.C. 2000. «The Spanish experience in drafting emergency plans for the risk management of dams». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, Rapport 25, 379-385.

DEKAY, M.L., MCLELLAND, D.M. 1993. «Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood». *Risk Analysis*. 13:2. 193-205.

DE MEDEIROS, C.H. 2000. «Probabilistic risk assessment technique as an approach to study hydraulic fracturing mechanism in embankment dams». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, Rapport 46, 715-727.

DENIS, H. 1998. *Comprendre et gérer les risques sociotechnologiques majeurs*. Montréal : Éditions de l'École Polytechnique de Montréal. 342p.

DEWEY, R.L., GILLETTE, R. 1993. «Prediction of embankment dam breaching for hazard assessment». *Proceedings of the Specialty Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, ASCE Geotechnical Special Publication No. 35*. 131-144.

DISE, K.M., VICK, S.G. 2000. «Dam safety risk analysis for Navajo dam». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, Rapport 22, 337-350.

DUNCAN, J.M. 2000. «Factors of safety and reliability in geotechnical engineering». *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 126:4. 307-316.

DUPAK, D.D., SMITH, G.F. 2000. «An owner's perspective with FMEA». *Canadian Dam Association 3rd Annual Conference*. Regina : Canadian Dam Association. 26-30.

FELL, R., BOWLES, D.S., ANDERSON, L.R., BELL, G. 2000. «The status of methods for estimation of the probability of failure of dams for use in quantitative risk assessment». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, Rapport 15, 213-235.

FELL, R., WAN, C.F., CYGANIEWICZ, J., FOSTER, M. 2003. «Time for development on internal erosion and piping in embankment dams». *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 129:4. 307-314.

FOSTER, M., FELL, R., SPANNAGLE, M. 2000. «A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment by piping». *Journal Canadien de Géotechnique*. 37:5. 1025-1061.

FOSTER, M., FELL, R., SPANNAGLE, M. 2002. «A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment by piping: Reply». *Journal Canadien de Géotechnique*. 39:2. 497-500.

GILLIES, D. 2000. *Philosophical theories of probability*. 1st ed. London : Routledge. 223p.

GRAHAM, W.J. 2000. «Should dams be modified for the probable maximum flood ?». *Journal of the American Water Resources Association*. 36:5. 953-963.

GUYONNET, D., CÔME, B., PERROCHET, P., PARRIAUX, A. 1999. «Comparing two methods for addressing uncertainty in risk assessments». *ASCE Journal of Environmental Engineering*. 125:7. 660-666.

HACKING, I. 2001. *Probability and inductive logic*. 1st ed. Cambridge : Cambridge University Press. 302p.

HARTFORD, D.N.D. 2000. «Dam risk and the owner's dilemma». *International Water Power and Dam Construction*. 52:9. 18-23.

HARTFORD, D.N.D., BAECHER, G.B., EN COLLOBORATION AVEC DISE, K.M., SMITH, M., ZIELINSKI, P.A. 2004. *Risk and uncertainty in dam safety*. London : Thomas Telford. 391 p.

HECKERMAN, D., MAMDANI, E.H., WELLMAN, M.P. 1995. «Real-world applications of bayesian networks». *Communications of the ACM*. 38:3. 24-26.

HYDRO-QUÉBEC. 2001. *Guide des études de rupture de barrages*. Montréal: Unité Hydraulique et Environnement, Direction Expertise et Support Technique de Production. 34p. HY-2001-06.

JANSEN, R.B. 1988. *Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation*. New York : Van Rostrand Reinhold. 811p.

JENSEN, F.V. 2001. *Bayesian networks and decision graphs*. 1st ed. New York : Springer. 268p.

KAHNEMAN, D., SLOVIC, P., TVERSKY, A. 1982. *Judgement under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge : Cambridge University Press. 555p.

KAPLAN, S. 1993. «Bayes' theorem and quantitative risk assessment». *Risk-Based Decision Making in Water Resources*. Santa Barbara : ASCE. 186-193.

KENNEY, T.C., LAU, D. 1985. «Internal stability of granular filters». *Journal Canadien de Géotechnique*. 22:2. 215-225.

KONG, A., BARNETT, G.O., MOSTELLER, F., YOUTZ, C. 1986. "How medical professionals evaluate expressions of probability". *New England Journal of Medicine*. 315:12. 740-744.

KREUZER, H. 2000. «L'utilisation de l'analyse des risques dans le processus de décision relatif à la sûreté des barrages et à leur gestion». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, rapport général, 769-834.

KULHAWY, F.H. 1992. «On the evaluation of soil properties». *ASCE Geotechnical Special Publication No. 31*. 95-115.

LAFITTE R. 1997. «Remarks - Conclusions - Future trends». *International Workshop on Risk-Based Dam Safety Evaluation*. Trondheim : International Centre for Hydropower.

LAURITZEN, S.N., SPIEGELHALTER, D.J. 1988. «Local computations with probabilities on graphical structures and their applications to expert systems». *Journal of the Royal Statistical Society*. 50. 157-224.

LAVALLÉE, D., MARCHE, C., QUACH, T.T. 2000. «De nouvelles approches pour quantifier le risque de rupture d'une retenue d'eau». *Journal Canadien de Génie Civil*. 27:6. 1217-1229.

LEE, B.H. 2001. «Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis». *Reliability and Maintainability Symposium*. Philadelphia : IEEE. 7-15.

LEE, K.L., ALBAISA, A. 1974 . «Earthquake induced settlements in saturated sands». *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*. 100:4. 387-406.

LEFEBVRE, B., GENDREAU, M., HÉBERT, D., BOUKARI, D. 1995. *Réseaux bayésiens pour l'entretien du réseau routier.* Montréal: Centre de Recherche sur les Transports. 30p. CRT-95-49.

LIMIN, H., YONGLI, Z., GAOFENG, F. 2002. «Reliability assessment of power systems by bayesian networks». *IEEE Transactions on Power Systems*. 876-879.

MANSUR, C.I., POSTOL, G., SALLEY, J.R. 2000. «Performance of relief well systems along the Mississipi river levees». *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 126:8. 727-738.

MARCHE, C. 2004. *Barrages, crues de rupture et protection civile*. Montréal : Presses Internationales Polytechnique. 388p.

MCCABE, B. 1997. *An automated modeling approach for construction performance improvement using simulation and belief networks.* 241p. Thèse de doctorat en génie civil, Université de l'Alberta.

MCCABE, B. 1998. «Belief networks : a probabilistic knowledge base». *International Conference on New Information Technologies for Decision Making in Civil Engineering*. Montréal : École de Technologie Supérieure. 281-290.

MCCABE, B., ABOURIZK, S.M., GOEBEL, R. 1998. «Belief networks for construction performance diagnostics». *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*. 12:2. 93-100.

MCCABE, B., FORD, D. 2001. «Using belief networks to assess risk». *Winter Simulation Conference*. Arlington : IEEE. 2, 1541-1546.

MERZ, J.F., DRUZDZEL, M.J., MAZUR, D.J. 1991. «Verbal expressions of probability in informed consent litigation». *Medical Decision Making*. 11:4. 273-281.

MORGAN, G.M., HENRION, M., SMALL, M. 1990. *Uncertainty : a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. 1st ed. Cambridge : Cambridge University Press. 344p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL . 2000. *Risk analysis and uncertainty in flood damage reduction studies*. Washington D.C. National Academy Press. 202 p.

PARKIN, J. 2000. *Engineering judgement and risk*. 1st ed. London : Thomas Telford. 220 p.

PEARL, J. 1988. *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. 2nd ed. San Mateo : Morgan Kaufman. 552 p.

PEARL, J. 2000. *Causality: models, reasoning and inference*. Cambridge : Cambridge University Press. 384 p.

PEARL, J., RUSSELL, S. 2000. *Bayesian networks*. Los Angeles: University of California. 7p. R-277.

PEARL, J., VERMA, T. 1991. «A theory of inferred causation». *Principles of knowledge representation and reasoning*. San Mateo : Morgan Kaufman. 441-452.

PECK, R.B. 1991. «Comments on risk analysis for dams». *Judgment in geotechnical engineering - The professional legacy of Ralph B. Peck*. Vancouver : BiTech. 156-160.

POUGEOISE, E. 1996. *Panorama de la philosophie*. Verviers : Marabout. 703p.

RENOOIJ, S. 2001. *Qualitative approaches to quantifying probabilistic networks.* 206 p. Thèse de doctorat en informatique, Université de Utrecht.

RETTERMEIER, K., FALKENHAGEN, B., KÖNGETER, J. 2000. «Risk assessment - new trends in Germany». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, Rapport 41, 625-641.

ROBERDS, W.J. 1991. "Methods for developing defensible subjective probability assessments". *Transportation Research Record.* 1288. 183-190.

ROBERT, B. 2003. «Les ingénieurs au coeur de la gestion des risques». *La formation des ingénieurs en matière de gestion des risques, résumés des conférences*. Montréal : Organisation de Coopération et de Développement Économique. 29-30.

ROBERT, B., PARÉ, J.J. 1992. «Rupture du barrage du Lac Beloeil, causes et conséquences». *Conférence annuelle de l'Association Canadienne de la Sécurité des Barrages*. Montréal : Association Canadienne de la Sécurité des Barrages. 1-14.

SANGALLI, A. 2001. *Éloge du flou.* 1ère éd. Montréal : Les Presses de l'Université de Montréal. 206p.

SEED, H.B., MAKDISI, F.I., IDRISS, I.M., LEE, K.L. 1975. «The slides in the San Fernando dams during the earthquake of February 9, 1971». *ASCE Journal of Geotechnical Engineering.* 101:7. 651-688.

SERRANO, S.E. 1997. *Hydrology for engineers, geologists and environmental professionals*. Lexington KY : Hydroscience. 452p.

SMITH, M. 2002. «Influence of uncertainty in the stability evaluation of a dam foundation». *International Congress on Maintenance and Rehabilitation of Dams.* Madrid : Spanish Society of Dams and Reservoirs.

SMITH, M. 2004. *Technical expertise of the Vuc Mau dam, geotechnical and risk aspects.* Montréal: Hydro Québec International. 62p. préparé pour la Banque Mondiale dans le cadre du projet «Natural Disaster Mitigation».

SMITH, M., MARCHE, C., ROBERT, B. 2004. «La nature de l'incertitude dans un calcul de risque barrage». *Colloque International sur les Risques en Génie Civil.* Tunisie : ISET de Sfax. 444-451.

SOCIÉTÉ D'ÉNERGIE DE LA BAIE JAMES. 1997. *Dimensionnement du riprap, guide pratique.* Montréal: Société d'Énergie de la Baie James. 79p.

SOWERS, G.F. 1993. «Human factors in civil and geotechnical engineering failures». *ASCE Journal of Geotechnical Engineering.* 119:2. 238-256.

SPETZLER, C.S., STAËL VON HOLSTEIN, A.S. 1975. «Probability encoding in decision analysis». *Management Science.* 22:3. 340-358.

TORRES-TOLEDANO, J.G., SUCAR, L.E. 1998. «Bayesian networks for reliability analysis of complex systems». *Ibero-American Conference on Artificial Intelligence.* Lisbon : Springer. 195-206.

TVERSKY, A., KAHNEMAN, D. 1974. «Judgment under uncertainty : heuristics and biases». *Science.* 185:1124-1131.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. 1999. *A procedure for estimating loss of life caused by dam failure.* Denver: Dam Safety Office. 43p. DSO-99-06.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. 2000a. *Risk analysis report, issue evaluation - Baseline risk analysis of Como dam.* Denver: Technical Service Center. 75p.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. 2000b. *Risk based profiling system.* Denver: Technical Service Center. 55p.

UNITED STATES SOCIETY ON DAMS. 2003. *Dam safety risk assessment : What is it? Who's using it and why? Where should we be going with it?* United States Society on Dams emerging issues white paper.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1994. *Flood-runoff analysis.* Fort Belvoir: United States Army Corps of Engineers. 214p. EM 1110-2-1417.

VICK, S.G. 2000. «Engineering application of dam safety risk analysis». *20e Congrès des Grands Barrages*. Beijing : Commission Internationale des Grands Barrages. Question 76, Rapport 21, 325-335.

VICK, S.G. 2002. *Degrees of belief.* 1st ed. Reston : ASCE Press. 455p.

VON THUN, L. 1998. «Risk assessment for dam safety - a framework for understanding». *Managing the Risks of Dam Project Development, Safety and Operation*. Buffalo : United States Committee on Large Dams. 95-113.

WALLSTEN, T.S., BUDESCU, D.V. 1983. «Encoding subjective probabilities : A psychological and psychometric review». *Management Science*. 29:2. 151-173.

WEIL, S. 1962. *L'enracinement*. Paris : Gallimard. 384p.

WORKSHOP REPORT : PART ONE. 1998. «Risk-based dam safety evaluations». *International Journal on Hydropower and Dams*. 5:1. 89-97.

WORLD COMMISSION ON DAMS. 2000. *Dams and development - A new framework for decision-making.* London: Earthscan publications limited. 404p.