République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr. Yahia Farés de MEDEA
Faculté des sciences et technique
Département: genie de la matiere
Filiére : genie civil

Mémoire de projet de fin d'étude

pour l'obtention du diplôme de master en Génie Civil

Option :Géotechnique

Thème

Élaboration d'un programme pour l'analyse de risques liés aux barrages

Réalisé par :

LAIDI ABDELMADJID

RAMDANI DJILLALI

Dirigé par :

Dr. MENAA El AZZIZI

2013/2014

Remerciement

Au terme de ce travail nous tenons à faire louange à « DIEU » qui nous a donné la force d'achever cette réalisation.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre Promoteur : Dr. ***MENAA El Azzizi*** pour ses conseils et son aide précieuse.

Nos sincères remerciements vont également à tous les Enseignants du département de génie civil qui nous a offert tout ce savoir.

Nos gratitudes à tous les membres de jury qui nous ont font l'honneur de juger notre travail.

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à l'élaboration de ce projet surtout : monsieur hichame et tous les masters du génie civil Centre.

On leur dit merci de tout notre cœur

SOMMAIRE

Sommaire……...1
Liste des fuguer ……1
Liste des tableaux……...1
Introduction général ……..1
Chapitre I : Les barrages…….…..4
I.1.Définition de barrage..... 4
I.2.Les barrages dans le monde 5
I.2.1.Quelques exemples de grands barrages dans le monde 7
I.3.Classification des barrages..... 7
I.3.1.Classification des retenues d'après les utilisations diverses de l'eau..... 7
I. 3.2.Classification des barrages selon le type de matériaux et le mode de résistance à la poussée de l'eau :..... 8
I. 3.2.1. Barrages rigides (en matériaux assemblés) 8
I. 3.2.1. 1.Le barrage voûte..... 8
I. 3.2.1. 2.Les barrages poids..... 9
I. 3.2.1. 3. Le barrage à contreforts ou voûtes multiples 10
I. 3.2.2. Barrages en remblais (en matériaux non assemblés) (embankment dams)..... 11
I. 4.Autres classifications des barrages..... 13
I. 5. Choix du site et des caractéristiques d'un barrage 13
I.5.1. Conditions relatives à la topographie 13
I. 5.2 Conditions géologiques..... 14
I. 5.2.1.La stabilité du barrage..... 14
I. 5.2.1.1.Travaux de reconnaissance..... 14
I. 5.2.1.2.Procédés géophysiques..... 15
I. 5.2.2.Etanchéité de la retenue..... 16
I. 5.2.2.1.Définitions..... 17
I. 5.2.2.2. Méthodes de mesure de la perméabilité 18
I. 5.2.2.3. Etude géologique..... 20
I. 5.3. Conditions hydrologiques 20
I. 5.4. Conditions relatives à la géographie humaine..... 20
I.6. Entretien des barrages……..20

Chapitre II : Les risques des barrages ……..….22
II .1.Introduction..... 22
II .2. Définition du risque 23
II .3. FACTEURS ET CARACTERISTIQUES DES RISQUES..... 26
II .4. DEFINITION DE L'ALEA 26
II .5.Vulnérabilité et les enjeux 27
II. 5. 1. Définition de la vulnérabilité 27
II.5.1.2. Quelques facteurs de la Vulnérabilité..... 28
II .5.2. Les enjeux..... 29
II .6. Le risque de rupture de barrage 29
II.6. 1. L'onde de submersion..... 31
II.7 .Statistiques sur les accidents des barrages..... 32
II.7.1 Quelques ruptures graves..... 32
II .8.La politique de prévention et les moyens de secours..... 34
II .8.1.La maîtrise du risque à la source..... 34
II .8.1.1.La prévision 34
II .8.1.2.Les moyens de prévention 35
II .8.1.3.La surveillance constante de l'ouvrage..... 35
II .8.1.4.L'inspection et la surveillance des barrages 36
II .8.2.La maîtrise de l'urbanisation 38
II.8.3.La planification des secours..... 38
II.8.4.information préventive de la population..... 40
II .8.5.L'alerte aux populations et les consignes 40
II.8.6.L'indemnisation..... 42
II.9. ETATS CRITIQUE POUVANT AFFECTER UN BARRAGE 43
II.9.1. Submersion 43
II.9.1.1. Analyse des causes de submersion 43
II.9.1.2. Etat critique de la submersion..... 44
II.9.1.2. 3.Identification du barrage :..... 44
II.9.1.2.4. Rupture de barrage Fergoug I en 1881 45
II.9.1.2.5. Rupture de barrage Fergoug II en 1927…….... 46
II.9.2.L'érosion ……47

II.9.2.1. Analyse des causes de l'érosion régressive ……..……48
II.9.2.2. Etat critique de l'érosion régressive ……..……48
II.9.2.3. Caractéristique du barrage …… ... 49
II.9.2. 4.Rupture du barrage de Teton 50
II.9.2. 5.Causes de rupture 50
II.9.3.Instabilité 50
II.9.3.1.Analyse des causes de l'état critique de l'instabilité 50
II.9.3.2.Etat critique de l'instabilité 52
II.9.3.2.1. Rupture de barrage Malpasset 1959 52
II.9.3.2.2. Causes de rupture de Malpasset 53
II.9.3.2.2. a- Fondation du barrage 53
II.9.3.2.2.b- Conditions d'exploitation 54
II.9.4. Envasement 54
II.9.4.1. Analyse des causes de l'état critique de l'envasement 54
II.9.4.2. Etat critique de l'envasement 54
II.9.4.2.1. construction 57
II.9.4.2.2. Comportement après la mise en eau 58
II.9.4.2.3. Travaux de consolidation 59
II.9.4.2.4. Envasement 59
II.9.5.Vieillissement 60
II.9.5.1. Analyse des causes de l'état critique de vieillissement 60
II.9.5.2. Etat critique de vieillissement 63
II.9.5.2.1. Caractéristique de barrage Beli Iskar 63
II.9.5.2.2. Causes de vieillissement 64
II.9.6. Pollution 64
II.9.6.1. Analyse des causes de la pollution du réservoir 66
II.9.6.2. Etat critique de la population d'un réservoir 67
II.9.6.2.1.a- Caractéristiques techniques 67
II.9.6.2.1.b- Usages 67
II.9.6.2.1.c- Nature de pollution 67
II.12. CONCLUSION 68

Chapitre III : Les Méthodes D'analyse de risques.....69

III.1. INTRODUCTION…….. …..69

III.2. DEFINITION D'ANALYSE DES RISQUES 69

III.3. DEMARCHES «INDUCTIVE» ET «DEDUCTIVE» 71

III.3.1. Spécificité et complémentarité des deux démarches 71

III.3.2. Sécurité de système 72

III.3.2.1. Connaissance du système 72

III.3.2.2. Identification des risques présentés par le système 73

III.3.2.3. Modélisation de la logique de fonctionnement et des défaillances du système ... 73

III.3.2.4. Analyse qualitative et quantitative 73

III.4. Description des principales méthodes 74

III.4.1. Analyse préliminaire des risques (APR) 75

III.4.1.1. Présentation 75

III.4.1.2. Arbres logiques 75

III.4.1.3. Méthodologie d'analyse préliminaire des risques 76

III.4.1.4. Limites et avantages de l'APR 77

III.4.2. Analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE) et 77

(AMDEC) 77

III.4.2.1. Méthodologie de la M.D.S.C 77

III.4.2.2. Limites et avantages de la M.D.S.C 78

III.4.3. Hazop 79

III.4.3.1. Historique et domaine d'application de Hazop 79

III.4.3.2. Principe de Hazop 79

III.4.3.3. Méthodologie de l'Hazop 80

III.4.3.4. Limites et avantages de Hazop 80

III.4.4. What – If ? 81

III.4.5. Arbre des défaillances (ADD) = l'Arbre des Causes (MAC) 82

III.4.5.1. Historique et domaine d'application de l'ADD 81

III.4.5.2. Principe de l'ADD 82

III.4.5.3. Méthodologie de l'arbre de défaillance 83

III.4.5.4. Limites et avantages de l'ADD 84

III.4.6. Arbre des événements 84
III.4.6. Historique et domaine d'application de l'ADE 84
III.4.6.2. Principe de l'ADE 84
III.4.6.3. Méthodologie de l'arbre des conséquences de l'ADE 85
III.4.6.4. Limites et avantages de l'ADE 86
III.4.7. Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences 87
III.4.7.1. Historique et domaine d'application de la méthode Nœud papillon 87
III.4.7.2. Principe de la méthode Nœud papillon 87
III.4.7.3. Méthodologie du diagramme causes-conséquences 88
III.4.7.4. Limites et avantages de la méthode Nœud papillon 80
III.4.8. Méthode du diagramme de Succès (MDS) 90
III.4.9. Méthode de Table de Vérité (MTV) 90
III.4.10. Méthode des combinaisons de pannes résumées (MCPR) 91
III.5. CONCLUSION 91

Chapitre. IV. : analyse du risque par (ADD ;A DE) 92

IV.1. Introduction 92
IV.2. Méthodes de calcul utilisé : 92
IV.2.1.méthode arbre événement 92
IV.2.1.1. Démarche 92
IV.2.1.2.Organigramme du programme : 95
IV.2.2.Arbre défaillance : 95
IV.2.2.1.Introduction 95
IV.2.2.2. PRINCIPE 95
IV.2.2.3 DÉFINITION ET OBJECTIFS 95
IV .2.2.4. DÉFINITION DES ÉVÉNEMENTS 95
IV.2.2.4.a Événement redouté : 95
IV.2.2.4.b Événements intermédiaires 97
IV.2.2.4.c Événements élémentaires 97
IV.2.2.5. CONSTRUCTION DE L'ARBRE DE DÉFAILLANCES 98
IV.2.2.5.a Démarche à suivre (figure VI.2) 98
IV.2.2.5.b Méthodologie 98

IV.2.2.5.d Les règles de construction 99
IV.2.2.6. L'arbre de défaillances probabilisé……100
IV. 3. Programmation des les méthodes:..... 100
IV. 3.1.Definition de delphi 100
IV. 4. LES INTERFACE DES METHODE……..…….. 101

CHPITRE V : étude de cas ……...……..104
V.1. Calcul et résultats..... 104
V.2.Arbre défaillance pour le cas d'une érosion interne d'un barrage en terre..... 108
V.2.2. Calcul et résultats..... 109
V.3. Conclusion :..... 113
V.4.CONCLUSION GENERALE : 113

LISTE DES FUGURE :

CHAPITRE I

Figure I.1 : Classification des barrages de 81 pays jusqu'en 1998 suivant leurs buts (d'après le Registre Mondial des Grands Barrages, 1998) 5
Figure I-2.2 : Nombre de barrages dans 81 pays jusqu'en 1998 6
(d'après le Registre Mondial des Grands Barrages, 1998). 6
Figure .I.3 : barrage voûte 8
Figure .I.4 : barrage poids 9
Figure .I.5 : barrage à contreforts ou voûtes multiples……10
Figure. I. 6 : barrage en remblais 11
Figure .I.7: Sondage mécanique vertical et rayonnant (Ginocchio, 1959). 14
Figure .I.8: Expérience de Darcy 16
Figure .I.9 : Schéma de calcul du débit d'une nappe libre 18
(d'après Civil Eng. Handbook). 18
Figure .I.10 : Schéma de calcul du débit d'une nappe artésienne 18
(D'après Civil Eng. Handbook). 18

CHAPITRE II

Figure II.1 : Tendance croissante des catastrophes au cours du siècle dernier……..24
Figure II.2 : Croissance de l'impact des catastrophes au cours du siècle dernier……..24

CHAPITRE III

Figure.III.1 Étapes génériques de l'appréciation des risques 70
Figure III.2 : Rapprochement entre l'axe du déroulement des événements et les deux 72
modes d'analyse du système 72
Figure III.3 : Étape de la sécurité des systèmes (Signoret et Leroy, 1986), ... 72
Figure III.4 : Présentation sous forme d'arbre logique des données issues de l'analyse 76
Préliminaire des risques (Lievens, 1976). 76
Figure III.5 : La méthodologie d'analyse préliminaire des risques…….78
Figure III.6 : La méthodologie AMDE 78
Figure III.7 : La méthodologie de l' HAZOP. 80
Figure III.8 : La méthodologie de l'arbre des causes 83
Figure III.9 : Arbre des causes générique pour une fuite, ... 83
Figure III.10 : La méthodologie de l'arbre de l'évènement 85

Figure III.11 : Un exemple d'un arbre d'événement 86
Figure III.1.2 : Représentation de scénarios d'accident selon le model papillon……87
Figure III.13 : La méthodologie de l'analyse des causes – conséquences…….. ….88

ChapitreIV :

Figure. I.1.: Schématisation d'un arbre d'événement..... …….....93
Figure I.2. Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillances..... 98

LISTE DES TABLEAUX:

Tableau I-.1 : Les plus grands barrages du monde suivant quatre critères…….....6
Tableau II.01: Les accidents les plus graves entre 1959 et1987..... 33
Tableau II.2: Les caractéristiques principales du barrage Fergoug. 45
Tableau II.3*:* La capacité théorique du barrage 57
Tableau II.4 : La capacité théorique et la capacité réelle du barrage 60
Tableau II.5 : Caractéristiques principales du barrage 63
Tableau II.6: Résulta d'essais de mesure de la résistance à la compression…….…… 64
Tableau V.1:tabluea des donnnées de arbre évenement……102
Tableau V.1 : tabluea des donnnées de arbre défallaince ……108

LISTE DES photo :

Chapitre I :

Photo N°1.1: Accumulation de débris naturels et anthropiques contre le mur d'un barrage……...20

Photo N°1.2: Les restes du barrage de Malpasset, détruit le 2 décembre 1959……20

Chapitre II :

Photo N°2.1: Rupture du barrage de Fergoug ……..47

Photo N°2.2:Rupture de barrage en terre. Le barrage de Teton (Idaho, États-Unis, 1976) ….50

Photo N°2.3:Photos du barrage Malpasset avant et après sa rupture le 2 décembre 1959. La solidité de l'assise de l'ouvrage sur les rochers était insuffisante…….52

Photo N°2.4**:**barrage Hamiz avant la catastrophe……..…58

Photo N°2.6: Barrage de Beli Iskar Vue d'ensemble du parement aval ……65

Photo N°2.7 : Barrage de Beli Iskar Parement amont du barrage……65

Photo N°2.8 : Barrage de Beli Iskar, dégradation du parement aval……65

Photo N°2.9**:** Pollution de barrage Mervent en France……67

ملخص

هذا العمل يقوم على تحليل الخطر من اجل التعريف بمنابعه والوضعيات المتعلقة به التي بإمكانها أن تقودنا إلى الخسائر البشرية وكذلك تأثيرها على لمحيط والممتلكات ،هناك عدد لا باس به من الوسائل التي بإمكانها تحليل حماية النظام المعمول بها في الميدان الصناعي مثل(طريقة تحليل لأولي للخطر.... APR, AMDE, MAC, MAE)
في هذه الدراسة يتم تطبيق النهج التحليلي من خلال طريقة من الآثار شجرة على السدود. هذا التحليل يسمح لتقدير المخاطر المرتبطة مع مختلف الظروف الحرجة المباشرة وغير المباشرة التي تؤثر على عمل تحليلها.
النهج الاحتمالي لسلامة السد يمكن القول أن السلامة المطلقة ومخاطر الصفر لا وجود لها؛ بالإضافة إلى ذلك، فمن أكثر موضوعية وواقعية مقارنة بالطرق التقليدية .
كلمات مفتاحيه:السدود، القرار، التقدير، الحالات غير المرغوب فيها والتسيير، طرق التحليل، الخطر.

Abstract

This work based on analysis of risk to identify the sources of dangers and the situations associated which can lead to damage on the people, the environment or the property. a certain number of the tools for analysis of safety of the systems resulting
field were listed (the analysis preliminaries of the risks, AMDE, tree of the failures, and the tree of the events…).These tools extend from the analyses in terms of control and checking until procedures more complex destinies primarily with the diagnosis from the organizational risks.

In this paper an analytical approach to the methods of tree of the failures effects on dams are applied. This analysis allows estimating the risks associated with direct and indirect various critical conditions affecting the work analyzed.

The probabilistic approach to dam safety can say that the absolute safety and zero risk does not exist, in addition, it is much more objective and realistic compared to conventional methods.
Key words :*Dam, decision, estimate, critical state, management, methods of analysis, risk.*

Résumé

Cet travail consiste de l'analyse de risque pour identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens. Un certain nombre des outils d'analyse de sécurité des systèmes issus du domaine industriel a été recensé (l'analyse préliminaire des risques, AMDE, arbre des défaillances, et l'arbre des événements…). Ces outils s'étendent des analyses en termes de contrôle et de vérification jusqu'à des procédures plus complexes destinées essentiellement au diagnostic des risques organisationnels. Dans la présente étude une approche analytique par la méthode de l'arbre des conséquences et l arbre défaillances sur les barrages sont appliquées. Cette analyse permet d'estimer les risques, direct et indirect liés aux différents états critiques affectant l'ouvrage analysé.

L'approche probabiliste de la sécurité d'un barrage permet de dire que la sécurité absolue et le risque zéro n'existent pas ; en plus, elle est beaucoup plus objective et réaliste comparée aux méthodes classiques.
Mots clés : *Barrage, décision, estimation, état critique, management, méthodes d'analyse, risque*

INTRODUCTION GENERALE

Les études de dangers requises par la règlementation pour les ouvrages hydrauliques introduisent des concepts nouveaux d'analyse de risques.

Ces concepts proviennent du domaine de l'industrie à risques technologiques et mettent en œuvre les méthodologies de la Sûreté de Fonctionnement Dans une étude de dangers et dans les démarches d'analyse de risques et de sûreté de fonctionnement en général, une étape incontournable est celle de l'analyse fonctionnelle du système examiné.

De la qualité de l'analyse fonctionnelle dépend la qualité de l'ensemble de l'étude ultérieure, notamment la mise en œuvre des méthodes d'analyse des défaillances et de construction des scénarios

Le concept de risque possède un grand nombre de définitions et d'approches et la confusion est souvent localisée sur le pourcentage de probabilité, que ce soit dans le langage courant ou dans les références techniques.

Le risque est donc une fonction de ces deux variables :

- Une mesure de l'occurrence d'un danger (défaillance pour un système complexe) : elle est obtenue généralement à partir d'une probabilité d'apparition (sur une période de référence donnée) ou d'une fréquence (nombre d'évènements se produisant par unité de temps) ;
- Les effets et les conséquences humaines, économiques ou environnementales, si ce danger survenait. Ils sont évalués par des mesures appropriées (nombre de morts, coûts économique…).

Pour cela l'industrie a développé et utilise depuis de nombreuses années des techniques pour identifier, analyser, et manager les risques. Ces techniques sont regroupées dans la sûreté de fonctionnement, qui est définie comme la science des défaillances, incluant, leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise. Elles ont connu leurs premières applications dans des contextes à risque technologique fort (nucléaire, aéronautique…) à partir de 1960. Elles ont ensuite été développées dans les années 1980 dans l'industrie de production.

Les méthodes d'analyse des risques ne sont que des outils d'aide à la réflexion et en ce sens, leur qualité est fortement liée à leurs conditions de mise en oeuvre. Il est donc indispensable de se pencher brièvement sur les raisons qui justifient l'utilisation de telles

méthodes.

Il existe un grand nombre d'outils dédiés à l'identification des dangers et des risques associés à un procédé ou une installation.

Quelqu'un des outils les plus fréquemment utilisés sont :

- L'analyse préliminaire des risques (APR);
- L'analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
- (AMDEC) ;
- L'analyse des risques sur schémas type HAZOP ou « What- if » ;
- L'analyse par arbre d'évènements,
- L'analyse par arbre des défaillances ;
- Le nœud papillon.

Ces outils pris individuellement ou combinés permettent le plus souvent de répondre aux objectifs d'une analyse des risques portant sur un procédé ou une installation. Néanmoins, pour faire appel à des méthodes possédant un domaine d'application spécifique. C'est le cas par exemple pour la prise en compte des effets dominos entre installations ou l'examen des erreurs humaines.

D'une manière générale, le choix de retenir un outil particulier d'analyse des risques s'effectue à partir de son domaine d'application et de ses caractéristiques.

L'ingénieur du génie civil connaît l'existence du risque, il prend des précautions et néanmoins l'accident est parfois là, souvent bénin mais quelque fois grave car le risque est difficile à mesurer.

La compétence de l'ingénieur s'exerce dans un contexte incertain ; incertitude de comportement et les conditions de mise en œuvre des matériaux, incertitudes sur l'environnement, incertitudes sur les conditions extrêmes d'exploitation des ouvrages et même incertitudes sur les incertitudes.

Dans le domaine du génie civil, les barrages ont toujours été considérés comme des ouvrages d'art spécifiques. Les raisons se trouvant, d'une part dans le caractère unique de chaque barrage (lié essentiellement aux fondations) et à la complexité des comportements et des mécanismes en jeu, et d'autre part dans les effets majeurs des actions de l'eau et des

gradients hydrauliques au sein des structures, rendant ainsi ces ouvrages atypiques.

Dans le contexte des barrages, les travaux de recherche réalisés ces dernières décennies ont développé des approches physiques, fonctionnelles ou statistiques, et des méthodes puissantes ont été mise au point : modélisation des lois de comportement, calculs par éléments finis, modèles statistiques, études de sûreté de fonctionnement…etc. A partir de données Abondantes (auscultation, essais…) et appuyées par l'analyse experte, ces approches sont performantes pour le diagnostic et l'analyse des risques approfondis des barrages.

Pour cela la prise en compte des risques lors de la conception, au stade de l'étude, aux cours de la réalisation et pendant l'exploitation, est le moyen de prévention contre les dommages liés aux risques. L'ingénieur est confronté, aujourd'hui, à l'augmentation du coût pour justifier son ouvrage face au risque ; mais les pertes humaines et financières sont beaucoup plus importantes en cas d'incident.

L'objectif de notre recherche est d'appliquer des méthodes analytiques (arbre des évènements et arbre de défaillance), sur les barrages pour estimer les risques directs et indirects liés aux différents états critiques affectant l'ouvrage pendant sa durée de vie, et aussi pour prendre la décision afin de minimiser le risque total ou maximisant l'utilité.

Ainsi, le mémoire présenté comporte, après une introduction, cinq chapitres répartis qui constituent deux phases principales du travail : une phase bibliographique et une phase analytique.

Le chapitre I fait le point sur les barrages en général. Il nous renseigne sur les différentes définitions du barrage. Ensuite, les différents types des barrages.

Le chapitre II montre quelques statistiques sur les accidents graves des barrages, les causes qui produisent le risque du barrage ainsi que les états critiques qui peuvent affecter un barrage.

Le chapitre III présente les différentes méthodes d'analyses et d'évaluation du risque, avec les limites et les avantages de chaque méthode ainsi que sa méthodologie d'application.

Et dans le chapitre IV présente l'étude des méthodes (arbre d'événement et arbre défaillance) avec un programme qui peux nous aidé pour simplifié la méthode.

Le chapitre V présente l'étude de cas à partir des méthodes (arbre d'évènement et arbre défaillance)

Chapitre I. Les barrages :

I.1.Définition de barrage

Un barrage est un ouvrage artificiel ou naturel (causé par l'accumulation de matériaux à la suite de mouvements de terrain) établi en travers du lit d'un cours d'eau, retenant ou pouvant retenir de l'eau. Les barrages artificiels doivent être placés dans des cuvettes géologiquement étanches. Ils sont composés d'un corps conçu de manière spécifique à chaque type d'ouvrage, reposant sur une fondation étanche ou rendue étanche en amont. Un barrage en béton est découpé en plusieurs tranches verticales, appelées plots. Des ouvrages annexes lui sont associés, tels que les évacuateurs de crues, les prises d'eau, les turbines, les vidanges de fond, etc.

Par extension, on appelle barrage tout obstacle placé sur un axe de communication et destiné à permettre un contrôle sur les personnes et/ou les biens qui circulent (barrage routier, barrage militaire). Toutefois, il n'existe pas de définition uniforme du terme « barrage ». Le seul recensement existant est celui des « grands barrages » régulièrement tenu à jour par la Commission internationale des grands barrages (CIGB).

Quand le barrage est submersible, on parle plutôt de chaussée, seuil ou de digue ; ce dernier terme est également préféré à celui de barrage lorsqu'il s'agit de canaliser un flot et non de créer une étendue d'eau stagnante.

Un barrage fluvial permet par exemple la régulation du débit d'une rivière ou d'un fleuve (favorisant ainsi le trafic fluvial), l'irrigation des cultures, une prévention relative des catastrophes naturelles (crues, inondations), par la création de lacs artificiels ou de réservoirs. Un barrage autorise aussi, sous certaines conditions, la production de force motrice (moulin à eau) et d'électricité - on parle alors de barrage hydroélectrique -, à un coût économique acceptable, le coût environnemental étant plus discuté ; voir à ce sujet la fragmentation éco paysagère, phénomènes d'envasement à l'amont du barrage, dégradation de la qualité de l'eau et de l'environnement.

Plus un projet est ambitieux, plus ses conséquences pour l'environnement naturel et social seront marquées : en noyant des vallées entières, la construction d'un barrage peut provoquer à la fois des bouleversements humains en forçant des populations entières à se déplacer, et avoir un impact écologique non négligeable en changeant l'écosystème local. Toutefois,

Les grands barrages font partie d'un plan d'aménagement intégré de bassin, les projets

de construction considèrent les impacts avant toute élaboration. Dans la plupart des cas, la loi ou le droit coutumier imposent un débit réservé (débit minimal réservé aux usagers de l'aval et pour le maintien de l'écosystème aquatique et des espèces en dépendant).

I.2.Les barrages dans le monde

La capacité de stockage des barrages contribuent donc efficacement à la gestion des ressources mondiales en eau qui sont limités, mal réparties et peuvent présenter de grandes variations saisonnières.

Suivant le Registre Mondial des Grands Barrages (1998), deux grandes catégories de barrages peuvent être distinguées (Figure I-2.1) :

• les barrages à but unique (17 953),

• les barrages à buts multiples (14 656).

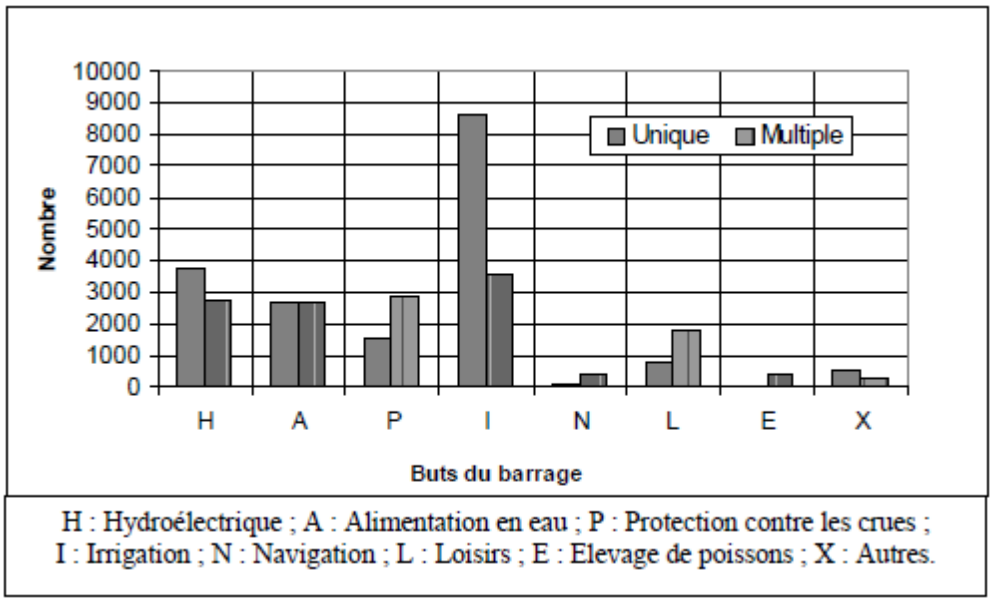


Figure I-.1 : Classification des barrages de 81 pays jusqu'en 1998 suivant leurs buts (d'après le Registre Mondial des Grands Barrages, 1998)

Dans la première catégorie, le plus grand nombre de barrages sont destinés à l'irrigation avec un pourcentage de 48 % alors que 21 % est utilisé pour la production électrique (40 % en Europe), 15 % est destinée à l'alimentation en eau domestique et industrielle. En ce qui concerne les autres buts, nous distinguons dans l'ordre décroissant : la protection contre les crues (8 %), les loisirs (4%) et à un moindre degré, la navigation et l'élevage de poissons.

Les barrages à buts multiples représentent une proportion importante de l'ensemble

des ouvrages, soit près de 45 %. Ce type d'aménagement est de plus en plus associé au développement économique des pays. Dans cette catégorie, l'irrigation tient également la première place. Viennent ensuite la protection contre les crues, la production d'électricité, l'alimentation en eau domestique et industrielle, les loisirs et, à un moindre degré l'élevage de poissons et la navigation.

Il y a plus de 800 000 barrages dans le monde avec environ 45 000 d'entre eux avec une hauteur de plus de 15 m. Les principaux pays constructeurs de barrages se trouvent en Europe (environ 7000 barrages), en Amérique du Nord (plus de7800 barrages) et en Asie (près de 30 000 barrages). Les plus grands barrages du monde, suivant différents critères de classification, sont résumés dans le Tableau suivant.

Tableau I-.1 : Les plus grands barrages du monde suivant quatre critères

Critères	Nom du barrage	Pays	Caractéristique
Hauteur	Rogun	Tajikistan	335 m
Capacité de la retenue	Syncrude Tailings	Canada	540 000 10^6 m^3
Bassin Versant	Assouan	Egypte	2 200 000 Km^2
Volume du barrage	Yacambu	Venezuela	3 600 10^6 m^3

L'analyse du nombre des barrages entre 1909 et 2000 pour chaque décennie et pour 81 pays du monde montrent que 82 % des barrages ont été construits après les années 1950 avec un ralentissement constaté dans la décennie 1980-1989 (Figure I-2.2).

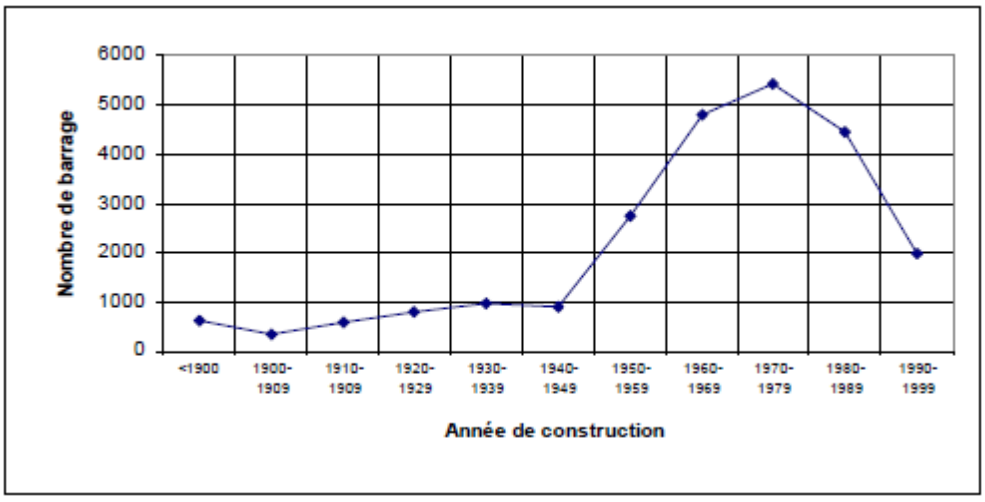


Figure I-.2 : Nombre de barrages dans 81 pays jusqu'en 1998 (d'après le Registre Mondial des Grands Barrages, 1998).

Sur les 1600 barrages, actuellement, en construction dans 42 pays, 40 % se trouvent

en Inde. Les autres grands pays constructeurs sont : chine, 280; Turquie, 193; Corée, 132; Japon, 90; Brésil, 42; Espagne, 37; Tailande, 36. Les barrages se répartissent entre les divers pays comme indiqué dans le Tableau I-3.3 suivant la hauteur du barrage. Les cinq pays suivants USA, Chine, Espagne, Inde et le Japon comportent 82 % du nombre total du barrage sur les 42 pays recensés.

I.2.1.Quelques exemples de grands barrages dans le monde

- le barrage Hoover aux États-Unis (1931-1935) ;
- les barrages d'Assouan sur le Nil, en Égypte ;
- les barrages d'Inga sur le Congo, en République démocratique du Congo ;
- le barrage d'Itaipu sur le Paraná, à la frontière entre le Brésil et le Paraguay ;
- la centrale Robert-Bourassa au Québec ;
- le barrage de Kapanda sur le Cuanza en Angola ;
- le barrage des Trois-Gorges en Chine ;
- le barrage de la Grande-Dixence, en Suisse ;
- le barrage Atatürk sur l'Euphrate en Turquie ;
- le barrage Daniel-Johnson sur la Manicouagan au Québec ;
- le barrage de Guri au Venezuela ;
- le barrage de Nourek (300 m) au Tadjikistan est le plus haut du monde.

I.3.Classification des barrages

Parmi les diverses classifications possibles, nous retiendrons les deux suivantes : D'après la fonction et la structure et suivant le type de matériaux constituant la digue, le mode de résistance à la poussée de l'eau et le procédé de construction (Ginocchio, 1959).

I.3.1.Classification des retenues d'après les utilisations diverses de l'eau

D'après les possibilités d'accumulation de la retenue, nous distinguons les barrages d'exhaussement et barrages d'accumulation. Cette classification est liée avec celle adoptée pour les aménagements hydroélectriques.

Les barrages qui jouent seulement un rôle d'exhaussement sont principalement ceux des aménagements de basse chute (Hn < 30 m ; Hn hauteur de chute nette) généralement situés

en basse vallée, L'exhaussement est caractérisé par la hauteur de retenue maximale, hm, différence entre la cote du plan d'eau à la retenue normale au droit du barrage et la cote du fond du cours d'eau au point le plus bas de celui-ci dans la section occupée par le barrage.
Les barrages d'accumulation sont ceux des aménagements de moyenne (30<Hn<200m) et de grande hauteur (Hn >200 m), généralement situé en haute vallée.
Les barrages d'accumulation peuvent avoir des buts ou utilisations différentes et souvent multiples :

a-stockage des eaux pour usage unique: eaux potables; Irrigation ; Protection contre les crues; Production d'énergie hydroélectrique.

b- Usages multiples: eau potable ; irrigation ; énergie hydroélectrique et protection contre les crues

I. 3.2.Classification des barrages selon le type de matériaux et le mode de résistance à la poussée de l'eau :

Les barrages sont souvent classés sur la base du type de matériaux de construction ou sur la méthode de résistance à la pression de l'eau. Les principaux types de barrages sont :

I. 3.2.1.Barrages rigides (en matériaux assemblés)

- Barrages voûtes (arch dams)
- Barrages poids (gravity dams)
- Barrages à voûtes multiles (multiple arch dams) ou Barrages à contreforts (bouttress dams)

I. 3.2.1.1.Le barrage voûte

Le barrage-voûte est un type de barrage à forme arquée dont la courbe permet de reporter les efforts dus à la poussée de l'eau sur chaque côté des rives plutôt que sur le barrage lui même. Cette technique est inspirée des voûtes des cathédrales. Les barrages-voûtes sont essentiellement utilisés dans des vallées étroites disposant de versants aux matériaux très solides.

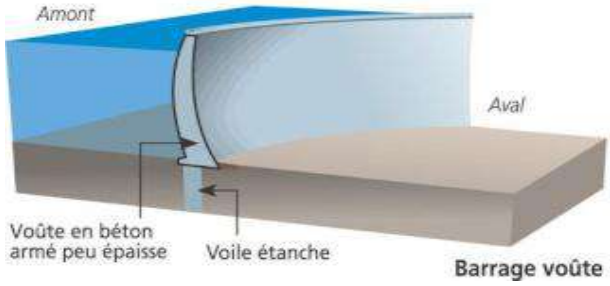


Figure .I.3 : barrage voûte

La technique de barrage-voûte nécessite une vallée plutôt étroite (même si des barrages voûtes ont été parfois construits dans des vallées assez larges, poussant cette technologie à ses limites) et un bon rocher de fondation. même lorsque ces conditions sont réunies, le barrage-voûte est aujourd'hui souvent concurrencé par les barrage-poids en béton ou le barrage en enrochements, dont la mise en œuvre peut être davantage mécanisée.

Par le peu de matière utilisée, c'est évidemment une technique très satisfaisante économiquement.

Cependant, la plus grande catastrophe de barrage vécue en France (Malpasset, au-dessus de Fréjus, le 2 décembre 1959) concernait un barrage-voûte en cours de mise en eau c'est la fondation (et non pas le barrage lui-même) qui n'a pas supporté les efforts appliqués par la retenue.

Avant cet accident (et, pour certains, aujourd'hui encore), la voûte est considérée comme le plus sûr des barrages. Malpasset est le seul cas connu de rupture d'un barrage-voûte.

I. 3.2.1. 2. Les barrages poids

Le barrage-poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple (leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangle).

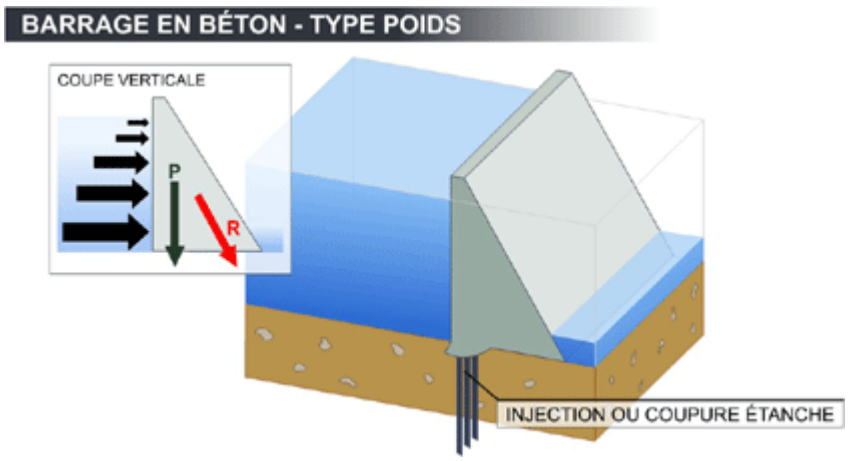


Figure .I.4 : barrage poids

Le choix de la technique est donc d'abord géologique : une assez bonne fondation rocheuse est nécessaire. Mais il faut également disposer des matériaux de construction (granulats, ciment) à proximité.

La technologie des barrages poids a évolué. Jusqu'au début du **XX**e siècle (1920-1930), les barrages poids étaient construits en maçonnerie (il existe beaucoup de barrages de ce type en France, notamment pour l'alimentation en eau des voies navigables). Plus tard, c'est le béton conventionnel qui s'est imposé.

Depuis 1978, une nouvelle technique s'est substituée au béton conventionnel. Il s'agit du béton compacté au rouleau. C'est un béton (granulats, sable, ciment, eau) avec peu d'eau, qui a une consistance granulaire et non liquide. Il se met en place comme un remblai, avec des engins de terrassement. Il présente le principal avantage d'être beaucoup moins cher que le béton classique.

I. 3.2.1.3.Le barrage à contreforts ou voûtes multiples

Le barrage à contreforts, ou barrage à voûtes multiples, est un barrage qui s'appuie sur une série de voûtes qui permettent de transmettre la poussée de l'eau vers la fondation du barrage. Les barrages à contreforts sont utilisés lorsque les appuis sont trop distants. La technique de ce barrage permet de réaliser un ouvrage économique en matériaux sur de grandes distances.

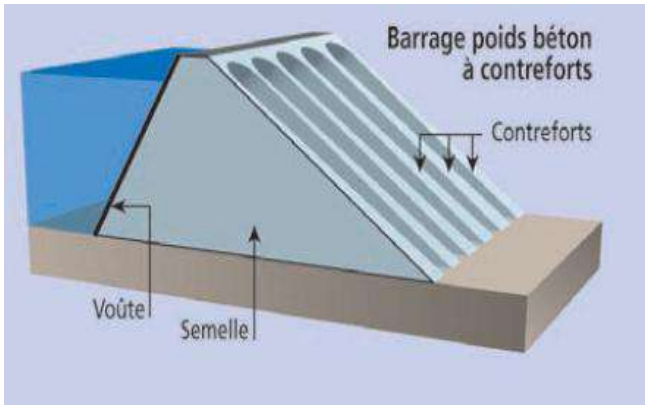


Figure .I.5 : barrage àcontreforts ou voûtes multiples

Un deux exemples le plus important de ce type est barrage daneil johnson au quebec, complété en 1968 dans le cadre du prohet Manic-Outardes. Haut de 214m et large de 1312m,

le barrage conçu par André Coyne ;est soutenu par deux contreforts centraux écartés par 160 m à leur base. Les 13 voûtes latérales forment des demi-cylindres inclinés qui ont 76 m d'entraxe. Au-delà des considérations esthétiques, Hydro- Québec a choisi de construire un barrage en voûte et contreforts pour des raisons économiques. Selon les études de conception, la construction de l'ouvrage a requis un peu plus de 2,2 millions de m^3 de béton, soit cinq fois moins qu'un barrage poids.

I. 3.2.2.Barrages en remblais (en matériaux non assemblés) (embankment dams)

On appelle barrages en remblais tous les barrages constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin ou très grossier (enrochements).

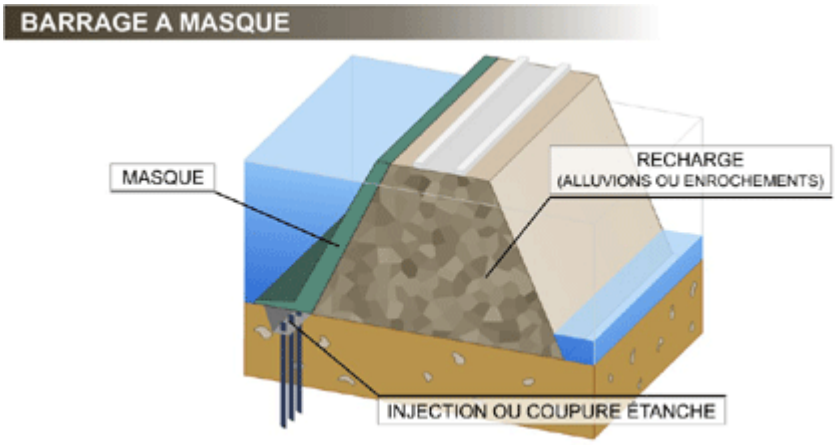


Figure. I.6 : barrage en remblais

Cette famille regroupe plusieurs catégories, très différentes. Les différences proviennent des types de matériaux utilisés, et de la méthode employée pour assurer l'étanchéité.

Le barrage homogène est un barrage en remblai construit avec un matériau suffisamment étanche (argile, limon). C'est la technique la plus ancienne de barrages en remblais.

Le barrage à noyau argileux comporte un noyau central en argile (qui assure l'étanchéité), épaulé par des recharges constituées de matériaux plus perméables. Cette technique possède au moins deux avantages sur le barrage homogène :

(1) les matériaux de recharge sont plus résistants que les matériaux argileux, on peut donc construire des talus plus raides

(2) on contrôle mieux les écoulements qui percolent dans le corps du barrage.

Le barrage en à noyau en moraine est souvent utilisé dans les régions marquées par le retrait des glaciers. Ces ouvrages sont généralement constitués d'un noyau imperméable de moraine, récupérée à proximité du site, qui est protégé par des filtres en granulaire.

La coupe type d'un barrage en enrochement comprend également une zone de transition située entre le filtre et la recharge.

Quelques cousins des barrages à noyau : les barrages en remblai à paroi centrale étanche (paroi moulée en béton, paroi en béton bitumineux).

Plus récente, la famille des barrages à masque amont. L'étanchéité est assurée par un « masque », construit sur le parement amont du barrage. Ce masque peut être en béton armé (il se construit actuellement de nombreux et très grands barrages en enrochements à masque en béton armé), en béton bitumineux, ou constitué d'une membrane mince (les plus fréquentes : membrane PVC, membrane bitumineuse).

I.4.Autres classifications des barrages

Il existe d'autres catégories de barrages, en général de taille plus réduite.

Les barrages de stériles miniers sont des barrages construits avec des résidus d'exploitation minière pour créer une zone de stockage de ces stériles. Les barrages sont montés au fur et à mesure de l'exploitation de la mine. Ils s'apparentent aux barrages en remblai.

Les barrages de montagne sont des ouvrages destinés à lutter contre les effets de l'érosion torrentielle. Ce sont des ouvrages construits en travers des torrents. Ils peuvent interrompre (partiellement ou complètement) le transport solide ; ils peuvent également fixer le profil en long d'un thalweg en diminuant l'agressivité des écoulements.

Les digues filtrantes sont des ouvrages construits en pierres libres à travers un talweg ou bas-fond dans lequel des eaux de ruissellement se concentrent lors des grandes pluies. La digue sert à freiner la vitesse de l'eau des crues, et elle épand ces eaux sur une superficie au côté amont, action par laquelle l'infiltration est augmentée et des sédiments sont déposés.

La superficie inondable constitue un champ cultivable sur laquelle sont obtenus de bons rendements grâce à une meilleure disponibilité en eau et en éléments nutritifs pour les cultures comme le sorgho. En même temps, l'érosion de ravine dans le talweg est arrêtée ou évitée.

I.5. Choix du site et des caractéristiques d'un barrage

Le choix du site et des caractéristiques géométriques (hauteur et formes) d'un barrage doit être effectué en fonction des conditions suivantes :

- Conditions topographiques
- Conditions géologiques
- Conditions hydrologiques

-Conditions relatives à la géographie humaine

Le choix du type d'ouvrage dépend également de ces différents facteurs ainsi que des conditions économiques relatives à l'exécution des travaux.

I.5.1.Conditions relatives à la topographie

La recherche d'un emplacement de barrage est précédée des opérations suivantes :

- Etablissement d'une carte à grande échelle avec courbes de niveau dressée, en général,par procédé photo grammatique

- Recherche de verrous (ou gorges) et de cuvette sur cette carte qui, pour un barrage fixe, doivent remplir les conditions suivantes :

1) largeur du verrou la plus faible possible pour réduire le volume de la digue par mètre de dénivellation

2) Capacité la plus grande possible pour une hauteur donnée de la cuvette située en amont du barrage d'accumulation.

La qualité d'un site de barrage d'accumulation peut être caractérisée par le volume d'eau accumulé par m3 de digue (m3 de béton du barrage), ou encore par le nombre de KWh accumulés par m3 de digue.

I. 5.2Conditions géologiques

Les roches et les sols de la zone de fondation de l'ouvrage et de la cuvette doivent présenter des caractéristiques satisfaisantes en ce qui concerne :

a- la stabilité du barrage

b- l'étanchéité de la retenue

I. 5.2.1.La stabilité du barrage

En ce qui concerne la stabilité de l'ouvrage, le terrain de fondation doit présenter les qualités essentielles suivantes :

- faible degré de broyage et d'altération
- faible compressibilité
- grande résistance à l'écrasement

La recherche de ces caractéristiques est réalisée grâce aux moyens suivants :

a) Travaux de reconnaissance

b) Procédés géophysiques

I. 5.2.1.1.Travaux de reconnaissance

Les travaux de reconnaissance ont pour but de reconnaître la topographie du rocher en place, la nature du terrain, sa structure, son degré d'altération (faible, diaclases) et de déterminer sa résistance mécanique.

Les différents procédés utilisés sont les suivants :

- Décapage de la zone d'implantation de l'ouvrage
- Percement de galerie et de puits dans les versants ou sous l'emplacement de l'ouvrage
- Sondage aux rails : enfoncement de barre métallique (composée par exemple, de rails éclissés) jusqu'au contact du rocher en place (bed-rock)
- Sondage mécanique vertical ou rayonnant (Figure .I.7) : carottage (échantillon cylindrique de roches) à des profondeurs sur plusieurs dizaines de mètres.

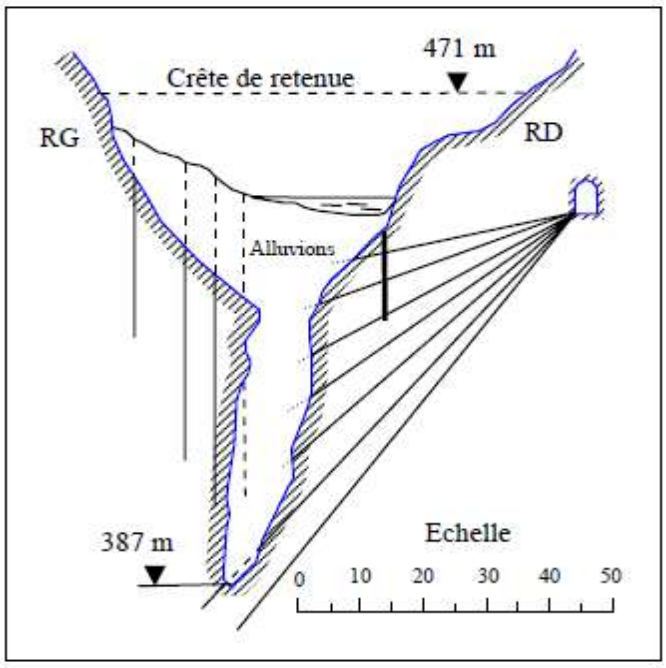


Figure .I.7: Sondage mécanique vertical et rayonnant (Ginocchio, 1959).

La durée des campagnes de reconnaissance est quelquefois très longue : des années voir même des dizaines d'années (ex. Barrage Serre-Ponçon 1913-1947 pour 6500 m de perforation).

I. 5.2.1.2.Procédés géophysiques

Mesures de certaines caractéristiques physiques des rochers et des sols telles que : vitesse du son et résistance ohmique à partir desquelles on peut déterminer les grandeurs caractérisant la déformation et la résistance mécanique des roches de fondations.

Rappelons que le module d'élasticité E d'un matériau caractérise sa compressibilité,

C'est à- dire sa déformation sous l'action d'une contrainte ; sa valeur est d'autant plus grande que le matériau est moins compressible et la roche de fondation est ainsi d'autant plus satisfaisante. Suivant la vitesse d'application des contraintes, nous distinguons le module d'élasticité statique et dynamique :

1) Module statique **Es** : peut être mesuré par deux méthodes :

Déformation d'une cavité : on crée une cavité cylindrique de diamètre d dans la roche ; on introduit de l'eau sous pression dans cette cavité et on mesure la variation **Δd** du diamètre du cylindre produite par une pression **p** :

$$\Delta \mathbf{d} = \frac{\mathbf{pd}}{\mathbf{E_s}} \qquad \textbf{(1)}$$

- Méthode de poinçonnement : elle consiste à charger le terrain sur une surface circulaire au moyen d'un vérin et mesurer les enfoncements sur les bords et au centre.

Les valeurs de Es varient entre 25 000 < Es < 300 000 Kg/cm2 (respectivement pour schistes verts et schistes cristallins de bonne qualité).

2) Module dynamique **Ed** : mesuré par la méthode sismique des vitesses de propagation d'ondes de pression longitudinales Vl et transversales Vt produites par une explosion. Ces vitesses permettent le calcul de Ed et μ, le coefficient de Poisson

$$\mathbf{V_l} = \sqrt{\frac{\mathbf{E_d}}{\boldsymbol{\rho}} + \frac{\mathbf{1-\mu}}{\mathbf{(1+\mu)(1-2\mu)}}} \quad \textbf{et} \quad \mathbf{V_l} = \sqrt{\frac{\mathbf{E_d}}{\boldsymbol{\rho}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2(1+\mu)}}} \qquad \textbf{(2)}$$

$\boldsymbol{\rho}$:Étant la masse volumique de la roche

La mesure du temps de propagation est réalisée au moyen de sismographes.

Le module Ed est en général, supérieur au module statique Es.

La méthode sismique permet également de déterminer l'épaisseur d'une couche rocheuse surmontant une couche de nature différente par mesure des temps de propagation (méthode par réfraction, méthodes par réflexion).

I. 5.2.2.Etanchéité de la retenue

L'étanchéité d'une retenue dépend de la perméabilité des terrains constituant le sol de fondation du barrage et la cuvette : ces terrains sont en effet soumis à la pression correspondant à la hauteur d'eau dans la retenue du barrage et peuvent être traversés par des débits importants.

I. 5.2.2.1.Définitions

La perméabilité d'un milieu poreux mesure son aptitude à laisser s'écouler les fluides en son sein. L'eau chemine dans les pores du milieu sous l'effet de la pression : le débit à travers une section donnée est d'autant plus faible que les frottements sont plus grands (pores de dimension plus petites). Considérons un milieu poreux homogène et isotrope à travers lequel s'écoule un liquide à débit constant Q (Figure .I.8).

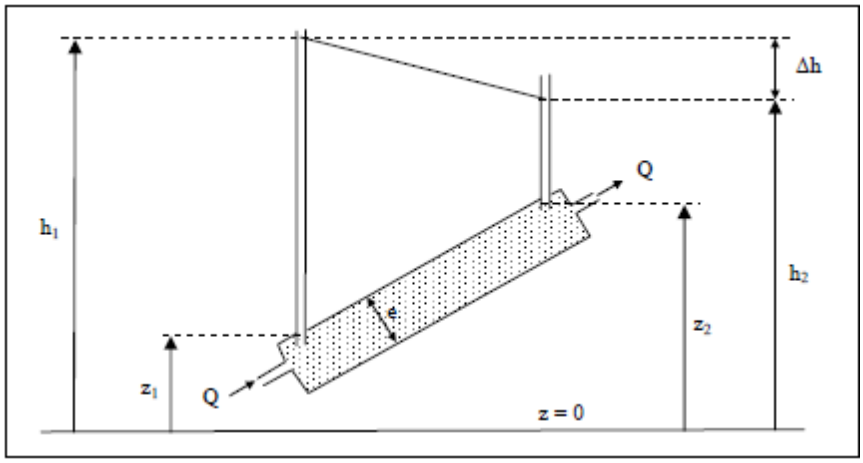


Figure .I.8: Expérience de Darcy

La loi de Darcy permet d'exprimer la vitesse moyenne de l'écoulement U à travers un milieu poreux par la relation :

$$\mathbf{U = kI = -k\frac{dh}{dL}} \qquad \textbf{(3)}$$

Avec, K : coefficient de perméabilité ; les ordres de grandeur du coefficient de perméabilité K sont les suivants : K sable siliceux 10-3 à 10-4 m/s ; K argile 10-7 m/s.;

I : gradient de pression (perte de charge/longueur d'infiltration) ;

h : est la charge piézométrique $\mathbf{h = z + \frac{\rho}{\rho g}}$ **(4)**

Cette loi exprime que la vitesse de percolation est positive dans la direction des charges décroissantes. Elle permet de déterminer la forme de la surface libre de la nappe d'eau infiltrée dans un massif (surface de saturation), celle des lignes de courant et le débit d'infiltration à travers le massif. L'analogie de la forme de la loi de Darcy avec la loi d'Ohm permet d'utiliser des modèles en analogie électrique pour tracer les lignes de courant et les lignes équipotentielles. Avec les moyens informatiques modernes, ces lignes peuvent

être déterminer directement par la résolution de l'équation de Laplace des écoulements potentiels plans.

I. 5.2.2.2.Méthodes de mesure de la perméabilité

Les méthodes de mesure du coefficient K diffèrent suivant que le terrain est formé de roches consistantes ou de terrains alluvionnaires.

b.1) ***Roches consistantes*** La perméabilité est, en général, mesurée sur place par l'essai « Lugeon » ; Mesure sur site par injection d'eau sous pression constante et mesure du débit absorbé par unité de longueur de forage.

b.2) ***Terrains alluvionnaires*** La perméabilité est mesurée par des essais en laboratoire ou des essais sur place :

* Essais en laboratoire : Une carotte de sol de section S est placée dans un tuyau sous pression constante et on mesure le débit Q à travers celle-ci pour une perte de charge linéaire I. La loi de Darcy donne :

$$\mathbf{K = \frac{Q}{SI}} \qquad \mathbf{(5)}$$

* Essais sur site : indispensable pour les matériaux constitués de grains pas très fins, car un échantillon de faibles dimensions n'est pas suffisamment représentatif. Méthode de rabattement de la nappe : pompage et détermination de la forme de la surface libre de la nappe rabattue au moyen de tubes piézométriques

- Nappe libre (la surface libre de la nappe est à la pression atmosphérique et l'aquifère n'est pas saturé sur toute son épaisseur) :

En supposant que toutes les vitesses horizontales dans une tranche verticale de la nappe sont égales (hypothèse de Dupuit) et que les vitesses verticales sont négligeables, le débit Q pour un écoulement permanent, peut être calculer par (Figure .I.9) :

$$\mathbf{Q = \frac{\pi K(H^2 - h^2)}{\log\left(\frac{D}{d}\right)}} \qquad \mathbf{(6)}$$

avec, Q : débit ; K : coefficient de perméabilité ; H : hauteur totale de l'eau à partir du fond du puit jusqu'à la surface libre sans influence du pompage ; h = H – s avec s le rabattement de la nappe ; D : diamètre du cylindre d'action ; d : diamètre du puits.

Cette formule qui n'est valable que dans les zones assez éloignée de la nappe permet de déterminer la perméabilité du milieu poreux en mesurant le débit, H(D), h et d.

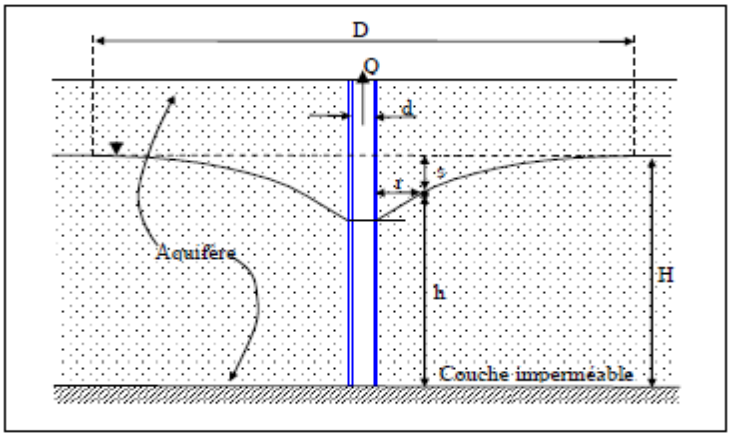


Figure.I.9: Schéma de calcul du débit d'une nappe libre
(D'après Civil Eng. Handbook).

Nappe artésienne (C'est une nappe captive, la surface libre est a une pression supérieure à la pression atmosphérique, la surface piézométrique est au-dessus de la surface topographique, (Figure I.10) : Le débit pour un écoulement permanent, à partir d'un puits artésien est donné par :

$$\mathbf{Q = \frac{2\pi Ke(H-h)}{\log\left(\frac{D}{d}\right)}} \qquad \mathbf{(7)}$$

Avec, **e :** est l'épaisseur de l'aquifère confiné.

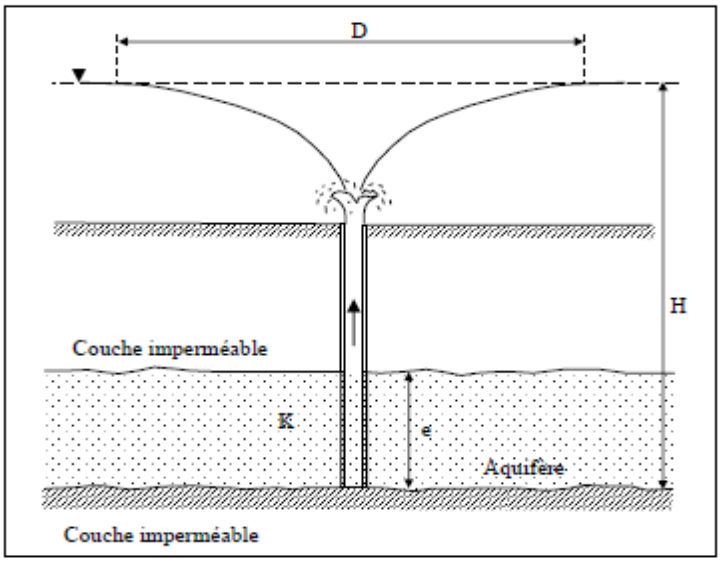


Figure .I.10: Schéma de calcul du débit d'une nappe artésienne
(D'après Civil Eng. Handbook).

I. 5.2.2.3.Etude géologique

Vise la détermination des possibilités de fuite : à l'aval du barrage, dans la vallée barrée ou dans une autre vallée de niveau inférieur. L'importance des fuites dépend de la nature géologique des terrains traversés. Les terrains peuvent être :

* ***Perméables en petit (terrains alluvionnaires***) : les résurgences se produisent, en général, à une distance suffisamment grande à l'aval du barrage pour que le débit de fuite soit acceptable. Les fuites sont importantes dans le cas d'un lit fossile, lits anciens recouverts par des alluvions (2.8 m3/s pour le barrage Sautet).

* ***Perméables en grand*** : roches solubles

I. 5.3.Conditions hydrologiques

a) Superficie du bassin versant : l'alimentation du réservoir doit assurer son remplissage en année hydrologique moyenne

b) Débit solide : important pour fixer la capacité utile de la retenue et la cote de la prise d'eau.

I. 5.4.Conditions relatives à la géographie humaine

a) Retenue normale et retenue exceptionnelle : (Qmoyen et Qcrue max) : courbes de remous correspondantes, habitations, routes, voies ferrées, cultures, sites protégés, ouvrages d'art, irrigation, pèche, ...

b) Agglomération et terres cultivées : expropriation/déplacements

c) Voies de communication : déviations routes, voies ferrées, conduites...

d) Navigation intérieure : à maintenir,

e) Débit réservé – réservoir de compensation : Qmin : échelles à poissons.

I.6. Entretien des barrages

Un barrage n'est pas un simple mur plus ou moins solide. Il n'est pas inerte et fait l'objet surveillance sismologique et technique sous plusieurs critères. L'ouvrage vit, travaille et se fatigue en fonction des efforts auxquels il est soumis.

Tout le barrage peut être exposé à 4 types de risque :

1. Les défauts de maintenance et de contrôle, eu égard à l'obsolescence des matériaux ;
2. Les crues ;
3. Les accidents de terrain, mouvements ou glissements ;
4. Les séismes, celui de référence se situant à 3,5 sur l'échelle de Richter.



Photo N°1.1: *Accumulation de débris naturels et anthropiques contre le mur d'un barrage. [20].*



Photo N°1.2: *Les restes du barrage de Malpasset, détruit le 2 décembre 1959 [20].*

L'obsolescence des matériaux est principalement liée à la dégradation du matériau béton, qui peut être sujet à deux maladies : l'alcali-réaction (dont souffre le barrage du Chambon, en France) et la réaction sulfatique interne (dont souffre le barrage de Bimont, en France).

Généralement, on estime qu'au cours du 20e siècle, 1 % des barrages à travers le monde se sont rompus.

Pour des raisons de maintenance des ouvrages, les barrages sont régulièrement inspectés. Chaque année, l'aspect extérieur du barrage est examiné, et périodiquement (tous les 10 ans en France) la retenue d'eau est vidée afin de permettre l'accès à la fois à la partie inférieure de l'ouvrage et aux équipements (conduites d'eau, grilles, vannes, etc.).

Les ouvrages intéressant la sécurité publique sont également auscultés, par des capteurs

permettant de mesurer leurs comportements (mesures de déplacements, de pression d'eau, de débit…). De son état dépend la sécurité des populations installées en aval.

Pour autant la probabilité de rupture est extrêmement faible : statistiquement, une rupture par an sur un parc mondial de 16 000 barrages, Chine exclue. En Europe, la probabilité est encore plus basse. En fait le danger est le plus élevé au moment du premier remplissage, le risque étant cependant bien moins élevé pour les ouvrages en béton que pour ceux en remblais.

En France, les dispositions réglementaires relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques sont assurées par le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007. Ce dernier a établi une nouvelle classification des digues et barrages et a clarifié les mesures à prendre pour assurer leur contrôle, leur mise sécurité et leur maintenance.

Les barrages construits dans les Alpes, dans les années 1950 et 1960, au plus fort de l'âge d'or de la houille blanche, sont aujourd'hui parvenus dans une phase de vieillissement qui nécessite des frais de maintenance de plus en plus élevés. EDF estime que la plupart des ouvrages hydrauliques atteignent seulement la moitié de leur espérance de vie mais a annoncé un important programme d'investissements pour la maintenance et la réhabilitation.

Rapport de l'OPCEST (office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et Technologiques) français du 9 juillet 2009, les principales inquiétudes résident moins dans les grands ouvrages que dans la multitude de petits barrages en France pour lesquels les niveaux d'entretien et de contrôle sont insuffisants.

.

Chapitre II : Les Risques des Barrages.

II .1.Introduction :

Les risques naturels ou technologiques sont devenus le lot de notre vie quotidienne.

Il ne se passe plus guère des jours sans l'annonce d'un accident menaçant des vies humaines ou notre environnement. Prestige et Erika (pollution de marine par pétrolier), AZF (l'accident de l'usine chimique de Toulouse), l'Amoco Cadiz (pollution marine par le mazout), Seveso (La fuite de dioxine d'une usine chimique produisant des herbicides), Bohpal (la fuite d'un gaz toxique dans une entreprise d'union Carbide), Mexico (une fuite dans une installation de stockage de gaz de pétrole liquéfié), Tchernobyl (un des accidents nucléaires les plus graves) Les inondations en Normandie, dans le Var, à Bab El oued et à Ain Essafra, tremblements de terre en Turquie, en Arménie, au Japon, l'effondrement de .terrain à Au Boué et Moutiers en Lorraine, les crises majeures de santé publique, qu'il s'agisse du Syndrome Respiratoire Aigu Sévère (SRAS), de la maladie deCreutzfeldt - Jacob (ESB), du sang contaminé, sans oublier la pandémie de SIDA, la pollution atmosphérique, le cancer… etc. ont été autant de tragiques jalons dans une liste noire, dont les médias se sont fait largement l'écho.

Ainsi, avec le développement technique, économique et social du XIXe et du XXe siècle, le risque a envahi notre quotidien avec son lot de catastrophes et occupe aujourd'hui une place sans précédent dans la décision publique. Enfin, l'impact des catastrophes naturelles et industrielles n'ayant cessé de croître, comme le montre les figures (II.1) et (II.2), la prise en compte des risques et de leur gestion n'en a été que de plus en plus nécessaire dans les sociétés modernes.

risque a envahi notre quotidien avec son lot de catastrophes et occupe aujourd'hui une place sans précédent dans la décision publique. Enfin, l'impact des catastrophes naturelles et industrielles n'ayant cessé de croître, comme le montre les figures (II.1) et (II.2), la prise en compte des risques et de leur gestion n'en a été que de plus en plus nécessaire dans les sociétés modernes.

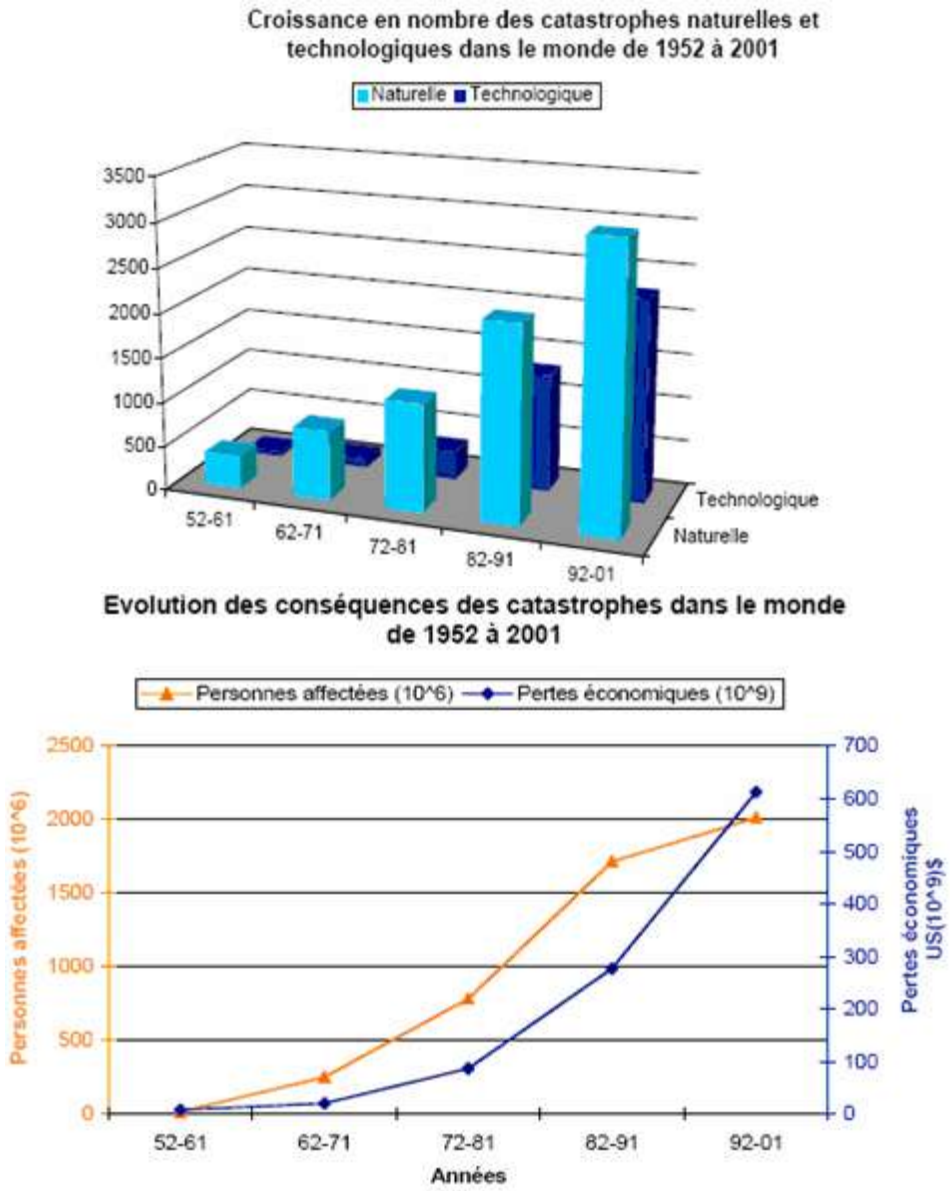


Figure II.1 : Tendance croissante des catastrophes au cours du siècle dernier (Source : International DisasterDatabase, www.cred.be/emdat). [11].

Figure II.2 : Croissance de l'impact des catastrophes au cours du siècle dernier (Source : International DisasterDatabase, www.cred.be/emdat),[11].

II .2Figure Villeumeur, 1988,: «Le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences»

Casagrande,: Utilisait les mots «risques graves» ou «grandes incertitudes» et définissait ce risque comme un processus de reconnaissance et de mise en relation.

Guide ISO/CEI 51, 1999, Le risque est la combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité.

AFNOR: «La possibilité qu'un projet ne s'exécute pas conformément aux prévisions de date d'achèvement, de coût et de spécifications ; ces écarts par rapport aux prévisions étant considérés comme difficilement acceptables, voir inacceptables»

En pratique, qu'il s'agisse d'accidents industriels ou de catastrophes naturelles, le calcul d'un risque mathématiquement est rare car il est difficile. Si les industriels utilisent des outils de sûreté d'événements), l'évaluation du risque est souvent ramenée à un processus simplifié d'évaluations qualitatives croisant différentes grandeurs.

Mathématiquement, le risque n'est autre que l'espérance du coût des dommages, due à la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable.

$E(C) = \sum C \times P(C)$

Néanmoins cette définition reste insuffisante, car elle ne tient pas compte de la vulnérabilité. En simplifiant à l'extrême ce processus, les expressions suivantes pour définir le risque, sont souvent rencontrées :

Traditionnellement, le risque peut être mesuré comme :

Risque =Fréquence(F) ×Conséquence(C)

Où, est produit de la fréquence de l'évènement initial et la probabilité d'un dommage.

Dans certains domaines opérationnels, le risque est estimé par :

Risque =Sévérités(S) ×probabilité(P) × Exposition(E)

Dans ce cas, si la probabilité (P) et l'exposition (E) définissent le composant de fréquence.

- ✓ Dans le domaine industriel:

Risque= Probabilité x Gravité

- ✓ Pour les risques naturels :

Risque = Aléa x Vulnérabilité

Ces définitions sont assez semblables, à condition de préciser les notions de probabilité, de gravité, d'aléa et de vulnérabilité.

Dans l'évaluation des risques industriels :

- ✓ La probabilité est une probabilité stricte. C'est la probabilité que le phénomène considéré se produise.

- ✓ La gravité mesure alors l'intensité des conséquences dommageablesde ce phénomène. Il est évident que plus le phénomène considéré intense, plus ses conséquences ne seront importantes.

Dans l'évaluation des risques naturels, l'aléa intègre deux aspects différents:

- ✓ La probabilité d'occurrence du phénomène et son intensité.

A titre d'exemple, on parlera d'aléa fort pour un mouvement de terrain mobilisant une très grande masse même si la probabilité d'occurrence de ce mouvement est assez faible. Par contre, l'aléa sera relativement faible, pour une même probabilité d'occurrence s'il correspond à une faible masse mise en mouvement. Si à chaque niveau d'intensité de l'aléa, on peut associer une probabilité, on pourra envisager une estimation (la plus vraisemblable) de l'aléa sous la forme d'un calcul d'espérance mathématique.

- ✓ La vulnérabilité, si on la définit comme « le niveau des dommages prévisible engendrés par le phénomène considéré » (MATE, 1999), elle traduit directement la gravité des conséquences potentielles du phénomène. Ils 'agit alors d'une gravité stricte, qu'on peut envisager d'estimer pour chaque phénomène donné, d'intensité donnée.

On constate ainsi que dans le premier cas, l'intensité du phénomène apparaît implicitement dans l'estimation de la gravité des conséquences alors que dans le second cas, elle est intégrée à l'estimation de l'aléa.

Dans la gestion des risques, l'élément de fréquence est tient compte de la menace :

$$Risque = [Menace(M) \times Vulnérabilité\ (V)] \acute{} Conséquence(C)$$

- ✓ La menace est une mesure de la probabilité qu'un type spécifique d'attaque

sera lancé contre une cible spécifique (c.-à-d., un scénario).

- ✓ La vulnérabilité est une mesure de la probabilité pour la protection diversecontre un scénario échoueront.
- ✓ La conséquence est l'importance des effets négatifs, si l'attaque est réussie. Quelques organismes, en incluant la marine, utilisent le terme criticité pourdécrire l'impact d'un événement.

II .3. FACTEURS ET CARACTERISTIQUES DES RISQUES :

Un facteur de risque est un élément déclencheur d'une perte, un événement ou une situation qui cause l'occurrence d'une perte. Le facteur de risque constitue donc l'origine d'un risque ou d'un ensemble de risques.

Parmi les exemples classiques de facteurs de risque, on retrouve la complexité d'une application, la taille d'un projet, le nombre d'intervenants, la nouveauté technique, l'instabilité des besoins d'affaire, le manque d'expérience, l'absence d'assurance qualité, le manque de rigueur dans la définition des exigences, des
Paramètres erronés d'estimation de l'effort, etc.

- **Facteurs de risque internes** : Il s'agit de circonstances contrôlées par un cadre supérieur effectuant une gestion des risques adéquate. Voici quelques exemples d'éléments de risque internes : fiabilité des prévisions de coûts; ressources humaines; ressources financières; définition des besoins- portée, résultats, avantages, complexité; structure organisationnelle; niveau de la certitude technique; et viabilité de l'organisation.
- **Facteurs de risque externes** : Il s'agit de circonstances qu'un cadre supérieur ne peut pas contrôler.

Voici quelques exemples d'éléments de risque externes:

Délais imposés par une autorité externe; mesure prise par le gouvernement; compressions budgétaires; obligations envers les partenaires; obligations légales; accords juridiques et politiques; et condition de résiliation Ainsi, les caractéristiques des risques sont:

- ✓ Leur nature
- ✓ L'effet produit
- ✓ Leur détectabilité
- ✓ Leur contrôlabilité
- ✓ Leur gravité

Leur probabilité d'occurrence qui correspond soit à leur probabilité d'apparition soit à leur fréquence d'apparition

II .4. DEFINITION DE L'ALEA : Ce mot d'origine latine qui signifie "coup de dé", peut se définir comme un "hasard favorable ou non; un risque d'incident défavorable, d'inconvénients" (Petit Larousse).

Ou encore un "aspect imprévisible que peut prendre une activité" (Encyclopédie Hachette). Ces définitions, issues des dictionnaires les plus courants, montrent que le terme de risque rentre dans la définition de l'aléa, alors que la communauté scientifique a introduit plus de nuances entre ces notions.

Depuis que la recherche fondamentale et appliquée s'intéresse au problème des risques (fondant la Cindynique), elle a cherché à préciser son langage et à fixer des définitions claires quant aux caractéristiques des événements considérés. Ainsi, plusieurs définitions de l'aléa ont été proposées :

- ✓ Le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable français(MEDD), considère l'aléa comme un phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensités données,

Gendre au (1999), le définit simplement comme une menace caractérisée par des propriétés physiques et une probabilité d'occurrence,

- ✓ Cette définition rejoint celle adoptée par les Nations Unies (UN International

II .5.Vulnérabilité et les enjeux :

II. 5. 1. Définition de lavulnérabilité :

Selon les auteurs, les définitions proposées prennent en compte divers paramètres géographiques, sociaux ou économiques. Cette notion composite amène de notables différences de points de vue. Parmi les définitions existantes, on peut retenir que :

MEDD (le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable français) adopte une définition de la vulnérabilité qui, au sens le plus large, exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux (MATE, 1998).

Plus techniquement, Gendreau (1999), caractérise la vulnérabilité comme étant la fragilité des installations humaines dans l'absolu. Autrement dit, cette notion s'appréciera de la même façon pour un élément donné, quels que soient sa position et le risque considéré.

- ✓ Elle est mesurée par une période de retour, ce qui lui confère la même dimension que l'aléa, Monachesi (2001), la voit comme une caractéristique propre de la société en transformation constante et produite de l'histoire de cette société.

De ce point de vue, l'origine de la catastrophe se trouve dans les modalités mêmes du développement de cette société,

- ✓ Graillot et al. (2001), tentent d'intégrer ces aspects socioéconomiques et géographiques dans une démarche globalisée d'analyse multicritères,
- ✓ D'école (1994), oppose "à l'approche classique de la vulnérabilité, qui mesure un endommagement potentiel des biens et des personnes et ses répercussions sur l'environnement économique, la vulnérabilité des sociétés à travers leurs capacités de réponses à des crises potentielles" (Dauphiné, 2001) .
- ✓ La NOAA (National Oceanic and Atmosphérique Administration), la définit simplement comme la susceptibilité des ressources à être affectées par des aléas.

La difficulté d'aboutir à une définition générale de la vulnérabilité provient des multiples facteurs qui entrent en jeu: les dimensions économiques, sociales, matérielles...etc. Elle est cependant susceptible d'intégrer ces différentes dimensions, implicitement ou explicitement.

II .5.1.2. Quelques facteurs de la vulnérabilité :

La densité de population, l'extension du bâti.

Les facteurs techniques :

- Mauvaise qualité de la construction, mauvaise maîtrise de l'eau,
- Sous-dimensionnement des ouvrages d'évacuation et de traitement des eaux usées...

Les éléments sociaux- économiques :

- Ils définissent au moins pour partie les modes d'occupation des sols ségrégation sociale, L'acceptation du danger :
- Le danger est parfois accepté contre un logement ou un emploi ; la pauvretécomme facteur de vulnérabilité.

Les facteurs psychologiques :

- Ignorance du danger, absence de conscience du risque (risque banalisé,intégré au quotidien) ;
- Absence de programme de prévention ;
- Législation laxiste ;
- Absence de réflexion sur les programmes de planification urbaine ;
- Absence d'une culture du risque au sein du groupe social ;
- Découpages administratifs : les territoires des risques, la multitude des
- acteurs, la dilution des responsabilités.

Les facteurs structurels :

- Localisation et moment précis de l'impact ;
- Dysfonctionnements fonctionnels et techniques imprévisibles.

  Les facteurs fonctionnels :
- Mauvaise gestion des crises, mauvaise organisation des aspects techniques et
- humains;
- Absence de système d'alerte, absence d'une prévision efficace

II .5.2. Les enjeux :

Les enjeux sont de trois ordres : humains, économiques et environnementaux.

L'onde de submersion ainsi que l'inondation et les matériaux transportés, issus du barrage et de l'érosion intense de la vallée, peuvent occasionner des dommages considérables :

- **Sur les hommes** : noyade, ensevelissement, personnes blessées, isolées ou déplacées

- **Sur les biens** : destructions et détériorations aux habitations, aux entreprises, aux ouvrages (ponts, routes, etc.), au bétail, aux cultures ; paralysie des services publics, etc.

- **Sur l'environnement** : endommagement, destruction de la flore et de la faune, disparition du sol cultivable, pollutions diverses, dépôts de déchets, boues, débris, etc., voire accidents technologiques, dus à l'implantation d'industries dans la vallée (déchets toxiques, explosions par réaction avec l'eau, etc.).

II .6. Le risque de rupture de barrage :

Le phénomène pouvant conduire à une rupture de barrage correspond à une destruction partielle ou totale de l'ouvrage, à même de se traduire, en situation extrême, par la vidange rapide de la retenue d'eau et donc de provoquer à l'aval une onde de submersion majeure comparable à un raz de marée.

Le mode de rupture susceptible d'affecter un barrage dépend généralement de ses caractéristiques. Ainsi, la rupture peut être :

- **plutôt progressive :** (tout au moins au début) dans le cas des barrages en remblais, soit par érosion externe suite à une submersion de l'ouvrage ou à un ruissellement sur le parement aval, soit par érosion interne suite à l'entraînement des matériaux à travers l'ouvrage ou ses fondations (phénomène de renard).
- **plutôt brutale ;** dans le cas des barrages en béton, en cas de déficience des terrains d'appui, de dégradation de la structure ou de la géométrie de l'ouvrage.

Il y a généralement des signes avant-coureurs qui peuvent être détectés par les systèmes de surveillance mis en place (mesures de déplacement, de pression, des fuites) et qui permettent, si nécessaire, de mettre en sécurité l'ouvrage par une vidange volontaire partielle ou totale de la retenue. Toutefois, un séisme particulièrement fort ou une brusque élévation du niveau de l'eau dans la retenue, due par exemple à une avalanche y tombant ou à un glissement de terrain sur les rives, sont susceptibles de provoquer des dommages suffisamment importants pour que la cinétique de rupture soit très rapide et ne puisse être détectée à temps. Par ailleurs, même en cas de détection, la possibilité de vidanger la retenue reste hypothétique : il peut y avoir des problèmes d'accès (notamment en cas de séisme) ou des défaillances des organes de vidange, si les transmissions ou les vannes elles-mêmes ont été endommagées par exemple.

Les causes de rupture peuvent être diverses et souvent cumulatives :

- **techniques** : vices de conception ou de construction, mauvais vieillissement des matériaux et défaut d'entretien des installations, défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux, obstruction des dispositifs d'évacuation des crues (déversoirs ou vannes), absence de dispositif permettant de suivre le comportement de l'ouvrage ;
- **naturelles :** Peuvent également être à l'origine de rupture de barrage.

Il en est ainsi des crues exceptionnelles, d'intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des ouvrages évacuateurs, appelée crue de projet.

Le niveau de sécurité retenu est généralement compris entre la crue millénaire et la crue déca millénaire. Les barrages en remblai ne supportent pas la submersion et sont donc plus vulnérables aux débordements. La phase de chantier pour les barrages en construction est une période sensible aux risques de crue, car les ouvrages d'évacuation ne sont pas encore opérationnels.

Les glissements de terrains, soient de l'ouvrage lui-même dans le cas de barrages en remblai, soit des terrains entourant la retenue sont également une cause de rupture. L'ouvrage peut être déstabilisé par un glissement (barrage de Malpasset,1959) ou bien submergé par la vague engendrée par un glissement en amont de la retenue (barrage du Vajont, 1963).

Enfin les séismes peuvent causer des dommages mineurs à ne pas négliger (déformations, tassements, fissures, etc.). Les ruptures de barrages dues aux séismes

sont d'ailleurs très rares.

- **humaines** : insuffisance des études préalables et du contrôle d'exécution, compétence insuffisante des intervenants et dilution des responsabilités avec les services en charge du contrôle, erreurs d'exploitation, de surveillance et d'entretien, malveillance, conflit, absence d'actions des opérateurs suite à des signes précurseurs de dégradation, manques ou mauvaises interprétations du comportement de l'ouvrage.

Le risque de rupture dépend souvent, hors éventuel déficit de surveillance et d'entretien :

- du type de barrage et de la période de construction, avec des pathologies qui leur sont fréquemment associées ;
- de la phase d'exploitation de l'ouvrage : la phase de remplissage est la plus critique (elle représente plus de 50 % des cas d'accident) ; elle est suivie par les périodes de crues.

Les ruptures de grands barrages sont extrêmement rares, compte tenu des savoir-faire des constructeurs et des gestionnaires ainsi que des contrôles de plus en plus sévères imposés par les Etats ; elles peuvent être plus ou moins meurtrières selon l'importance de population implantée à l'aval.

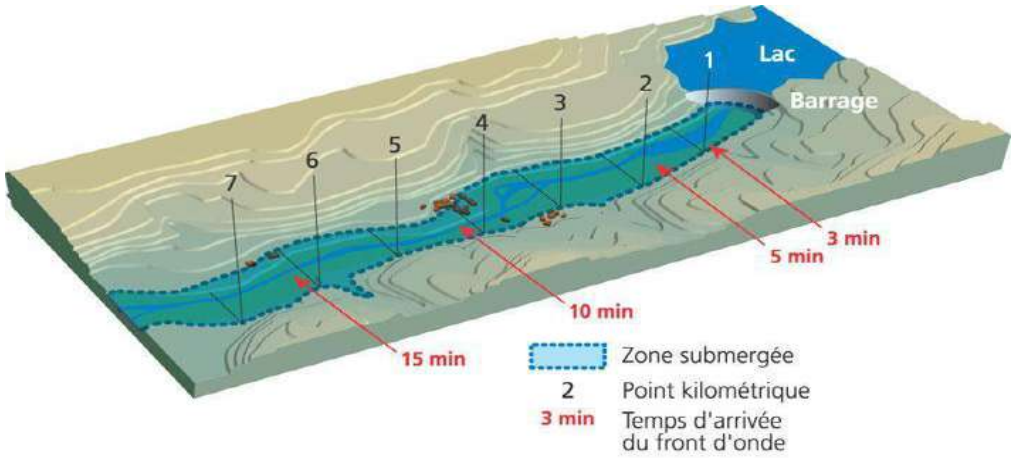
Par contre, compte tenu d'une grande diversité dans les qualités de conception, de réalisation ou de gestion, les ruptures de moyens et surtout petits ouvrages sont plus fréquentes (cas par exemple en 2001 du dispositif d'écrêtement des crues de la Savoureuse conçu pour protéger l'agglomération Belfortaine (90) ainsi que Montbéliard (25) ou en 2006 de la retenue d'altitude pour enneigement artificiel de la station de Pelvoux (05), suite à une avalanche) ; les ondes de submersion sont moins intenses mais les conséquences peuvent être également graves selon la localisation des enjeux, pour les biens et pour l'environnement ainsi que, le cas échéant, pour les personnes

II .6. 1. L'onde de submersion :

L'aléa « rupture de barrage » correspond à la formation d'une onde de submersion, à l'origine d'une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval.

La carte du risque : représente les zones menacées par l'onde de submersion qui résulterait de la rupture totale ou partielle de l'ouvrage. Obligatoire pour les grands barrages, cette carte estréalisée par l'exploitant à partir de simulations sur ordinateur.

Elle détermine à l'avance, dès le projet de construction, quelles seront les caractéristiques de l'onde de submersion : hauteur de l'eau, vitesse, temps de progression de l'onde, amortissement, etc., en tous points de la vallée, en y faisant figurer les enjeux et les points sensibles, ainsi que tous les renseignements indispensables à l'établissement des plans de secours et d'alerte.



Exemple de carte du risque

II.7 .Statistiques sur les accidents des barrages :

II.7.1 Quelques ruptures graves :

Entre 1959 et 1987, 30 accidents de rupture de barrages ont été recensés dans le monde, faisant 18 000 victimes. Seuls les accidents ayant causé plus de 100 morts sont répertoriés dans le tableau ci-après (Tableau **II.1**).

Tableau II.01: Les accidents les plus graves entre 1959 et1987 [16]

Barrage	*pays*	*Date de rupture*	*Hauteur du barrage (m)*	*Volume de la retenue (m^3)*	*Nombre de victimes*
Panshet	Inde	1961	49	2	1000
Sempor	Indonésie	1967	60	5	20
Barrage en remblai ; rupture durant la construction					
Dale dyke	Grande	1864	29	3	230
Barrage en remblai ; rupture lors de la première mise en eau					
Iruhaike	Japon	1868	28	18	1200
Mill River	États-Unis	1874	13	inconnu	140
South Fork	États-Unis	1889	21	18	2200
Walnut Grove	États-Unis	1890	33	11	129
Hyogiri	Corée du Sud	1961	15	0.2	139
Nanak Sagar	Inde	1967	16	210	100
Machu	Inde	1979	26	101	2000
Gotvan	Inde	1980	22	inconnu	200
Kantale	Sri Lanka	1986	27	135	127
Barrage poids, rupture lors de la première mise en eau					
Puentes	Espagne	1802	69	1	600
Saint Francis	États-Unis	1928	62	4	450
Barrage poids, rupture en service					

Fergoug I	Algérie	1881	33	3	200
Tigra	Inde	1917	25	12	1000
Malpasset	France	1959	60	4	423
Khadakwasla	Inde	1961	33	13	1000
Barrage à contreforts et voûtes multiples					
Gleno	Italie	1923	35	5	600
Vega de Terra	Espagne	1959	33	7.3	140

En considérant l'ensemble des ruptures postérieures à 1800 dans le monde, quelle que soit la hauteur du barrage, on compte 144 ruptures dont :

- 71 sans victime ;
- 31 avec moins de 10 morts ;
- 17 avec 10 à 99 morts ;
- 25 avec 100 morts et plus.

II .8.Lapolitiquedepréventionet les moyens de secours :

La gestion du risque se décompose en plusieurs étapes et plusieurs phases d'analyse et d'action. Chacune d'entre elles a des domaines et des exigences propres en termes de zones considérées et de fréquence de réactualisation des informations. Souvent représentées et organisées de façon cyclique, les grandes étapes de gestion sont désignées par :

II .8.1.La maîtrise du risque à la source :

II .8.1.1.La prévision :

L'estimation de la date de survenance d'une rupture de barrage étant impossible, la Prévision d'un tel phénomène est réduite à l'estimation de ses caractéristiques (intensité,

L'estimation de la date de survenance d'une rupture de barrage étant impossible, la prévision d'un tel phénomène est réduite à l'estimation de ses caractéristiques (intensité, localisation) synthétisées sur la carte du risque.

II .8.1.2.Les moyens de prévention :

L'examen préventif des projets de barrages Pour les ouvrages créant une différence de niveau d'eau supérieure à 35 cm entre l'amont et l'aval de l'ouvrage, ou une submersion d'une des rives du cours d'eau, un dossier de déclaration ou d'autorisation doit être réalisé avant la construction. Cette obligation relève de l'application de la loi sur l'Eau du 3 janvier 1992 et des décrets n° 93-742 et n° 93-743 du 29 mars 1993.

Les installations susceptibles de présenter des dangers pour la sécurité publique relèvent du régime de l'autorisation ou de la concession. Les autres qui, bien qu'elles ne soient pas susceptibles de présenter un tel danger, doivent néanmoins respecter certaines prescriptions définies par le service en charge de la police de l'eau, sont soumises à déclaration.

Ce service examine les dossiers de déclaration et d'autorisation.

Lorsque l'ouvrage a une hauteur supérieure à 20 m, le Comité technique permanent des barrages (CTPB) doit obligatoirement donner son avis. Le maître d'ouvrage fait réaliser, en plus du dossier d'autorisation, un dossier préliminaire puis un dossier définitif, qui seront tous deux examinés par le CTPB. L'avis du Comité technique permanent des barrages porte notamment sur les points suivants :

- choix du site et du type d'ouvrage ;
- étude hydrologique déterminant la « crue de projet » ;
- étude et traitement des fondations ;
- conception des structures ;
- condition d'exécution, choix du directeur de travaux et de son intérimaire ;
- programme de mise en eau de l'ouvrage ;
- dispositif d'auscultation ;
- étude de l'onde de rupture du barrage.

Pour les ouvrages moins hauts mais concernant la sécurité publique, la consultation du CTPB est envisageable si des éléments particuliers le justifient.

Enfin pour les plus grands barrages, un plan particulier d'intervention est réalisé conjointement entre l'État et l'exploitant, en complément des mesures déjà citées

II .8.1.3.La surveillance constante de l'ouvrage :

Pour prévenir toute dégradation, et a fortiori toute rupture, il faut exercer une surveillance constante de l'ouvrage

II .8.1.4.L'inspection et la surveillance des barrages :

Intéressant la sécurité publique, dont font partie tous les grands barrages, sont organisées actuellement par le circulaire interministériel n° 70-15 du14 août 1970 modifiée par la circulaire du 29 septembre 1983.

CE texte précise que « propriétaires et concessionnaires ont la charge de maintenir les ouvrages en bon état ». L'État assure le contrôle de cette surveillance, sous l'autorité des préfets, par l'intermédiaire des services chargés de la police de l'eau et des milieux aquatiques (DDE, DDAF, services spécialisés de la navigation) ou des services ayant le contrôle technique des ouvrages (DRIRE). Cette circulaire distingue plusieurs périodes dans la vie du barrage et préconise des mesures particulières à chacune.

Lors de la mise en eau de l'ouvrage : période essentielle de la vie de l'ouvrage qui permet de déceler d'éventuelles anomalies, une surveillance continue et complète du corps de l'ouvrage est obligatoire. Un dépouillement immédiat des mesures est réalisé afin d'intervenir le plus rapidement possible en cas d'anomalie. Les déformations affectant les fondations et les versants de la retenue sont également surveillées. Le maître d'ouvrage se doit de définir une procédure lors de cette phase et de vérifier sa bonne mise en œuvre

.Lors de l'exploitation en service normal de l'ouvrage :des examens visuels réguliers sont prévus, ainsi que des mesures plus ou moins espacées, selon que des anomalies sont constatées ou non.

Les appareils d'auscultation doivent être extrêmement fiables, robustes, sensibles et précis (pour détecter au plus vite), simples et rapides d'emploi. Un rapport annuel est envoyé au service de contrôle.

Celui-ci effectue des visites annuelles lorsque la retenue est pleine.

Il s'assure de la compétence de l'exploitant et de l'efficacité de son organisation dans sa mission de surveillance des ouvrages et contrôle le bon état d'entretien des différents organes de sécurité de l'ouvrage. Une visite décennale est effectuée au moins une fois tous les dix ans à l'occasion d'une vidange complète de l'ouvrage ou par des moyens

subaquatiques après octroi d'une dérogation ministérielle ; cette inspection décennale s'intéresse plus particulièrement aux parties habituellement noyées.

Par ailleurs, les organes de sécurité (évacuateurs de crue et vidanges) sont conçus en tenant compte des défaillances possibles et font l'objet d'essais réguliers.

Toutes les informations recueillies par la surveillance permettent une analyse et une synthèse rendant compte de l'état du barrage, ainsi que l'établissement, tout au long de son existence, d'un « diagnostic de santé» permanent. Si cela est nécessaire, des travaux d'amélioration ou de confortement sont réalisés.

Pour les ouvrages hydroélectriques concédés, le circulaire n° 70-15 du 14 août 1970 est appliqué pour tous les barrages de plus de 20 m de hauteur et pour ceux de hauteur inférieure intéressant la sécurité publique.

Pour les barrages de moyenne importance, une circulaire du 23 mai 1997 reprend de manière allégée des dispositions de nature comparable. Ici aussi la surveillance de l'ouvrage est continue et complète lors de la mise en eau. Lors de l'exploitation normale, les méthodes et moyens de surveillance, le dispositif éventuel d'auscultation, la périodicité des tournées et mesures et les conditions d'interprétation des résultats, sont définis par l'exploitant et présentés au service de contrôle. Un ingénieur compétent, désigné par l'exploitant, doit effectuer une visite au moins tous les deux ans.

Le service de contrôle (DRIRE) effectue une visite complète au moins tous les cinq ans, pour un examen visuel de l'ouvrage, de ses abords et, le cas échéant, des zones instables des versants.

Dans le cas des ouvrages faisant l'objet de concessions hydroélectriques mais n'entrant pas dans le champ d'application des précédentes circulaires, les moyens de surveillance sont définis par le service de contrôle.

Enfin, concernant les ouvrages qui ne menacent pas la sécurité publique et qui ne font pas l'objet de concession, les prescriptions concernant leur surveillance sont définies par les arrêtés d'autorisation délivrés par le service en charge de la police de l'eau.

La gestion active : Pour la sécurité de l'ouvrage des lâchures de barrage (ou lâchers d'eau) peuvent être réalisées :il s'agit d'évacuations contrôlées d'une fraction d'eau de la retenue.

Ces lâchures sont réalisés lors des crues ou des intempéries importantes afin d'empêcher la cote de la retenue d'atteindre son niveau critique ou lorsque l'ouvrage présente des signes de faiblesse.

Dans ce dernier cas, le niveau de l'eau dans la retenue doit diminuer afin de réduire les contraintes exercées sur l'ouvrage.

Néanmoins ce scénario est extrêmement rare et les lâchers d'eau interviennent essentiellement comme régulation pendant l'exploitation normale de l'ouvrage.

II .8.2.La maîtrise de l'urbanisation :

Face au risque rupture de barrage, la seule mesure d'urbanisme applicable pourrait être l'interdiction de construire au sein des zones les plus menacées. Néanmoins, celles-ci couvrent de si grandes surfaces, qu'une telle mesure serait disproportionnée par rapport à la probabilité d'occurrence du risque.

II.8.3.La planification des secours :

Le plan communal de sauvegarde :

Au niveau communal, c'est le maire, détenteur des pouvoirs de police, qui a la charge d'assurer la sécurité de la population dans les conditions fixées par le code général des collectivités territoriales.

À cette fin, il prend les dispositions lui permettant de gérer la crise et peut, si nécessaire, faire appel au préfet représentant de l'État dans le département.

Le plan communal de sauvegarde détermine, en fonction des risques connus, les mesures immédiates de sauvegarde et de protection des personnes, fixe l'organisation nécessaire à la diffusion de l'alerte et des consignes de sécurité, recense les moyens disponibles et définit la mise en œuvre des mesures d'accompagnement et de soutien de la population.

Ce plan est obligatoire dans les communes comprises dans le champ d'application d'un PPI, dont les grands barrages sont tous pourvus.

Les plans Orsec :

En cas de catastrophe concernant plusieurs communes, les plans de secours départementaux sont mis en application, conformément à la loi du 22 juillet 1987. La loi de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004 a réorganisé les plans de secours existants, selon le principe général que lorsque l'organisation des secours revêt une ampleur ou une nature particulière, elle fait l'objet dans chaque département d'un plan Orsec.

Le plan Orsec départemental, arrêté par le préfet, détermine, compte tenu des risques existants dans le département, l'organisation générale des secours et recense l'ensemble des moyens publics et privés susceptibles d'être mis en ouvre.

Il comprend des dispositions générales applicables en toute circonstance et des dispositions propres à certains risques particuliers, tel que le risque«Rupture de barrage ».

Lorsqu'au moins deux départements d'une zone de défense sont concernés par une catastrophe ou que la mise œuvre de moyens dépassant le cadre départemental s'avère nécessaire, le plan Orsec de zone est mis en service.

Les dispositions spécifiques des plans Orsec prévoient les mesures à prendre et les moyens de secours à mettre en œuvre pour faire face à des risques de nature particulière ou liés à l'existence et au fonctionnement d'installations ou d'ouvrages déterminés.

Il peut notamment faire référence à un plan particulier d'intervention (PPI) pour des barrages hydroélectriques.

C'est le préfet qui déclenche la mise en application du plan Orsec et assure la direction des secours.

Le Premier ministre peut placer le pilotage des opérations de secours sous la direction du représentant de l'État dans l'un de ces départements ou recourir au préfet de la zone de défense concernée.

Il existe une veille permanente assurée par des centres départementaux, interrégionaux (ce sont les zones de défense) et national.

Leur coordination est assurée par la direction de la défense et de la sécurité civiles du ministère de l'Intérieur.

Le plan particulier d'intervention :

Chaque barrage de plus de 20 m de hauteur et de capacité supérieure à 15 hm3 fait l'objet d'un plan particulier d'intervention (PPI), plan d'urgence spécifique, qui précise les mesures destinées à donner l'alerte aux autorités et aux populations, l'organisation des secours et la mise en place de plans d'évacuation.

Ce plan s'appuie sur la carte du risque et sur des dispositifs techniques de surveillance et d'alerte.

Après avis du Comité technique permanent des barrages sur les documents techniques préparatoires à l'établissement du PPI, le PPI est arrêté par le préfet et mis en œuvre par les services de l'État chargés de la protection civile. Certains dispositifs techniques, en particulier au niveau du barrage, restent à la charge du gestionnaire de l'ouvrage.

Ce plan découpe la zone située en aval d'un barrage en trois zones suivant l'intensité de l'aléa.

La zone de proximité immédiate peut être submergée dans un délai ne permettant qu'une alerte directe ; la population doit l'évacuer dès l'alerte donnée.

Dans la zone d'inondation spécifique, la submersion est plus importante.

II.8.4.information préventive de la population :

La loi du 22 juillet 1987 a instauré le droit des citoyens à une information sur les risques majeurs auxquels ils sont soumis sur tout ou partie du territoire, ainsi que sur les mesures de sauvegarde qui les concernent. Cette partie de la loi a été reprise dans l'article L125.2du Code de l'environnement.

Établi sous l'autorité du préfet, le dossier départemental des risques majeurs (DDRM) recense à l'échelle d'un département l'ensemble des risques majeurs par commune.

Il explique les phénomènes et présente les mesures de sauvegarde. À partir du DDRM, le préfet porte à la connaissance du maire les risques dans la commune, au moyen de cartes au 1 : 25 000 et décrit la nature des risques, les événements historiques, ainsi que les mesures d'État mises en place.

Le maire élabore un document d'information communal sur les risques majeurs(DICRIM).

Ce document présente les mesures de prévention et les mesures spécifiques prises en vertu des pouvoirs de police du maire. Le DICRIM peut être accompagné d'une communication (au moins tous les deux ans si la commune est couverte par un plan de prévention des risques) et d'une campagne d'affichage.

Ces deux documents sont disponibles en mairie.

Dans les communes concernées par un ouvrage faisant l'objet d'un plan particulier d'intervention (PPI), une campagne d'information « PPI » doit être réalisée. Son objectif est de faire connaître les risques et les consignes de sécurité spécifiques. Ces campagnes doivent être renouvelées au maximum tous les 5 ans.

Électricité de France réalise notamment des campagnes d'information en bordure des cours d'eau, afin de sensibiliser les usagers (pêcheurs, promeneurs, baigneurs et pratiquants de sports d'eaux vives).

II .8.5.L'alerte aux populations et les consignes :

Le signal national d'alerte : Le signal national d'alerte consiste en trois émissions successives d'une minute chacune et séparées par des intervalles de cinq secondes, d'un son modulé en amplitude ou en fréquence. Des essais ontlieu le premier mercredi de chaque mois à midi.

Le signal est diffusé par tous les moyens disponibles et notamment par le réseau national d'alerte et les équipements des collectivités territoriales.

Il est relayé par les dispositifs d'alarme et d'avertissement dont sont dotés les établissements recevant du public, et par les dispositifs d'alarme et de détection dont sont dotés les immeubles de grande hauteur.

Il ne doit pas être confondu avec le signal d'alerte lié aux ouvrages hydrauliques, qui est spécifique.

Le signal d'alerte lié aux ouvrages hydrauliques :

Il comporte un cycle d'une durée minimum de deux minutes diffusé par un réseau de sirènes type corne de brume, installées par le maître d'ouvrage.

Les essais des sirènes des ouvrages hydrauliques, effectués par l'exploitant, ont lieu une fois par trimestre : les premiers mercredis des mois de mars, juin, septembre et décembre pendant douze secondes à 12 h 15. Le signal d'essaicomporte un cycle de douze seconds composés de trois émissions sonores de deux secondes séparées par un intervalle de trois secondes.

Les différents niveaux d'alerte :

Pour les barrages dotés d'un PPI, celui-ci prévoit plusieurs niveaux d'alerte en fonction de l'évolution de l'événement.

Le premier degré est l'état de vigilance renforcée pendant lequel l'exploitant doit exercer une surveillance permanente de l'ouvrage et rester en liaison avec les autorités.

Le niveau supérieur, niveau d'alerte no 1, est atteint si des préoccupations sérieuses subsistent (cote maximale atteinte, faits anormaux compromettants, etc.).

L'exploitant alerte alors les autorités désignées par le plan et les tient informées de l'évolution de la situation, afin que celles-ci soient en mesure d'organiser si nécessaire le déclenchement du plan (déclenchement effectué par le préfet).

Lorsque le danger devient imminent (cote de la retenue supérieure à la cote maximale, etc.),

on passe au niveau d'alerte no 2.

L'évacuation est immédiate. En plus de l'alerte aux autorités, l'exploitant alerte directement les populations situées dans la « zone de proximité immédiate » et prend lui-même les mesures de sauvegarde prévues aux abords de l'ouvrage, sous le contrôle de l'autorité de police.

L’alerte aux populations s’effectue par sirènes pneumatiques du type corne de brume mises en place par l’exploitant. Plus à l’aval du barrage, il appartient aux autorités locales de Définir et de mettre en œuvre les moyens d’alerte et les mesures à prendre pour assurer la sauvegarde des populations.

Le niveau d’alerte n 2 est bien entendu atteint lorsque la rupture est constatée, partielle ou totale.

Enfin, pour marquer la fin de l’alerte, par exemple si les paramètres redeviennent normaux, un signal sonore continu de trente secondes est émis. Cependant la fin de l’alerte ne marque pas nécessairement la fin de la vigilance renforcée.

La montée en puissance du dispositif d’alerte doit permettre au préfet d’alerter les municipalités des communes concernées suffisamment tôt pour que les mesures de sauvegarde soient prises à temps, notamment en évacuant les personnes présentes sur les zones submersibles.

Pour les autres barrages intéressant la sécurité publique, mais sans PPI, aucune disposition spécifique n’existe. Les services administratifs compétents (DDAF, DDE, DRIRE, etc.) doivent s’assurer que les gestionnaires prennent toutes les mesures nécessaires pour que la sécurité publique ne soit pas menacée.

Pour les populations éloignées des ouvrages, et si la commune est dans la zone du PPI, il est de la responsabilité du maire de répercuter l’alerte auprès de ses administrés.

Les consignes Un certain nombre de consignes générales à suivre « avant, pendant et après » une alerte ont été défi nies.

Elles sont complétées par des consignes spécifiques à chaque risque (voir tableaux ci-contre).

En matière de risque rupture de barrage, il est nécessaire de connaître le système d’alerte spécifie que pour la zone de proximité immédiate, ainsi que les points hauts assurant un refuge.

II .8.6.L'indemnisation

Les préjudices occasionnés par une rupture de barrage sont écartés du champ d'application de la garantie " catastrophes naturelles ".

Ils sont couverts par les contrats d'assurance garantissant les dommages d'incendie ou les dommages aux biens ainsi que, le cas échéant, les dommages aux corps de véhicules terrestres à moteur. Cette garantie est étendue aux pertes d'exploitation, si elles sont couvertes par le contrat de l'assuré. Etapes d'une étude-type de sûreté de fonctionnement de

barrage.

II.9. ETATS CRITIQUE POUVANT AFFECTER UN BARRAGE

Nous essayerons de présenter dans ce qui suit, une étude des causes, conséquences et enfin l'arbre de cause- conséquences.

L'objectif principal de la méthode de l'arbre des causes, étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident (chapitre 3).

La méthode de l'arbre d'événements est particulièrement utilisée dans le domaine de l'analyse après accidents en vue d'expliquer les conséquences observées résultant d'une défaillance du système (chapitre 3).

La méthode de l'arbre d'événement permet de déterminer la probabilité de chaque chemin des événements et de ses conséquences associées.

II.9.1. Submersion :

La crue est un événement naturel qui peut causer des pertes en vies humaines et des dommages aux biens. En conséquence, les ouvrages de retenue doivent être conçus pour permettre le passage des crues sous des conditions prévues et avec la marge de sécurité fixée.

Pour l'analyse de la sécurité des ouvrages d'accumulation en cas de crues, 2 types de crue doivent être considérés :

- La crue de projet
- La crue de sécurité.

La crue de projet : correspond à un événement exceptionnel et doit être évacuée dans des conditions normales d'écoulement, sans provoquer aucun dommage et avec une marge de sécurité fixée par une revanche ultime.

La crue de sécurité : la crue de sécurité correspond à un événement extrême que l'ouvrage de retenue doit être capable de supporter, son passage dans la retenue conduit au niveau maximum admis pour le plan d'eau.

II.9.1.1. Analyse des causes de submersion

La submersion d'un barrage peut résulter de plusieurs paramètres indépendants ou dépendants entre eux :

- Evénements météorologiques et hydrologiques.
- Précipitation

- Régime d'écoulement
- Crues
- Transports solides
- Insuffisance des informations hygrométriques pour l'évaluation des paramètres de base ;
- Sous-estimation des facteurs rentrant dans ce calcul du débit de dimensionnement ;
- Mauvaise estimation des revanches ;
- Mauvaises appréciation des paramètres liés au laminage des crues ;
- Mauvais dimensionnement des tranches des barrages ;
- Erreur pour le laminage des crues ;
- Versants instables non contrôlés;
- Rupture non contrôlée d'un barrage amont ;

Mauvais dimensionnement hydraulique et mécanique des éléments de l'évacuateur des crues ;

- Mauvais fonctionnement ou obturation d'ouvrages vannés.

II.9.1.2. Etat critique de la submersion :

Exemple 1*: Barrage Fergoug–Algérie*

La rupture de barrage Fergoug, montre que les premiers barrages Algériens ont connu des problèmes de conception du fait que les techniques de réalisations des barrages n'étaient pas alors maîtrisées

II.9.1.2. 3.Identification du barrage :

La construction d'un barrage sur l'Habra en amont du futur centre de Perrégaux était déjà évoquée dans le procès verbal d'enquête du 14 avril 1853, la construction du barrage débuta en 1865. Les principales caractéristiques du barrage se trouvent dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.2: Les caractéristiques principales du barrage Fergoug [17].

En droit	***Algérie***
Date de construction	1865
Type de barrage	Barrage poids en maçonnerie hydraulique
L'année d'achèvement	1871
La hauteur (au-dessus du thalweg)	35 m
La hauteur à partir de fondation	43 m
La largeur maximum de fondation	33 m
La capacité de la cuvette	30000000 m³
Le débit de crue	400 – 500 m³/s
La hauteur de barrage	32

II.9.1.2.4. Rupture de barrage Fergoug I en 1881 :

Le 10 mars 1872: une crue exceptionnelle estimée à 700 m^3/s provoqua la rupture du déversoir (qui obligent pour crée une brèche).

Le 15 décembre 1881: une crue de 850 m^3/s emporta 125 mètre du barrage sur la rive droit. 250 personnes furent noyées, ponts, et maisons emportés par les flots déchaînés. La reconstruction du barrage dura deux années, de 1883 à 1885, avec modification du profil et coûta 1300000 franc.

II.9.1.2.5. Rupture de barrage Fergoug II en 1927 :

Le 25 novembre 1927, le niveau de l'eau ne cessait de monter obligeant les responsables du barrage à ouvrir les vannes d'évacuation à leur débit maximum. Cette opération ne suffit pas à diminuer la pression qui s'exerçait sur le barrage poids. En 22 heures et 20 minutes, le plan d'eau s'éleva de 27 m.

Le samedi matin, à 10 h. 45, le barrage de l'Oued - Fergoug, de 32 m de hauteur, se mettait à vibrer. Soudain le barrage fléchissait dans son milieu, s'ouvrait, et une énorme trombe d'eau jaillissait au point de rupture.

Trois quarts d'heure après l'annonce de la rupture du barrage, les flots torrentiels déferlaient dans les rues de Perrégaux, dans un vacarme assourdissant et angoissant.

La vague, puissante et dévastatrice, emporte sur son passage le pont métallique du chemin de fer; le dépôt des chemins de fer de l'état, les locomotives et les wagons sont soulevés, renversés, transportés jusque dans les rues de la ville. Les routes sont coupées, les vergers arrachés, les récoltes anéanties. L'eau submerge et dégrade la route Perrégaux-Oran.

Dans la ville, une cinquantaine de maisons n'ont pas résisté et se sont effondrées sous le chocet la poussée de cette force naturelle que l'on avait essayé de maîtriser. Dans les rues, la hauteur des eaux boueuses atteint deux mètres. Grâce à l'appel téléphonique de l'ingénieur du barrage, mais aussi du fait que la catastrophe se soit déroulée de jour, il n'y eut pas de victime àPerrégaux. On dénombra cependant quelques noyés dans la plaine.





Le barrage de Fergoug en 1907 avant la rupture Le barrage de fergoug en déversement



Le barrage de fergoug après la catastrophe en 1928



Le barrage de Fergoug après reconstruction 1986

Photo N°2.1: *Rupture du barrage de Fergoug [17].*

Erosion interne :

L'érosion interne se présente sous deux formes :

- **Une érosion physico-chimique** : due à une dissolution de matériaux d'origine soluble ;
- **Une érosion mécanique :** le débit d'infiltration peut entraîner les particules à une fuite non maîtrisée. Cet entraînement peut s'accentuer en allant jusqu'à la formation d'un tunnel aboutissant à un renard.

Les infiltrations qui peuvent se produire dans le corps du barrage, ses fondations ou ses appuis latéraux, doivent être étudiées de façon très rigoureuse, elles doivent rester assez faibles pour que les débits de fuites ne soient pas tels que l'économie du projet soit remise en question, et d'autre part, éviter toutes les causes entraînant l'instabilité de l'ouvrage (les pressions d'infiltration qui occasionnent des sous pressions capables de soulever le barrage).

L'érosion interne : Phénomène causé par un écoulement d'eau qui arrache et transporte certaines particules du sol. Cette dénomination, qui désigne d'une façon générale dans les ouvrages en terre les migrations des particules, couvre plusieurs phénomènes : la boulance, la suffusion, et le renard.

L'érosion interne se présente sous deux formes :

- **Une érosion physico-chimique** : due à une dissolution de matériaux d'origine

soluble :

- **Une érosion mécanique :** le débit d'infiltration peut entraîner les particules à une fuite non maîtrisée. Cet entraînement peut s'accentuer en allant jusqu'à la formation d'un tunnel aboutissant à un renard.

II.9.2.1. Analyse des causes de l'érosion régressive :

Il existe une multitude de causes premières aboutissant au phénomène d'érosion, nous citons essentiellement les propriétés mécaniques et hydrauliques des matériaux compactés (érodabilité et perméabilité), la conception, et l'état des filtres et des étanchéités.

Les événements initiateurs peuvent être les mouvements différentiels du corps du barrage, la modification du régime hydraulique, des actions extérieures (chocs) ou l'évolution des propriétés des matériaux du remblai au cours du temps. Ainsi, on regroupe toutes les causes comme suit :

a. Causes liées à la fissuration du remblai

Tassement inégal : Il peut être dû soit à une hétérogénéité du sol, de fondation, une discontinuité des déformations du remblai ou un fort pendage des appuis latéraux ;

- Relâchement des contraintes : on peut observer ce phénomène surtout niveau des appuis où les contraintes sont surconsolidées ;
- Fracturation hydraulique : c'est un phénomène qui affecte les noyaux minces ayant une faible contrainte effective lors du contact avec les recharges ;

- Reconnaissances géologiques et géotechniques incomplètes: de mauvaises reconnaissances du site tel que la présence de fissures géologiques ou de roche altérables, induit la naissance de chemins privilégiés d'écoulement ;
  - Mauvais fonctionnement des conduites de vidange et évacuateurs de fonds ;
  - Mauvais fonctionnement des vannes.

Celui-ci peut être provoqué par des vibrations dans les conduites d'où transmission au sol de fondation du corps de la digue.

Le déclenchement de l'un de ces phénomènes provoque l'endommagement de l'étanchéité.

b. Causes liées au compactage

L'expérience montre qu'il est trop difficile de compacter les matériaux devant les conduites de vidange et les évacuateurs de fond.

Pour cela, des mesures sérieuses doivent être menées à ces niveaux, et ceci en mesurant les débits de fuite devant être interceptés.

Pour palier à cette anomalie, il est recommandé d'utiliser des conduites dentées dans le but d'augmenter la longueur d'écoulement d'où diminuer le gradient hydraulique.

Mais cette recommandation présente des difficultés pratiques de compactage autour des dents, comme meilleure solution, on utilise un drain protégé de filtres en fin de conduite.

- La mauvaise liaison de deux couches compactées successives peut être la cause d'un chemin privilégié d'écoulement. Ce phénomène est du soit au choix de l'épaisseur à compacter, soit au mauvais compactage des premiers centimètres de la couche précédente.
  - ✓ Mauvaise stratification des couches.
  - ✓ Mauvaise adaptation du matériel au matériau.

Il est préconisé de compacter les argiles avec le compacteur à pieds de mouton, alors que pour les graves alluvionnaires, on utilise le compacteur à rouleaux lisses.

La figure (5.10) représente une analyse par l'arbre des causes de l'état critique de la l'érosion interne

II.9.2.2. Etat critique de l'érosion régressive :

Exemple 2 : Barrage de Teton

Plusieurs accidents provoqués par l'érosion, parmi les exemples les plus connus on a la rupture du barrage de Teton.

II.9.2.3. Caractéristique du barrage :

Le barrage de Teton a été situé sur la rivière de Teton, trois milles de nord-est de Newdale, Idaho (U.S.A). Il a été conçu pour fournir la commande d'inondation, la production d'électricité, et l'irrigation pour plus de 40.000 hectares de champs.

La construction du barrage a commencé en février 1972. À une hauteur maximum de remblai de 93 mètres au-dessus de la rivière et la capacité de réservoir est de 356 millions de mètres cubes une fois rempli jusqu'au-dessus. La construction du barrage est terminée, le 3 octobre 1975 a commencé de stocker l'eau, mais les travaux de sortie de rivière percent un tunnel et le tunnel auxiliaire de travaux de sortie n'ont pas été ouverts.

La rupture du barrage de Teton pendant le remplissage initial du réservoir, 3 juin 1976 a tué quatorze personnes et a causé des centaines de millions de dollars dans des dégâts matériels en aval.

II.9.2. 4.Rupture du barrage de Teton :

- 3 juin 1976, plusieurs petites infiltrations observées dans le mur de rive nord ;
- 4 Juin 1976, l'humidité a été notée dans la rive droite et les petits ressorts commençaient à apparaître (Panel indépendant, 1976).
- 5 Juin 1976, la première fuite principale a été notée entre 7:30 et 8:00 heure du matin. La fuite coulait à environ 500 à 800 litres par seconde dans la rive droite de la roche. De 9:00 heures du matin l'écoulement avait augmenté jusqu'à 1.100 à 1.400 litres par seconde et on avait observé l'infiltration environ 40 mètres au-dessous de la crête du barrage
- Entre 11:15 et 11:30 heure du matin le gros morceau de 6 mètre du barrage est tombé dans le tourbillon et dans des minutes le barrage entier s'est effondré (Panel indépendant, 1976).





Vue sur le barrage Teton (USA) avant rupture *Rupture du barrage de Teton (USA)*

Photo N°2.2:*Rupture de barrage en terre. Le barrage de Teton (Idaho, États-Unis, 1976) [19]*

II.9.2. 5.Causes de rupture :

- Les informations sur le site et les études géologiques étaient appropriées et étendues;
- Les roches volcaniques de site sont «fortement perméables et modérément intensément à joint» ;
- La présence des sols argileux légèrement plastiques, est fortement érodables ;
- Le remplissage rapide du barrage n'a pas contribué la rupture. Si le barrage avait été rempli plus lentement, "une rupture semblable se serait produit à une certaine

date ultérieure." ;

- La séismicité n'était pas un facteur ;
- Il n'y avait pas assez d'instruments dans le barrage pour fournir des informations proportionnées au sujet des états de changement du remblai et des butées ;
- L'infiltration par le matériel pourrait avoir causé l'érosion en arrière
- L'érosion par le contact direct pourrait être produite, où l'eau était en contact avec les joints ouverts ;
- La cause fondamentale de la rupture peut être considérée comme une combinaison des facteurs géologiques et des décisions de conception.

II.9.3.Instabilité :

II.9.3.1.Analyse des causes de l'état critique de l'instabilité

Les causes premières sont regroupées en deux familles, qui sont essentielles :

- Conception du barrage.
- Mauvaise conception (construction du noyau argileux, drainage, vidange rapide, séismes, etc...),
- Analyse de stabilité erronée due à des modèles de calcul inadaptés (non considération des différents cas d'études, pressions interstitielles et vidanges rapides non étudiées…).
- Oubli d'études, les plus fréquents sont les appuis des barrages et les tassements différentiels.
- Les ruptures entraînées par les modifications des caractéristiques géotechniques du terrain.
- Mauvaises reconnaissances,
- Non contrôle des matériaux mis en place,
- hétérogénéité des terrains de fondations et des zones d'emprunts.
- Les événements initiateurs peuvent être :

  Les sollicitations extérieures (séismes, chocs, etc…)
- Les changements extérieurs du régime hydraulique (vidanges rapides, etc.…)
- Les évolutions intérieures du régime hydraulique (colmatage des drains, érosion interne, etc.…)
- L'évolution des propriétés mécaniques du remblai,

- Déformations du barrage pouvant induire une évolution des contraintes au
- cours du temps.

II.9.3.2.Etat critique de l'instabilité :

Exemple : Barrage de Malpasset

La rupture de barrage Malpasset sous l'effet de plusieurs effets produits :

- 421 morts
- 155 immeubles détruits
- 1 000 ha de terres agricoles totalement sinistrés
- Deux (02) Milliards de francs de dégâts.

II.9.3.2.1. Rupture de barrage Malpasset 1959 :

Ce barrage fut achevé en 1954, c'est un barrage en voûte mince de 66 m de hauteur. En décembre 1959 : le barrage de Malpasset cède, alors que des intempéries ont fait montrer le niveau d'eau dans la retenue. Le barrage était implanté sur une faille ; la poussée de l'eau a déchaussé le bloc, qui est tombé vers l'aval. L'onde de submersion a atteint la ville de Fréjus située à une dizaine de kilomètres, avant de se jeter dans la mer. Il y aura 423 victimes et des dommages matériels importants : 155 immeubles détruits, 1000 hectares de terres agricoles sinistrées, deux milliards de francs de dégât.

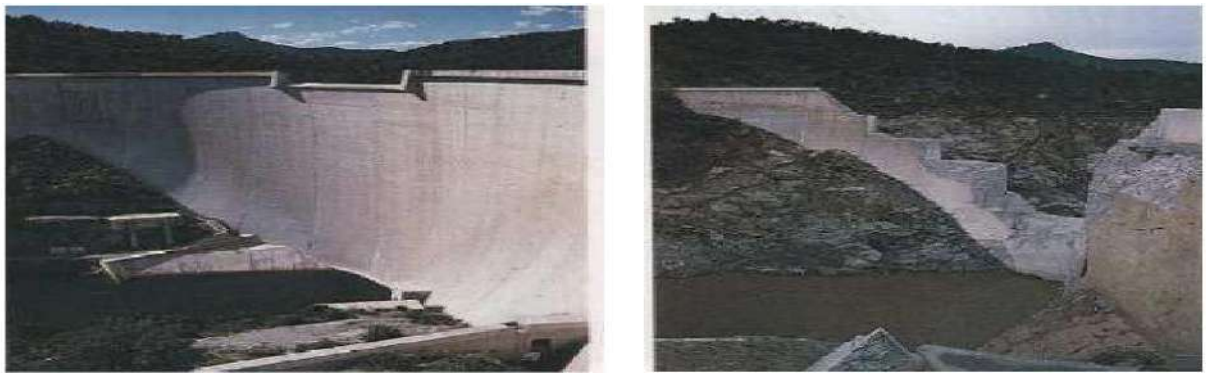


Photo N°2.3:*Photos du barrage Malpasset avant et après sa rupture le 2 décembre 1959. La solidité de l'assise de l'ouvrage sur les rochers était insuffisante. [20].*

II.9.3.2.2. Causes de rupture de Malpasset :

Le béton de la voûte n'était pas responsable de l'accident, ni dans son calcul, ni dans sa réalisation: c'est le terrain de fondation qui a lâché. Restait à savoir pourquoi.

Comme pour beaucoup d'autres accidents rares, ce sont en fait plusieurs caractères indépendants qui se sont trouvés réunis :

II.9.3.2.2. a- Fondation du barrage :

La foliation bien développée du massif rocheux a permis l'ouverture d'importantes fractures, en particulier sur la rive gauche, où elle était sub-verticale et tangente à la voûte. En effet, lorsqu'un barrage est rempli, l'eau le pousse vers l'aval. Ce déplacement entraîne le terrain de fondation de façon sensible, mais pas le terrain situé en amont (faute d'une résistance suffisante à la traction de la roche). Ce phénomène, négligeable dans le cas des barrages épais car il se répartit sur toute l'épaisseur, à été particulièrement important à Malpasset, d'autant plus que la roche était exceptionnellement déformable (près de 10 fois plus que pour les autres barrages du même type, celle de Tignes représentant le cas idéal d'une roche encaissante d'excellente qualité).

Une faille rive gauche (non repérée lors des études préliminaires) délimitait un bloc rocheux de grand volume qui est tombé vers l'aval sous la poussée de l'eau de la retenue. Cette chute, facilitée par les phénomènes de sous-pression (poussée d'Archimède), a été rendue plus dramatique encore par le fait qu'elle supportait la culée qui avait été placée sur la rive gauche pour maintenir la voûte du barrage, dont l'assise était incertaine.

Un tunnel fut creusé au niveau de la culée rive gauche pour étudier la faille et les caractéristiques du terrain. La perméabilité du terrain était particulièrement sensible à la compression, ce que personne n'avait remarqué lors de la construction. Cette caractéristique asans doute joué un rôle important dans la rupture du barrage: le terrain de fondation est naturellement parcouru par des circulations d'eau du simple fait du fort gradient hydraulique qui existe entre la retenue à l'amont et le cours d'eau à l'aval. Mais dans le cas qui nous préoccupe, cette circulation a été rendue impossible par la formation d'une barrière imperméable dans les zones de compression engendrées par la poussée de la voûte. Toute la pression hydraulique s'est donc concentrée à ce niveau, accentuant l'instabilité de l'ouvrage dans son ensemble. Ce facteur n'avait pas été pris en compte lors de la construction. Pourtant, on avait pris conscience depuis la rupture du Barrage de Bouzey (Vosges) en 1895 que l'eau n'exerce pas seulement sa poussée sur la face

amont du barrage, mais qu'elle s'infiltre également dans les joints de la maçonnerie et sous l'ouvrage, mettant ainsi dangereusement en cause sa stabilité

II.9.3.2.2.b- Conditions d'exploitation :

Le remplissage très rapide des 4 derniers mètres du barrage (en 24 h) a opéré unvéritable effet de choc sur la structure de ce dernier.

Le Barrage de Malpasset ne faisait l'objet d'aucune surveillance particulière ni de la part du bureau d'études responsable de sa construction, ni de la part d'aucun organisme public.

II.9.4. Envasement :

L'envasement des barrages est considéré comme étant l'accumulation des dépôts de vase au fond des retenues. Les dommages causés par ce phénomène (réduction de la capacité, obturation des pertuis de vidange et déstabilisation de la digue peuvent être importantes), et il peut s'avérer extrêmement difficile, voir même impossible d'y remédier particulièrement dans les régions arides et semi-arides.

II.9.4.1. Analyse des causes de l'état critique de l'envasement :

Les divers types d'érosion, (splash, en nappes, en griffes et ravinantes) sont à l'origine de ces transports solides en suspension, lesquels se développent dans un système constitué, d'une part, par l'élément bassin (et oued) caractérisé par sa perméabilité, sa nature lithologique l'intensité du relief, sa végétation et, d'autre part ,par l'élément moteur du transport solide à savoir l'eau, qui agit par son énergie cinétique d'impact et sa capacité d'érodabilité ainsi que par son ruissellement.

Divers paramètres conditionnent la formation de ces transports de matières terreuses et leur évolution dans le temps. Pour ne citer que quelques uns de ces facteurs, mentionnons: les conditions initiales à savoir:

- L'humidité antérieure du sol,
- Le caractère torrentiel des précipitations pluviales,
- La période de l'année dans laquelle s'effectue le transport solide,
- La nature géologique du bassin versant, et la lame d'eau ruisselée.

Tous ces paramètres liés entrent simultanément en jeu et il est difficile d'en isoler un pour dire qu'il est le seul à entrer en considération, dans le cas d'une crue donnée observée.

Seul le transport solide par suspension, qui est dû à la composante verticale de la vitesse turbulente.

Parmi les problèmes posés par ce transport, nous citons un problème très important qui est l'envasement des retenues d'eau, par conséquent la diminution de la capacité utile.

L'érosion par l'eau, l'érosion par le vent et les glaciers sont les principaux phénomènes.

L'objectif voulu est de mettre en évidence les différents facteurs favorisant le phénomène d'érosion :

a. Décomposition du processus

L'érosion hydrique s'explique à travers de l'action des pluies sur le sol. Deux fonctions sont connues :

- La fonction de rejaillissement ou effet «splash» qui provoque le détachement des particules ;
- La fonction de ruissellement, dont l'effet est le transport.

i. L'effet « splash »

Les gouttes d'eau martèlent le sol, ce qui provoque :

- Une dégradation de sa structure ;
- La formation d'une pellicule de battance ;
- Des projections de certaines particules (sables fins, limons fins…).

L'intensité de cet effet dépend directement de la teneur en eau du sol, il atteint son maximum si la surface du sol est saturée et couverte d'une pellicule d'eau de 2 à 3mm.

L'effet « splash » cède ensuite sa place au ruissellement dès que l'épaisseur dela lame d'eau excède 3 mm, cette épaisseur lui confère alors la capacité d'absorber l'énergie cinétique des gouttes d'eau.

Les flaques formées dans les dépressions superficielles du sol débordent : c'est le ruissellement.

ii. Ruissellement

Il apparaît sur les sols en pente (même très faible) au moment où l'intensité de la pluie devient supérieure à la capacité d'absorption du sol. Ce phénomène est lié à la formation d'une croûte de battance, couche limitant l'infiltration profonde de l'eau.

Le ruissellement agit sur le sol par des actions de détachement, mais aussi et principalement par des actions de transport. L'un ou l'autre de ces mécanismes prédominera selon les caractéristiques spécifiques des couches superficielles du sol, en particulier la rugosité et la pente du terrain.

iii. Colluvionnement

Lorsque le ruissellement est ralenti, les particules les plus fines véhiculées par l'eau dans le bas de la pente se redéposent pour former une zone de glaçage.

L'érosion en nappe se traduit donc par une sélection granulométrique des particules du sol : les fractions les plus grossières restent sur place, les éléments de taille supérieure à 2 mm « émergent » pour former une surface irrégulière, tandis que les particules les plus fines sont entraînées dans les bas de pente.

b. Facteurs de la dégradation du sol

i. Facteurs abiotiques :

Intensité de la pluie : La cause principale de l'érosion en nappe est l'énergie de la battance des pluies sur les sols dénudés. L'indice de l'érosivité de la pluie est fonction de l'énergie cinétique des gouttes de pluie multipliée par la quantité de pluie en 30 minutes.

Nature du sol : L'érodibilité des sols dépend essentiellement :

- Du taux de matières organiques du sol ;
- De la texture du sol ;
- De la structure de l'horizon de surface et de sa perméabilité ;
- De la présence du fer et de l'alumine libre, du type d'argile et de la salure des matériaux.

Les sols les plus érodibles sont ainsi ceux qui sont riches en limons et en sables fins.

Influence de la pente : Il est bien entendu que, plus la pente est raide, plus l'eau n'érodera le sol. L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente à cause de l'augmentation du ruissellement. La fusion de petits champs pour en faire de plus grands a généralement comme conséquence d'allonger les pentes, d'augmenter les risques d'érosion par l'augmentation de la vitesse de l'eau, occasionnant un plus grand lessivage (capacité de transport des sédiments). Risque selon la pente (d'après l'Association Régionale d'Etude pour l'Amélioration des Sols en seine-Normandie),

Entre 0 et 1% : ruissellement sans érosion

Entre 1 et 3% : érosion en nappes et rigoles

Entre 3 et 5% : érosion forte (rigoles et ravines)

Plus de 5% : érosion très forte (éventuellement ravines profondes), mais ce sont les causes dues à l'action humaine qui doivent faire l'objet de nos soucis car ce sont sur celles-là, seules, que nous pouvons agir.

ii. Facteurs naturels

L'érosion ne dépend pas seulement du climat, de la géologie et de la topographie mais elle dépend également de la nature de la couverture végétale. Pour arrêter l'érosion, un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes de fortes pluies. Il sert à ralentir l'écoulement du ruissellement tout en maintenant une bonne porosité du sol.

Parmi les facteurs conditionnels de l'érosion, le couvert végétal est certainement le facteur le plus important puisque l'érosion passe de 1 à plus de 1 000 t lorsque toutes choses étant égales, le couvert végétal d'une parcelle diminue de 100 % à 0.

II.9.4.2. Etat critique de l'envasement :

Exemple : Barrage Hamiz–Algérie

La plupart des barrages algériens sont touchés par le problème de l'envasement par exemple (barrage Hamiz, fergoug I, sig, et cheufas I …).

II.9.4.2.1. construction :

Situé dans la wilaya de Boumerdès, le barrage du Hamiz est mis en service en 1879. Il est surélevé en 1935 pour atteindre 45 m et le réservoir est approfondi en 1972. Le barrage retient les eaux de l'oued Arbatache d'un débit annuel de 52 millions de m^3. Le bassin versant d'une superficie de 139km^2 est constitué en quasi – totalité par des sédiments marneux. Une quantité de 0.27 million de m^3 de solides arrive chaque année dans la retenue, ce qui réduit sa capacité de 30 millions de m^3en 1935 à moins de 12.3 millions de m^3en 1964.

Tableau II.3*:* La capacité théorique du barrage [22].

Pour une tranche d'eau de 15 m	1366400 m^3
20 m	3199200 m^3
25 m	6066200 m^3
35 m	9767700 m^3




Photo N°2.4.:*barrage Hamiz avant la catastrophe [22]*.




Photo N°2.5:*Barrage Hamiz après la catastrophe [22]*.

II.9.4.2.2. Comportement après la mise en eau :

Toute la partie rive droite de l'ouvrage étant assise sur les calcaires fissurés du Lutétien, de nombreux ennuis devaient surgir quant à l'étanchéité ; ils furent de deux sortes : des fuites à la base et une considérable augmentation des débits d'une source située près du mur de pied, au fur et à mesure de la montée du plan d'eau.

Une source chaude de 2.37/seconde existait en effet, avant l'édification du barrage, sur la rive droite de l'oued, à la cote 131.650.

Lors de la mise en eau, une source froide apparut à proximité immédiate de l'autre, à cote 131.940.

Le débit des deux sources augmente considérablement au fur et à mesure de l'élévation

du niveau de l'eau (mai 1890). Cette augmentation n'était sensible qu'à partir d'une hauteur d'eau de 33 m environ.

De décembre 1890 jusqu'en 1910 malgré divers travaux, la situation resta inchangée ; mais à la suite de nouveaux travaux d'étanchement, le débit de la source n'était plus, en 1913, que de 50 l/seconde pour une hauteur de retenue de 33 m. Le débit se réduisit à 25 l/seconde en 1914.

II.9.4.2.3. Travaux de consolidation :

Sous l'action des chasses faites par les vannes de fond, un bassin s'était formé à l'aval Du barrage.

Cette excavation fut attribuée à un tourbillon à axe horizontal se formant sous la veine d'eau sortant des évacuateurs. On vidangea cette excavation en 1905. Les fondations n'étaient pas atteintes, mais le canal tronc commun était endommagé; la partie menacée fut soutenue par une voûte surbaissée.

En 1916, un contrefort supplémentaire fut construit sur la rive gauche et des travaux furent effectués au contrefort rive droite.

Une nouvelle vidange, identique à celle de 1905, fut faite en 1923. On constata que les fondations étaient toujours intactes, mais que les micaschistes sur lesquels reposait l'ouvrage dans la partie médiane se décomposaient à tel point qu'on pouvait les enlever à la pioche.

Un mur de pied et un massif d'enrochements furent construits, barrage.

Cette excavation fut attribuée à un tourbillon à axe horizontal se formant sous la veine d'eau sortant des évacuateurs. On vidangea cette excavation en 1905. Les fondations n'étaient pas atteintes, mais le canal tronc commun était endommagé; la partie menacée fut soutenue par une voûte surbaissée.

En 1916, un contrefort supplémentaire fut construit sur la rive gauche et des travaux furent effectués au contrefort rive droite.

Une nouvelle vidange, identique à celle de 1905, fut faite en 1923. On constata que les fondations étaient toujours intactes, mais que les micaschistes sur lesquels reposait l'ouvrage dans la partie médiane se décomposaient à tel point qu'on pouvait les enlever à la pioche. Un mur de pied et un massif d'enrochements furent construits.

II.9.4.2.4. Envasement :

Le bassin versant de l'Oued Arbatache est constitué en quasi-totalité par des sédiments marneux. On conçoit que l'envasement de la cuvette soit important, malgré l'action des

chasses opérées par les vannes de fond. Les chiffres suivants établissent cette importance (année 1914)

Tableau II.4: La capacité théorique et la capacité réelle du barrage[22]

Cotes	*Capacité théorique*	*Capacité réelle*
15	1360000 m^3	500000 m^3
20	31900000 m^3	1400000 m^3
25	6060000 m^3	4000000 m^3
30	9760000 m^3	7700000 m^3
34	14360000 m^3	12300000 m^3

II.9.5.Vieillissement :

Le vieillissement d'un barrage se traduit par sa dégradation au cours du temps, le plus souvent, il met en jeu le rôle de l'eau, d'où perte des caractéristiques mécaniques, et fluage des organes de génie civil.

Nous pouvons regrouper les causes principales induisant l'instabilité du barrage, suite à l'apparition de l'état critique (vieillissement) comme suit :

II.9.5.1. Analyse des causes de l'état critique de vieillissement :

a. Dégradations de surface

Fissuration des remblais :

Les fissures de retrait sont les plus fréquentes.

Ce type de fissuration n'est pas toujours anodin car les discontinuités, qui sont de l'ordre du millimètre jusqu'à 2 à 3 cm d'ouverture et plusieurs décimètre de profondeur, fragilisent la surface des ouvrages par leur remblai qui peut perdre peu à peu de sa résistance et devenir instable (glissement de peau).

La fissuration de la crête des barrages était étroitement liée au type de revêtement. C'est ainsi que les crêtes renforcées par matériaux bitumineux ou par traitement en chemin rural vieillissent beaucoup mieux que celles qui n'ont aucun revêtement.

Ravinement des remblais : Le ravinement des talus et notamment celui du talus aval, résulte également d'une recherche d'économie. L'enquête confirme qu'il s'agit là d'un

défaut de jeunesse en relation avec l'absence de protection des talus par de terre végétale engazonnée.

Effets du batillage : Les dégradations du talus amont par les vagues sont plus préoccupantes. La marche créée par batillage à hauteur de la retenue normale, trèssollicitée par la houle en période hivernale, varie entre la simple ondulation de surface et une marche de plus de 1 mètre de hauteur.

b. Dégradations internes aux remblais

Déformations excessives des remblais et percolations anormales à travers les ouvrages ou les fondations, sont les dysfonctionnements internes les plus fréquemment rencontrés.

Tassements excessifs des remblais : Le tassement a conduit à un fléchissement visible de la crête dans la partie centrale du barrage sans aucune cassure aggravante et sans autre conséquence qu'une diminution locale de la revanche qui réduit la sécurité du barrage vis-à-vis d'une sur verse.

Le scénario extrême n'a été atteint que sur un barrage où la consolidation des sols de fondation a entraîné un tassement excessif, suivi de fissures avec rejet et finalement, d'un glissement général du remblai 10 ans après sa construction.

Ces comportements pathologiques, qui tiennent à l'absence ou à l'insuffisance des études de site ou des sols, n'ont conduit, en plus de 30 ans, qu'à un événement grave sur la population étudiée. La hauteur modérée des ouvrages qui limite l'importance des tassements est probablement l'une des explications de ce faible taux de désordre grave.

Percolations incontrôlées : Les percolations anormales à travers les ouvrages sont la principale cause des désordres observés sur les barrages visités. Quelques barrages observés présentent une humidité en pied aval.

Elle prend la forme de sources ponctuelles ou de suintements diffus sur tout ou partie du pied aval du barrage qui se transforme, a parfois, en marécage (eau stagnante rouillée, joncs, faible portance du terrain).

Phénomènes de glissement et d'érosion interne : Ils sont la suite logique des percolations anormales à travers le remblai ou la fondation. Phénomènes de glissement de talus produit par perte de résistance mécanique des matériaux ou par sous pressions.

Les ruptures de barrage par l'érosion interne représentent 2 accidents.

Le compactage médiocre des terres du remblai qui favorise les circulations anarchiques et éventuellement concentrées de l'eau à travers le massif, et la rupture d'une conduite de vidange sont à l'origine des deux accidents recensés.

c. La stabilité des barrages

La longévité et les cas de charge qui les barrages ont supportés ne peuvent à eux seuls être considérés comme le gage de leur stabilité. d'une part, ils n'ont probablement pas encore subi la crue de projet et, d'autre part, les fortes sollicitations qu'els ont supporté ont pu produire des phénomènes de fatigue au des déformations irréversibles, les rendant plus fragiles vis-à-vis de sollicitations équivalentes dans l'avenir. Enfin, les phénomènes de vieillissement que subissent la maçonnerie, le masque amont, les dispositifs d'étanchéité et les organes de drainage peuvent progressivement diminuer la sécurité de l'ouvrage.

d. Le vieillissement des bétons et des maçonneries

Pour les maçonneries, le vieillissement concerne à la fois les aspects mécaniques et les aspects hydrauliques. Sur ce dernier point, c'est essentiellement la connaissance des phénomènes chimiques qui doit être privilégiée, avec un intérêt particulier pour les modifications qui pourraient être consécutives à des évolutions avec le temps de la qualité des eaux de la retenue (acidification due aux pluies, effets éventuels de l'eutrophisation, etc…).

Pour les barrages en béton armé : si la plupart des barrages ne font appel dans leur structure qu'à du béton non arme, certains types de barrages sont construits en béton armé.

Et il n'est pas sur qu'en présence d'eau, béton et armatures fassent toujours bon ménage.

Les phénomènes en cause sont, coté aval, la carbonations ou la pénétration d'ions chlorure en présence d'atmosphères salines ou polluées et, coté amont, la dissolution par les eaux agressives. On peut y ajouter les chocs thermiques aux quels sont éventuellement exposés ces ouvrages minces, en particulier pendant les périodes où la retenue ne joue plus de rôle tampon. Un autre mécanisme de vieillissement est constaté sur certaines voûtes : il s'agit du fluage des bétons. Il n'a, semble-t-il, pas jusqu'alors à des mises en danger.

Cependant, les déformations, irréversibles vers l'aval qui en résulte peuvent à la longue être préjudiciables pour l'ancrage dans les fondations.

e. Principaux scénarios de vieillissement barrages en béton et barrage en maçonneries :

Fondation (masse de roche)

- Perte de force sous des actions permanentes ou répétées ;
- Erosion et solution ;
- Vieillissement des rideaux en coulis et des canalisations.

Corps de barrage (béton ou mortier et pierre)

- Réactions chimiques ayant pour résultat le gonflement ;
- Rétrécissement, fluage et réaction menant à la contraction ;
- Perte de force des actions permanentes et répétées ;
- Résistance faible à la congélation et au dégel.

Autres

- Vieillissement des joints structuraux ;
- Vieillissement des revêtements ;
- Vieillissement des structures précontraintes.

II.9.5.2. Etat critique de vieillissement :

Exemple : *Barrage de Beli Iskar*

En effet, un contrôle défectueux des écoulements à travers le barrage met en cause à la fois la stabilité de l'ouvrage, par la répartition défavorable des sous- pressions et sa pérennité par l'accélération des processus de vieillissement.

II.9.5.2.1. Caractéristique de barrage Beli Iskar :

Les principes caractéristiques du barrage sont représentés dans le tableau 05.

Tableau II.5: Caractéristiques principales du barrage[21]

En droit	***Bulgarie***
Date de construction	1935-1945
Type de barrage	Barrage poids
Hauteur (m)	50.7
Longueur en crête (m)	533
Hauteur maximale sur fondation (m)	51
Volume du corps du barrage m^3	226000

II.9.5.2.2. Causes de vieillissement :

Une coupe, de l'amont vers l'aval, montre un parement amont constitué de moellons de granit sur une épaisseur de 0,6 m environ, À l'aval du parement, une zone d'épaisseur 2 m constituée d'un béton dosé à 280 kg de ciment par m^3.

Le reste du corps du barrage constitué d'un béton dosé à 185 kg de ciment par m^3.

Depuis sa construction, le barrage a fait l'objet de peu de travaux de réfection exceptés quelques travaux de rejointoiement du parement amont. En revanche, différentes campagnes de reconnaissance ont mis en évidence un processus de vieillissement important des bétons du barrage. A titre indicatif, les résultats d'essai de mesure de la résistance à la compression obtenus au cours des trois campagnes de 1945, 1982 et 1999 sont donnés ci-après. Ils montrent que la résistance moyenne à la compression des bétons est inférieure à la moitié de sa valeur initiale après 55 ans d'exploitation.

Tableau II.6: Résulta d'essais de mesure de la résistance à la compression [21].

	Résultats 1945	Résultats 1982	Résultats 1999
Résistance moyenne à la compression des échantillons de béton B280	59.2 MPa	28.2 MPa	22.3 MPa
Résistance moyenne à la compression des échantillons de béton B185	37.5 MPa	21.9 MPa	15.4 MPa

i



Photo N°2.6: *Barrage de Beli Iskar : Vue d'ensemble du parement aval [21].*



Photo N°2.7 : *Barrage de Beli Iskar : Parement amont du barrage [21].*



Photo N°2.8 : *Barrage de Beli Iskar, dégradation du parement aval [21].*

II.9.6. Pollution :

Un polluant (ou contaminant) est par conséquent un facteur physique, chimique ou biologique issu le plus souvent de l'activité humaine et provoquant sous une intensité ou une concentration (teneur) anormale, une altération de la qualité de l'eau naturelle.

- Physique : chaleur, matières en suspension, radioactivité, et autres ;
- Chimiques : sels minéraux, métaux lourds, pesticides, détergents, hydrocarbures et autre ;
- microbiologiques : micro- organismes, virus, bactéries.

II.9.6.1. Analyse des causes de la pollution du réservoir :

a. Eaux de pluie :

Les eaux de pluies dans leur trajet vers le sol, nettoient l'atmosphère et dissolvent ou entraînent mécaniquement les gaz et particules naturellement présentes dans celles-ci, ou apportées par les diverses pollutions naturelles, domestiques ou industrielles.

Les eaux de pluies peuvent aussi ruisseler sur des surfaces (végétales, bâtiments, toitures,…) et y dissout, entraîne ou arrache divers éléments. Les eaux de pluies pourront donc contenir, surtout au début de leurs formations :

- Des gaz atmosphériques naturellement présents dans l'air: N2, O2, C02.
- Des polluants atmosphériques gazeux provenant de la combustion (S02, S03,

N0x), de la fermentation des matières organiques (H2S, CH4, NH3,.) ou des industries.

- Des bactéries banales ou pathogènes
- Des particules dissoutes ou non dissoutes.

b. Sources naturelles :

Les eaux superficielles et marines peuvent être naturellement polluées par :

- Les écoulements et explosions volcaniques terrestres et marines (gaz, laves, métaux. lourds, etc.)
- L'érosion éolienne et pluviale des sols.
- La fermentation des végétaux (algues)
- Les déjections liquides et solides animales, etc.

Ces diverses sources sont responsables d'apports polluants en particules dissoutes ou non dissoutes (sable, argile,...) en matières organiques, en matières chimiques, en bactéries,...

c. Sources domestiques :

Les eaux usées domestiques se subdivisent en :

- Eaux ménagères issues des cuisines, salles de bains, opération de blanchissage (blanchir le linge, rendre propre), de lavage de locaux.
- Eaux vannes : eaux de W.C chargées d'usines.

d. Sources agricoles :

L'agriculture intensive pratiquée dans les régions développées, entraîne un risque important de pollution des eaux :

- L'usage souvent abusif des engrais à base de Nitrates et de phosphates enrichit les eaux en ces éléments, les argues y croissent et prolifèrent en surnombre.

Lors de leur putréfaction, elles consomment l'oxygène dissous, rendront ainsi la vie de la faune aquatique difficile voire impossible.

- L'utilisation des insecticides et herbicides représente un problème majeur de toxicité pour la faune et la flore aquatique et en définitive pour l'être humain.

e. Sources industrielles :

Les importants polluants d'origine industrielle susceptibles d'être rencontrés dans les eaux.

II.9.6.2. Etat critique de la population d'un réservoir :

II.9.6.2.1. Barrage Mervent en France :

Le barrage de Mervent en France c'est un barrage voûte, la mise en service débute en 1956.

II.9.6.2.1.a- Caractéristiques techniques :

Volume stocké : 8300000m^3 volume utile : 7500000m^3 Production 2004 : 7457000 m^3

II.9.6.2.1.b- Usages :

Différents usages de l'eau stockée : irrigation, soutient d'étiage, protection contre les inondations, tourisme, pêche, énergie éclectique.

Débit restitué à la rivière (débit réservé) : 2000000m^3

II.9.6.2.1.c- Nature de pollution :

Enfouissement de 2000 tonnes de pneus usagés, de meules polluées et autres déchets.



Photo N°2.9 : *Pollution de barrage Mervent en France [23].*

II.12. CONCLUSION :

Les barrages sont parmi les constructions humaines les plus importantes, à la fois par leurs dimensions parfois exceptionnelles et par leur utilité sociale. L'ouvrage pendant sa durée de vie connaît des changements qui peuvent conduire à des dommages. Ces derniers produits par plusieurs causes de différents ordres (techniques, naturelles, et humaines). Et aussi peuvent être affecté par plusieurs états critiques (la submersion, érosion interne, et la stabilité). Ces derniers peuvent produire des dommages importants sur l'ouvrage lui-même (perte de production), et aussi sur l'environnement et les être humain (des victimes). Dans ce chapitre, les différents états critiques affectant le barrage ont été présentés,

Chapitre III : Les Méthodes D'analyse de risques.

III.1. INTRODUCTION :

La réalisation d'une étude de sécurité des systèmes fait appel à différents outils d'analyse, très diversifiés quant à leurs performances, leur domaine d'application et leur complexité. Seules, les caractéristiques essentielles des méthodes les plus utilisées ainsi que les critères qui permettent de les distinguer (critères techniques et d'usage).
Un certain nombre de ces méthodes issues du domaine industriel a été recensé.

Ces méthodes s'étendent des analyses en termes de contrôle et de vérifications jusqu'à des procédures plus complexes destinées essentiellement au diagnostic des risques organisationnels. Par ailleurs, leur complexité croissante répond au besoin de détecter des risques qui deviennent moins observables et plus sporadiques.

Des méthodes ont par conséquent été développées, qui permettent une identification plus systématique de ces risques. L'application de ces méthodes fait appel à deux raisonnements complémentaires d'identification et d'analyse du risque par induction et par déduction. La première démarche dite inductive consiste à «descendre» des causes vers les effets.

La seconde démarche dite déductive, elle consiste à remonter aux causes premières de défaillances données à priori. Cette méthode «remonte» des effets vers les causes.

III.2. DEFINITION D'ANALYSE DES RISQUES :

L'analyse du risque (Dangers) est définie comme « l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque ».
L'analyse des risques vise tout d'abord à identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens.

Dans un second temps, l'analyse des risques permet de mettre en lumière les barrières de sécurité existante en vue de prévenir l'apparition d'une situation dangereuse (barrières de prévention) ou d'en limiter les conséquences (barrières de protection).

Le processus détaillé d'appréciation des risques compte 12 étapes distinctes

(Figure III.1) :

1. définir les objectifs et la portée de l'étude;
2. choisir la méthode d'analyse la plus appropriée;

3. constituer une équipe d'analyse multidisciplinaire;
4. recueillir et préparer l'information requise;
5. définir les critères d'analyse;
6. déterminer les dangers;
7. analyser les risques;
8. évaluer l'acceptabilité des risques;
9. recommander des barrières de sécurité additionnelles;
10. évaluer le risque résiduel;
11. documenter (rapport d'analyse);
12. recommandations;

Il existe différents classements des méthodes d'analyse de risques, nous retiendrons ici trois de ces classements :

- Méthodes qualitatives ou quantitatives,
- Méthodes inductives ou déductives,

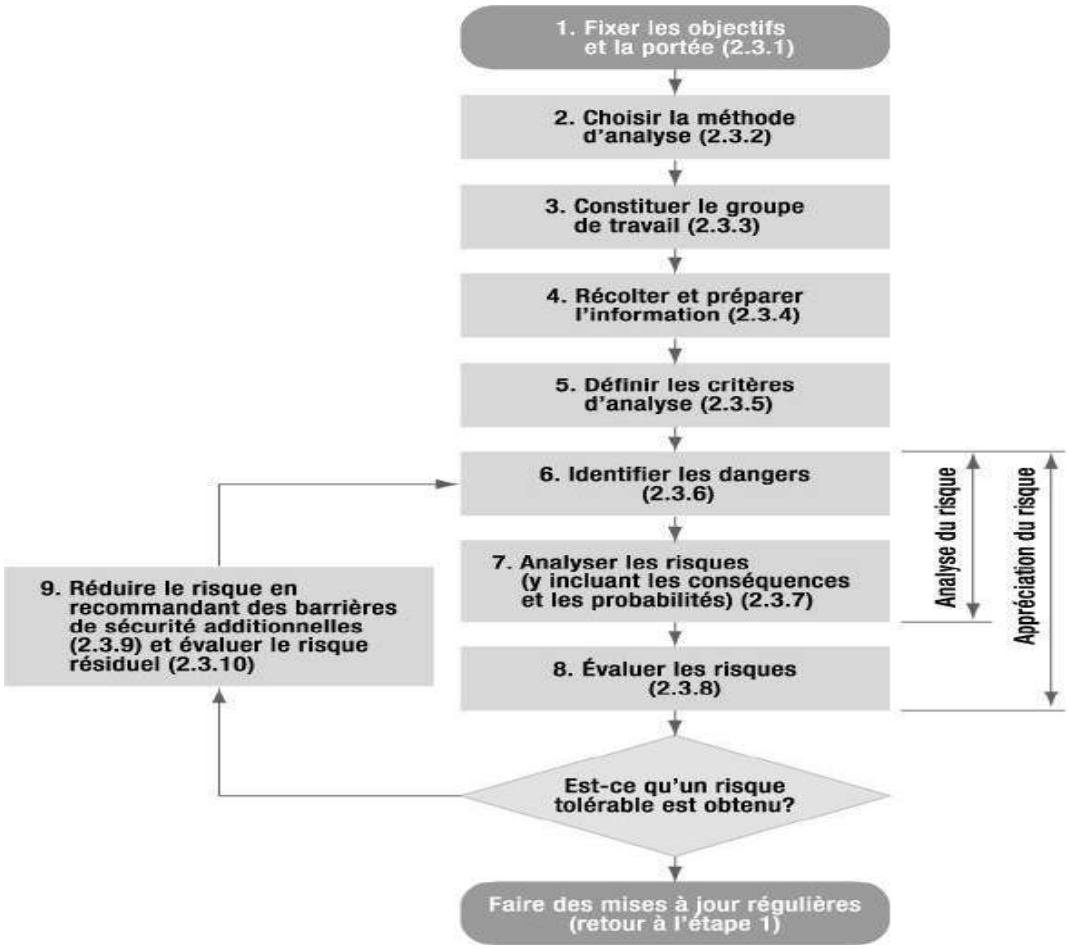


Figure.III.1Étapes génériques de l'appréciation des risques

III.3. DEMARCHES «INDUCTIVE» ET «DEDUCTIVE»

L'application des méthodes de sécurité des systèmes fait appel aux raisonnements par induction et par déduction. Cette terminologie désigne deux procédures complémentaires d'identification et d'analyse du risque, qui s'expriment concrètement par l'utilisation de techniques particulières. Les plus connues sont «l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets» (AMDE) pour la démarche inductive et «l'analyse par arbre des défauts» (ADD) pour la démarche déductive.

III.3.1. Spécificité et complémentarité des deux démarches

Il est intéressant de remarquer que, contrairement à la démarche inductive qui caractérise de nombreuses méthodes d'analyses (AMDE, mais aussi analyse préliminaire des risques, analyse par arbre d'évènement, etc.), la démarche déductive est généralement associée à une seule méthode, l'analyse par arbre des défauts.

Les expressions «méthodes inductives» et «méthode déductives», couramment utilisées, sont commodes car elles permettent de faire une distinction entre deux procédures d'analyse d'un système technique: progression du général vers le particulier et inversement.

Mais dans les faits, un examen plus attentif des critères permettant d'effectuer cette distinction conduit à mettre en évidence une ambiguïté concernant ce qui est réellement désigné : le mode de raisonnement intrinsèque à chaque méthode ou le mode d'examen du système technique.

Par exemple, un arbre d'événements et un arbre des défauts nécessitent tous deux un mode de raisonnement déductif (étant donné l'état du système à un niveau ou à un instant particulier, en déduire l'état suivant). Par contre, le mode d'examen du système sera inductif dans le premier cas (progression des événements élémentaires vers les événements finaux indésirables), déductif dans le second cas (progression inverse).

La figure (3.1) resitue les deux démarches par rapport au mode d'analyse du système et au déroulement des événements dans le temps.

La méthode inductive (ou «directe»), qui conduit à identifier des événements indésirables, est «en phase» avec le déroulement virtuel de ces événements.

Au contraire, la méthode déductive(ou «inverse»), qui reconstitue la logique des enchaînements entre événements primaires et événements indésirables est «en opposition de phase» par rapport au déroulement dans le temps.

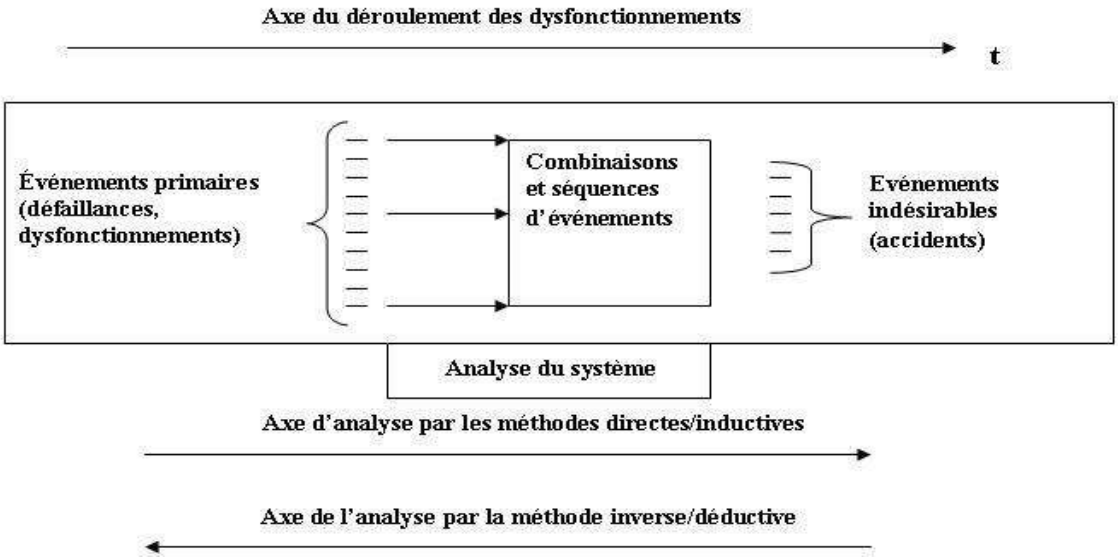


Figure *III*.2: Rapprochement entre l'axe du déroulement des événements et les deux modes d'analyse du système

III.3.2. Sécurité de système

La mise en ouvre d'une étude de sécurité d'un système comprend quatre phases principales (d'après Signoret et Leroy, 1986).

1) Définition du système étudié ;

2) Identification des risques présentés par le système ;

3) Modélisation de la logique de fonctionnement et des défaillances du système ;

4) Analyse qualitative et quantitative.

III.3.2.1. Connaissance du système

Elle nécessite de réunir de la documentation concernant les objectifs de production et de sécurité, la réglementation en vigueur, la technicité (schémas de principe, plans détaillés, explications de spécialistes).

Description de l'environnement du système, spécialement en ce qui concerne les échanges avec l'extérieur (flux de matières premières et de produits finis).

Connaissance des objectifs de sécurité que le système doit respecter: définition de l'utilisation anormale (conditions d'emploi hors spécifications), apport d'informations concernant les événements redoutés pour le système, etc.

III.3.2.2. Identification des risques présentés par le système

La connaissance des risques par les spécialistes est rarement exhaustive (Signoret et Leroy), et ceci d'autant plus que le système technique considéré est nouveau ou très complexe. Des méthodes ont par conséquent, été développées et qui permettent une identification plus systématique de ces risques.

Les plus connues sont :

- L'analyse préliminaire des risques ;
- L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets ;
- L'analyse par l'arbre d'événements.

III.3.2.3. Modélisation de la logique de fonctionnement et des défaillances du système

La mise en ouvre de méthodes inductives pour l'identification des risques conduit à sélection parmi ces derniers les plus dommageables pour le système.

L'examen spécifique des risques les plus importants fait essentiellement appel à une démarche déductive qui permet de reconstituer les séquences d'événements virtuellement en cause dans l'apparition des dysfonctionnements redoutés» il s'agit alors d'établir un modèle représentant correctement les liaisons de causalité entre chacun de ces derniers et des événements primaires (défaillance d'un composant, événement extérieur, etc.)» (Signoret et Leroy),

La méthode de représentation la plus utilisée est celle de l'arbre des défauts (causes).

III.3.2.4. Analyse qualitative et quantitative

Cette dernière étape «consiste à évaluer, à partir des modèles, la probabilité dématérialisation des risques envisagés». Analyse qualitative (classement des événements indésirables en fonction de leur importance relative, de leur modalité d'apparition, et) ou quantitative (attribution de probabilités d'occurrence pour chacun de ces mêmes événements) conduisent toutes deux à évaluer le niveau de risque inhérent au système.

Les résultats obtenus constitueront une aide précieuse lors de la décision de procéder si nécessaire à des modifications du système pour l'amélioration de la sécurité.

Les auteurs indiquent en outre que l'analyse de risque permet aux responsables d'un projet, et ceci dès la phase de conception, sinon de supprimer les risques présentés par une installation «du moins de les prévoir, afin de minimiser les conséquences en modifiant les caractéristiques initialement prévues pour les système» (Signoret et Leroy).

Cette remarque est importante car elle met l'accent sur l'intérêt présenté par une étude de sécurité des systèmes en phase de conception. En ce sens, les quatre tapes qui viennent d'être présentées décrivent en quelque sorte une démarche exhaustive et idéale.

Dans la pratique, on imagine difficilement qu'une procédure aussi complexe puisse toujours convenir en cours d'exploitation d'un système technique, ceci pour d'évidentes raisons de faisabilité et de coût….

La figure (3.2) résume les différentes étapes présentées par les auteurs.

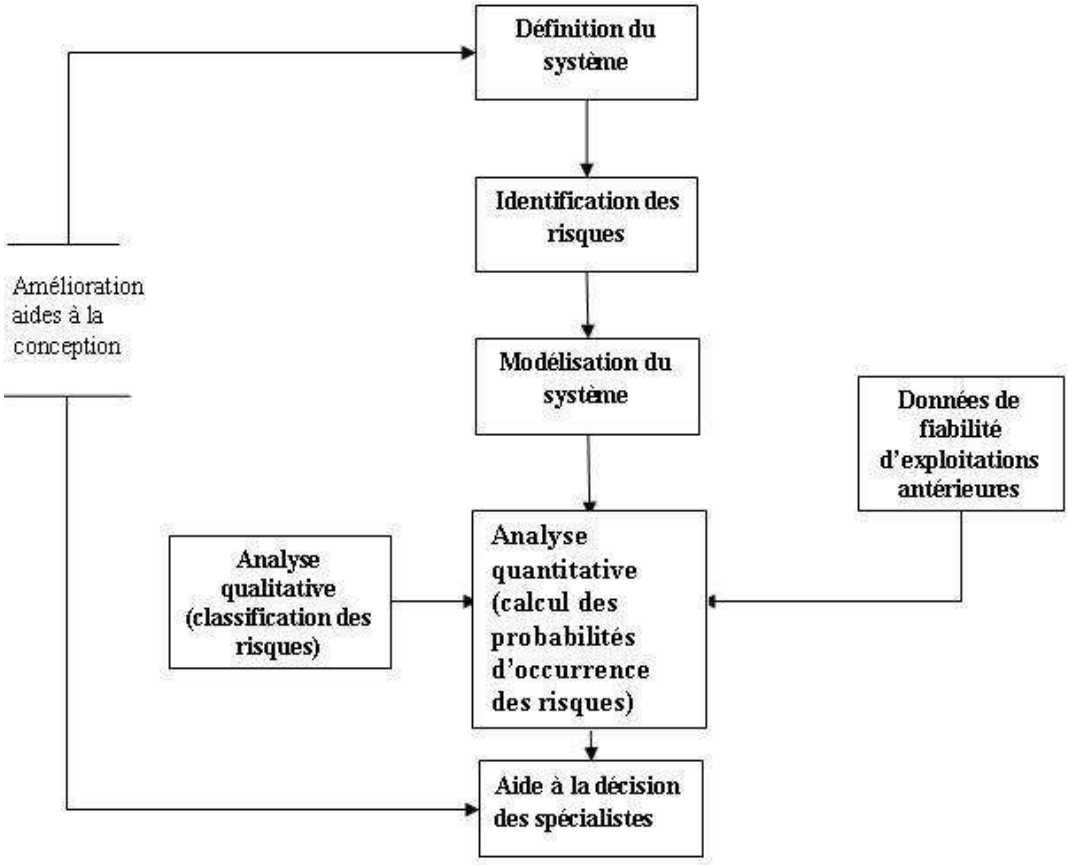


Figure III.3: Étape de la sécurité des systèmes (Signoret et Leroy, 1986),

III.4. Description des principales méthodes

La réalisation d'une étude de sécurité des systèmes fait appel à différents outils d'analyse, très diversifiés quant à leurs performances, leur complexité. Seules, les caractéristiques essentielles des méthodes les plus utilisées ainsi que les critères qui permettent de les distinguer (critères techniques et d'usage).

III.4.1. Analyse préliminaire des risques (APR)

III.4.1.1. Présentation

L'Analyse Préliminaire des Risques (Dangers) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires.

Cette méthode sert à identifier les risques d'un système au stade de sa conception, de les situer et par suite, de définir des règles et des procédures permettant d'éliminer ou de maîtriser les situations dangereuses et les accident potentiels ainsi mis en évidence (Lievens, 1976).

En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de système étudiée.

La description des résultats obtenus s'effectue au moyen de divers modes de présentation :

- Tableaux à colonnes: ils permettent d'ordonner les informations utiles en fonction de notions prédéfinies ;
- Arbre logique: pour chaque sous-système étudié, comprenant mention de la gravité des conséquences en cas d'accident, cet arbre dé compose l'enchaînement des circonstances qui conduisent à l'événement indésirable.

Ce tableau est rempli par un spécialiste possédant une bonne connaissance du système, en tenant compte des relations dynamiques existantes entre les différentes étapes de l'analyse.

III.4.1.2. Arbres logiques

Une présentation différente des données issues de l'APR peut être obtenue en utilisant une structure de type arborescent figure (III.4).

Pour chaque sous système étudié, comprenant mention de la gravité des conséquences en cas d'accident, cet arbre décompose l'enchaînement des circonstances qui conduisent à l'événement indésirable. Les notions utilisées restent inchangées par rapport à la présentation sous forme de tableaux.

Seul diffère l'aspect, qui présente l'intérêt de mieux montrer l'enchaînement des causalités.

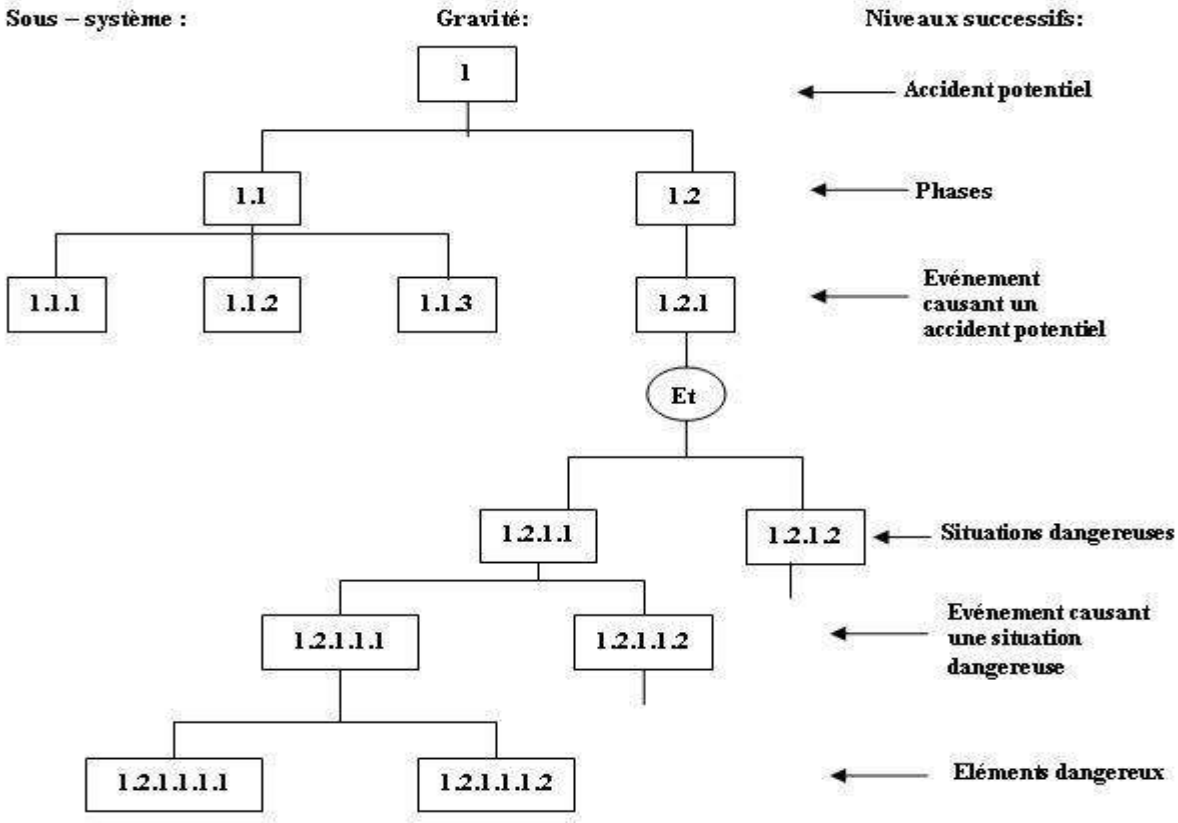


Figure III.4: Présentation sous forme d'arbre logique des données issues de l'analyse Préliminaire des risques (Lievens, 1976).

III.4.1.3. Méthodologie d'analyse préliminaire des risques

La méthodologie d'analyse préliminaire des risques comporte quatre phases comme le montre la figure (III.5).

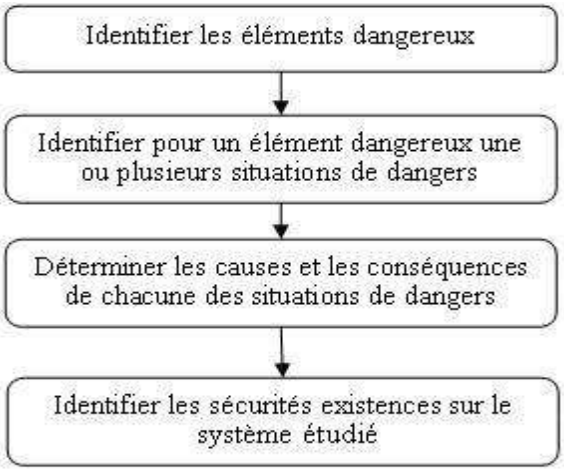


Figure III.5: La méthodologie d'analyse préliminaire des risques.

III.4.1.4. Limites et avantages de l'APR

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses. Par rapport aux autres méthodes, elle apparaît comme relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé.

En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des évènements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes.
Comme son nom l'indique, il s'agit à la base d'une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées.

Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils tels que l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances.

III.4.2. Analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE) et (AMDEC)

C'est l'outil d'analyse le plus utilisé et l'un des plus efficaces parmi l'ensemble des techniques inductives disponibles. Introduite dans l'aéronautique depuis 1960, elle s'est peu à peu imposée dans le spatial, le nucléaire, la chimie, l'industrie automobile, etc.
Elle commence par une description du système, de sa morphologie et de son fonctionnement. Ensuite, on recense les défaillances de chaque sous système ou composant.

Elle permet une analyse systémique et très complète des modes de défaillance des composants, de leurs causes et de leurs effets sur le système; on évalue ainsi l'importance des modes de défaillances vis-à-vis de la sûreté de fonctionnement; les résultats de l'analyse sont présentés sous forme de tableau.

L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité est une extension de l'AMDE qui inclut une analyse de criticité des modes de défaillances.

III.4.2.1. Méthodologie de la M.D.S.C

Phase 1 : Analyse des mécanismes de défaillance de manière exhaustive.
Identification des mécanismes de défaillance de manière exhaustive.

Phase 2 : Evaluation de la criticité.
Détermination des défaillances critiques par comparaison au seuil de criticité acceptable prédéfini.

Phase 3 : proposition d'actions correctives.

Diminution du niveau de criticité des défaillances en agissant sur un ou plusieurs des critères (fréquence, gravité, probabilité de non détection de la défaillance).

Phase 4 : Synthèse de l'étude/ décisions.

Effectuer un bilan et fournir les éléments permettant de lancer les actions à effectuer.

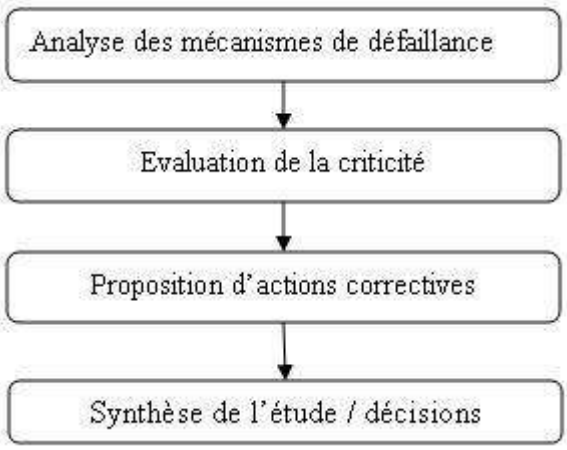


Figure III.6: La méthodologie AMDE.

III.4.2.2. Limites et avantages de la M.D.S.C

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mise en ouvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant à la défaillance globale du système.

De par son caractère systématique et sa maille d'étude généralement fine, elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence.

Comme elle consiste à examiner chaque mode de défaillance, ses causes et ses effets pour les différents états de fonctionnement du système, l'AMDEC permet d'identifier les modes communs de défaillances pouvant affecter le système étudié.

Les modes communs de défaillances correspondent à des événements qui de parleur nature ou la dépendance de certains composants, provoquent simultanément des états de panne sur plusieurs composants du système. Les pertes d'utilités ou des agressions externes majeurs constituent généralement des modes communs de défaillance.

Dans le cas des systèmes particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu du volume important d'informations à traiter.

Cette difficulté est décuplée lorsque le système considéré comporte de nombreux états de fonctionnement. Par ailleurs, l'AMDEC considère des défaillances simples et peut être

utilement complétée, selon les besoins de l'analyse, par des méthodes dédiées l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances par exemple.

III.4.3. Hazop

III.4.3.1. Historique et domaine d'application de Hazop

La méthode Hazop, pour Hazard Operability, a été développée par la société Imperial Chemical Industries (ICI) au début des années 1970. Elle a depuis été adaptée dans différents secteurs d'activité.

En considérant de manière systématique les dérives des paramètres d'une installation en vue d'en identifier les causes et les conséquences, cette méthode est particulièrement utile pour l'examen de systèmes thermo- hydrauliques, pour lesquels des paramètres comme le débit, la température, la pression, le niveau, la concentration… sont particulièrement importants pour la sécurité de l'installation.

III.4.3.2. Principe de Hazop

La méthode de type Hazop est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo - hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit…

L'Hazop suit une procédure assez semblable à celle proposée par l'AMDE.

L'Hazop ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles(ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation.

De ce fait, elle est centrée sur l'installation à la différence de l'AMDE qui est centrée sur les composants.

Pour chaque partie constitutive du système examiné (ligne ou maille), la génération (conceptuelle) des dérives est effectuée de manière systématique par la
conjonction :

- De mot-clé comme par exemple «Pas de», «Plus de», «Moins de», «Trop de»
- Des paramètres associés au système étudié. Des paramètres couramment rencontrés concernent la température, la pression, le débit, la concentration, mais également le temps ou des opérations à effectuer.

MOT-CLE + PARAMETRE = DERIVE

A l'origine, l'HAZOP n'a pas été prévue pour procéder à une estimation de la probabilité d'occurrence des dérives ou de la gravité de leurs conséquences.

Cet outil est donc parfois qualifié de qualitatif.

Néanmoins, dans le domaine des risques accidentels majeurs, une estimation apriori de la probabilité et de la gravité des conséquences des dérives identifiées s'avère souvent nécessaire. Dans ce contexte, l'Hazop doit donc être complétée par une analyse de la criticité des risques sur les bases d'une technique quantitative simplifiée.

III.4.3.3. Méthodologie de l'Hazop

La méthodologie de l'hazop est basée sur quatre phases comme on peut le constater sur la figure III.7 :

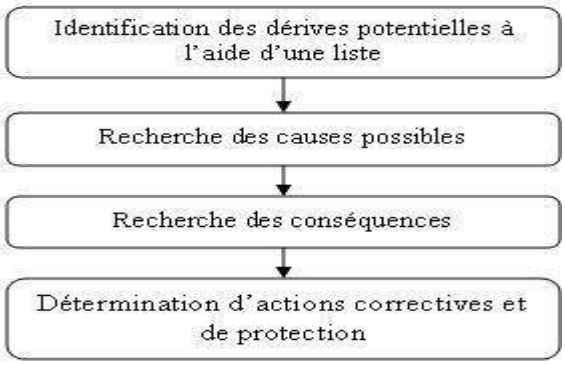


Figure III.7 : La méthodologie de l' HAZOP.

III.4.3.4. Limites et avantages de Hazop

L'Hazop est un outil particulièrement efficace pour les systèmes thermo -hydrauliques. Cette méthode présente tout comme l'AMDE un caractère systématique et méthodique. Considérant, de plus, simplement les dérives de paramètres de fonctionnement du système, elle évite entre autres de considérer, à l'instar de l'AMDE, tous les modes de défaillances possibles pour chacun des composants du système.

En revanche, l'Hazop permet difficilement d'analyser les évènements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances.

Par ailleurs, il est parfois difficile d'affecter un mot clé à une portion bien dé limitée du système à étudier. Cela complique singulièrement l'identification exhaustive des causes potentielles d'une dérive. En effet, les systèmes étudiés sont souvent composés de parties interconnectées si bien qu'une dérive survenant dans une ligne ou maille peut avoir des conséquences ou à l'inverse des causes dans une maille voisine et inversement. Bien entendu, il est possible à priori de reporter les implications d'une dérive d'une partie à une autre du système. Toutefois, cette tâche peut rapidement s'avérer complexe.

III.4.4. What – If ?

La méthode dite «What-If ?» est une méthode dérivée de l'Hazop. Elle suit donc globalement la même procédure et les informations présentées au paragraphe précédent pour l'Hazop restent donc valables ici.

La principale différence concerne la génération des dérives des paramètres de fonctionnement. Ces dérives ne sont plus dans ce cas envisagées en tant que combinaison d'un mot clé et d'un paramètre, mais fondées sur une succession de questions de type de la forme : «QUE (What) se passe-t-il SI (If) tel paramètre ou tel comportement est différent de celui normalement attendu ?». Il apparaît ainsi que l'efficacité de la méthode «What-If ?» repose en grande partie sur l'expérience des personnes réunies au sein du groupe de travail.

Cette méthode paraît donc moins fastidieuse à mener que l'Hazop mais est réservée à une équipe expérimentée.

III.4.5. Arbre des défaillances (ADD) = l'Arbre des Causes (MAC)

III.4.5.1. Historique et domaine d'application de l'ADD

L'analyse par arbre des défaillances fut historiquement la première méthode mise au point en vue de procéder à un examen systématique des risques.

Elle a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine Bell Telephone et fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles.

Visant à déterminer l'enchaînement et les combinaisons d'évènements pouvant conduire à un événement redouté pris comme référence, l'analyse par arbre des défaillances est maintenant appliquée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, le nucléaire, l'industrie chimique,…

Elle est également utilisée pour analyser a posteriori les causes d'accidents qui se sont produits. Dans ces cas, l'événement redouté final est généralement connu car observé. On parle alors d'analyse par arbre des causes, l'objectif principal étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident.

III.4.5.2. Principe de l'ADD

L'analyse par arbre de défaillances est une méthode de type déductif. En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant finalement conduire à cet événement. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux évènements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté.

Les évènements de base correspondent généralement à des :

- Évènements élémentaires qui sont généralement suffisamment connus pour qu'il ne soit pas utile d'en rechercher les causes. Ainsi, leur probabilité d'occurrence est également connue ;
- Évènements ne pouvant être considérés comme élémentaires mais dont les causes ne seront pas développées faute d'intérêt ;
- Évènements dont les causes seront développées ultérieurement au gré d'une nouvelle analyse par exemple ;
- Évènements survenant normalement et de manière récurrente dans le fonctionnement du procédé ou de l'installation.

Quelle que soit la nature des éléments de base identifiés, l'analyse par arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

- Ces évènements sont indépendants ;
- Ils ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de renseignements, d'intérêt ou bien parce que cela est impossible ;
- Leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence peut être évaluée.

Ainsi, l'analyse par arbre des défaillances permet d'identifier les successions et les combinaisons d'évènements qui conduisent des évènements de base jusqu'à l'événement indésirable retenu.

Les liens entre les différents évènements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques (de type «ET» et «OU» par exemple). Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente. A l'aide de règles mathématiques et statistiques, il est alors théoriquement possible d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'événement final à partir des probabilités des évènements de base identifiés.

III.4.5.3. Méthodologie de l'arbre de défaillance

L'objectif principal de la méthode d'arbre des causes est l'analyse des causes des accidents.

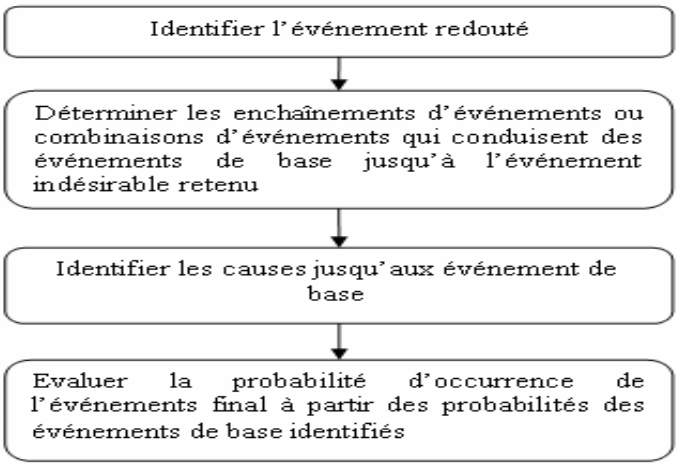


Figure III.8 : La méthodologie de l'arbre des causes

La figure (III.9) représente un exemple d'un arbre des causes pour une fuite.

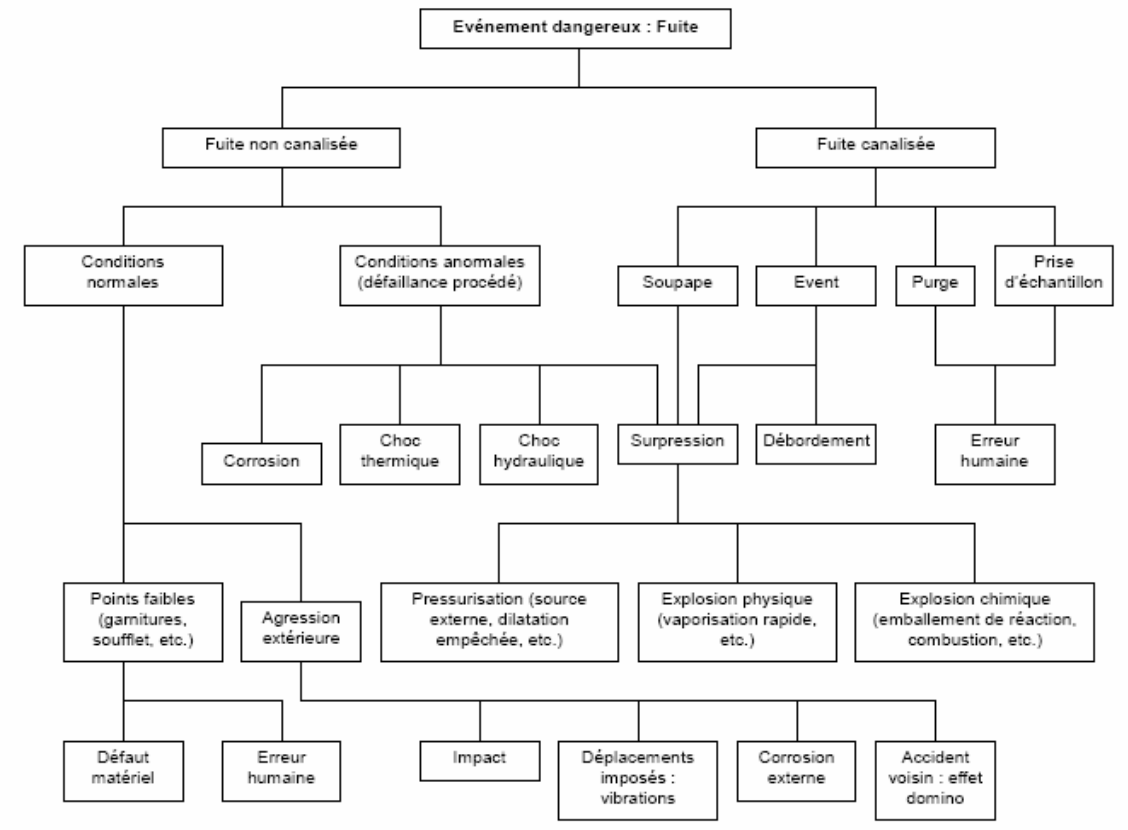


Figure III.9 : Arbre des causes générique pour une fuite,

III.4.5.4. Limites et avantages de l'ADD

Le principal avantage de l'analyse par arbre des défaillances est qu'elle permet de considérer des combinaisons d'évènements pouvant conduire in fine à un événement redouté. Cette possibilité permet une bonne adéquation avec l'analyse d'accidents passés qui montre que les accidents majeurs observés résultent le plus souvent de la conjonction de plusieurs événements qui seuls n'auraient pu entraîner de tels sinistres. Par ailleurs, en visant à l'estimation des probabilités d'occurrence des événements conduisant à l'événement final, elle permet de disposer de critères pour déterminer les priorités pour la prévention d'accidents potentiels.

L'analyse par arbre des défaillances porte sur un événement particulier et son application à tout un système peut s'avérer fastidieuse. En ce sens, il est conseillé de mettre en œuvre au préalable des méthodes inductives d'analyse des risques.

Ces outils permettent d'une part d'identifier les évènements les plus graves qui pourront faire l'objet d'une analyse par arbre des défaillances et d'autre part, de faciliter la détermination des causes immédiates, nécessaires et suffisantes au niveau de l'élaboration de l'arbre.

Depuis une dizaine d'années, des logiciels informatiques sont commercialisés a fin de rendre plus aisée l'application de l'arbre des défaillances. Ces outils se montrent très utiles pour la recherche des coupes minimales, la détermination des probabilités ainsi que pour la présentation graphique des résultats sous forme arborescente.

III.4.6. Arbre des événements

III.4.6. Historique et domaine d'application de l'ADE

L'analyse par arbre d'évènements a été développée au début des années 1970pour l'évaluation du risque lié aux centrales nucléaires à eau légère. Particulièrement utilisée dans le domaine du nucléaire, son utilisation s'est étendue à d'autres secteurs d'activité.

De par sa complexité proche de celle de l'analyse par arbre des défaillances, cette méthode s'applique préférentiellement sur des sous-systèmes bien déterminés.

Elle apporte une aide précieuse pour traiter des systèmes comportant de nombreux dispositifs de sécurité et de leurs interactions.

A l'instar de l'analyse par arbre des défaillances dont elle s'inspire, elle permet d'estimer les probabilités d'occurrence de séquences accidentelles.

Cette méthode est particulièrement utilisée dans le domaine de l'analyse après accidents en vue d'expliquer les conséquences observées résultant d'une défaillance du système.

III.4.6.2. Principe de l'ADE

L'analyse par arbre des d'évènements, vise à déterminer, dans une démarche déductive, les causes d'un événement indésirable ou redouté retenu à priori. A l'inverse, l'analyse par arbre défaillance suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les évènements qui en découlent.

A partir d'un événement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'évènements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention…

Ces dispositifs peuvent concerner aussi bien des moyens automatiques qu'humains (intervention des opérateurs) ou organisationnels (application de procédures).

III.4.6.3. Méthodologie de l'arbre des conséquences de l'ADE

La méthode des conséquences utilise pour l'analyse après les accidents en vue d'expliquer les scénarios de défaillance ou bien de rupture.

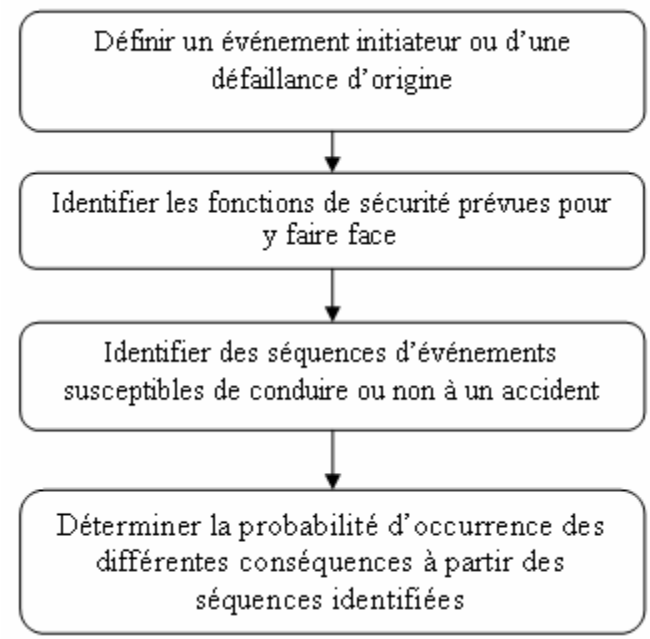


Figure III.10 : La méthodologie de l'arbre de l'évènement.

La figure (III.11) montre un exemple d'arbre d'événement dans le domaine industriel.

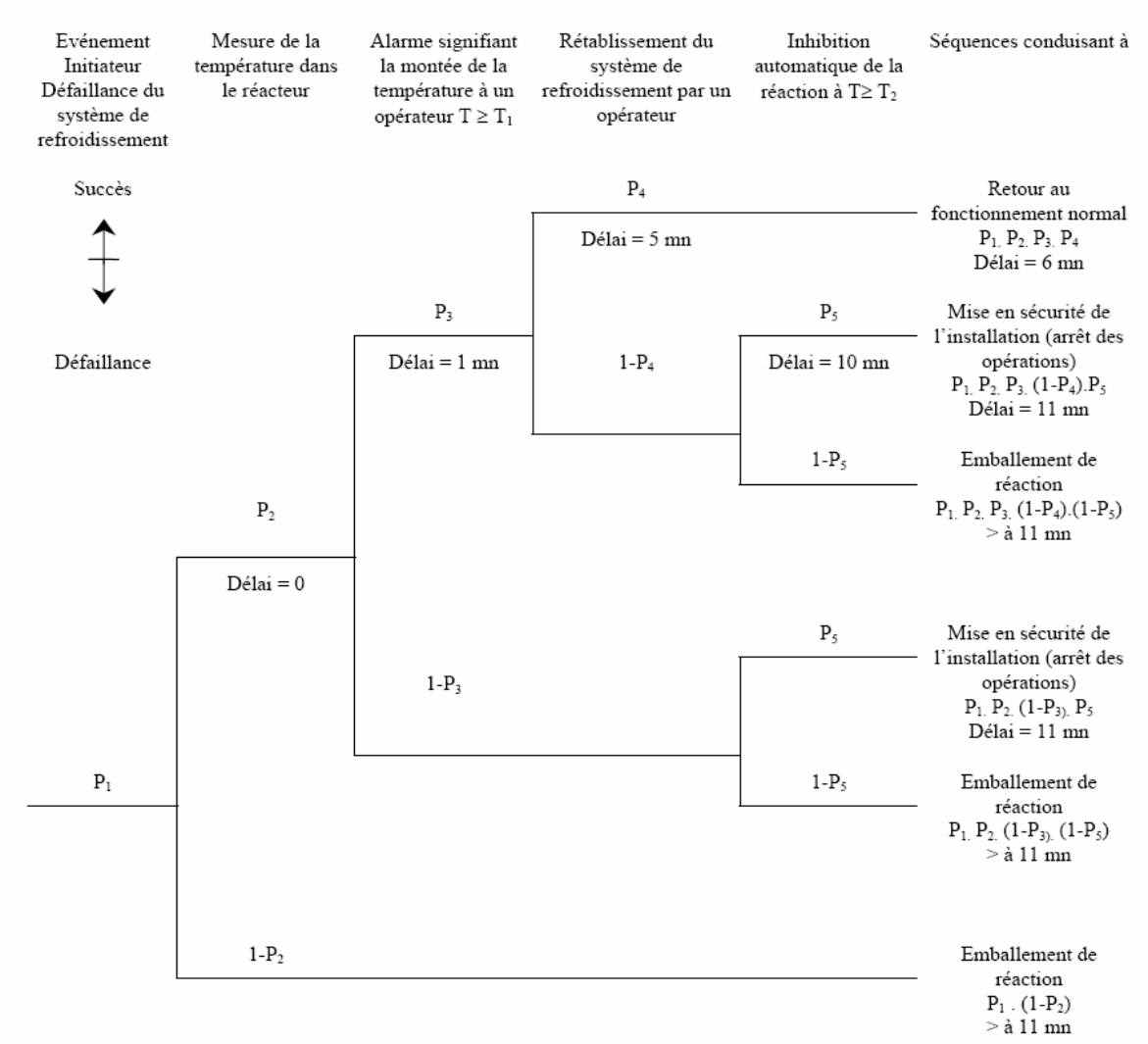


Figure III.11: Un exemple d'un arbre d'événement .

III.4.6.4. Limites et avantages de l'ADE

L'analyse par arbre d'évènements est une méthode qui permet d'examiner, à partir d'un événement initiateur, l'enchaînement des évènements pouvant conduire ou non à un accident potentiel. Elle trouve ainsi une utilité toute particulière pour l'étude de l'architecture des moyens de sécurité (prévention, protection, intervention) existants ou pouvant être envisagés sur un site. A ce titre, elle peut être utilisée pour l'analyse d'accidents à posteriori.

Cette méthode peut s'avérer rapidement lourde à mettre en œuvre.

En Conséquence, il faut définir avec discernement l'événement initiateur qui fera l'objet de cette analyse.

III.4.7. Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences

III.4.7.1. Historique et domaine d'application de la méthode Nœud papillon

Le «nœud papillon» est une approche de type arborescente largement utilisée dans les pays européens comme les Pays-Bas qui possèdent une approche probabiliste de la gestion des risques. Le nœud papillon est utilisé dans différents secteurs industriels par des entreprises comme SHELL qui a été à l'origine du développement de ce type d'outils.

Cette méthode se révèle intéressante pour l'analyse des causes et des conséquences d'un événement initiateur que l'on redoute de voir survenir dans un système.

Elle se caractérise par le caractère presque simultané de l'analyse déductive des causes et de l'analyse inductive des conséquences, combinant ainsi les principes des MAC et MACQ.

Elle est intéressante pour l'analyse des systèmes où l'ordre dans lequel surviennent les défaillances est important; néanmoins, elle apparaît difficile à utiliser pour l'analyse de systèmes trop complexes.

III.4.7.2. Principe de la méthode Nœud papillon

Le nœud papillon est un outil qui combine un arbre de défaillance et un arbre d'événements. Il peut être représenté sous la forme suivante :

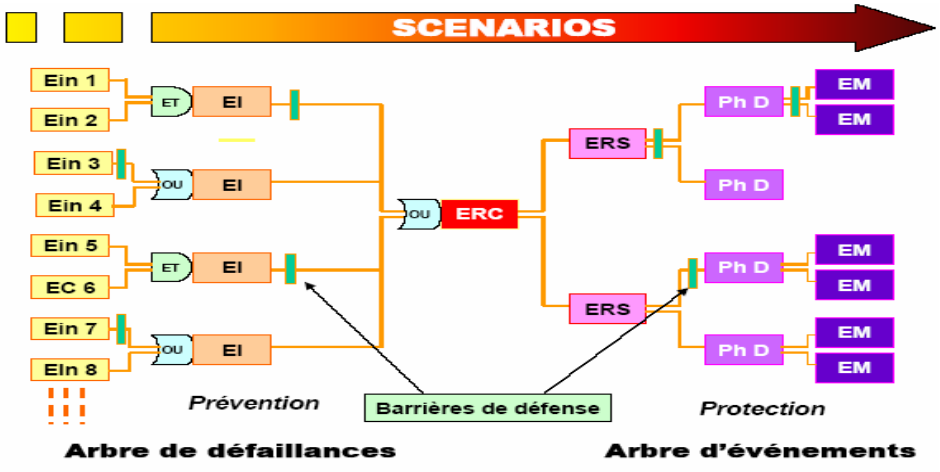


Figure III.12 : Représentation de scénarios d'accident selon le model papillon.

Le point central du nœud papillon, appelé ici événement redouté Central, désigne généralement une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition).

La partie gauche du nœud papillon s'apparente alors à un arbre des défaillances s'attachant à identifier les causes de cette perte de confinement.

Lapartie droite du nœud papillon s'attache quant à elle à déterminer les conséquences de cet événement redouté central tout comme le ferait un arbre d'événements.

Sur ce schéma, les barrières de sécurité sont représentées sous la forme de barres verticales pour symboliser le fait qu'elles s'opposent au développement d'un scénario d'accident. De fait, dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (événements indésirable ou courant) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles (effets majeurs) désigne un scénario d'accident particulier pour un même événement redouté central.

Cet outil permet d'apporter une démonstration renforcée de la bonne maîtrise des risques en présentant clairement l'action de barrières de sécurité sur le déroulement d'un accident.

III.4.7.3. Méthodologie du diagramme causes-conséquences

La procédure d'analyse de risque est présentée sur la figure (III.12), elle est constituée de 2 parties: l'analyse des causes ou fautes et l'analyse des conséquence.

L'analyse des causes par des états ou conditions critiques et «remonte» vers leurs événements initiateurs et leur cause primaires .L'analyse des conséquences par ces mêmes états ou conditions critiques pouvant se développer en accidents ou en ruine et «descend» vers les conséquences possibles sous forme de différents scénarios.

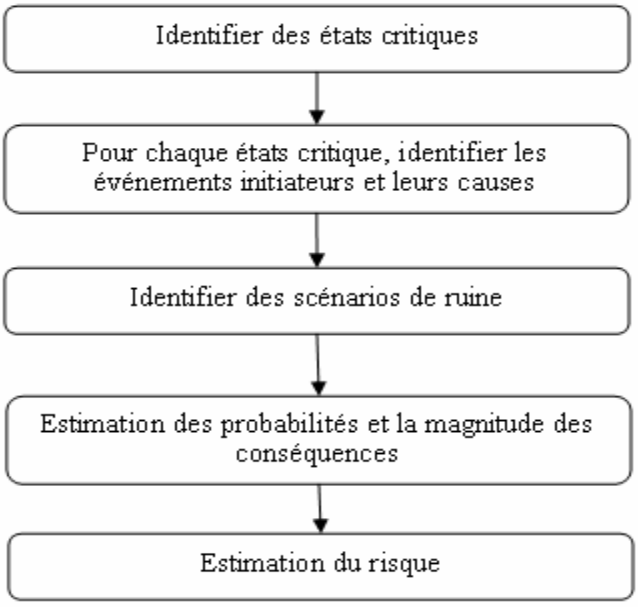


Figure III.13: La méthodologie de l'analyse des causes - conséquences.

III.4.7.4. Limites et avantages de la méthode Nœud papillon

Le Nœud Papillon offre une visualisation concrète des scénarios d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées.

De ce fait, cet outil met clairement en valeur l'action des barrières de sécurité s'opposant à ces scénarios d'accidents et permet d'apporter une démonstration renforcée de la maîtrise des risques.

En revanche, il s'agit d'un outil dont la mise en oeuvre peut être particulièrement coûteuse en temps. Son utilisation doit donc être décidée pour des cas justifiant effectivement un tel niveau de détail.

III.4.8. Méthode du diagramme de Succès (MDS)

La méthode du Diagramme de succès (MDS) conduit à une modélisation du fonctionnement d'un système. Le diagramme de succès obtenu permet le calcul ,généralement aisé, de la fiabilité (ou disponibilité) du système supposé irréparable.

Dans certaines conditions très restrictives, ce calcul peut être étendu à ceux de la fiabilité, de la disponibilité et de la maintenabilité d'un système réparable .Cette méthode est utilisable lorsqu'une analyse détaillée des causes de défaillance (et de leurs combinaisons) n'est pas requise et lorsqu'il y a indépendance entre les défaillances (et les réparations) des composants.

Par ailleurs, il existe une correspondance entre les modélisations par diagramme de succès et par arbre des causes.

La méthode de décompte des composants (MDC) est dérivée de la MDS ; elle admet que le système peut être représenté par un diagramme série.

III.4.9. Méthode de Table de Vérité (MTV)

Cette méthode nécessite l'étude de toutes les combinaisons d'états de fonctionnement et de panne des composants; c'est donc théoriquement la méthode la plus rigoureuse qui puisse exister. La table de vérité obtenue peut faire l'objet d'une réduction de nature booléenne; on obtient ainsi les combinaisons pertinentes.

Cependant, la MTV n'est plus applicable dès que le nombre de composants est grand, étant donné le nombre, alors très important, de combinaisons à considérer.

Néanmoins, on peut parfois imaginer l'utiliser à un niveau de décomposition d'un système ou d'un ensemble de systèmes élémentaires tel que le nombre de combinaisons de défaillances reste limité ; ceci est parfois le cas au niveau des fonctions.

Les inconvénients de cette méthode sont réduits par son informatisation.

III.4.10. Méthode des combinaisons de pannes résumées (MCPR)

Elle est une méthode inductive débutant par l'AMDE et se poursuivant par le regroupement des pannes et de leurs combinaisons jusqu'à l'obtention de tous les fonctionnements anormaux des systèmes à analyser. Elle se présente ainsi comme une extension et une généralisation de l'AMDE qui en constitue la première étape.

Cette méthode se caractérise par l'introduction de certains concepts spécifiques à cette méthode: pannes résumées internes, pannes résumées externes, pannes résumées globales.

La notion «d'effets» permet d'établir le lien entre les pannes et les fonctionnements anormaux, les événements indésirables, etc. L'analyse quantitative sera effectuée en ayant recours aux méthodes d'analyse quantitative (ex. MAC).

Cette méthode se prête bien à des analyses systématiques, pratiquées sur des ensembles de systèmes élémentaires complexes en interaction.

L'organisation des études relatives à un ensemble complexe des systèmes est facilitée par une telle méthode. Elle paraît également bien adaptée à la prise en compte d'analyses de sûreté de fonctionnement dès la conception d'un ensemble de systèmes complexes.

III.5. CONCLUSION

Les outils d'analyse des risques sont fréquemment utilisés dans le domaine de la prévention des risques. Procurant un caractère systématique à l'analyse, ils permettent :

- ✓ D'identifier les causes et les conséquences potentielles d'évènement sin désirables ;
- ✓ De mettre en lumière les barrières de sécurité existantes ou pouvant être envisagées au regard du risque.

Associées à une démarche d'évaluation semi - quantitative, ils visent à identifier les risques les plus importants et à envisager en conséquence des propositions d'améliorations. L'utilisation de ces méthodes est particulièrement recommandée dans le cadre de l'analyse des risques d'une étude des dangers, puisqu'elles permettent de viser à plus d'exhaustivité pour l'identification et tendre ainsi vers la maîtrise des risques majeurs.

Il n'existe pas de bons ou de mauvais outils d'analyse des risques.

Chacun possède des avantages et des inconvénients qui lui sont propres.

Un outil particulier est donc généralement plus ou moins adapté au contexte de système étudié et aux objectifs recherchés.

Rappelons enfin que ces outils ne peuvent assurer une exhaustivité totale de l'identification des causes potentielles de sinistres.

Ce dernier constat met en avant la nécessité d'une démarche itérative visant à utiliser des outils de plus en plus complexes pour une analyse de plus en plus fine des risques, en combinant par exemple plusieurs des méthodes d'analyse.

Chapitre IV : Analyse du risque

IV.1. Introduction :

Les études d'analyse de risques mettent en évidence la difficulté d'obtenir des mesures de la sûreté de fonctionnement des barrages ou de leurs composants : mécanismes en jeu très divers et complexes, unicité de chaque ouvrage et de sa fondation, informations sur les incidents et les défaillances peu abondantes et pas nécessairement disponibles... Ainsi, une approche fiabiliste de la sûreté de fonctionnement est peu probante et le jugement de l'expert reste à la base de l'évaluation des probabilités. Le travail d'évaluation des probabilités est réalisé dans le cadre d'équipes pluridisciplinaires constituées par des experts du domaine et animées par un spécialiste de la Sûreté de Fonctionnement.

IV.2. Méthodes de calcul utilisé :

IV.2.1.méthode arbre événement :

IV.2.1.1. Démarche :

Les arbres d'événement sont conventionnellement construits horizontalement, à partir de la gauche, c'est-à-dire à partir de l'événement initial. Le développement de l'arbre se fait alors chronologiquement, en étudiant le comportement de chaque élément. Un scénario ou un système est formé de plusieurs éléments qui se combinent pour prévenir les conséquences graves. Les arbres d'événement permettent de déterminer l'enchaînement des événements ainsi que le résultat final : succès ou échec. Les arbres d'événements sont donc en général binaires, les événements étant supposés soit arrivé, soit non.

La figure **IV.1** représente un arbre d'événement pour lequel on retient la branche supérieure si le système est dans un état opérationnel quand il est sollicité. L'événement initiateur initie le scénario. Les actions correctrices de l'événement générique peuvent atténuer ou aggraver l'événement initiateur. Une branche particularise les événements génériques en fonction du passé et en fonction de conditions initiales de la séquence. Une séquence est un chemin qui conduit aux conséquences acceptables ou inacceptables.

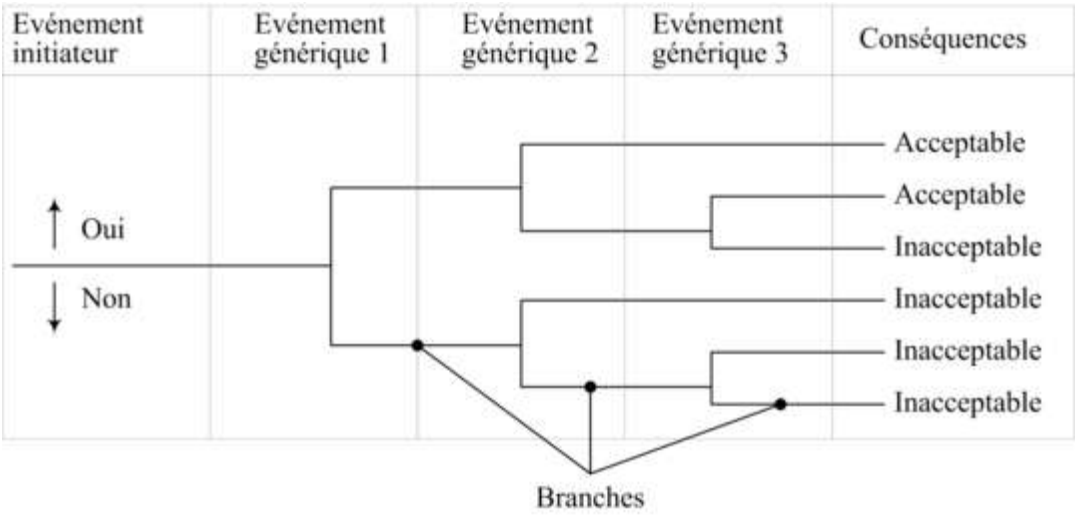


Figure. IV.1.: Schématisation d'un arbre d'événement

L'évaluation quantitative des arbres d'événements est simple et rapide. Connaissant pour tous les événements les probabilités de se trouver dans une configuration échec ou défaillance, il est facile de calculer la probabilité d'apparition d'un des scénarios de défaillances.

Plus précisément, la méthode se déroule en six phases :

1. Identifier l'événement initiateur : ce peut être la défaillance d'un système, d'un sous-*système, d'un composant,... ou un événement extérieur. On détermine ensuite* quantitativement la fréquence d'apparition de cet événement.

2. Identifier les mécanismes de prévention, systèmes automatiques de sécurité, alarmes opérateurs, actions de l'opérateur, barrières de sécurité, etc. Leur efficacité s'évalue au travers d'une probabilité de succès / échec.

3. Construire l'arbre, de la gauche (événement initiateur) vers la droite (conséquences) en enchaînant les mécanismes de prévention représentés par des branches : branche supérieure pour le succès, branche inférieure pour l'échec. L'objectif en terme de finesse du niveau de conséquences intervient lors de cette phase :

a. On peut avoir un objectif limité aux questions de sécurité : possibilité d'accident grave (explosion par exemple) ou non ? ;

b. On peut avoir un objectif un peu plus détaillé : possibilité d'accident grave, production dégradée, production nominale et sans accident ; ***c.*** On peut avoir un accident beaucoup plus détaillé : possibilité d'accident grave, possibilité d'accident bénin, arrêt de la

production, perte de plus de 80% de la production, perte de 30 à 80% de la production, perte de production inférieure à 30%, retard supérieur à la journée, retard inférieur à la journée, production nominale, par exemple.

4. Estimer les probabilités de chaque branche.

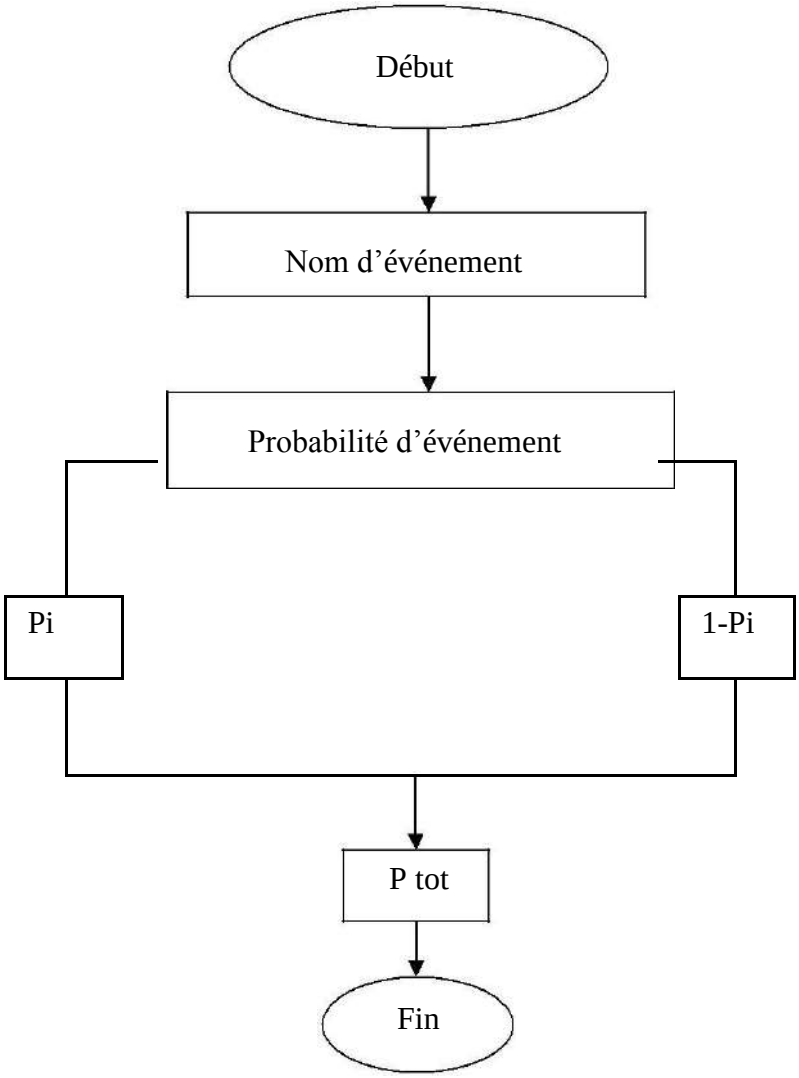
5. Estimer les probabilités de chaque conséquence par combinaison des probabilités des branches.

6. Hiérarchiser les conséquences par probabilités.

Deux utilisations de l'arbre obtenu sont alors possibles :

- l'approche déductive : une fois l'arbre construit, il est réduit, c'est-à-dire que certaines séquences sont supprimées en raison de leur incohérence. L'arbre des conséquences « systèmes » est déduit en remplaçant dans l'arbre précédent les fonctions par les systèmes de sûreté correspondants. Il est souvent utile de revoir l'ordre des événements génériques en raison des interactions entre fonctions de sûreté, ce qui permet également de simplifier l'arbre. La mise en ordre est guidée par les aspects temporels, les interactions fonctionnelles et les interactions entre systèmes élémentaires. Une simplification à l'aide de l'algèbre booléenne est également possible.
- l'approche inductive : elle est basée sur la méthode MCPR qui permet l'élaboration des pannes résumées globales. Celles-ci permettent la sélection des événements initiateurs et ensuite l'élaboration des arbres des conséquences. La simplification des arbres des conséquences est réalisée sur les mêmes critères et à l'aide des méthodes que dans l'approche déductive.

IV.2.1.2.Organigramme du programme :



IV.2.2.Arbre défaillance :

IV.2.2.1.Introduction :

Contrairement à l'analyse des modes de défaillances, l'arbre de défaillances est une méthode déductive (déductif : procédant d'un raisonnement logique rigoureux). Elle permet de savoir comment un système peut être indisponible. Il s'agit de représenter les différentes évènements et leurs liaisons par des portes de logique (fonction ET ou fonction OU selon que la défaillance du matériel se produit lorsque les évènements se réalisent ensemble ou séparément).

IV.2.2.2. PRINCIPE

Cette méthode déductive (de l'effet vers ses causes) a pour objet la recherche de toutes les combinaisons de défaillances élémentaires pouvant aboutir à un évènement redouté,

parfois identifié par une AMDEC. A partir de cet « évènement sommet », on construit une arborescence (schéma graphique en forme d'arbre inversé) représentant l'enchaînement logique des « évènements intermédiaires » jusqu'à la mise en cause des « évènements élémentaires » (défaillance d'un composant). Cela par utilisation du symbolisme logique de l'algèbre de Boole. Il est ainsi possible d'identifier toutes les défaillances élémentaires pouvant conduire à l'évènement redouté, puis de quantifier celui-ci par son taux de défaillance λ obtenu à partir des taux de défaillances λi de chaque composant mis en cause.

Ce type d'analyse permet, dans le domaine de la maintenance :

- d'améliorer la conception ;
- de faire un diagnostic rapide ;
- de prévoir une meilleure logistique.

Pour établir cet arbre, il est souhaitable de s'aider de l'analyse des modes de pannes et défaillances décrits précédemment en AMDEC.

IV.2.2.3 DÉFINITION ET OBJECTIFS

L'arbre de défaillances est une représentation graphique de type arbre généalogique (la filiation d'une famille). Il représente une démarche d'analyse d'événement. L'arbre de défaillances est construit en recherchant l'ensemble des événements élémentaires, ou les combinaisons d'événements, qui conduisent à un événement redouté (E.R.). L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un événement redouté pour déterminer de manière exhaustive (exhaustif : sujet traité à fond) l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires.

Les objectifs sont résumés en quatre points :

- La recherche des événements élémentaires, ou leurs combinaisons qui conduisent à un E.R.
- La représentation graphique des liaisons entre les événements. Remarquons qu'il existe unereprésentation de la logique de défaillance du système pour chaque E.R. Ce qui impliquequ'il y aura autant d'arbres de défaillances à construire que d 'E.R. retenus.
- Analyse qualitative: cette analyse permet de déterminer les faiblesses du système. Elle estfaite dans le but de proposer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système. La recherche des éléments les plus critiques est faite en déterminant les chemins qui conduisentà un E.R. Ces chemins critiques représentent des scénarios qui sont analysés en fonction desdifférentes modifications qu'il est possible

d'apporter au système. L'analyse des scénariosqui conduisent à un E.R. est faite à partir des arbres de défaillances, il est alors possible dedisposer des "barrières de sécurité" pour éviter les incidents.

- Enfin, IL est possible d'évaluer la probabilité d'apparition de l'E.R. connaissant laprobabilité des événements élémentaires. C'est l'analyse quantitative qui permet dedéterminer d'une manière quantitative les caractéristiques de fiabilité du système étudié.

L'objectif est en particulier de définir la probabilité d'occurrence des divers événementsanalysés. Les calculs reposent sur : les équations logiques tirées de la structure de l'arbre dedéfaillances et des probabilités d'occurrence des événements élémentaires.

IV.2.2.4. DÉFINITION DES ÉVÉNEMENTS

IV.2.2.4.a Événement redouté :

L'événement redouté est l'événement indésirable pour lequel nous faisons l'étude detoutes les causes qui y conduisent. Cet événement est unique pour un arbre de défaillances etse trouve au "sommet" de l'arbre. Avant de commencer la décomposition qui permetd'explorer toutes les combinaisons d'événements conduisant à l'événement redouté, il fautdéfinir avec précision cet événement ainsi que le contexte de son apparition. *L'événementredouté est représenté par un rectangle au sommet de l'arbre*

IV.2.2.4.b Événements intermédiaires

Les événements intermédiaires sont des événements à définir comme l'événementredouté. La différence avec l'événement redouté est qu'ils sont des causes pour d'autres événements. Par exemple c'est la combinaison d'événements intermédiaires qui conduit àl'événement redouté. *Un événement intermédiaire est représenté par un rectangle comme l'événement redouté.*

IV.2.2.4.c Événements élémentaires

Les événements élémentaires sont des événements correspondants au niveau le plusdétaillé de l'analyse du système. Dans un arbre de défaillances, ils représentent lesdéfaillances des composants qui constituent le système étudié. Pour fixer le niveau de détaillede notre étude, nous considérons en général que les événements élémentaire coïncident avecla défaillance des composants qui sont réparables ou interchangeables. *Les événements élémentaires sont représentés par des cercles.*

IV.2.2.5. CONSTRUCTION DE L'ARBRE DE DÉFAILLANCES

IV.2.2.5.a Démarche à suivre (figure VI.2)

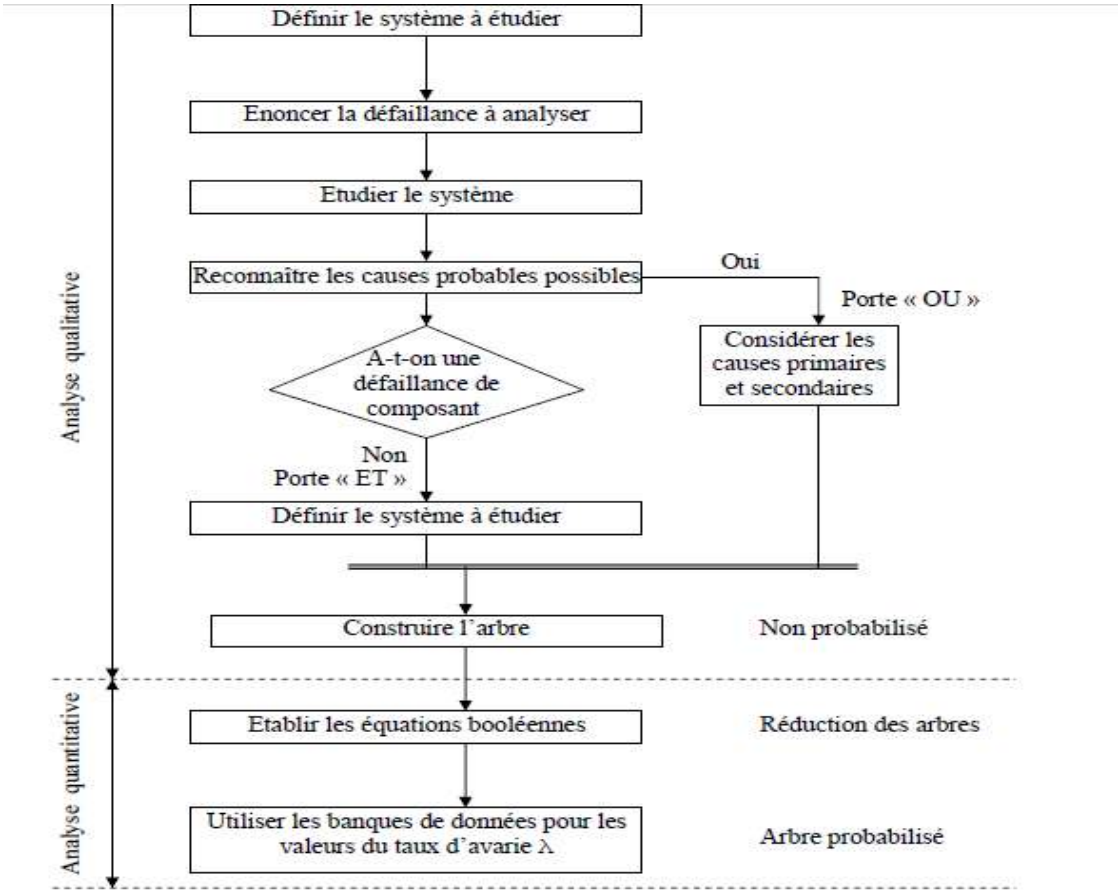


Figure VI.2. Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillances.

IV.2.2.5.b Méthodologie

C'est une analyse déductive qui demande une grande connaissance des divers modes de dégradation des systèmes. On part de la défaillance présumée des systèmes et on recherche toutes les causes ou agencement (combinaison) de causes qui peuvent conduire à cette défaillance. Un certain nombre de symboles sont utilisés pour construire l'arbre ; ils sont décrits ci-dessus.

IV.2.2.5.c Construction d'un arbre de défaillances

La construction de l'arbre de défaillances repose sur l'étude des événements entraînants un événement redouté. Les deux étapes suivantes sont réalisées successivement en partant de l'E.R. et en allant vers les événements élémentaires.

a- Dans un premier temps définir l'événement redouté (l'événement intermédiaire, ou l'événement élémentaire) analysé en spécifiant précisément ce qu'il représente et dans quel contexte il peut apparaître.

b- Puis dans un deuxième temps représenter graphiquement les relations de cause à effet par des portes logiques (ET, OU) qui permettent de spécifier le type de combinaison entre les événements intermédiaires qui conduisent à l'événement analysé.

Pour pouvoir appliquer cette méthode il est nécessaire de :

- Vérifier que le système a un fonctionnement cohérent.
- Connaître la décomposition fonctionnelle du système.
- Définir les limites du système (le degré de finesse de notre étude dépend des objectifs).
- Connaître la mission du système et son environnement pour déterminer le ou les événements redoutés qui est nécessaire à étudier.
- Connaître les modes de défaillance des composants c'est par exemple en s'appuyant sur une analyse de type AMDEC que les branches de l'arbre pourront être construites.

IV.2.2.5.d Les règles de construction

- Expliciter les faits et noter comment et quand ils se produisent:
  - ✓ pour l'événement redouté,
  - ✓ pour les événements intermédiaires.
- Effectuer un classement des événements:
  - ✓ événement élémentaire représentant la défaillance d'un composant :
    - défaillance première,
    - défaillance de commande.
  - ✓ événements intermédiaires provenant d'une défaillance de composant,
  - ✓ événements intermédiaires provenant du système indépendamment du composant.
- Rechercher les " causes immédiates " de l'apparition de chaque événement intermédiaire afin d'éviter l'oubli d'une branche.
- Eviter les connexions directes entre portes car elles sont en général dues à une mauvaise compréhension du système ou une analyse trop superficielle.
- Supprimer les incohérences comme par exemple : un événement qui est à la fois cause et conséquence d'un autre événement.

IV.3.2. Programmation des les méthodes:

Il existe beaucoup environnements de développement visuel pour créer des applications par exemple(c++builder, netbeans, jbuilder, Delphi …etc.),et pour créer notre application on a choisi Delphi parce qu'il est un environnement de développement visuel trop puissant pour créer des applications véritablement natives et à hautes performances pour PC avec un contrôle et une sécurité renforcée ,des applications offrants une qualité supérieure d'expérience aux utilisateurs et ça avec un seul code source basé sur le langage pascal.

IV.3.3.Définition de Delphi

L'EDI Delphi est un EDI propriétaire fonctionnant sous Windows créé en 1995 et édité par Borland. À l'époque, créer des programmes graphiques sous Windows se faisait en grande majorité en utilisant soit la chaîne de compilation Visual C++, soit le RADVisual Basic. Le premier outil étant excessivement complexe et le second assez peu structuré, Delphi apparut alors comme une alternative viable pour beaucoup de développeurs qui souhaitaient créer des programmes standards pour Windows.

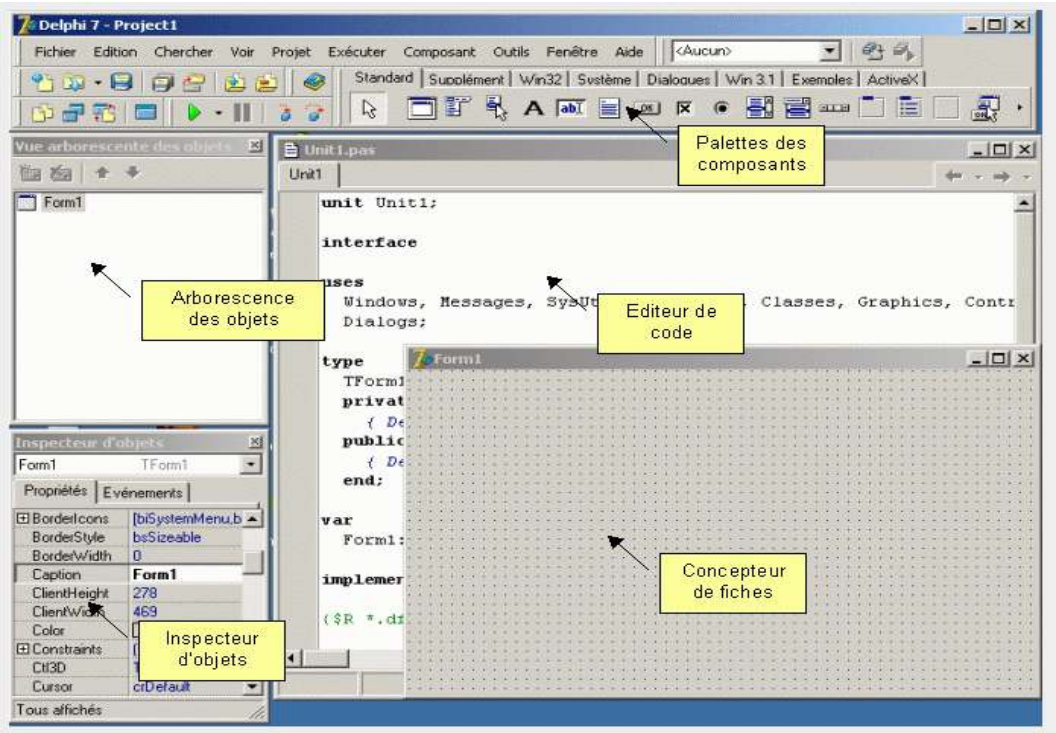
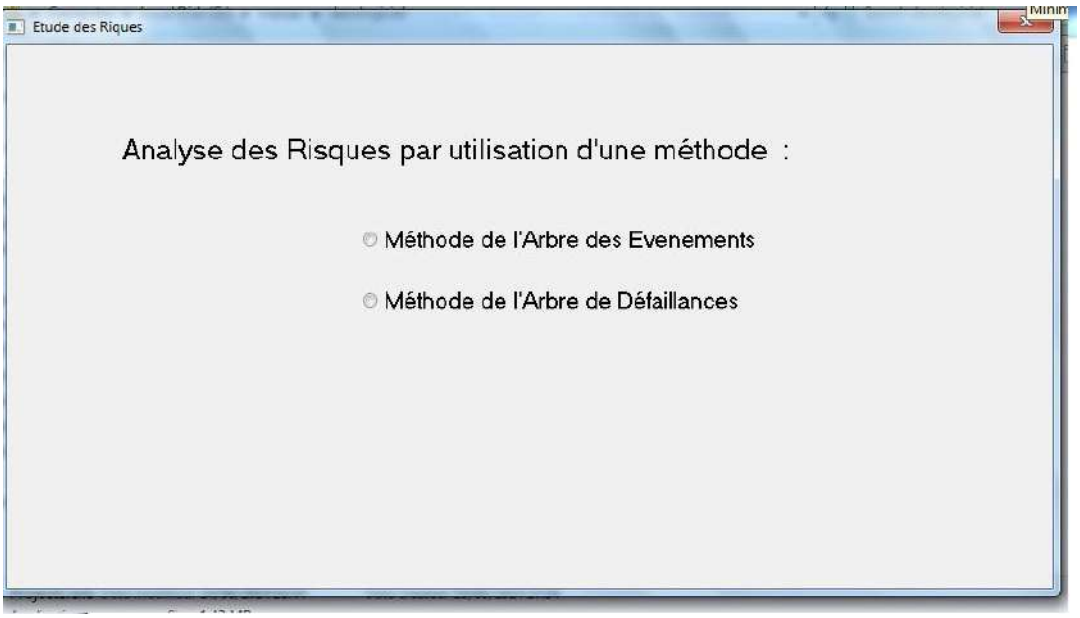


Figure. IV.37:INTERFACE DE DELPHI

IV.4.Interface de programme que calcul l'analyse de risque :



INTERFACE GENERALE POUR CHOIX DE LA METHODE D'ANALYSE

Chapitre .V.: Etude de cas

II.1. Arbre d'évènement pour le cas d'une érosion Interne d'un barrage en terre:

Barrage BOUTAIBA

-Commune MAGHRAOUA

-daïra :AL AZIZIA

-wilaya :MéDéa

II.1.Tableau des données:

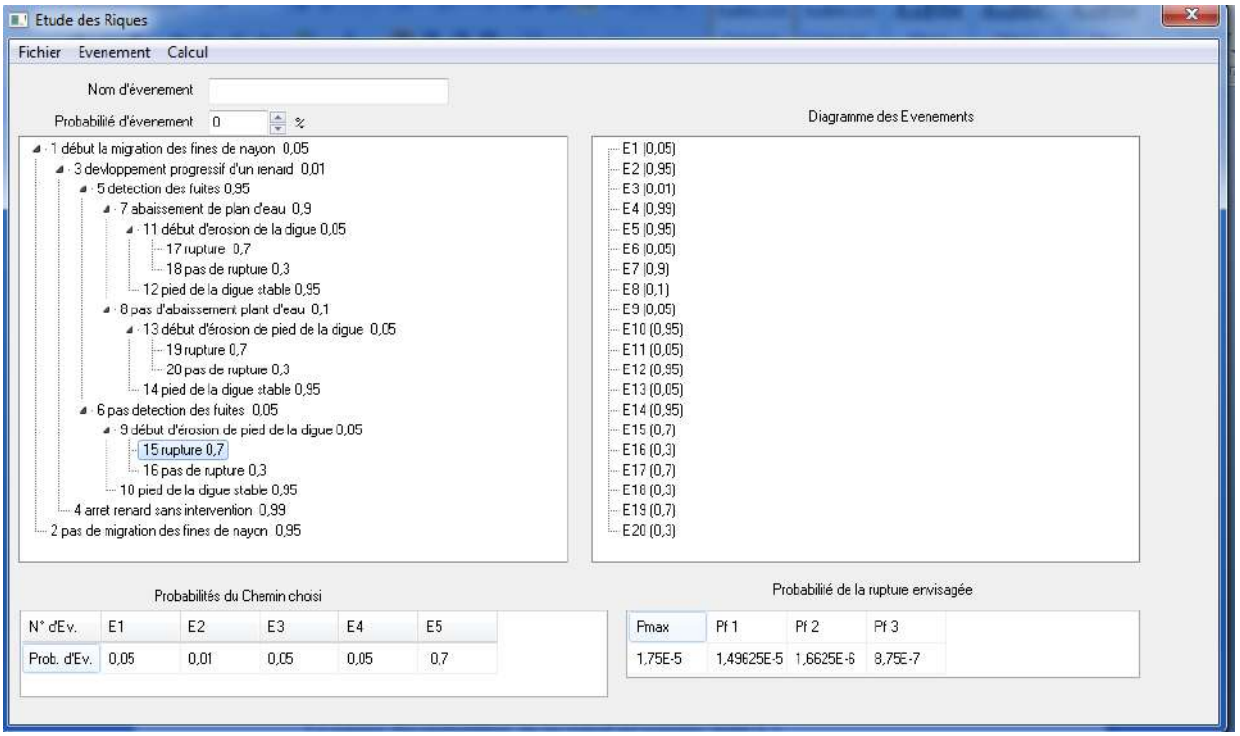
Les éléments	*Les noms des éléments :*	*Probabilité*		
		Scenario1	*Scenario2*	*Scenario3*
E1	*Début de la migration des fines de noyau*	*0 ,05*	*0,03*	*0,05*
E2	*Pas de migration des fines du noyau*	*0,95*	*0,97*	*0,95*
E3	*Développement progressif d'un renard*	*0,01*	*0 ,04*	*0,05*
E4	*Arrêt de renard sans intervention*	*0,99*	*0,96*	*0,95*
E5	*Détection de fuites*	*0,95*	*0,90*	*0,99*
E6	*Pas détection de fuites*	*0 ,05*	*0,10*	*0,01*
E7	*Abaissement de plan d'eau*	*0,90*	*0,95*	*0,85*
E8	*Pas abaissement de plan d'eau*	*0,10*	*0,05*	*0,15*
E9	*Début d'érosion de pied de la digue*	*0 ,05*	*0,01*	*0,03*
E10	*Pied de la digue stable*	*0,95*	*0,99*	*0,97*
E11	*Début da l'érosion du pied de la digue*	*0 ,05*	*0,05*	*0,06*
E12	*Pied de la digue stable*	*0,95*	*0,95*	*0,94*

E13	***Début d'érosion de pied de la digue***	***0 ,05***	***0,10***	***0,07***
E14	***Pied de la digue stable***	***0,95***	***0,90***	***0,93***
E15	***rupture***	***0,70***	***0,65***	***0,70***
E16	***Pas de rupture***	***0,30***	***0,35***	***0,30***
E17	***rupture***	***0,70***	***0,70***	***0,65***
E18	***Pas de rupture***	***0,30***	***0,30***	***0, 35***
E19	***rupture***	***0,70***	***0,65***	***0,70***
E20	***Pas de rupture***	***0,30***	***0 ,35***	***0,30***

II.1.1. Calcul et résultats

Pour l'étude de cas envisagé on considérera 03 scénarios :

Scenario 1 :



Interface de la méthode de l évènement avec un scenario 1

La somme des probabilités en un nœud est toujours égale à 1.

On calcul de la probabilité des différents types de rupture envisagés et le résultat est obtenu en multipliant les probabilités de tous les évènements :

$\mathbf{P_{f1}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_7\ P_{11}\ P_{17}=1,49.10^{-5}$

$\mathbf{P_{f2}}=P_1\ P_3 P_5\ P_8\ P_{13}\ P_{19}=1,7.10^{-6}$

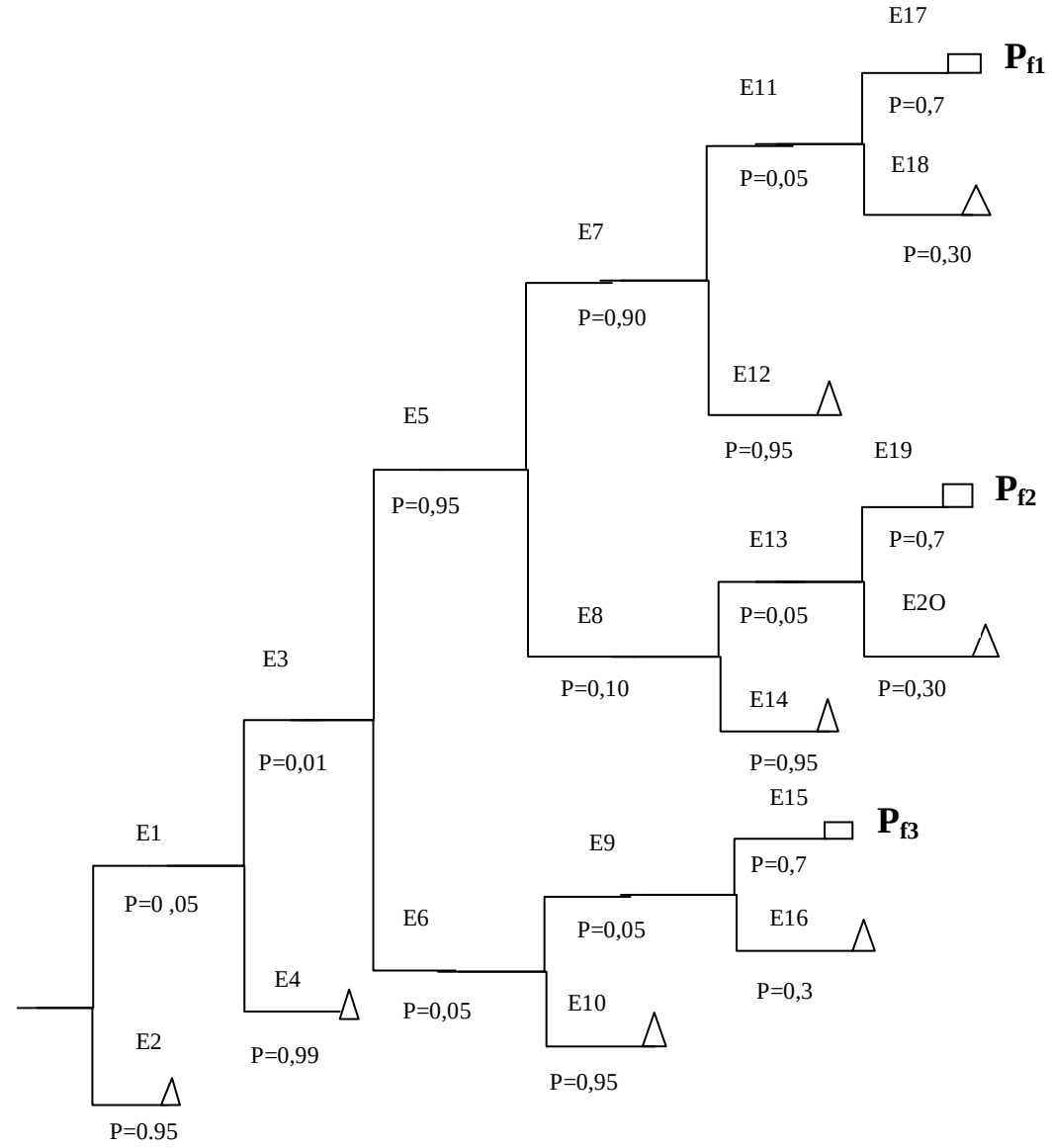
$\mathbf{P_{f3}}=P_1\ P_3 P_6\ P_9\ P_{15}=8,8.10^{-7}$

Probabilité de rupture (p_{max})

e rupture

$\mathbf{Pmax}=\sum p_{fi}=P_{f1}+P_{f2}+P_{f3}=1,75.10^{-5}$

$\mathbf{Pmax}=1,75.10^{-5}$



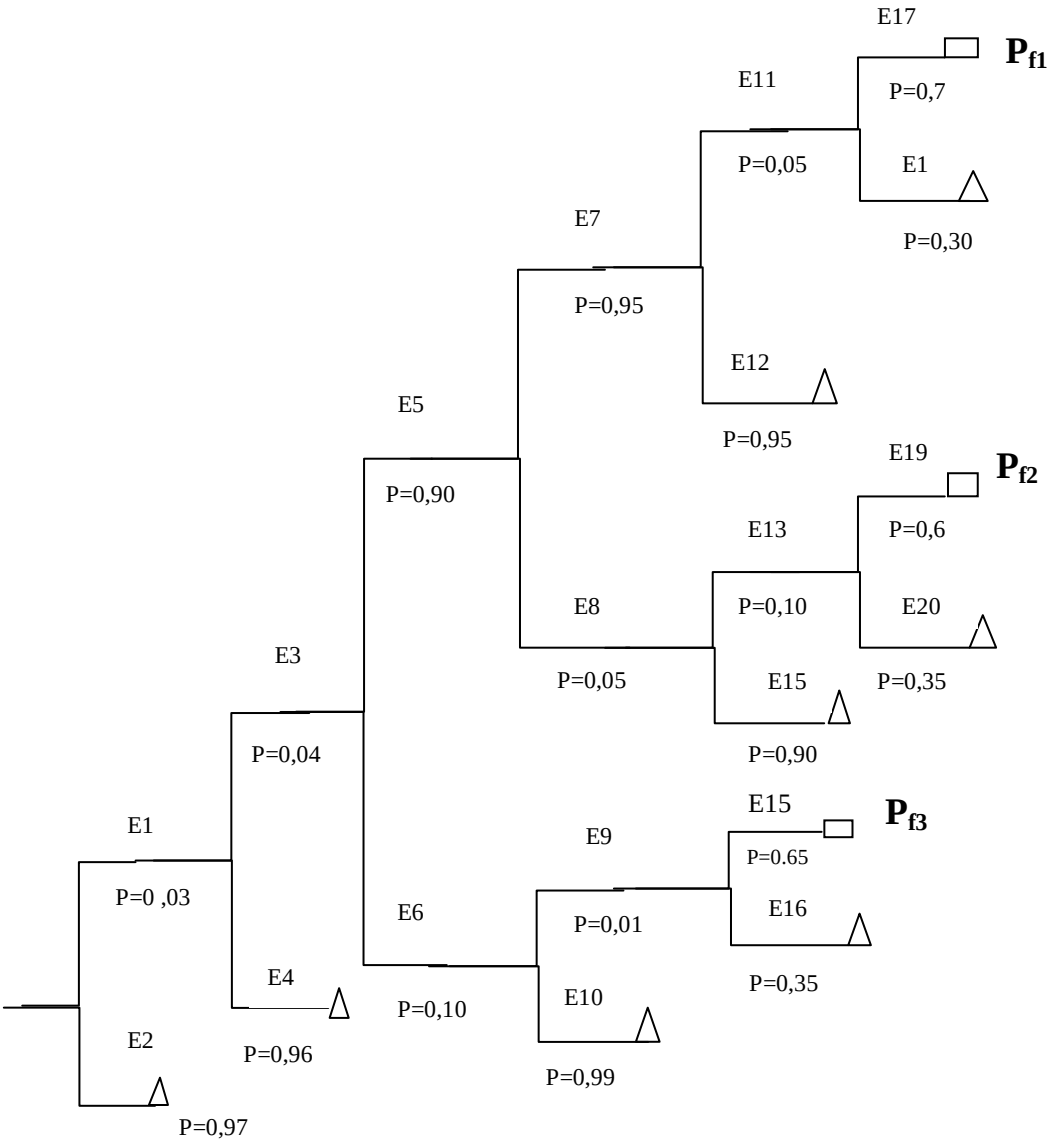
L'Arbre d'événement pour l état critique de érosion (scenario 1)

Scenario 2 :

$\mathbf{P_{f1}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_7\ P_{11}\ P_{17}=3{,}6\ .10^{-5}$

$\mathbf{P_{f2}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_8\ P_{13}\ P_{19}=3{,}5.10\text{-}6$

$\mathbf{P_{f3}}=P_1\ P_3\ P_6\ P_9\ P_{15}=7{,}8\ .10^{-7}$



L'Arbre d'événement pour l état critique de érosion (scenario 2)

Probabilité de rupture (p_{max})

$\mathbf{Pmax}=\sum \mathbf{p_{fi}}= \mathbf{P_{f1}}+ \mathbf{P_{f2}}+ \mathbf{P_{f3}}=4{,}03\ .10^{-5}$

Pmax=$4{,}03\ .10^{-5}$

△ Stable; ▭ rupture;

Scenario 3:

$\mathbf{P_{f1}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_7\ P_{11}\ P_{17}=8{,}2\ .10^{-5}$

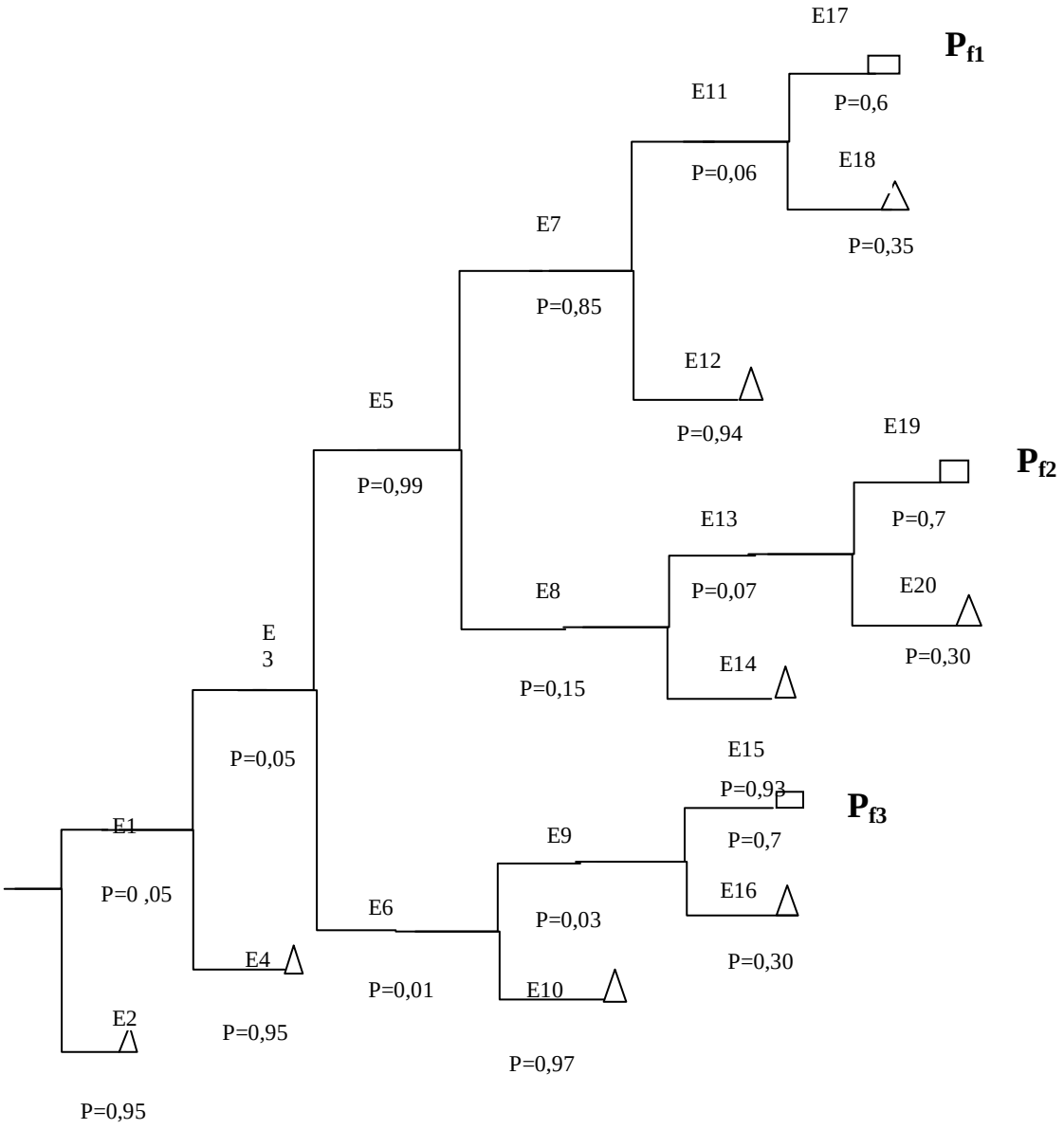
$\mathbf{P_{f1}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_8\ P_{13}\ P_{19}=1{,}8\ .10^{-5}$

$\mathbf{P_{f3}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_9\ P_{15}=5{,}3\ .10^{-7}$

Probabilité de rupture (p_{max})

$\mathbf{p_{max}}=\sum \mathbf{p_{fi}}= \mathbf{P_{f1}}+ \mathbf{P_{f2}}+ \mathbf{P_{f3}}=1{,}005\ .10^{-4}$

$\mathbf{p_{max}}=1{,}005\ .10^{-4}$



L'Arbre d'événement pour l état critique de érosion (scenario 3)

△ Stable ; ▭ rupture ;

Remarque :La probabilité annuelle de rupture est la somme des probabilités de rupture pour chacun des scénarios.

Résultat :

Le risque de rupture existe quand la probabilité est grande .dans notre cas dans le scénario 3.

*II.2.*Arbre défaillance pour le cas d'une érosion interne d'un barrage en terre

Barrage BOUTAIBA –

Commune MAGHRAOUA

-daïra : AL AZIZIA

-wilaya : Médéa :

Exemple d'application

Nous allons élaborer l arbre défaillance,

Défaillance a analyser (événement redouté) : rupture par érosion

Les causes intermédiaires sont Résistance à l'érosion et trop faible et Pression interstitielles excessive

Les couses probable possible a ci-dessous

II.2.Tableau des données d'événement élémentaire

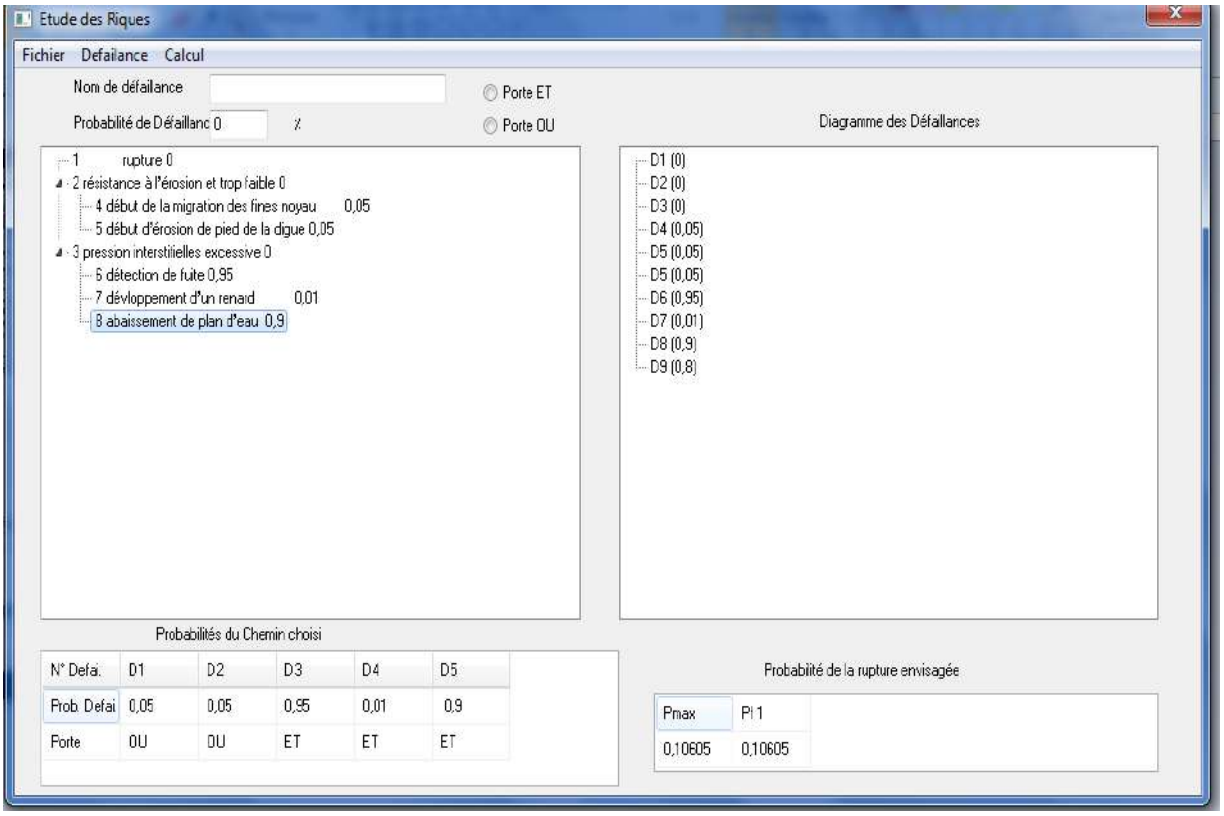
Les éléments	***Les noms des éléments***	***probabilité***		
		Scenario1	***Scenario2***	***Scenario 3***
D1	***Début de la migration des fines de noyau***	***0 ,05***	***0 ,03***	***0 ,04***
D2	***Développement d'un renard***	***0,01***	***0 ,04***	***0 ,15***
D3	***Détection de fuites***	***0,95***	***0 ,09***	***0 ,50***

D4	***Abaissement de plan d'eau***	***0,90***	***0 ,95***	***0 ,85***
D5	***Début d'érosion de pied de la digue***	***0 ,05***	***0 ,01***	***0 ,04***

II.2.2. Calcul et résultats

Pour l'étude de cas envisagé on considérera 03 scénarios :

Scenario 1 :



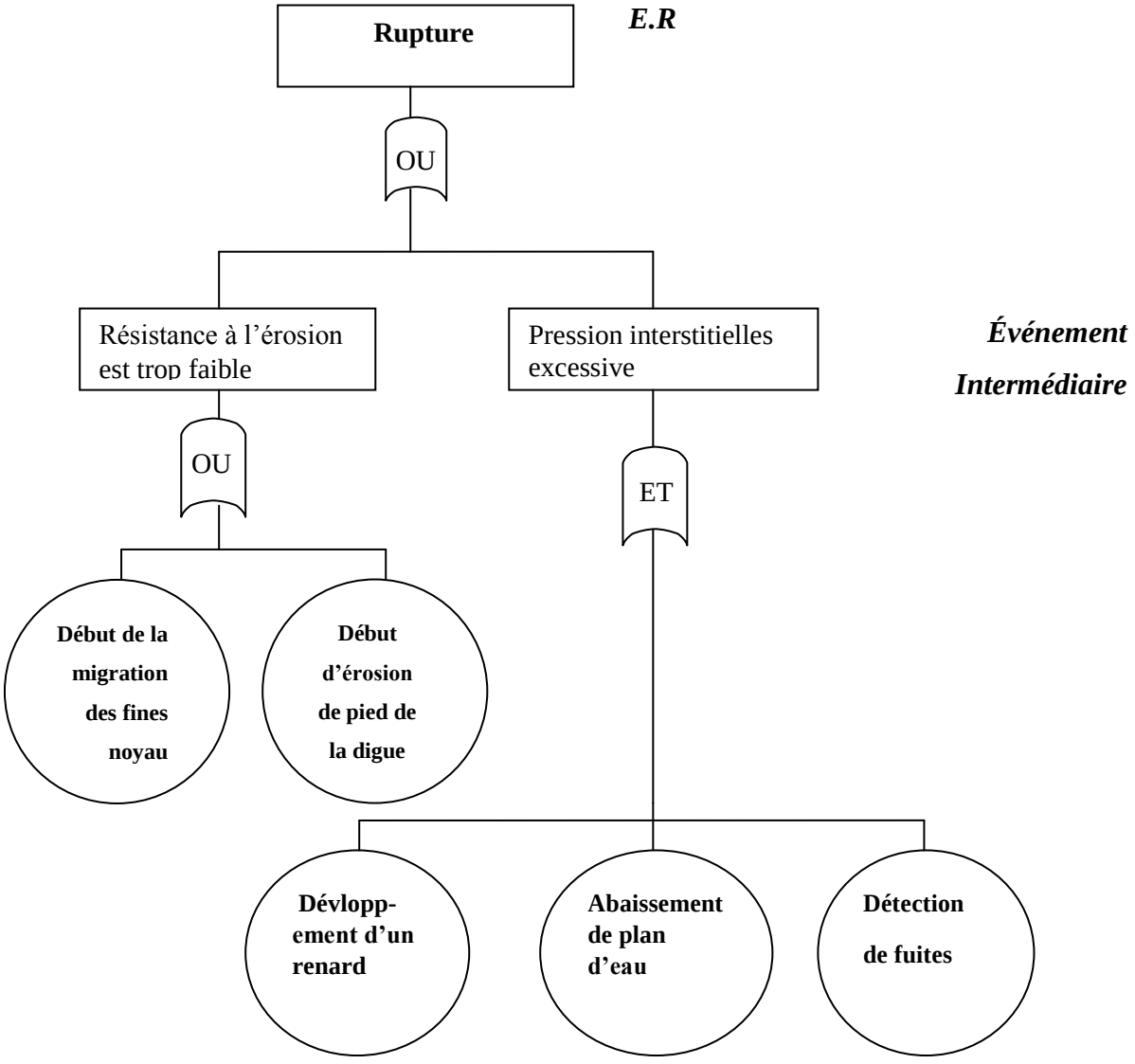
Interface de la méthode de la défaillance avec un scenario 1

On calcul de la probabilité des différents types de rupture envisagés et les résultats

Calcul D_F

$$Df = [(D1 + D5).(D1 * D5)] + (D2 * D3 * D4)$$

$$Df = [(0{,}05 + 0{,}05) - (0{,}05 * 0{,}05)] + (0{,}01 * 0{,}95 * 0{,}90) = 0{,}10605$$

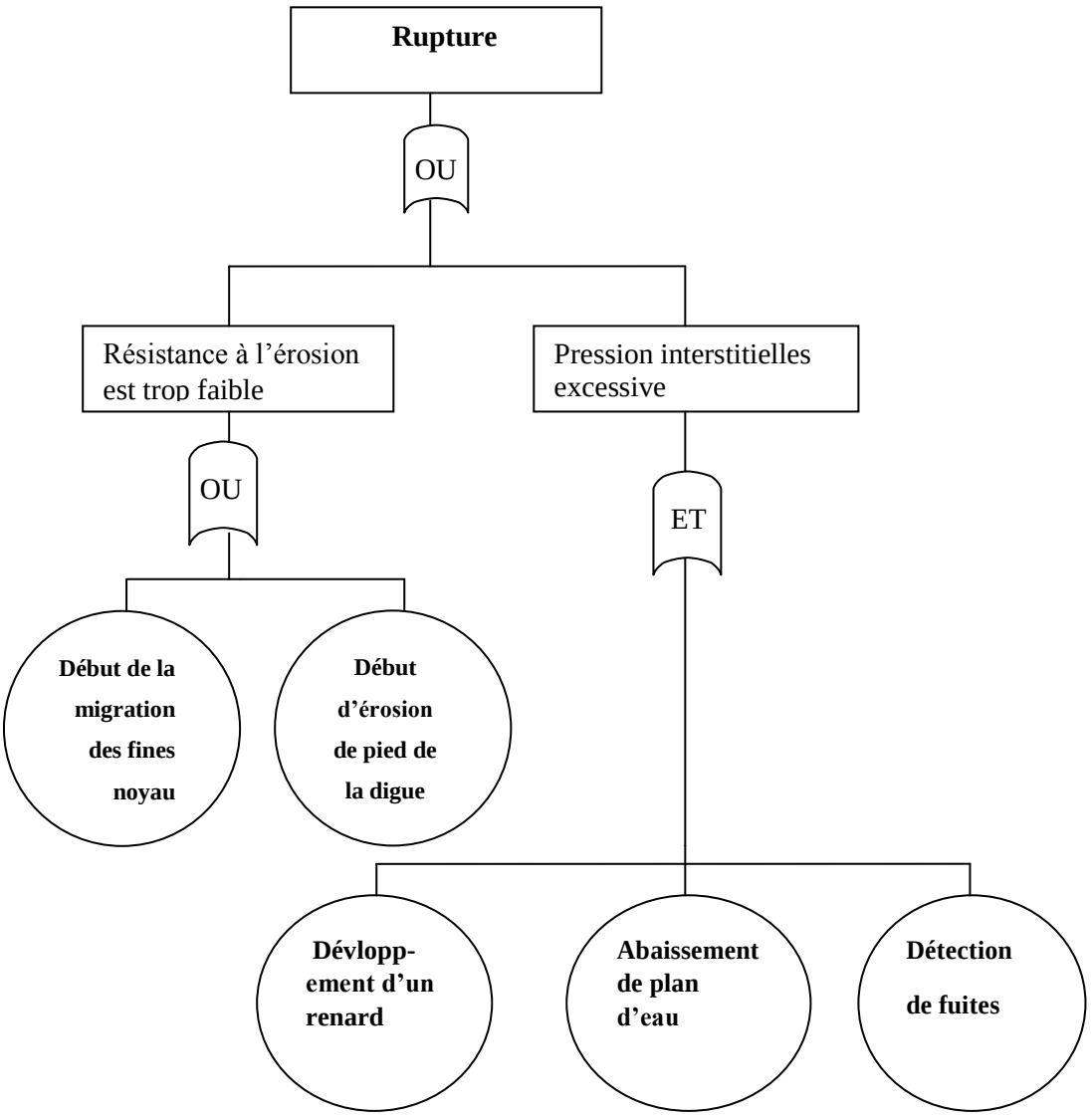


Arbre défaillance por l'etat critique d'érosion(scenarion 1)

Scenario2 :

$$Df = [(D1 + D5).(D1 * D5)] + (D2 * D3 * D4)$$

$$Df = [(0{,}03 + 0{,}01) - (0{,}03 * 0{,}01)] + (0{,}04 * 0{,}09 * 0{,}95) = 0{,}04312$$

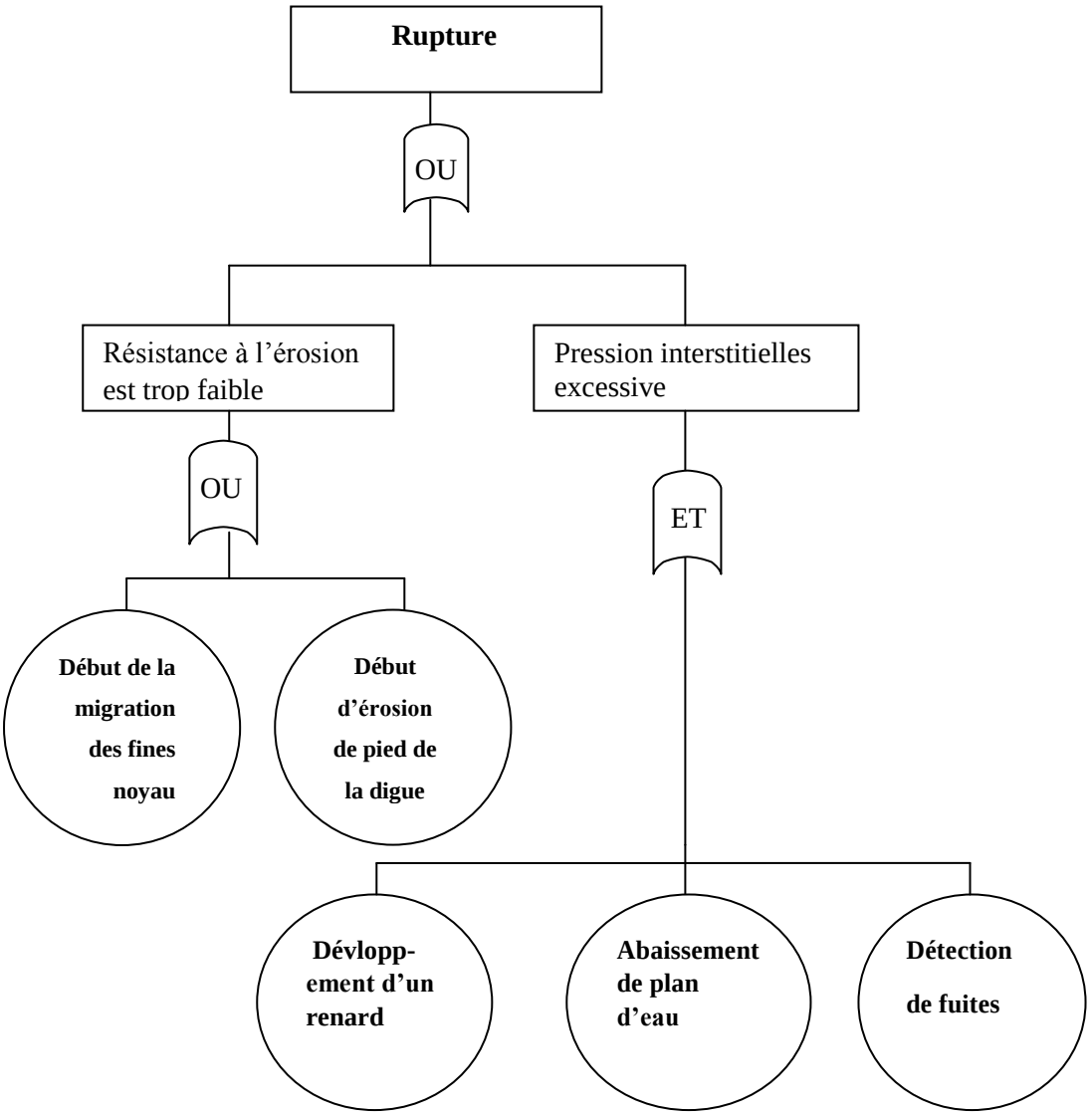


Arbre défaillance por l'etat critique d'érosion(scenarion 2)

Scenario 3

$$Df = [(D1 + D5).(D1 * D5)] + (D2 * D3 * D4)$$

$$Df = [(0{,}04 + 0{,}04) - (0{,}04 * 0{,}04)] + (0{,}15 * 0{,}50 * 0{,}85) = 0{,}14215$$



Arbre défaillance por l'etat critique d'érosion(scenarion 3)

Remarque **:** Le risque de rupture existe quand la probabilité est grande .dans notre cas dans Le Scénario 3

IV.5. Conclusion :

Finalement, compte tenu de la forte implication de l'expertise dans l'analyse quantitative, les mesures de sûreté de fonctionnement obtenues présentent un caractère intrinsèquement subjectif : elles peuvent ainsi être utilisées pour déterminer les scénarios de rupture et les composants les plus critiques pour un barrage donné, et à l'échelle d'un parc entier, les ouvrages les plus dangereux. Toutefois, elles peuvent difficilement être déplacées de leur contexte pour établir des comparaisons de risques avec des barrages d'un autre parc, voire d'autres systèmes du génie civil ou industriel.

la méthode de l'arbre défaillance, étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident (événement redoute).

La méthode de l'arbre d'événements est particulièrement utilisée dans le domaine de l'analyse après accidents en vue d'expliquer les conséquences observées résultant d'une défaillance du système.

L'analyse par l'arbre d'événements demande de déterminer les séquences d'opération qui conduisent aux conséquences.

CONCLUSION GENERALE :

Quelque soit le type de risques (naturels ou anthropiques), ces derniers sont devenus de vrais "soucis " pour les spécialistes et il ne se passe guère un jour sans l'annonce d'un accident menaçant des vies humaines ou notre environnement.

Ce mémoire comporte deux parties : une à caractère bibliographique, et l'autre à caractère analytique.

L'étude bibliographique réalisée en premier dans ce mémoire a révélé que :

- Le risque est une notion composite de l'aléa et la vulnérabilité.

-Les barrages sont parmi les ouvrages les plus importants qui peuvent être affectés par plusieurs états critiques. La surveillance et l'entretien restent les seuls moyens prévenants de risque.

- L'analyse du risque est l'utilisation des informations disponibles pour identifier les Phénomènes dangereux et estimer le risque. L'analyse des risques vise tout d'abord à identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou lesbiens. Et permet de mettre en lumière les barrières de sécurité existantes et de prévenir en cas d'apparition d'une situation dangereuse (barrière de prévention) ou d'en limiter les conséquences (barrière de protection).

- Les outils d'analyse des risques permettent d'estimer les risques en terme de probabilité et de gravité. Au niveau de l'analyse des risques, cette estimation est effectuée de manière simplifiée et ne doit pas être considérée comme un outil précis d'évaluation. Cette phase vise simplement à donner des indications sur les risques jugés à priori les plus importants en vue d'envisager de la manière la plus efficace possible, les mesures de prévention et de protection devant être engagées.

L'étude bibliographique réalisée en premier dans ce mémoire a révélé que :

- Le risque est une notion composite de l'aléa et la vulnérabilité. L'évaluation du risque : processus de comparaison du risque estimé à des critères de risque donnés pour déterminer l'importance du risque.

- La phase d'estimation des risques permet notamment d'identifier les risques les plus importants. Pour ces risques jugés les plus critique, une évaluation plus fine de la gravité demeure indispensable. Cette évaluation est effectuée à partir de scénarios d'accident et moyennant l'utilisation de modélisations plus ou moins complexe selon les phénomènes à traiter et l'environnement du site.

- Acceptation du risque : décision d'accepter et le choix des stratégies pour manager le risque.

L'approche analytique a été réalisée à l'aide de la méthode de l'arbre des événements et des défaillances

L'analyse par l'arbre de défaillances permet à partir d'un événement redouté, de déterminer les enchaînements d'événements ou combinaisons d'événements pouvant finalement conduire à cet événement. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté.

La méthode de l'arbre des événements est particulièrement utilisée dans le domaine de l'analyse après accidents en vue d'expliquer les conséquences observées résultant d'une défaillance du système. L'analyse par arbre d'événements suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les événements qui en découlent. La réalisation d'un arbre d'événements permet de déterminer la probabilité d'occurrence des différentes conséquences à partir des séquences identifiées.

- La probabilité d'occurrence d'une conséquence suite à une séquence particulière peut alors être estimée, pour des événements indépendants, comme le produit de la probabilité d'occurrence de l'événement initiateur et de la probabilité d'occurrence de l'événement selon le cheminement des événements intermédiaires.

- Pour cela on applique les deux méthodes sur les différents états critiques du barrage (submersion, l'érosion régressive, l'envasement, vieillissement, l'instabilité, la pollution…). Pour chaque état critique on cherche les causes des défaillances, ensuite on applique la notion de risque en terme

mathématique du coût des dommages et des probabilités d'occurrence d'un événement indésirable.

A partir de la méthode de l'arbre des événements on établit les différents scénarios qui pouvant conduire à une défaillance, ensuite on évalue la probabilité (Pi) d'apparition de chaque scénario, et les conséquences (Ci) pour chaque état critique.

- Pour chaque état critique on construit l'arbre des causes-conséquences, pour évaluer le risque indirect. Mais l'étude des causes de rupture du barrage ; c'est une étape clé pour réduire le risque à la source ou bien réduire la probabilité pour arriver à un risque. Par contre l'utilisation de la méthode des arbres des événements permet de réduire le risque en terme de coût.

- Après l'analyse des causes et conséquences des risques du barrage, on établit une étude de traitement de risque soit par :

_ Refus d'une situation à risque et s'en retirer ;

_ Prendre des décisions visant à minimiser les conséquences positives ;

_ partager avec une autre partie le bénéfice ou la perte engendrée par une situation à risque

_ accepter le bénéfice ou la perte engendrée par une situation à risque.

Pour ce travail on prend comme solution des décisions pour minimiser le risque associé aux barrages, est pour chaque état critique on cherche les paramètres des décisions pour minimiser le risque en terme de la probabilité.

- Mathématiquement, l'équation du risque total permet une analyse d'optimisation d'une même alternative et même le choix entre les alternatives ; si les différents coûts et les probabilités sont modélisés en fonction de l'information.

- Une autre solution pour minimiser le risque si la communication du risque : échange ou partage des informations concernant le risque entre le décideur et toute personne, groupe ou organisme susceptible d'affecter, d'être affecté ou de se sentir lui- même affecté par le risque.

- A la fin l'approche probabiliste de la sécurité d'un barrage, permet de dire que la sécurité absolue et le risque zéro n'existe pas quelque soit le type de l'ouvrage, seulement elle est beaucoup plus objective et réaliste comparée aux méthodes déterministes.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

[1]Adjim. H, et Bekkouche. A, 2004 : Qualité de l'information hydrologique et viabilité des aménagements hydrauliques : Cas de l'aménagement Souani (w. de Tlemcen).symposium international : Qualité et Maintenance au Service de l'Entreprise. QUALIMA01 – Tlemcen.

[2]Adjim. H, et Djedid. A, Bekkouche. A, 2005 : Sécheresse et transfert d'eau : Les causes de l'échec de l'aménagement Souani (Nord – Ouest de L'Algérie). XXIIIiemes Rencontres Universitaires de Génie Civil. Risque et Environnement.

[3]Danielle lautrin veillessemnet et rehabitation des petites barrages en terre cemagref edition

[4]comité de Registre Mondial des Grands Barrages, 1998

[5]Ginocchio, R. - Aménagements hydroélectriques. Eyrolles (1959).

[6]Bouvard, M. - Barrages mobiles et ouvrages de dérivation à partir de rivières transportant des matériaux solides. Eyrolles (1984).

[7]International Water Power and Dam Construction Magazine, 6 octobre 2009 « Under the influence - 60 most influential people in the industry »

[8]Paul Paradis1967 : Manic-Outardes, Montréal, Hydro-Québec

[9]J. C. J. Vlaar, A. J. Wesselink, 1990 Aménagement de conservation des eaux et des sols par digues filtrantes; expérimentations dans la région de Rissiam, Burkina Faso, 1986-1989. Tome I: Aspects techniques et agronomiques., Ouagadougou (BF), Comité Interafricain d'études hydrauliques,, 93-90 p.

[10]Christian Kert, 9 juillet 2008.La sécurité des barrages en question, Rapport de l'OPCEST (office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques),

[11] Ghassan. **Z, 2004** : Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages Thèse de Docteur En Génie Civil Hydro systèmes – Géotechnique, Institut National Polytechnique de Lorraine.

[12] Peyras. L, Royet. P, et Boissier. D, **2004** : Le risque en génie civile : les principaux concepts et les différentes approches d'analyse. Colloque Internationale en Génie Civil Tunisie..

[13] Bekkouche. A, **1987** : Sécurité des grands barrages en terre. Approche probabiliste des problèmes d'écoulement lies aux reconnaissances et contrôles.

[14] Institut National de L'environnement Industriel et des Risques, 200: Outils d'analyse des risques générés par une installation industriel.

[15] Henry. J-B, 2004 : Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine. Thèse de Doctorat. L'Université de StrasbourgI.

[16] Ministre de la Prévention des Pollutions et des Risques (M.P.P.R), **2004** :Les ruptures de barrages .www.ecologie.gouv.fr – www.prim.net.

[17] Comite Technique Permanent des Barrages, 1998: «Le barrage de Perrégaux, l'illustration N° 4423 du 10.12.1927, le s eaux déchaînées en Oranie »

[18] Solva and Delatte, 2003: Failure of the Teton dam, proceedings of the 3rd ASCE forensics congress. San diegsonia

[19] Bureau of Reclamation, Pacific Northwest Region 1998 «The faillure of Teton

[20] Comite International des Grands Barrages (1974) :«Leçons tirées des accidents de barrages, édition complète»

[21] Lino-ISL. M, 2001 : Techniques de réhabilitation modélisation des barrages

poids, 3éme Conférence Nationale Fiabilité des Matériaux et des Structure ‘‘JNfiab3’’, Bordeaux, février 2001.

[22] Durozoy. G, 1952 : La géologie et les problème de l’eau en algérie. XIX Congrès Géologiques International Alger.

dam», note d’information.

Thèse de Docteur, Ecole Centrale de paris.

[23] Ministère de l’Ecologie Nelly Olin, 2005 : Pas de pneus dans mon eau.

[24] Monteau. M, et Favaro. M, **1990** : Bilan des méthodes d’analyse a priori des risque : des contrôles à l’ergonomie des systèmes. Centre de recherche

[25] Monteau. M, et Favaro. M, **1990** : Bilan des méthodes d’analyse a priori des risque : principales méthodes de la sécurité des systèmes Centre de recherche de ’INRS Nancy.

de l’INRS Nancy.

[26] Goro. N, 2004: Etude de dangers – tome 4, dossier établissement – volume 01.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Rupture_de_barrage

http://fr.wikipedia.org/wiki/Rupture_de_barrage

http://www.risques majeur.fr/sites/www.rsquesmajeur.fr/files/photo-divers/barrag3.gpg

http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-de-rupture-de-barrage

ANNEXE :

Aléa : Probabilités d'un événement qui peut affecter le système étudié (naturel ou technologie).

Analyse par arbre d'événements : Technique qui établit les résultats éventuels (importance, séquence) d'un événement causatif.

Analyse de l'arbre des conséquences : Schéma logique arborescent qui permet de relier par une méthode inductive l'événement initiateur aux conséquences qu'il peut entraîner**.**

C'est une méthode inductive qui permet d'illustrer les conséquences intermédiaires et finales (par exemple, incendie ou explosion) qui peuvent survenir après l'apparition d'un événement initialement sélectionné (par exemple, une finité de produit inflammable.

Analyse par arbre de défaillance ou des causes : Schéma logique arborescent qui permet de relier par une méthode déductive l'événement indésirable (Etat critique) aux événements susceptibles de l'entraîner. C'est une méthode déductive qui permet de représenter les combinaisons logiques des différents états d'un système qui peuvent conduire à une situation aux conséquences particulières.

Analyse des conséquences: C'est une méthode qui permet d'illustrer les conséquences possibles résultant d'une combinaison logique d'événements sélectionnés.

Arbre des conséquences : Représente les combinaisons d'événements qui sont utilisés pour décrire la progression de l'état critique à travers une série de branches. Binaires.

Danger **:** Etat qui correspond aux préjudices potentiels d'un phénomène naturel sur les personnes**.**

Enjeux : Personnes, biens, équipements, environnement menacés par le risque et susceptibles de subir des préjudices ou des dommages.

Evénement : Une réalisation à effet indésirable et d'un certain degré de signification.

Probabilité : Une probabilité est la possibilité qu'un événement se produise. Aux fins de la planification d'activités, la probabilité peut être: Forte – il est fort possible que l'événement se produise au cours de l'année financière et presque certain qu'il aura lieu durant la période de planification Moyenne – il est peu probable que l'événement se produira au cours de l'année financière et possible qu'il se déroule durant la période de planification Faible – il est peu probable que l'événement se produira au cours de l'année financière ou de la période de planification

Renard : Phénomène d'érosion interne très dangereux qui est développé par une érosion régressive dans un conduit de l'aval vers l'amont.

Risque : C'est le coût des dégâts possibles (économiques, humains, environnement, etc.) pondérés par leur probabilité d'occurrence sur un temps donné (année ou durée de vie de l'ouvrage).

Scénario : Une succession d'événements, chacun étant la conséquence de l'autre.

Système : Ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction (Villemeur, 88), [Leyras. L, 2002].

Fréquence : Nombre d'événements précis au cours d'une période donnée ;