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

Projet de fin d'etude

Pour l'obtention du diplome de master II en Génie civil

Option: GEOTECHNIQUE

Théme

Analyse des risques liées aux Barrages

Préparée par :

- BEZAZ Raihana
- MOUZAOUI Meriem

Encadré par :

- M.Le Dr . MENAA El Azzizi

** Année universitaire 2012/2013 **

Résumé :

La démarche dans une analyse de risque est l'analyse de tout le système, de ses pathologies, des différentes actions auxquelles peuvent être soumis, des différents scénarios de ruine des ouvrages géotechniques tels que les barrages.

Dans la présente étude une approche analytique par la méthode de l'arbre des conséquences sur les barrages est appliquée. 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, méthodes, analyse de risque.*

Abstract

The approach to risk analysis is the analysis of the whole system, its diseases, different actions which may be subject to different scenarios of failure of geotechnical structures such as dams.

In this paper an analytical approach to the method of tree effects on dams is 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.

Keywords: *Dam decision, estimate, critical state, methods, risk analysis*

الملخص :

منهج تحليل المخاطر هو تحليل نظام برمته ، والإجراءات المختلفة التي قد تكون خاضعة لمختلف سيناريوهات فشل الهياكل الجيوتقنية مثل السدود.في هذه الدراسة يتم تطبيق النهج التحليلي بطريقة تأثيرات شجرة على السدود. هذا التحليل يسمح بتقدير المخاطر المرتبطة مع الظروف الحرجة المختلفة المباشرة وغير المباشرة التي تؤثر على عمل تحليلها.

المنهج الاحتمالي لسلامة السد والخطر صفر لا وجود لها، وبالإضافة إلى ذلك، فإنه هو أكثر بكثير من موضوعية وواقعية بالمقارنة مع الطرق التقليدية.

كلمات البحث: قرار سد، تقدير، حالة حرجة، والأساليب، وتحليل المخاطر

.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidées vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir données du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur Dr. manaa pour son précieux temps qu'il a consacré à notre écoute, à notre orientation et correction tout au long de notre projet.

Nous tenons à remercier : le président et les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

En fin nous remercions tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde après mon DIEU pour leurs sacrifices :
A Mes chers parents que dieu les garde et préserve.
A Ma grand mère que dieu la protège
A Mes frères surtout Amine qui m'a beaucoup aidée, et mes Sœurs
A toute la famille « Bezaz» sans exception.
Je remercie mon amie et binôme Meriem qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.
Mes amies intimes
A Tous mes collègues de la 2ème année master géotechnique.

RAIHANA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde
Après mon DIEU pour leurs sacrifices :
A Mes chers parents que dieu les garde et préserve.
A Mes frères et mes Sœurs
A toute la famille «MOUZAOUI» sans exception.
Je remercie mon amie et binôme Raihana qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.
A tous Mes amis intimes.
A Tous mes collègues de la 2ème année master géotechnique.

MERIEM

Sommaire :

CHAPITRE I : Les Barrages

Introduction générale : …….1

Premier partie :recherche bibliographique

Chapitre I: les barrages :

I.1. Définition de barrage :……4

I.2. Quelques exemples de grands barrages dans le monde :…… ...…..6

I.3. Types de barrages : ……..……6

I.3.1. Barrage poids :……..7

I.3.2 .Barrage en remblais…….……8

I.3.3. Barrage voûte ……...……7

I.3.4. Barrage contreforts ou multivoûtes :……..8

I.3.5. Barrages mobiles à aiguilles :……..9

I.3.6.Barrages mobiles à battant :……11

- **À battant ou porte à axe vertical,**
- **À battant à axe horizontal**
- **Barrage mobile à gravité**
- **Barrage mobile à clapets**

I.4. D'autres types de barrages :……..12

I.5. Entretien des barrages :…….13

CHAPITRE II : Les Risques des Barrages.

II.1. Qu'est ce que le risque de rupture de barrage ……..16

II.2. Etats critiques associés aux barrages……..……17

II.3. Les enjeux :…….…….…….…….19

II.4. La gestion du risque de rupture de barrage :…….19

II.4.1- La prévention :……...19

- **La surveillance constante du barrage**
- **L'information préventive de la population**

II.4.2- L'alerte :……...……..20

II.4.3- L'organisation des secours :…….20

II.4.4- L'indemnisation :…….…….21

II.5.La Sûreté de Fonctionnement dans le domaine des barrages. Exemple :……....……21

II.6. L'analyse fonctionnelle appliquée aux barrages :……..……22

II.7. Modélisation de la sûreté de fonctionnement des barrages :…..…….……..……23

II.8. Mesure de la sûreté de fonctionnement des barrages :…..……25

II.9. Synthèse et conclusions d'une étude de sûreté de fonctionnement de barrage :…..…27

II.10 .STATISTIQUE SUR LES ACCIDENTS DES BARRAGES :……...……..27

II.10.1. Quelques ruptures graves :…….27

II.10.2. Causes de rupture :..……29

II.10.2.1. Problèmes techniques :.……29

II.10.2.2. Causes naturelles :...…….30

II.10.2.3. Causes humaines :..……...30

II.10.3. Types de rupture :……...30

II.10.4.ETAT CRITIQUE DE LA SUBMERSION :……31

II.10.4.1. Identification du barrage :…….…….31

II.10.4.2. Rupture de barrage Fergoug I en 1881 :……...…32

II.10.4.3. Rupture de barrage Fergoug II en 1927 :……..32

II.10.5. Etat critique DE L'EROSION REGRESSIVE :……..35

II.10.5.1. Caractéristique du barrage :……..35

II.10.5.2. Rupture du barrage de Teton :……..35

II.10.5.3. Causes de rupture :…….……36

II.10.6. ETAT CRITIQUE DE L' INSTABILITE :…….37

II.10.6.1.Rupture de barrage Malpasset 1959 :…….……37

II.10.6.2. Causes de rupture de Malpasset :…….……..38

II.10.6.2.a. Fondation du barrage :……..……..38

II.10.6.2.b. Conditions d'exploitation :……..39

II.10.7. Etat critique de vieillissement :…….……39

II.10.7.1. Caractéristique de barrage Beli Iskar :….....40

II.10.7.2. Causes de vieillissement :……..……..40

II.10.8. Etat critique DE L'ENVASEMENT :…….…….…...42

II.10.8.1.Construction :…….…….…. 42

II.10.8.2. Comportement après la mise en eau :……..…….….43

II.10.8.3. Travaux de consolidation :……44

II.10.8.4. Envasement :…….……...44

II.10.9. ETAT CRITIQUE DE LA POLLUTION D'UN RESERVOIR :…….…….45

II.10.9.1. Barrage Mervent en France :……..45

II.10.9.1.a. Caractéristiques techniques :……45

II.10.9.1.b. Usages :……..……45

II.10.9.1.c. Nature de pollution :……..……45

II.10.9.2. Barrage de Hammam Boughrara en Algérie :…….....….46

II. 10.9.2.a. Caractéristique du barrage de Hammam Boughrara :……46

II. 10.9.2.b. Pollution du barrage hammam Boughrara, (d'après Benadda. L,2004) :……..……..48

II .10.10. ETAT CRITIQUE DE L'ABSENCE DES INFORMATIONS HYDROLOGIQUES :……49

II.10.10.1. Aménagement de Souani :…….……..…49

II. 10.10.2. Causes de l'échec :……..…50

II. 11. Le risque de rupture de barrage en France et dans le monde :…….……50

II.12. CONCLUSION :……...……..51

CHAPITRE III : Analyse de risques. Méthodes.

III.1. Introduction ……..……..52

III.2. DEFINITION D'ANALYSE DES RISQUES ……..……52

III.3. DEMARCHES «INDUCTIVE» ET «DEDUCTIVE»…….54

III.3.1. Spécificité et complémentarité des deux démarches……...…..55

III.3.2. Sécurité de système……...……56

III.3.2.1. Connaissance du système…….……56

III.3.2.2. Identification des risques présentés par le système…….……..57

III.3.2.3. Modélisation de la logique de fonctionnement et des défaillances du système…….……57

III.3.2.4. Analyse qualitative et quantitative…….……58

III.**4. Quelques méthodes d'analyse de risques…….……59**

III.4.1. Analyse préliminaire des risques (APR)……..……59

III.4.1.1. Présentation…….59

III.4.1.2. Arbres logiques…….……60

III.4.1.3. Méthodologie d'analyse préliminaire des risques…….…….61

III.4.1.4. Limites et avantages de l'APR……62

III.4.2. Analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE et AMDEC)……...……62

III.4.2.1. Méthodologie de la A.M.D.E.C…….…….63

III.4.2.2. Limites et avantages de l'AMDEC…….……63

III.4.3. La méthode « Hazop »……..……..64

III.4.3.1. Historique et domaine d'application de la méthode…….……64

III.4.3.2. Principe de Hazop…….……64

III.4.3.3. Méthodologie de l'Hazop……..65

III.4.3.4. Limites et avantages de Hazop…….…...66

III.4.4. La Méthode « What – If ? »……..….66

III.4.5. Arbre des défaillances (ADD) ou l'Arbre des Causes (MAC)…….…..67

III.4.5.1. Historique et domaine d'application de l'ADD……67

III.4.5.2. Principe de l'ADD……..……..67

III.4.5.3. Méthodologie de l'arbre de défaillance…….……..69

III.4.5.4. Limites et avantages de l'ADD…….70

III.4.6. Arbre des événements……70

III.4.6.1. Historique et domaine d'application de l'ADE……..70

III.4.6.2. Principe de l'ADE…….……71

III.4.6.3. Méthodologie de l'arbre des conséquences de l'ADE…….71

III.4.6.4. Limites et avantages de l'ADE…….……72

III.4.7. Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences……...73

III.4.7.1. Historique et domaine d'application de la méthode Nœud papillon……..73

III.4.7.2. Principe de la méthode Nœud papillon……..….73

III.4.7.3. Méthodologie du diagramme causes-conséquences…….……..75

III.4.7.4. Limites et avantages de la méthode Nœud papillon…….…….75

III.4.8. Méthode du diagramme de Succès (MDS)…….……76

III.4.9. Méthode de Table de Vérité (MTV)……76

III.4.10. Méthode des combinaisons de pannes résumées (MCPR) …….77

III.5. CONCLUSION…….78

Deuxième partie : analyse de risque d'un barrage

CHAPITRE IV : Etude de Cas

IV.1.Introduction……79

IV.2. Méthode de calcul utilisée ……79

IV.3. Démarche ……80

IV.3.1.Méthode ……80

IV. 3.2.Programmation de la méthode……82

- **Description de l'outil de développent (Visual studio)**
- **Description programme développé («ANRYS ») :**

IV.4.Etude de cas : arbre d'évènement pour le cas d'une érosion interne d'un barrage en terre……85

IV.4.1.Tableau des données……85

IV.4. 2. Calcul et résultats……86

IV.5.Conclusion……90

CONCLUSION GENERALE……91

Liste de tableau :

Tableau.1.Dénombrement des accidents observés aux USA au 19éme et début du 20éme siècle……...……17

Tableau.2.AMDE (extrait) relative à la fondation amont injectée d'un barrage poids…….....…..…….23

Tableau.3.Probabilités annuelles de rupture de trois barrages norvégiens selon trois scénarios…….……26

Tableau.4. Les accidents les plus graves entre 1959 et 1987 ……..……27

Tableau.5. Les caractéristiques principales du barrage Fergoug …….....30

Tableau.6. Caractéristiques principales du barrage …….....…… 39

Tableau.7. Résultats d'essais de mesure de la résistance à la compression…….……..40

Tableau.8. : La capacité théorique du barrage……..….41

Tableau.9. : La capacité théorique et la capacité réelle du barrage …….……..……..44

Tableau.10. : Caractéristiques du barrage Hammam Boughrara ……..……..……46

Liste de figure :

Figure.1. Le barrage de la Grande-Dixence……..4

Figure.2.Le barrage de Mattmark……..6

Figure.3. le barrage de l'Hongrin……7

Figure.4. le barrage Daniel-Johnson …….8

Figure.5. Système Poirée……...….8

Figure.6 . À battant ou porte à axe vertical……..10

Fig. 7. Accumulation de débris naturels et anthropiques contre le mur d'un barrage……..…12

Fig. 8.Les restes du barrage de Malpasset, détruit le 2 décembre 1959……13

Figure .9. Analyse structurelle d'un barrage en remblai à noyau central……21

Figure.10. Scénario de rupture d'un barrage en remblai modélisé par la méthode des arbres d'événements……24

Figure.11. Evaluation des scénarios de défaillance d'un aménagement hydraulique constitué de deux barrages en remblai par arbre d'événements……25

Figure.12.Étapes génériques de l'appréciation des risques……53

Figure.13. Rapprochement entre l'axe du déroulement des événements et les deux modes d'analyse du système……55

Figure.14.Étape de la sécurité des systèmes (Signoret et Leroy, 1986)……58

Figure.15. Présentation sous forme d'arbre logique des données issues de l'analyse préliminaire des risques (Lievens, 1976)……69

Figure .16. La méthodologie d'analyse préliminaire des risques……69

Figure.17. La méthodologie AMDEC……..71

Figure.18 La méthodologie de l' HAZOP……73

Figure.19. La méthodologie de l'arbre des causes…….77

Figure.20.Arbre des causes générique pour une fuite…….77

Figure.21. La méthodologie de l'arbre de l'évènement……..80

Figure.22. Un exemple d'un arbre d'événement……..80

Figure.23.Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon……..82

Figure.24.La méthodologie de l'analyse des causes – conséquences……83

Figure.25 Schématisation d'un arbre d'événement - inspirée de (Mortureux, 01)… ……88

Fig.26Visual studio……91

Fig.27.programe (ANRYS) …….92

Référence :

- COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. *Analyse par arbre de panne*, [CEI 1025], Genève, CEI/IEC, octobre 1990.
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures: Second Edition with Worked Examples*, Wiley–American Institute of Chemical Engineers, New York, N.Y., 1992.

Logiciel : *FaultEase*, v 2.0, Arthur D. Little, Cambridge

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] American Nuclear Society, 1983: (PRA) Probabilistic risk assessment. Guide: A guide to the performance of probabilistic risk assessment for nuclear power plants.NUREG/CR.2300. US Nuclear Regulatory Commission, Washington.

[4] Andersen. G. R, Chouinard. L. E, and Al. 2001: Risk indexing tool to assist in prioritizing improvements to embankment dam inventories. Journal of Geotechnical and Geo- environmental Engineering.

[5] Ang. A, Tang. W, 1984: Probability concepts in engineering planning and design. Volume II, Decision, Risk and Reliability.

[6] Ayyub. B. M, et Beach. J. E, et al. 2001: Risk analysis and management for marine systems. International cooperation on marine engineering systems. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

[7] Bekkouche. A, **1987** : Sécurité des grands barrages en terre. Approche probabiliste des problèmes d'écoulement lies aux reconnaissances et contrôles. Thèse de Docteur, Ecole Centrale de paris.

[8] Bekkouche A. 1991 « Les grands barrages, incidents et enseignements », Journées d'étude sur les barrages, Institut de génie civil, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, le 30 et 31Mai.

[9] Benadda. L, 2004 : Etude de la pollution du bassin versant de l'oued Mouillah

(haut Tafna). Thèse de Magister d'Hydraulique. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
[10] Bourdarot. E, 2001 : Analyse du comportement à long terme des barrages voûtes. 3éme Conférence Nationale Fiabilité des Matériaux et des Structure ''JNfiab3'', Bordeaux, Février 2001.
[11] Bruno. M, et Cyril. N, 2000 : Les risques dans la conduite de projet: généralités et exploration de la méthode MMR. Ecole des Mines de Saint Etienne.
[12] Bureau of Reclamation, **2003**: Dam Safety Risk Analysis Methodology.
[13] Bureau of Reclamation, Pacific Northwest Region 1998 «The faillure of Teton dam», note d'information.
[14] Colin. F, 2000: Approche spatiale de la pollution chronique des eaux de surface par les produits phytosanitaires cas de l'atrazine dans le bassin versant du Sousson (Gers, France). Thèse de Doctorat. L'Unité Mixte de Recherche CEMAGREFENGREF « Structures et Systèmes spatiaux », Montpellier.
[15] Comite International des Grands Barrages (1974) :«Leçons tirées des accidents de barrages, édition complète»
[16] Comite International Grands Barrages, 2001: Non-structural risk reduction measures. Benefits ad costs for dams.
[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] Costet J et Sanglerat. G, 1975 : Cours pratique de mécanique des sols tome I plasticité et calcul des tassements. Paris
[19] Costet. J et Sanglerat. G, 1975 : Cours pratique de mécanique des sols tome II calcul des ouvrages. Paris.
[20] Degoutte. G, 2002 : Petits barrages recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Comité Français des Grands Barrages.
[21] Degoutte. G, et Royet. R, 2005 : Aide mémoire de mécanique des sols. La publication de l'ENGREF.
[22] Durozoy. G, 1952 : La géologie et les problème de l'eau en algérie. XIX Congrès Géologiques International Alger.
[23] Ezell. B. C, Farr. J. V. al, 2000: Infrastructure risk analysis model. Journal of Infrastructure Systems.
[24] Fasan. L, 2005 : Management des risques appliquée à la gestion de projet.
[25] Favre. J, **1986** : Analyse de la sécurité : fiabilité – risque. Ecole Centrale Paris.
[26] Favre. J, 2004 : Géotechnique sécurité des ouvrages risques modélisation de l'incertain, fiabilité et analyse des risques. Ecole Central Paris
[27] Gagliardini. O, 2004: Principe généraux du dimensionnement des ouvrages. IUP Génie Civil et Infrastructure. UJF. Grenoble.
[28] Ghassan. **Z, 2004** : Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages Thèse de Docteur En Génie Civil – Hydrosystèmes – Géotechnique, Institut National Polytechnique de Lorraine.
[29] Groupement Français Des Associations Du Génie Civil, 2000 : Risque et génie civil. Colloque.
[30] Goro. N, 2004: Etude de dangers – tome 4, dossier établissement – volume 01.
[31] Guide Maghrebien pour l'Execution des Etudes et des Travaux de Retenues Collinaires 1987: resources en eau dans le pays de l'Afrique du Nord.
[32] Gunzburger. Y et Zornette. N, 2000: Rapport de semaine départementale. Ecole de Mines de Nancy.
[34] Henry. J-B, 2004 : Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine. Thèse de Doctorat. L'Université de Strasbourg I.

Site web

[1]http://vulcan.wr.usgs.gov/volcanoes/MSH/NatMonument/PointsInterest/swift_reservoir.html.
[2] www.ferc.gov/eventcalendar/Fils/20060315105753-opening.

Chapitre 2 ETATS CRITIQUES ASSOCIES AUX BARRAGES

Chapitre I : Les Barrages

I.1. Définition de barrage :

I .2- Quelques exemples de grands barrages dans le monde :

I.3.Types de barrages :

I.3.1. Barrage poids

Fig. Le barrage de la Grande-Dixence

I.3.2 .Barrage en remblais

Fig. Le barrage de Mattmark

I.3.3. Barrage voûte

Fig. le barrage de l'Hongrin

I.3.4. Barrage contreforts ou multivoûtes

Fig. le barrage Daniel-Johnson

I.3.5. Barrages mobiles à aiguilles

Fig. Système Poirée

I.3.6.Barrages mobiles à battant

À battant ou porte à axe vertical,

Fig. À battant ou porte à axe vertical

À battant à axe horizontal

Barrage mobile à gravité,

Barrage mobile à clapets,

I.3. D'autres types de barrages

I.4. Entretien des barrages

Fig. Accumulation de débris naturels et anthropiques contre le mur d'un barrage.
Fig. Les restes du barrage de Malpasset, détruit le 2 décembre 1959.

Chapitre II : Les Risques des Barrages.

II.1. Qu'est ce que le risque de rupture de barrage ?

II.2- Etats critiques associés aux barrages

Tableau 2.1 : Dénombrement des accidents observés aux USA au 19éme et début du 20éme siècle [26]

II.3. Les enjeux

II.4. La gestion du risque de rupture de barrage

II.4.1- La prévention

La surveillance constante du barrage

L'information préventive de la population

II.4.2- L'alerte

II.4.3- L'organisation des secours

II.4.5- L'indemnisation

II.5- La Sûreté de Fonctionnement dans le domaine des barrages. Exemple.

II.6. L'analyse fonctionnelle appliquée aux barrages

Figure 4. Analyse structurelle d'un barrage en remblai à noyau central (Peyras et al., 06b)

II.**7. Modélisation de la sûreté de fonctionnement des barrages**

Tableau ?? : AMDE (extrait) relative à la fondation amont injectée d'un barrage poids (Peyras et al., 06b)

Figure7 Scénario de rupture d'un barrage en remblai modélisé par la méthode des arbres d'événements

II.**8. Mesure de la sûreté de fonctionnement des barrages**

Figure 8. Evaluation des scénarios de défaillance d'un aménagement hydraulique constitué de deux barrages en remblai par arbre d'événements (Cea, 00)

Chapitre III : Analyse de risques. Méthodes.

III.1. Introduction

III.2. DEFINITION D'ANALYSE DES RISQUES

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

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

3.1. Spécificité et complémentarité des deux démarches

Figure 3.1 : Rapprochement entre l'axe du déroulement des événements et les deux modes d'analyse du système [52].

3.2. Sécurité de système

3.2.1. Connaissance du système

3.2.2. Identification des risques présentés par le système

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

3.2.4. Analyse qualitative et quantitative

Figure 3.2 : Étape de la sécurité des systèmes (Signoret et Leroy, 1986), cité par [5].

4. Quelques méthodes d'analyse de risques

4.1. Analyse préliminaire des risques (APR)

4.1.1. Présentation

4.1.2. Arbres logiques

Figure 3.3 : Présentation sous forme d'arbre logique des données issues de l'analyse préliminaire des risques (Lievens, 1976), cité par [53].

4.1.3. Méthodologie d'analyse préliminaire des risques

Figure 3.4 : La méthodologie d'analyse préliminaire des risques

4.1.4. Limites et avantages de l'APR

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

4.2.1. Méthodologie de la A.M.D.E.C

Figure 3.5 : La méthodologie AMDEC

4.2.2. Limites et avantages de l'AMDEC

4.3. La méthode « Hazop »

4.3.1. Historique et domaine d'application de la méthode

4.3.2. Principe de Hazop

4.3.3. Méthodologie de l'Hazop

Figure 3.6 : La méthodologie de l' HAZOP.

4.3.4. Limites et avantages de Hazop

4.4. La Méthode « What – If ? »

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

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

4.5.2. Principe de l'ADD

4.5.3. Méthodologie de l'arbre de défaillance

Figure 3.7 : La méthodologie de l'arbre des causes

Figure 3.8 : Arbre des causes générique pour une fuite,

4.5.4. Limites et avantages de l'ADD

4.6. Arbre des événements

4.6.1. Historique et domaine d'application de l'ADE

4.6.2. Principe de l'ADE

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

Figure 3.9: La méthodologie de l'arbre de l'évènement

Figure 3.10 : Un exemple d'un arbre d'événement, [36].

4.6.4. Limites et avantages de l'ADE

4.7. Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences

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

4.7.2. Principe de la méthode Nœud papillon

Figure 3.11 : Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du noeud papillon, [36].

4.7.3. Méthodologie du diagramme causes-conséquences

Figure 3.12 : La méthodologie de l'analyse des causes - conséquences.

4.7.4. Limites et avantages de la méthode Nœud papillon

4.8. Méthode du diagramme de Succès (MDS)

4.9. Méthode de Table de Vérité (MTV)

4.10. Méthode des combinaisons de pannes résumées (MCPR)

5. CONCLUSION

INTRODUCTION GENERALE

Quasiment depuis l'antiquité les êtres humains ont toujours cherché à lutter contre les risques de la nature et à travers l'histoire nous pouvons bien remarquer que l'homme s'est servi de la science comme moyen de défiance.

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.

Quelque uns 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 causes et conséquences), sur les barrages pour estimer les risques direct et indirect 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, six 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 d'une méthode (arbre d'événement) avec un programme qui peux nous aidé pour simplifié la méthode.

Chapitre I : Les Barrages

I.1. Définition de barrage :

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à réguler le débit du cours d'eau et/ou à en stocker l'eau pour différents usages tels que : contrôle des crues, irrigation, industrie, hydroélectricité, pisciculture, réserve d'eau potable, etc.

Par extension, on appelle barrage tout obstacle placé sur un axe de communication et destiné à permettre un contrôle sur les personnes et 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.

Les barrages existent probablement depuis la préhistoire (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures).

D'après N. Schnitter-Reinhardt, le plus ancien barrage connu serait un barrage poids construit près de Jawa, en Jordanie, vers la fin du 4e millénaire avant J.-C. Hérodote cite un barrage construit par le pharaon Ménès, fondateur de la première dynastie, à Kosheish, pour alimenter la ville de Memphis. Un barrage d'une longueur de 115 mètres fut construit dans la vallée de Garawi en Égypte vers 3000 av. J.-C.

La première rupture de barrage connue est celui de Sadd El Kaffara, sur le Wadi Garawi, 30 km au sud du Caire. Elle se serait produite entre 2650 et 2465 avant J.-C. C'est probablement la rupture de ce barrage qui en a arrêté la construction pendant un millénaire.

En 560 après. J.-C., l'historien byzantin Procope de Césarée faisait mention d'un barrage-voûte en amont en maçonnerie (barrage de Daras).

Les Romains ont construit des barrages : par exemple, deux barrages en Espagne, dans la région de Mérida, les barrages de Proserpine et de Cornalvo, d'une hauteur de 12 à 19 m, construits vers 25 avant J.-C., ou encore, au Portugal, le barrage romain de Belas.

Mais c'est au Moyen âge qu'ils se sont fortement développés en Europe pour alimenter les moulins à eau. Il semble qu'ils aient parfois pu s'appuyer sur des sédiments accumulés en amont d'embâcles naturels, ou sur les lieux de barrages de castors dont la toponymie conserve des traces (par exemple en France avec le mot *bief* et *bièvre* (ancien nom de castor) qui pourraient être liés, ou avec des noms de communes tels que Beuvry (un des anciens noms de castor) ou Labeuvrière (la « castorière »). Les cartes anciennes, de Cassini par exemple, portent témoignage des nombreux barrages de petites rivières faits par les paysans ou les moines locaux, pour conserver l'eau et y élever du poisson ou pour le rouissage du lin ou du chanvre.

En conservant des volumes d'eau et une hauteur d'eau plus importante en saison sèche, ces barrages ont également pu tamponner les fluctuations estivales des nappes (c'est la hauteur d'eau qui contrôle la vitesse de percolation, cf. Loi de Darcy).

Au XVIe siècle, les Espagnols réalisèrent de grands barrages en maçonnerie. Le plus remarquable fut celui de Tibi, à 18 km au nord d'Alicante construit en 1594. Haut de 45 m, il est encore utilisé.

I .2- 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.Types de barrages :

I.3.1. Barrage poids :

Un 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. On compte deux grandes familles de barrages-poids, les barrages poids-béton, et les barrages en remblais (ces derniers n'étant d'ailleurs généralement pas qualifiés de barrage-poids, mais de barrage en remblais *ou en terre*).

Même si les barrages voûtes ou à contrefort nécessitent moins de matériaux que les barrages poids, ces derniers sont encore très utilisés de nos jours. Le barrage-poids en béton est choisi lorsque le rocher du site (vallée, rives) est suffisamment résistant pour supporter un tel ouvrage (sinon, on recourt aux barrages en remblais), et lorsque les conditions pour construire un barrage voûte ne sont pas réunies (cf. ci-dessous).

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.

Le barrage de la Grande-Dixence en Suisse, exploité par Alpiq, est le plus haut barrage-poids du monde (285 m)



Fig.1 *Le* ***barrage de la Grande-Dixence***

I.3.2 .Barrage en remblais :

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

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 et (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).

Le barrage de Mattmark en Suisse, celui de Šance en République tchèque sont de ce type. En France, le barrage de Serre-Ponçon (deuxième plus grande retenue d'Europe) est un barrage en remblai. Les barrages en enrochement sont les plus fréquents dans le parc de barrages d'Hydro-Québec. Ils représentent 72 % des 600 barrages exploités par l'entreprise en 2002



Fig.2 Le barrage de Mattmark

I.3.3. Barrage voûte :

La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à *double courbure*).

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 barrages-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.

On rencontre aussi des barrages avec plusieurs voûtes comme le barrage de l'Hongrin en Suisse.



Fig.3 le barrage de l'Hongrin

I.3.4. Barrage contreforts ou multivoûtes :

Lorsque les appuis sont trop distants, ou lorsque le matériau local est tellement compact qu'une extraction s'avère presque impossible, la technique du barrage à contreforts permet de réaliser un barrage à grande économie de matériaux.

Le mur plat ou multivoûtes (Vezins, Migoëlou ou Bissorte) en béton s'appuie sur des contreforts en béton armé encastrés dans la fondation, qui reportent la poussée de l'eau sur les fondations inférieures et sur les rives.

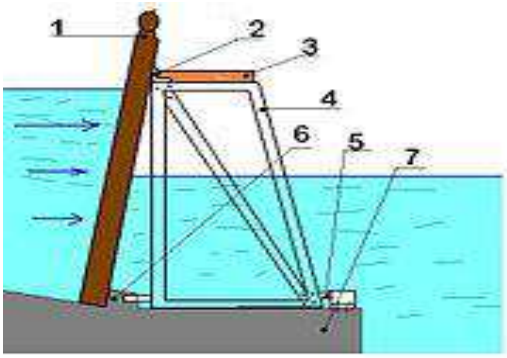
Un des exemples le plus important de ce type est le barrage Daniel-Johnson au Québec, complété en 1968 dans le cadre du projet Manic-Outardes. Haut de 214 m et large de 1 312 m, le barrage, conçu par André Coyne, est soutenu par deux

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 voûtes 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 m³ de béton, soit cinq fois moins qu'un barrage poids.



Fig.4 Le barrage Daniel-Johnson

I.3.5. Barrages mobiles à aiguilles



Légendes :

1 = aiguille
2 = appui
3 = passerelle
4 = fermette
5 = pivot
6 = heurtoir
7 = radier

Fig.5 Système Poirée

Le barrage mobile ou à niveau constant, a une hauteur limitée ; il est généralement édifié en aval du cours des rivières, de préférence à l'endroit où la pente est la plus faible. On utilise généralement ce type de barrage dans l'aménagement des estuaires et des deltas.

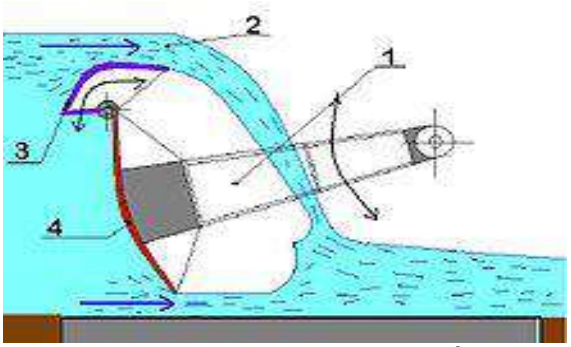
Selon le type de construction le barrage mobile peut être :

Le barrage à aiguilles, créé par l'ingénieur Charles Antoine François Poirée en 1834, qui, s'inspirant des anciens pertuis, étendit le système sur toute la largeur du cours ; améliorant considérablement la navigation fluviale dès la moitié du XIX^{e} siècle. Le premier fut établi par Charles Antoine François Poirée sur l'Yonne, à Basseville, près de Clamecy (Nièvre). Le *système Poirée* consiste en un rideau de madriers mis verticalement côte à côte barrant le lit du fleuve. Ces madriers ou *aiguilles* d'une section de 8 à 10 cm et longues de 2 à 4 m, selon les barrages, viennent s'appuyer contre un *butoir* (ou heurtoir) du *radier* (sur le fond) et sur une *passerelle* métallique constituée de *fermettes*. Ces *fermettes* peuvent pivoter pour s'effacer sur le fond en cas de crue et laisser le libre passage aux eaux. Les fermettes sont reliées entre elles par une *barre d'appui* qui retient les aiguilles et une *barre de réunion*, de plus elles constituent la passerelle de manœuvre. Les aiguilles à leur sommet présentent une forme qui permet une saisie aisée. Néanmoins c'est un travail fastidieux, long et dangereux (il faut plusieurs heures et le travail de plusieurs hommes pour mener à bien la tâche). Bien que ce type de barrage soit remplacé par des techniques plus modernes et automatiques ; sur certains barrages encore existants, les aiguilles de bois sont remplacées par des aiguilles en aluminium remplies de polystyrène (pour la flottabilité en cas de chute dans la rivière), d'un poids bien moindre et plus facilement manœuvrable.

À effacement sur le fond de la rivière (seuil (barrage)) pour permettre l'écoulement total ou en position intermédiaire pour créer un déversoir.

I.3.6.Barrages mobiles à battant :

À battant ou porte à axe vertical, comme le barrages moderne hollandais (Maeslantkering), ou les portes à la Léonard de Vinci fermant le port-canal de Cesenatico pour empêcher les fortes marées d'envahir les terres.



Légendes :

1 = battant

2 = déversoir

3 = vanne à volet

4 = vanne à secteur

Fig.6 À battant ou porte à axe vertical

À battant à axe horizontal avec possibilité d'échapper en aérien lorsque le débit devient critique, ce qui évite de constituer un obstacle à l'écoulement des eaux en temps de crue. Ce type de barrage est généralement employé pour empêcher l'eau salée de remonter l'estuaire, comme à Volta Scirocco en Italie.

La partie fixe correspond à une plate-forme (ou radier) étanche.

Une grande vanne à secteur, qui en position de fermeture totale détermine un battant qui s'appuie sur la plate-forme, pendant qu'en position de soulèvement complet, il laisse l'écoulement complètement libre.

Une vanne à volet, montée sur la génératrice supérieure de la vanne à secteur, qui permet de régler l'écoulement dans le déversoir et le niveau d'eau désiré en amont du barrage. L'écoulement de l'eau peut se produire par le dessous du battant lorsque la vanne à secteur inférieure est soulevée (ce qui permet aussi de nettoyer la surface de la plate-forme), ou bien par le dessus en déversoir, lorsque la vanne supérieure à volet est abaissée.

Barrage mobile à gravité, d'un fonctionnement théoriquement très simple, la vanne à gravité ne comporte que peu d'éléments mécaniques. Il s'agit d'un battant, sorte d'enveloppe creuse articulée autour d'une charnière fixée sur un socle de béton.

En position repos l'enveloppe se remplit d'eau et descend de son propre poids sur le radier.

En position active, de l'air injecté chasse l'eau et permet au battant de remonter par gravité. La hauteur dépend de la quantité d'air insufflée.

Un tel procédé est en application dans le Projet MOSE qui doit protéger la lagune de Venise des hautes eaux de l'Adriatique (Acqua, alta)

Barrage mobile à clapets, d'un fonctionnement comparable au barrage à mobile à gravité ci-avant à la différence près qu'il est mû par deux vérins hydrauliques situés de part et d'autre du clapet. Il respecte parfaitement sa fonction : réguler l'écoulement de la rivière pour maintenir un niveau sensiblement constant dans le bief amont. Son principal inconvénient est d'être excessivement dangereux pour le touriste nautique. Les poissons ne peuvent le remonter que lorsque la rivière est en hautes eaux et le clapet complètement baissé

I.4. D'autres types de 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. 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 barrage peut être exposé à 4 types de risque :

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



Fig.7 Accumulation de débris naturels et anthropiques contre le mur d'un barrage.



Fig.8 Les restes du barrage de Malpasset, détruit le 2 décembre 1959.

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. Selon le 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. Qu'est ce que le risque de rupture de barrage ?

Le phénomène de rupture de barrage correspond à une destruction partielle ou totale d'un barrage.

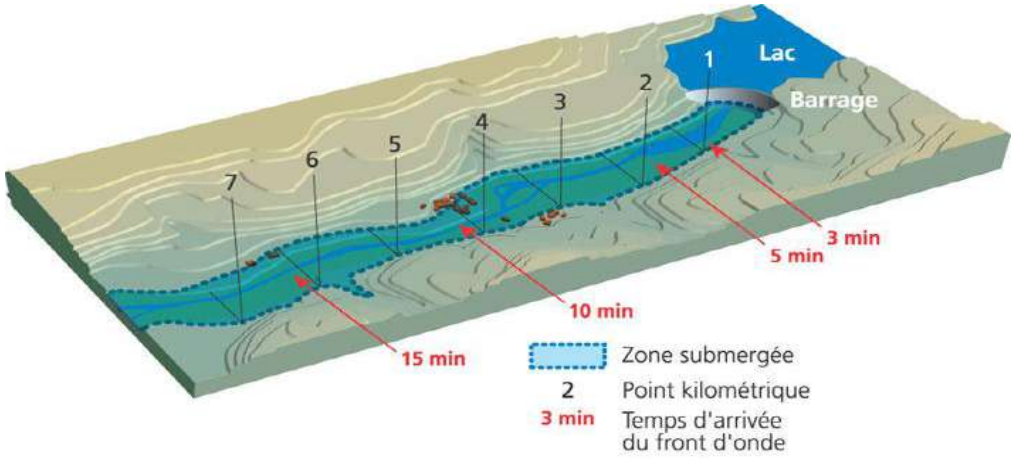
Les causes de rupture peuvent être diverses :

- **Techniques** : défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux, vices de conception, de construction ou de matériaux, vieillissement des installations
- **Naturelles** : séismes, crues exceptionnelles, glissements de terrain (soit de l'ouvrage lui-même, soit des terrains entourant la retenue et provoquant un déversement sur le barrage)
- **Humaines** : insuffisance des études préalables et du contrôle d'exécution, erreurs d'exploitation, de surveillance et d'entretien, malveillance.

Le phénomène de rupture de barrage dépend des caractéristiques propres du barrage. Ainsi, la rupture peut être :

- **Progressive :** dans le cas des barrages en remblais, par érosion régressive, suite à une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci (phénomène de " renard ")
- **Brutale** : dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

Une rupture de barrage entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par 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 d'une rupture totale de l'ouvrage. Obligatoire pour les grands barrages, cette carte détermine, dès le projet de construction, quelles seront les caractéristiques de l'onde de submersion en tout point de la vallée : hauteur et vitesse de l'eau, délai de passage de l'onde, etc. Les enjeux et les points sensibles (hôpitaux, écoles, etc.) y figurent également.



Exemple de carte du risque

II.2- Etats critiques associés aux barrages

Il existe prés de 400000 grands barrages (en 1982, 16800 en dehors de la Chine). Le taux des ruptures reste important puisqu'il correspond à 1.5 rupture par an et le pourcentage des incidents est 2 à 7 fois plus grand, suivant le type d'ouvrage. Donc si on leur donne une durée de vie de 100 ans, 4 barrages sur 1000 connaîtront une rupture.

Le dénombrement ci-dessous (tableau 1), s'il porte sur une période relativement ancienne aux USA, a le mérite de faire un inventaire détaillé des principales causes d'accidents (270 au total dont 187 pour les barrages en terre). Les auteurs, G.Post et P. Londe les ont regroupées en 3 grandes familles d'états critiques :

- La stabilité,
- La durabilité (par rapport à l'eau),
- La fonction (arrêter l'eau- submersion)

On constate que les auteurs ont dû distinguer les différents types de barrages car ils ne sont pas affectés de la même façon par les différents états critiques.

Ils ont dû aussi distinguer deux niveaux de gravité, la ruine et les accidents ce qui donnera deux grands types de scénario.

Tableau 1 : Dénombrement des accidents observés aux USA au 19éme et début du 20éme siècle

Causes (insuffisance)	*Voûte*		*Contreforts*		*Poids*		*Terres*		*Enroch*		*Divers*		*Total*
	R	**A**	**R**	**A**	**R**	**A**	**R**	**A**	**R**	**A**	**R**	**A**	
Renversement						4							4
Glissement	1	1	1		3	3		3			1		13
Résistance	1	3	1	1	2	3	11	35		2			59
Déformation		1		1			7	18		4			31
Fuites		2			1	1	2	22					28
Action interne	2	1	3	2	1	1	15	20	2		1		48
Erosion de surface	1						4	10		1			16
Actions		2	1	3				4	10		1		16
Drainage								2					2
Effet de l'eau	1	3	1		2	2	12	3	3	2			28
Autres							2	8	1	1			12
Autres				1	1	1	4	6		1			14
Total	6	13	7	8	10	18	57	130	7	11	3		
	19		15		28		187		18		3		268

R :rupture ; A :accident ;

II.3. 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.4. La gestion du risque de rupture de barrage

II.4.1- La prévention

L'examen préventif des projets de barrages est réalisé par le service de l'État en charge de la police de l'eau et par le Comité technique permanent des barrages (CTPB). Le contrôle concerne toutes les mesures de sûreté prises de la conception à la réalisation du projet.

La surveillance constante du barrage s'effectue aussi bien pendant la période de mise en eau qu'au cours de la période d'exploitation. Elle s'appuie sur de fréquentes inspections visuelles et des mesures sur le barrage et ses appuis (mesures de déplacement, de fissuration, de tassement, de pression d'eau et de débit de fuite, etc.). 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 apparaît nécessaire, des travaux d'amélioration ou de confortement sont réalisés. Pendant toute la durée de vie de l'ouvrage, la surveillance et les travaux d'entretien incombent à l'exploitant du barrage. 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) et par l'intermédiaire des directions régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) pour les barrages faisant l'objet de concessions hydroélectriques.

L'information préventive de la population : le droit à l'information générale sur les risques majeurs s'applique. Chaque citoyen doit prendre conscience de sa propre vulnérabilité face aux risques et pouvoir l'évaluer pour la minimiser. Pour cela il est primordial de se tenir informé sur la nature des risques qui nous menacent, ainsi que sur

les consignes de comportement à adopter en cas d'événement.

II.4.2- L'alerte :

En cas d'événement majeur, la population est avertie au moyen du signal national d'alerte, complété par le signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydrauliques émis par des sirènes pneumatiques de type " corne de brume ", installées par l'exploitant. Ce signal comporte un cycle d'une durée minimum de deux minutes, composé d'émissions sonores de deux secondes séparées par un intervalle de trois secondes.

II.4.3- L'organisation des secours :

Le maire peut élaborer sur sa commune un plan communal de sauvegarde. Si la situation le nécessite, le préfet peut mettre en oeuvre le plan Orsec ou le plan particulier d'intervention (PPI). Ce dernier découpe la zone située en aval d'un barrage en trois zones :

- **La zone de sécurité immédiate** (ou " zone du quart d'heure "), que la population doit évacuer dès l'alerte donnée, la submersion pouvant survenir dans un délai inférieur à quinze minutes
- **La zone d'alerte I**, où la population dispose de plus de quinze minutes pour son évacuation
- **La zone d'alerte II**, où la submersion est moins importante.

II.4.4- 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.

II.5- La Sûreté de Fonctionnement dans le domaine des barrages :

Exemple :

Le contexte des barrages est intéressant car il permet d'appréhender l'intérêt et les limites de ce que peut apporter la Sûreté de Fonctionnement aux ouvrages d'art à caractère unique, présentant des mécanismes complexes. Pour ces ouvrages, on ne peut en général pas disposer de données suffisantes pour engager une démarche fiabiliste, que ce soit au moyen d'une modélisation simple des mécanismes et d'essais expérimentaux sur les matériaux, ou par référence à une population homogène d'ouvrages de même type.

La Sûreté de Fonctionnement appliquée au contexte des barrages date du début des années 1990 et fait l'objet actuellement de nombreux développements, impulsés essentiellement par les pays nord-américains (USA et Canada) et nord-européens (Norvège, Suède, Pays-Bas). Deux manuels techniques font référence dans le domaine : le récent bulletin de la Commission Internationale des Grands Barrages et le guide de la Canadian Electricity Association .

Malgré l'intérêt que suscitent ces approches au niveau international pour l'analyse de risques, on ne compte toutefois que peu d'applications à des études de sûreté de fonctionnement de barrages. Dans ces applications, on retrouve des pratiques communes : travail d'équipe d'experts pluridisciplinaires, examen des principaux aléas (hydrologique et sismique), modélisation des scénarios de rupture, implication forte du jugement expert dans l'analyse quantitative. On présente ci-après les différentes étapes d'une étude-type de sûreté de fonctionnement de barrage.

II.6. L'analyse fonctionnelle appliquée aux barrages :

L'analyse fonctionnelle recherche toutes les fonctions accomplies par le barrage et ses composants, pour ensuite identifier leurs modes de défaillances, leurs causes et effets. Elle est menée en deux étapes : l'analyse fonctionnelle externe et l'analyse fonctionnelle interne.

L'analyse fonctionnelle externe s'intéresse aux interactions entre le système (le barrage, sa fondation et ses ouvrages annexes) et son environnement. Elle permet de déterminer les fonctions de contrainte accomplies par le barrage, en réaction à son environnement (sollicitations, circulations de flux hydrauliques, contacts...), et les fonctions principales qui

traduisent l'objet du barrage (production hydroélectrique, fourniture d'eau, écrêtement des crues...).

Après l'analyse globale du système, l'analyse fonctionnelle interne recherche les fonctions de conception accomplies par les composants du barrage. Pour cela, une analyse structurelle est conduite et liste tous les composants constitutifs du barrage, repère leur position géographique au sein de l'ouvrage et détermine les interactions avec les autres composants (Figure 9).

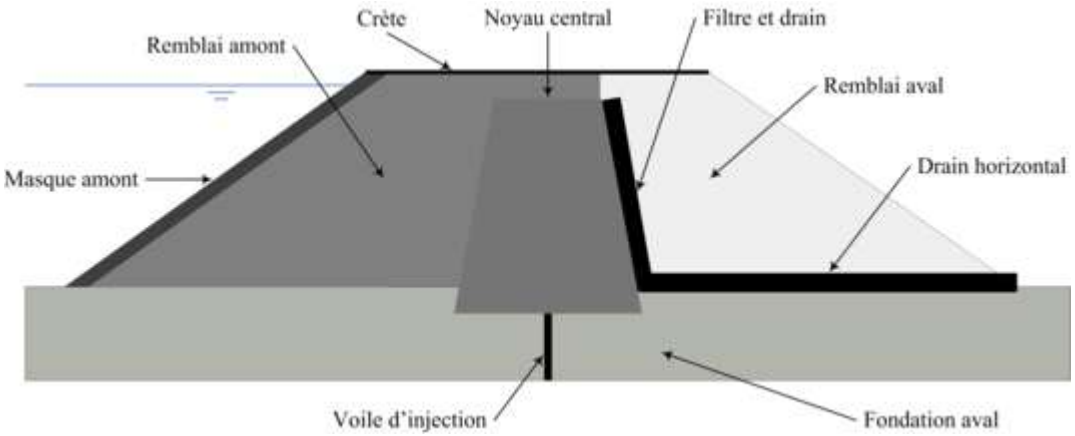


Fig. 9 *Analyse structurelle d'un barrage en remblai à noyau central*

Au final de l'analyse fonctionnelle, on dispose, d'une part, d'une description précise de l'ouvrage, de ses composants et des liens entre composants et environnement, d'autre part, d'une liste des fonctions principales et de contrainte du barrage et des fonctions de conception de chaque composant.

II.7. Modélisation de la sûreté de fonctionnement des barrages

Après l'analyse fonctionnelle, l'objectif de cette étape est de modéliser les modes de défaillance des barrages. Trois techniques de la Sûreté de Fonctionnement peuvent être utilisées principalement pour la modélisation fonctionnelle. Tout d'abord, l'AMDE (*Failure Modes and Effects Analysis* - FMEA) est une méthode particulièrement efficace pour l'analyse des modes de défaillance et permet de structurer, sous forme de tableaux, les informations sur les dégradations : les pertes de performance, leurs causes, leurs effets. En toute rigueur, elle est appliquée en préliminaire à d'autres techniques de modélisation des scénarios de défaillance ou d'analyse quantitative, mais paradoxalement, elle fait l'objet de peu d'applications dans les études de sûreté

de fonctionnement de barrages. On présente au tableau 2 un extrait d'un tableau AMDE concernant la défaillance d'une fondation injectée d'un barrage poids.

Compossant	***Fonction***	***Mode de défaillance***	***Cause possible de la défaillance***	***Effet possible de la défaillance***	***Symptômes de la défaillance***	***Moyen de détection***
1-Fondation amont injectée	Limiter les flux hydrauliques	La fonction «Limiter les flux hydrauliques» Est dégradés ou défaillante	***Processus*** : -fissuration de la fondation amont ***Etat du composant :*** -dissolution de la fondation amont -érosion de la fondation amont	***Flux hydraulique :*** -eau x d'infiltration dans la fondation amont -eaux d'infiltration vers la fondation aval ***Flux de charger :*** -sous pressions dans la fondation amont -sous pression dans la fondation aval	- mesures des débits de drainage -fuite dans la fondation aval - mesures des débits de drainage -Piézométrie dans la fondation amont -piézométrie dans la fondation aval	-empotement déversoir, débitmètre -observation visuelle -empotement déversoir, débitmètre -cellule de pression interstitielle -piézomètres -cellule de pression interstitielle -piézomètres

Tableau 02 *: AMDE (extrait) relative à la fondation amont injectée d'un barrage poids*

La méthode la plus largement rencontrée dans les études est celle des Arbres d'Evénements (***Event Tree Analysis***) qui est mise en œuvre pour modéliser les mécanismes de rupture : un mécanisme est représenté sous forme d'un scénario, constitué de séquences d'événements se déroulant chronologiquement et construit inductivement à partir d'un événement initiateur jusqu'aux événements finaux (la rupture en général). La figure II.11 illustre la modélisation par un arbre d'événements du scénario de rupture d'un barrage en remblai par surverse consécutive à un séisme exceptionnel. A partir de l'événement initiateur (le séisme associé à une fréquence), on enchaîne les séquences chronologiques de modes de défaillance qui conduiraient à la ruine de l'ouvrage. Enfin, la méthode des Arbres des Conséquences (***Fault Tree Analysis***) est utilisée pour la modélisation fonctionnelle d'équipements spécifiques des barrages, à fonctionnement proche des systèmes industriels : les composants électromécaniques, les vannes clapets, les générateurs de secours... De façon déductive, on recherche les événements successifs susceptibles de provoquer l'événement final indésirable.

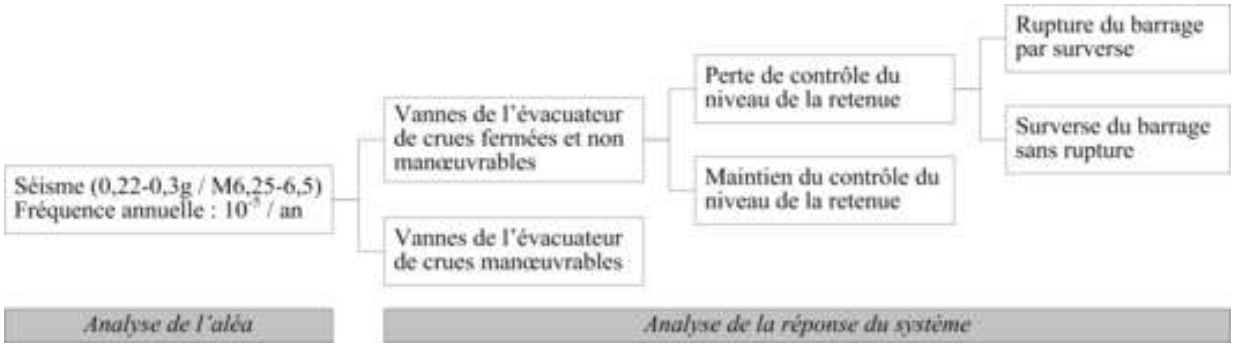


Fig.II.11 Scénario de rupture d'un barrage en remblai modélisé par la méthode des arbres d'événements

II.8. Mesure de la sûreté de fonctionnement des barrages

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.

L'analyse quantitative proposée dans les études de sûreté de fonctionnement de barrages est conduite à partir de méthodes dites d'analyse de risques (**ex. : arbres d'événements**, Fig.II.12**)**. Les probabilités de transition associées à chaque séquence (nœud) de l'arbre proviennent du jugement des experts et, lorsque le mécanisme étudié le permet, la probabilité d'occurrence de l'événement initiateur (le premier nœud de l'arbre) est obtenue à partir d'un modèle probabiliste de l'aléa, à l'instar de la méthode du Gradex en hydrologie pour le scénario de surverse .

La probabilité totale associée au scénario résulte ensuite du calcul des probabilités rattachées à chaque événement de l'arbre (Figure II.12). De par l'aspect déclaratif de l'estimation des probabilités par les experts, on obtient alors des probabilités subjectives (ou déclaratives) d'occurrence d'un scénario.

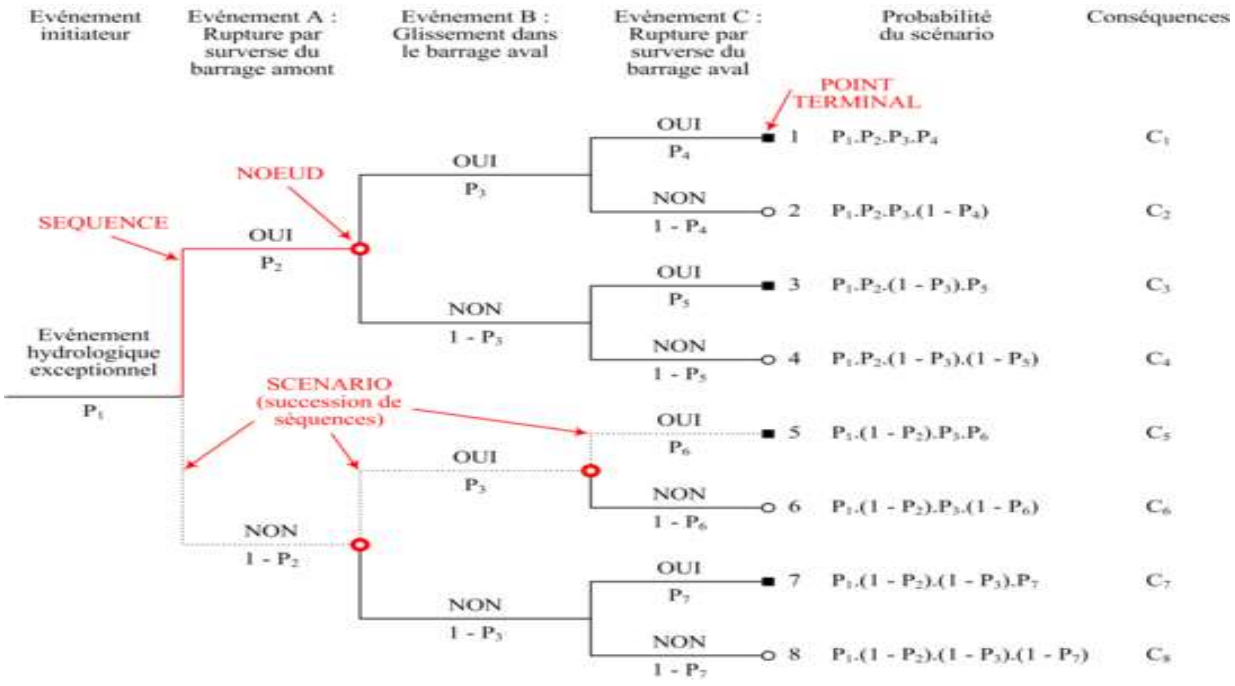


Fig.II.12 *Evaluation des scénarios de défaillance d'un aménagement hydraulique constitué de deux barrages en remblai par arbre d'événements*

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 industriels.

II.9. Synthèse et conclusions d'une étude de sûreté de fonctionnement de barrage

On donne à titre d'exemple les résultats d'une étude de sûreté de fonctionnement menée sur trois barrages norvégiens en enrochements de conception analogue (Tableau 3). Le calcul des probabilités a été réalisé par la construction d'arbres d'événements pour chaque scénario envisagé, puis par l'évaluation par un panel d'experts des probabilités subjectives associées à chaque nœud de l'arbre. Les périodes de retour correspondant aux différentes intensités de crues et de séismes ont été obtenues par des modèles probabilistes et des données statistiques relatifs à ces deux aléas (sismique et hydrologique).

Barrage	Hydrologie scénario de surverse, p_h	Séisme scénario de liquéfaction, p_s	Erosion interne scénario de renard, p_e	Total, p_t
Viddalsvatn	$1,2.10^{-6}$	$1,1.10^{-5}$	$5,5.10^{-4}$	$5,6.10^{-4}$
Dravladalsvatn	$4,0.10^{-4}$	$1,5.10^{-6}$	$5,0.10^{-5}$	$4,5.10^{-4}$
Svartevatn	$1,0.10^{-7}$	$2,0.10^{-7}$	$6,0.10^{-6}$	$6,3.10^{-6}$

Tableau 03. *Probabilités annuelles de rupture de trois barrages norvégiens selon trois scénarios*

En synthèse, les études de sûreté de fonctionnement appliquées aux barrages constituent une approche puissante d'analyse de risques permettant la quantification de la sûreté. Elles sont particulièrement efficaces pour l'amélioration de la connaissance d'un ouvrage et de ses points faibles et pour la gestion patrimoniale (mise en place de programmes de travaux et optimisation de la maintenance). Cependant, le coût de telles études est important et cette approche reste réservée aux grands ouvrages.

II.10 .Statistiques sur les accidents des barrages :

II.10.1 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 4).

***Tableau 04** : Les accidents les plus graves entre 1959 et 1987.*

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.10.2. Causes de rupture :

Les causes de rupture d'ouvrage peuvent être de différents ordres.

II.10.2.1. Problèmes techniques :

Peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. Il peut s'agir d'un défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des crues ou bien d'un vice de conception, de construction ou de matériaux. Le type de barrage, les matériaux utilisés, la nature des fondations ainsi que l'âge de l'ouvrage vont avoir une influence sur l'apparition de ces problèmes. Cependant, l'évolution des techniques de construction rend les barrages modernes beaucoup plus sûrs.

II.10.2.2 Causes 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 décamillénaire. 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.

II.10.2.3 Causes humaines :

Peuvent enfin être à l'origine d'accidents: études préalables pas assez approfondies, contrôle d'exécution insuffisant, erreurs d'exploitation, défaut de surveillance et d'entretien ou encore actes de malveillance, sabotage, attentat, guerre.

II.10.3. Types de rupture :

Le risque de rupture brusque et inopinée est considéré comme très faible, voire nul. La situation de rupture paraît plutôt liée à une évolution plus ou moins rapide d'une dégradation de l'ouvrage susceptible d'être détectée par la surveillance et l'auscultation.

Les barrages en remblai peuvent être touchés par une rupture progressive, causée par un phénomène d'érosion externe ou interne.

L'érosion externe est engendrée par des circulations d'eau, même peu importantes sur la crête des barrages. Le mécanisme d'érosion s'amorce à partir du bord aval de la crête et progresse jusqu'à ce qu'une brèche soit ouverte. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la

crête, la hauteur de l'eau qui s'écoule au-dessus du barrage.

L'érosion interne correspond à l'entraînement des matériaux au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation. Elle est provoquée par des percolations excessives à travers l'ouvrage. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure.

Les barrages en maçonnerie ou en béton sont menacés par une rupture instantanée partielle ou totale, produite par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

II.10.4. 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.10.4.1 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 05 : Les caractéristiques principales du barrage Fergoug.

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 m^{33}
Le débit de crue	400 – 500 m^3/s

La hauteur de barrage	32

II.10.4.2 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.10.4.3 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 choc

et 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 à

Perrégaux. 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 apres la catastrophe en 1928



Le barrage de Fergoug apres reconstruction 1986

Un autre exemple de la rupture par la submersion :

Ces photos montrent la rupture de barrage de Sweetwater (en maçonnerie de hauteur > 30 m) aux USA, par l'effondrement due à la submersion provoquée par un séisme de magnitude

6.7 Mw.



Le barrage de Sweetwater aux USA avant la rupture



La rupture de barrage Sweetwater en 1916

Les photos ci-après représentent la rupture de barrage Swift (en remblai de hauteur <30m) par la submersion 1964 aux USA.



Le barrage de Swift aux USA avant la rupture.



La rupture de barrage Swift

II.10.5. 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.10.5.1. 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.10.5.2. 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)

Rupture de barrage en terre. Le barrage de Teton (Idaho, États-Unis,1976)

II.10.5.3. 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.10.6. Etat critique de l'instabilité :

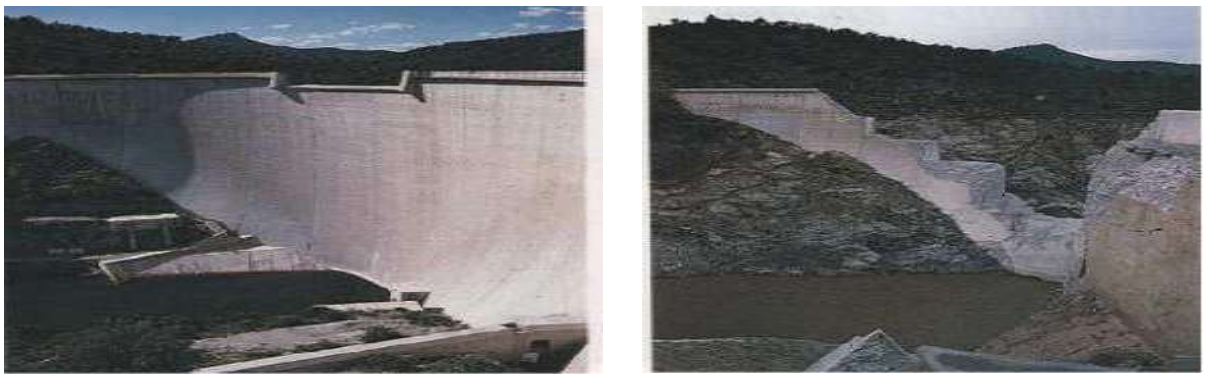
Exemple : Barrage de Malpasset

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.10.6.1. 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.



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

II.10.6.2. 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.10.6.2.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 a

sans 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.10.6.2.b- Conditions d'exploitation :

Le remplissage très rapide des 4 derniers mètres du barrage (en 24 h) a opéré un véritable 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.10.7. 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.10.7.1. Caractéristique de barrage Beli Iskar :

Les principes caractéristiques du barrage sont représentés dans le tableau 06.

Tableau 6 *: Caractéristiques principales du barrage*

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.10.7.2. 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 07** : Résultats d'essais de mesure de la résistance à la compression*

	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

Ces résultats sont corrélés avec une augmentation régulière des débits de percolation collectés et mesurés au niveau de la galerie de drainage et à l'aval du barrage.



Barrage de Beli Iskar :

parement amont du barrage



Barrage de Beli Iskar :

vue d'ensemble du parement aval



Barrage de Beli Iskar, dégradation du parement aval

II.10.8. 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.10.8.1. 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^3 en 1935 à moins de 12.3 millions de m^3 en 1964.

***Tableau 08**: La capacité théorique du barrage*

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





Photos de barrage Hamiz avant la catastrophe





Barrage Hamiz après la catastrophe

II.10.8.2. 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 l/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 la cote 131,940.

Le débit des deux sources augmenta 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.10.8.3. 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.

II.10.8.4. 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 09** : La capacité théorique et la capacité réelle du barrage*

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.10.9. Etat critique de la population d'un réservoir :

Parmi les exemples des pollutions de barrage on peut citer le cas des deux barrages, Mervent en France et Hammam Boughrara en Algérie.

II.10.9.1. Barrage Mervent en France :

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

II.10.9.1.a- Caractéristiques techniques :

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

II.10.9.1.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.10.9.1.c- Nature de pollution :

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



Pollution de barrage Mervent en France

II.10.9.2. Barrage de Hammam Boughrara en Algérie :

II.10.9.2.a-Caractéristique du barrage de Hammam Boughrara

Le barrage de Hammam Boughrara, le plus important de la wilaya de Tlemcen, est situé sur le point de confluence entre l'oued Tafna et l'oued Mouillah à environ un kilomètre , en amont de la localité de hammam Boughrara et à 10 Km, de la daïra de Maghnia. Il est destiné à satisfaire les besoins en eau, essentiellement, des villes d'Oran (33 Hm^3) et de Maghnia (17 Hm^3) et en eau d'irrigation de la moyenne Tafna (9 Hm^3). Les différentes caractéristiques du barrage hammam Boughrara sont résumées dans le tableau 10.

***Tableau 10** : Caractéristiques du barrage Hammam Boughrara*

Caractéristiques physiques	**Caractéristiques hydrauliques**
Coordonnées : X=102.92, Y=185.20, Z=251.00m Type : digue en terre hétérogène Hauteur maximale : 75m Longueur de la crête : 10555m Evacuateur de crues Latéral1 et Fusible2 Débit maximal évacué^{1} : 2900m^{3}/s. Longueur^{1} : 547,70m Débit évacué^{2} : 2220m^{3}/s Longueur^{2} :250m, largeur : 25m Hauteur^{2} : 3.50m Tour de prise Type : galerie avec une tour Débit de la prise : 5.80m^{3}/s Débit de la vidange de fond : 6000m^{3}/s Longueur de la galerie : 2220m Hauteur de la tour de prise : 66.70m	Capacité total : 177Hm^{3} Volume régularisé : 59Hm^{3} Volume mort : 23.30Hm^{3} Superficie du lac : 894Ha Superficie du B.V : 2000Km^{2} Précipitation moyenne : 350mm Débit de crues : 5880m^{3}/s Apport solide moyen : 501.10T/an Caractéristiques diverses: Excavation : 2100000m^{3} Remblais : 45000000m^{3} Béton : 171000m^{3} Forage et injection : 257000m

II.10.9.2.b- Pollution du barrage hammam Boughrara,

(d'après Benadda.L, 2004) :

Le site du barrage hammam Boughrara se présente comme une source secondaire de pollution, alimentée par les oueds Mouillah et Tafna et leurs différents affluents.

Cette pollution composée de différents paramètres et éléments chimiques, organiques et biologiques constitue un réel danger sur la qualité et la probabilité des deux régularisées par le barrage.

Ainsi, cet important ouvrage joue actuellement le rôle d'une grande lagune, et ne peut être utilisé pour les objectifs auxquels il a été conçu, et risque même d'être condamné, si aucune action de luttée contre sa pollution n'est entreprise dans les brefs délais.



Barrage Hammam Boughrara

II.10.10. Etat critique de l'absence des informations hydrologiques :

Exemple : *Le cas de barrage de Souani, Algérie*

L'insuffisance des données hydrologiques et la surestimation des informations entraîne l'échec de réalisation d'un ouvrage pour le besoin de l'être humain.

II.10.10.1. Aménagement de Souani :

L'aménagement de Souani est constitué d'une réserve de 14 Mm^3 constituée de trois digues en terre réalisé à proximité du village du même nom. La réserve était censée recevoir l'excédent du barrage Béni Bahdel évalué à 14 Mm^3. En effet, ce dernier dont la capacité initiale était évaluée à 63 Mm^3 était censé pouvoir régulariser un volume de 74 Mm^3. L'idée a consisté à vouloir récupérer cet excèdent en réalisant le réservoir de Souani et une conduite de transfert d'environ une vingtaine de Km. Le projet a été presque achevé puisque les trois digues en terre ont été réalisées, la conduite posée sur presque la totalité des 20 Km et de nombreux équipements installés.

L'aménagement de Souani constitue un aménagement de transfert d'eau entre le barrage Béni Bahdel et un réservoir réalisé dans la localité de Souani (W. de Tlemcen), il a été réalisé dans la décennie 1970 – 1980 et visait à mettre en valeur les potentialités agricoles d'un périmètre dans la région. Le projet a été achevé en grande partie mais jamais exploité. En effet, le barrage Béni Bahdel réalisé dans les années 40 a été conçu selon des données très favorables puisqu'il a été dimensionné pour une pluie moyenne de 560 mm et devrait régulariser un volume annuel de 74 million des mètre de cube. Or l'actualisation des données concernant la pluviométrie de la région a montré que la moyenne annuelle des précipitations du bassin de ce barrage autour de 350 – 450 mm pour un volume régularisable entre 30 et 40 millions de mètre de cube.

Cette surestimation des capacités du barrage de béni Bahdel est, à notre sens, à l'origine de l'échec de l'aménagement Souani .

II.10.10.2. Causes de l'échec :

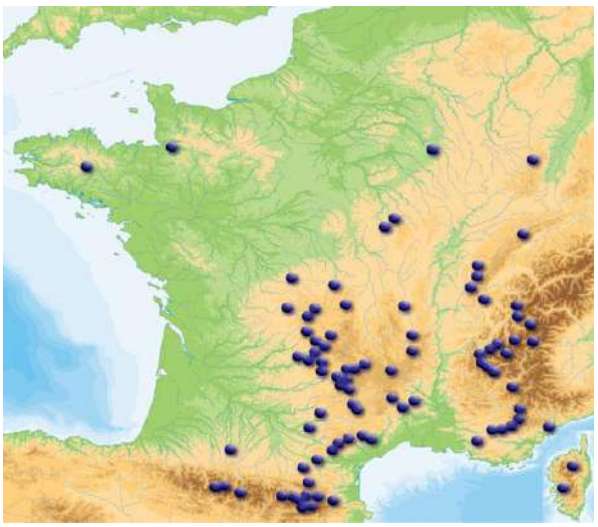
Il est clair que l'aménagement Souani est un échec pour ses promoteurs. La raison essentielle étant la diminution de la pluviométrie dans la région entraînant une diminution des ressources en eau de surface mobilisées par le barrage Béni Bahdel.

L'échec du projet est dû à:

- La sécheresse qui sévit dans la région Ouest du pays depuis quelques années
- Une surestimation des ressources en eau mobilisables par le barrage Béni Bahdel. Cette surestimation peut provenir de :
- L'utilisation de la station pluviométrique installée sur le site du barrage pour caractériser le bassin.
- Une surestimation du ruissellement.

II.11. Le risque de rupture de barrage en France et dans le monde :

Le risque de rupture de barrage concerne tous les barrages intéressant la sécurité publique. En France, on en compte environ 400, dont **89 " grands barrages "**.



Carte des grands barrages

En France, les grands barrages sont les barrages de plus de vingt mètres de hauteur au-dessus du terrain naturel (point le plus bas) et de plus de quinze millions de mètres cubes de capacité de retenue.

Entre 1959 et 1987, trente accidents de barrages ont été recensés dans le monde, faisant 18 000 victimes. En France, deux accidents ont marqué les esprits.

En 1895, à Bouzey (Vosges), la rupture, suite aux infiltrations d'eau, du corps du barrage poids (haut de 18 m) causa la mort de cent personnes.

En 1959, le barrage de Malpasset (haut de 60 m), en amont de Fréjus (Var), céda après la rupture du terrain de fondation sur lequel s'appuyait la voûte, suite aux infiltrations d'eau. On dénombra 421 morts, 155 immeubles furent entièrement détruits, mille hectares de terres agricoles furent ravagés. Les dégâts ont été estimés à deux milliards de francs.

En Italie, la catastrophe de Vajont (Longarone), en 1963, a fait plus de deux mille morts à la suite d'un glissement de terrain dans la retenue (hauteur du barrage : 265 m).

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, afin d'analyser les causes du rupture qui seront abordées en chapitre III .

Chapitre III : Analyse de risques. Méthodes.

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. Définition de l'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 existantes 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 (FigureIII.23) :

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. mettre en œuvre les 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,

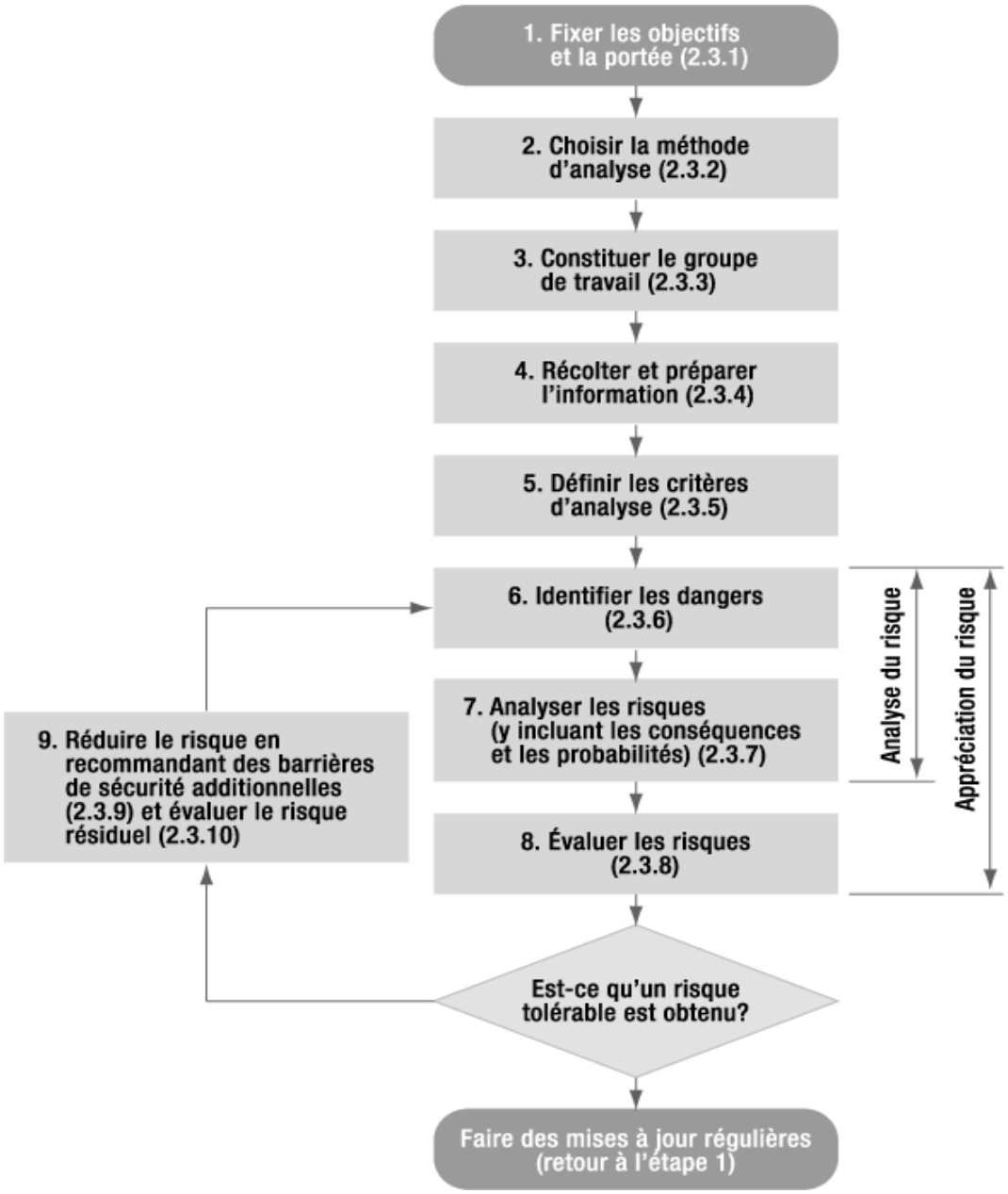


Fig.III.23 *Étapes génériques de l'appréciation des risques*

III.3. Démarches «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 (III.24) 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.

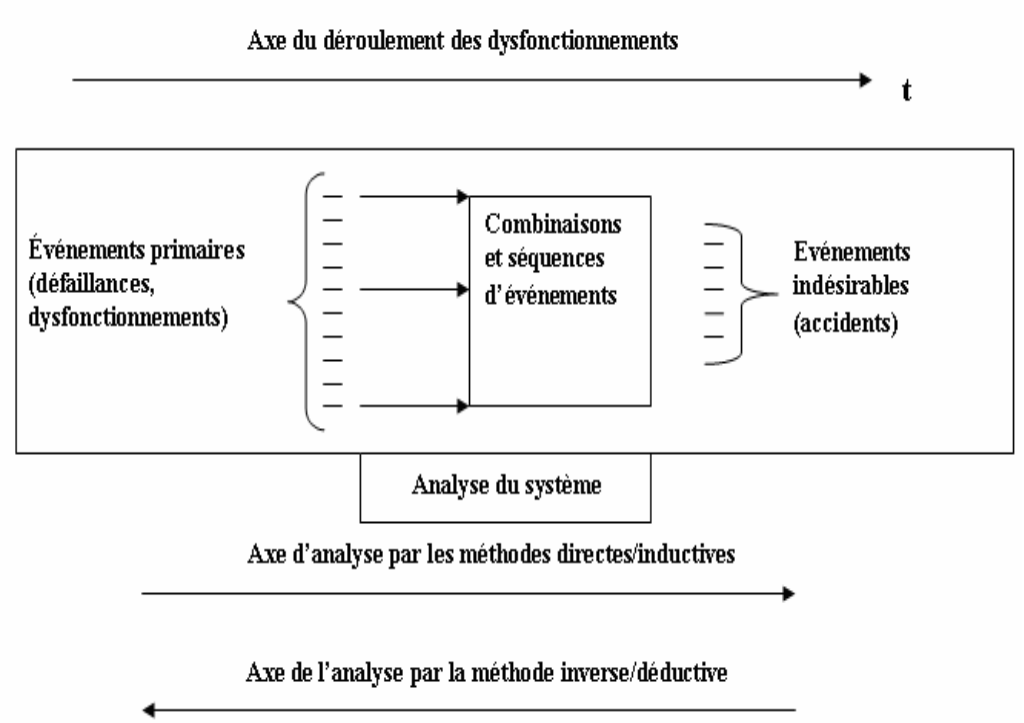


***Fig.III.24** : Rapprochement entre l'axe du déroulement des événements et les deux modes d'analyse du système.*

III.3.2. Sécurité de système :

La mise en œuvre 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 œuvre 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 de matérialisation 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 le 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 étapes 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 (III.25) résume les différentes étapes présentées par les auteurs

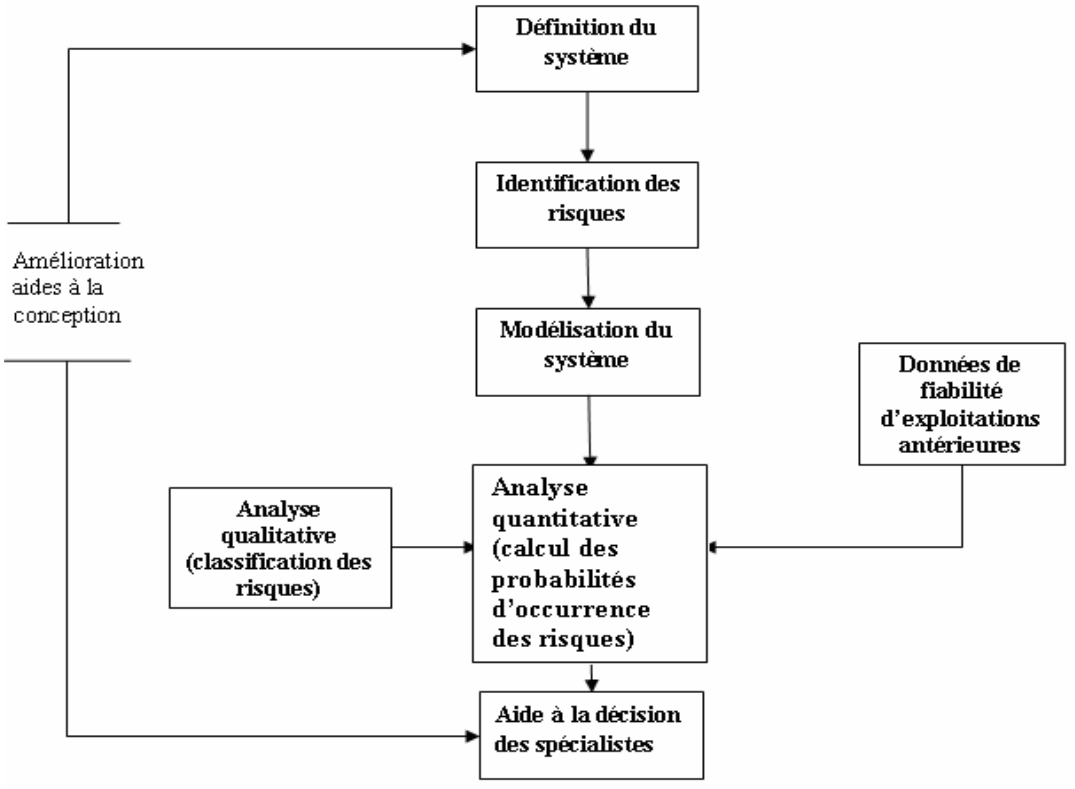


***Fig.III.25** : Étape de la sécurité des systèmes (Signoret et Leroy, 1986].*

III.4. Quelques méthodes d'analyse de risques :

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 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 accidents 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 décompose 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.26).

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.

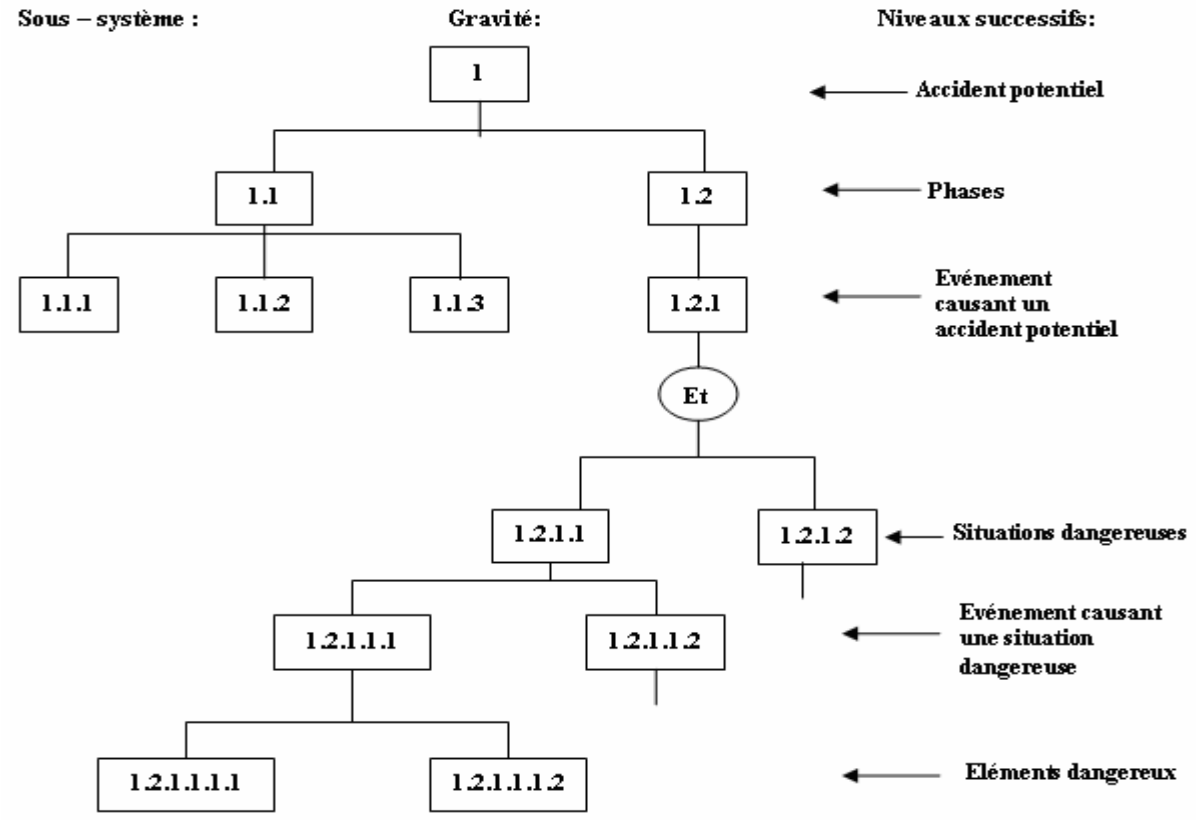


Fig.III.26 *: Présentation sous forme d'arbre logique des données issues de l'analyse préliminaire des risques (Lievens, 1976).*

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.27).

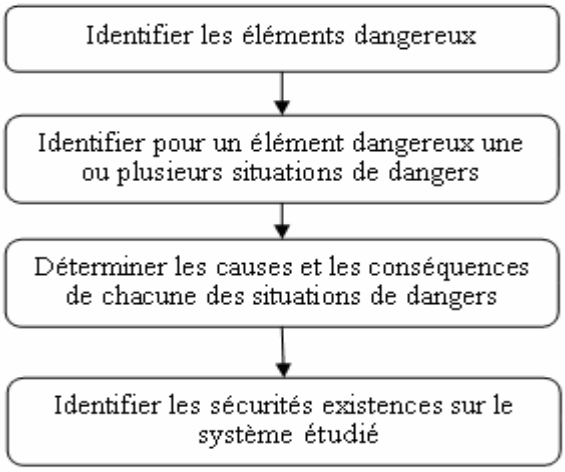


Fig.III.27 *: La méthodologie d'analyse préliminaire des risques.*

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 (Hazard Operability) 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 A.M.D.E.C

La méthode d'analyse de défaillances d'éléments simples conduisant des phases :

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.

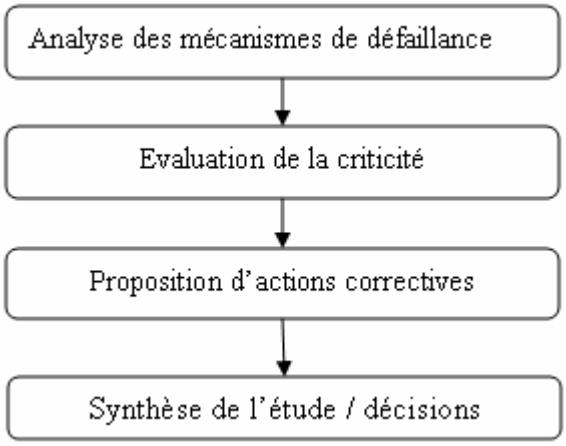


***Fig.III.28** : La méthodologie AMDEC.*

III.4.2.2. Limites et avantages de l'AMDEC

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mise en oeuvre pour l'analyse de défaillances d'éléments simples 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 par leur 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 à l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances par exemple.

III.4.3. La méthode « Hazop » :

III.4.3.1. Historique et domaine d'application de la méthode :

La méthode Hazop, (***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 mots-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. Soit :

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 a priori 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.29 :

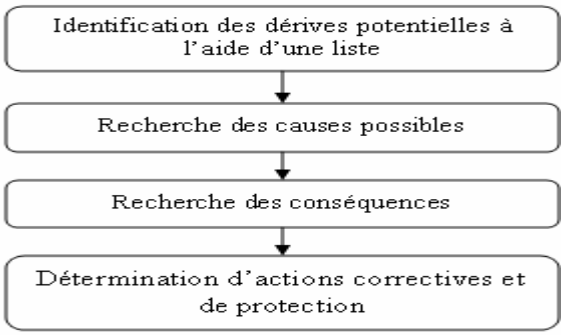


***Fig. III.29** : La méthodologie de l' HAZOP.*

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 délimitée 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. La Méthode « 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) ou 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 Téléphone 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.

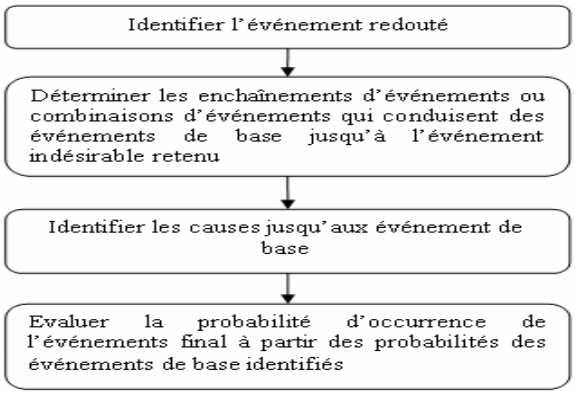


***Fig.III.30**: La méthodologie de l'arbre des causes*

La figure (20) représente un exemple d'un arbre des causes pour une fuite.

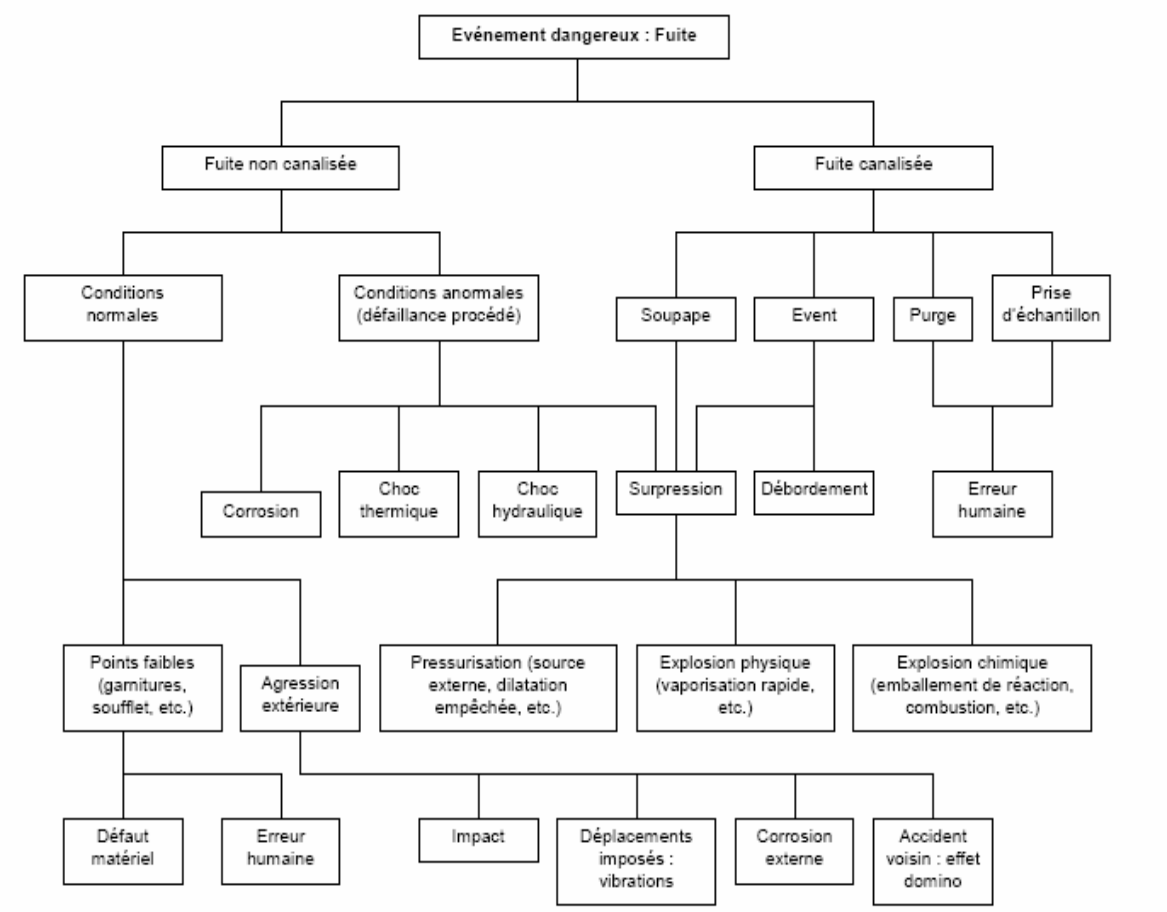


***Fig.III.31**: Arbre des causes générique pour une fuite,*

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 oeuvre 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 afin 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.4.6.1. Historique et domaine d'application de l'ADE :

L'analyse par arbre d'évènements a été développée au début des années 1970 pour 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 défaillances, 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 d'évènements 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).

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.

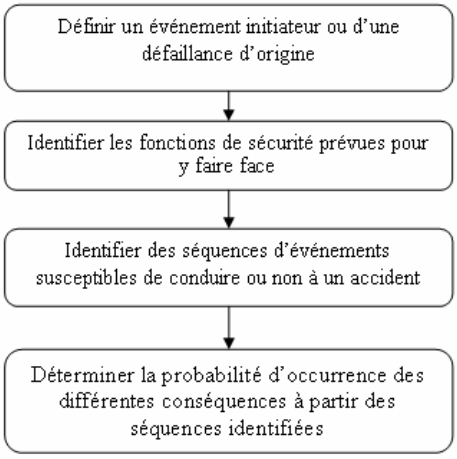


***Fig.III.32**: La méthodologie de l'arbre de l'évènement.*

La figure (III.33) montre un exemple d'arbre d'événement dans le domaine industriel.

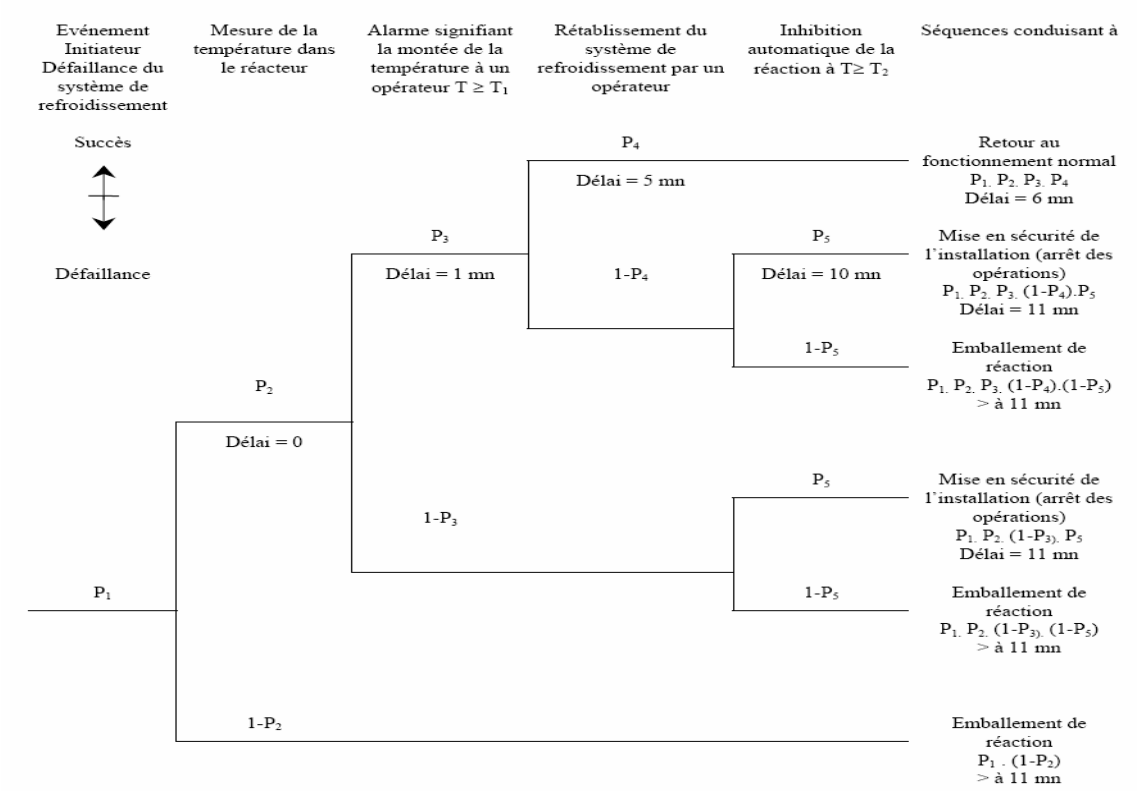


Fig.III.33*: Un exemple d'un arbre d'événement*

III.4.6.4. Limites et avantages de l'ADE :

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 oeuvre. 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 :

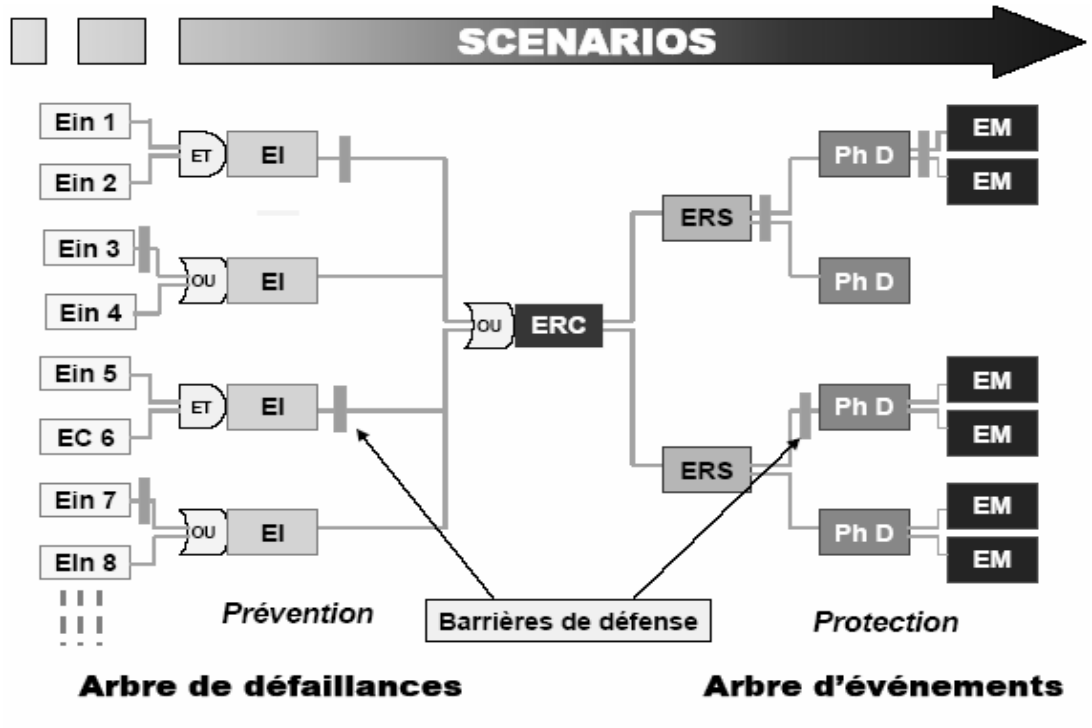


***Fig.III.34** : Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon.*

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. La partie 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.35), 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.

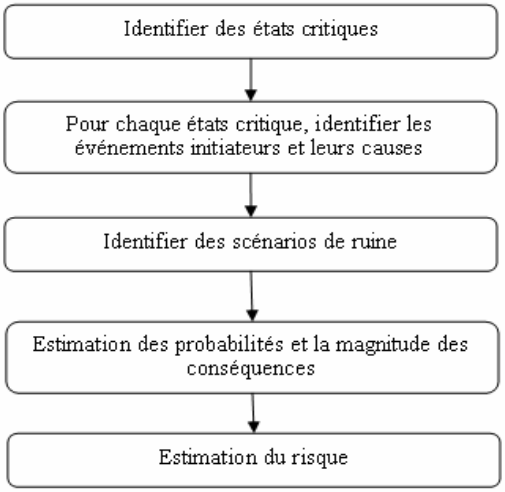


Fig.III.35 *: La méthodologie de l'analyse des causes - conséquences.*

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.

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'évènements indésirables .

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.

2ème partie : Analyse de risque d'un barrage

Chapitre IV : Etude de Cas

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. Méthode de calcul utilisée :

La méthode la plus largement rencontrée dans les études est celle des Arbres d'Evénements (Event Tree Analysis) elle est mise en œuvre pour modéliser les mécanismes de rupture : un mécanisme est représenté sous forme d'un scénario, constitué de séquences d'événements se déroulant chronologiquement et construit inductivement à partir d'un événement initiateur jusqu'aux événements finaux (la rupture en général).

L'analyse quantitative proposée dans les études de sûreté de fonctionnement de barrages est conduite à partir d'arbres d'événements. Les probabilités de transition associées à chaque séquence (nœud) de l'arbre proviennent du jugement des experts et, lorsque le mécanisme étudié le permet, la probabilité d'occurrence de l'événement initiateur (le premier nœud de l'arbre) est obtenue à partir d'un modèle probabiliste de l'aléa, à l'instar de la méthode du Gradex en hydrologie pour le scénario de surverse. La probabilité totale associée au scénario résulte ensuite du calcul des probabilités rattachées à chaque événement de l'arbre. De par l'aspect déclaratif de l'estimation des probabilités par les experts, on obtient alors des probabilités subjectives (ou déclaratives) d'occurrence d'un scénario.

IV.3. Démarche :

IV.3.1 Méthode :

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.36 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.

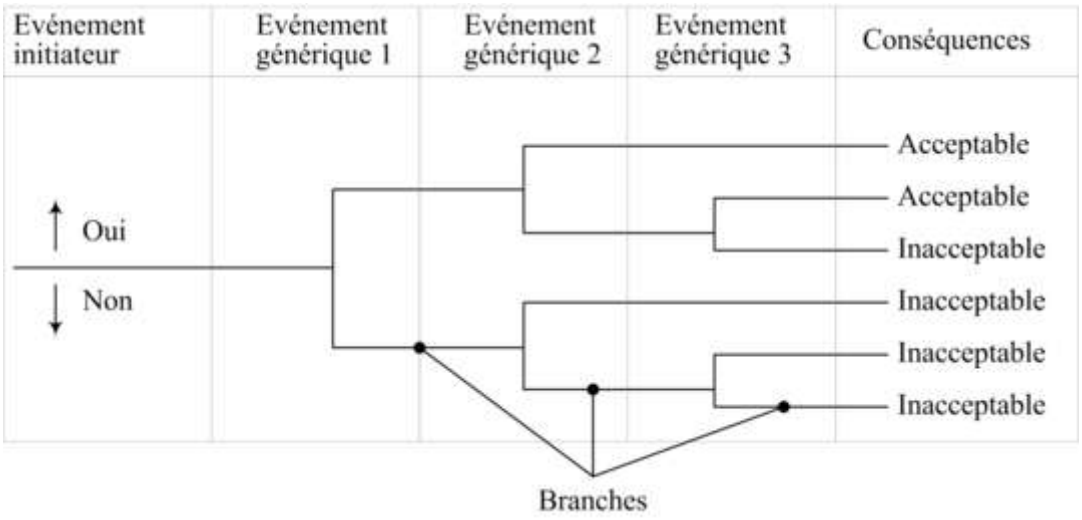


***Fig.IV.36** : Schématisation d'un arbre d'événement*

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.

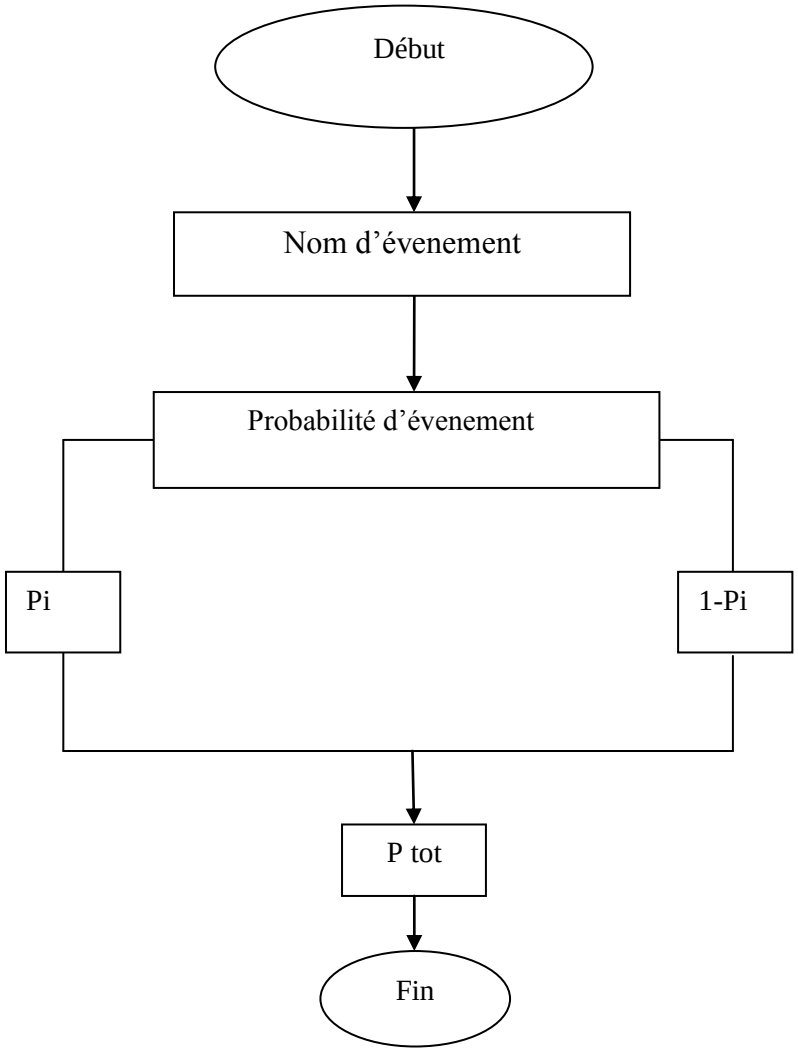
Deux utilisations de l'arbre obtenu sont alors possibles :

- 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.3.2.Organigramme du programme :



IV. 3.2. Programmation de la méthode:

Notre programme basé sur la méthode l'arbre d'événement a été développé par le langage « **c Sharp ».** Il est structuré en plusieurs fichiers, chaque fichier peut comporter plusieurs sous programme ou (Espace de noms).

le langage de programmation **c Sharp** a été développé par la société Microsoft . Il est interprété puis exécuté sur une machine virtuelle, ou compilé en code natif a l'exécution. il semble être le nouveau langage pour développer des applications Windows, à coté d'autre langage comme Visual basique et Dclfi, C ++...

- **Description de l'outil de développent (Visual studio)**

Microsoft Visual Studio est une suite de logiciels de développement pour Windows conçue par Microsoft. La dernière version s'appelle Visual Studio 2012.

Visual Studio est un ensemble complet d'outils de développement permettant de générer des applications Web ASP.NET, des Services Web XML, des applications bureautiques et des applications mobiles. Visual Basic, Visual C++, Visual C# et Visual J# utilisent tous le même environnement de développement intégré (IDE, Intégrâtes Développent Environnent), qui leur permet de partager des outils et facilite la création de solutions faisant appel à plusieurs langages. Par ailleurs, ces langages permettent de mieux tirer parti des fonctionnalités du Framework .NET, qui fournit un accès à des technologies clés simplifiant le développement d'applications Web ASP et de Services Web XML grâce à Visual Web Développer(figure IV.37).

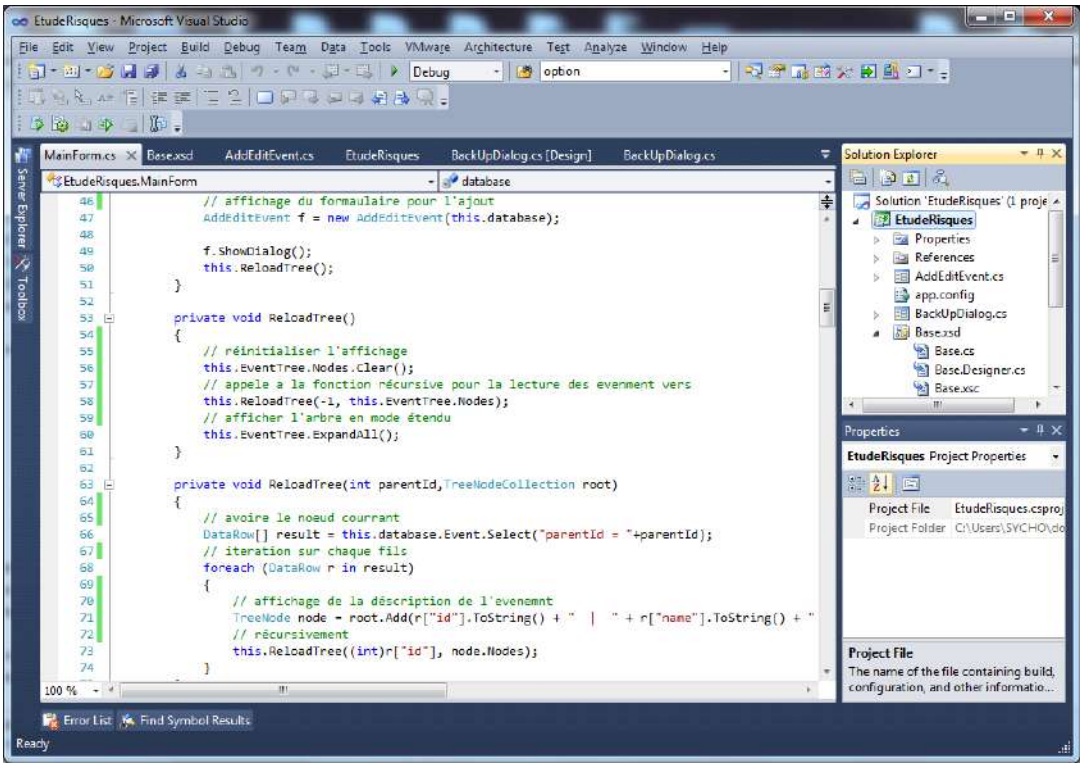
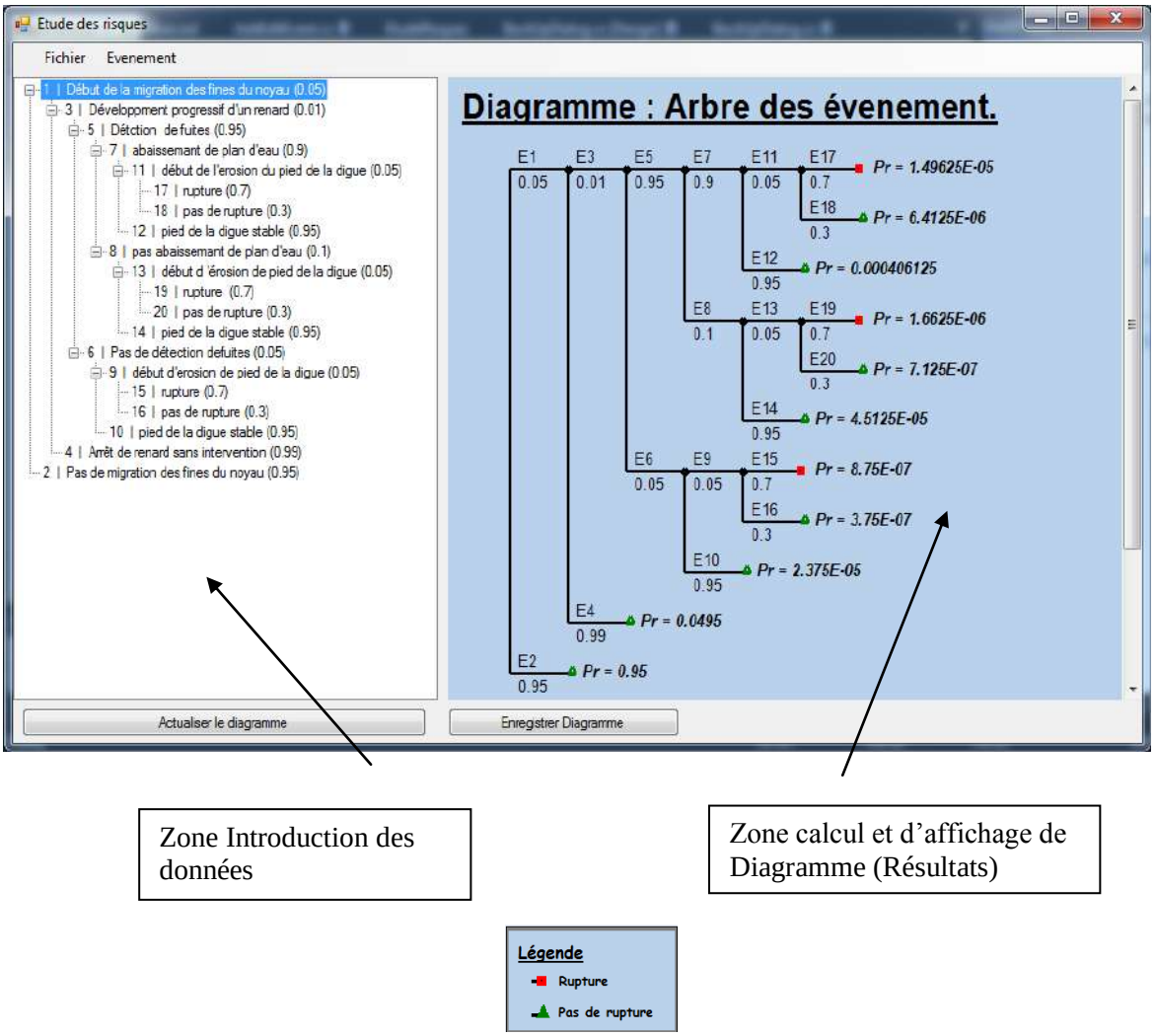


Fig.IV.37 *:Visual studio*

- **Description programme développé («ANRYS ») :**

L'introduction des donnes, l'analyse du risque ainsi que mes résultats sont métrisés grace a l'interface dans la figure IV.38 :



Zone Introduction des données

Zone calcul et d'affichage de Diagramme (Résultats)

Fig.IV.38 : Programe (ANRYS)

On peut incéré ou supprimé un nouvel événement grâce à la commande 'édite',ajouté ou supprimé(figure. IV.39) :

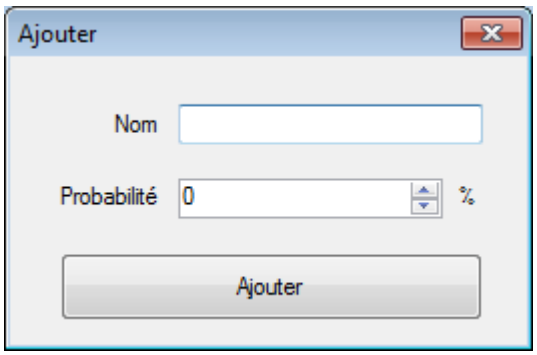


Fig .IV.39.Novell évènement

IV.4. Etude de cas : arbre d'évènement pour le cas d'une érosion interne d'un barrage en terre:

Barrage BOUTAIBA

-commande MAGHRAOUA

-daïra :AL AZIZIA

-wilaya :MéDéa

IV.4.1.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 stables*	*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***

IV.4.2. Calcul et résultats

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

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 :

$$P_{f1}=P_1\ P_3\ P_5\ P_7 P_{11} P_{17}=3{,}0\ .10^{-6}$$

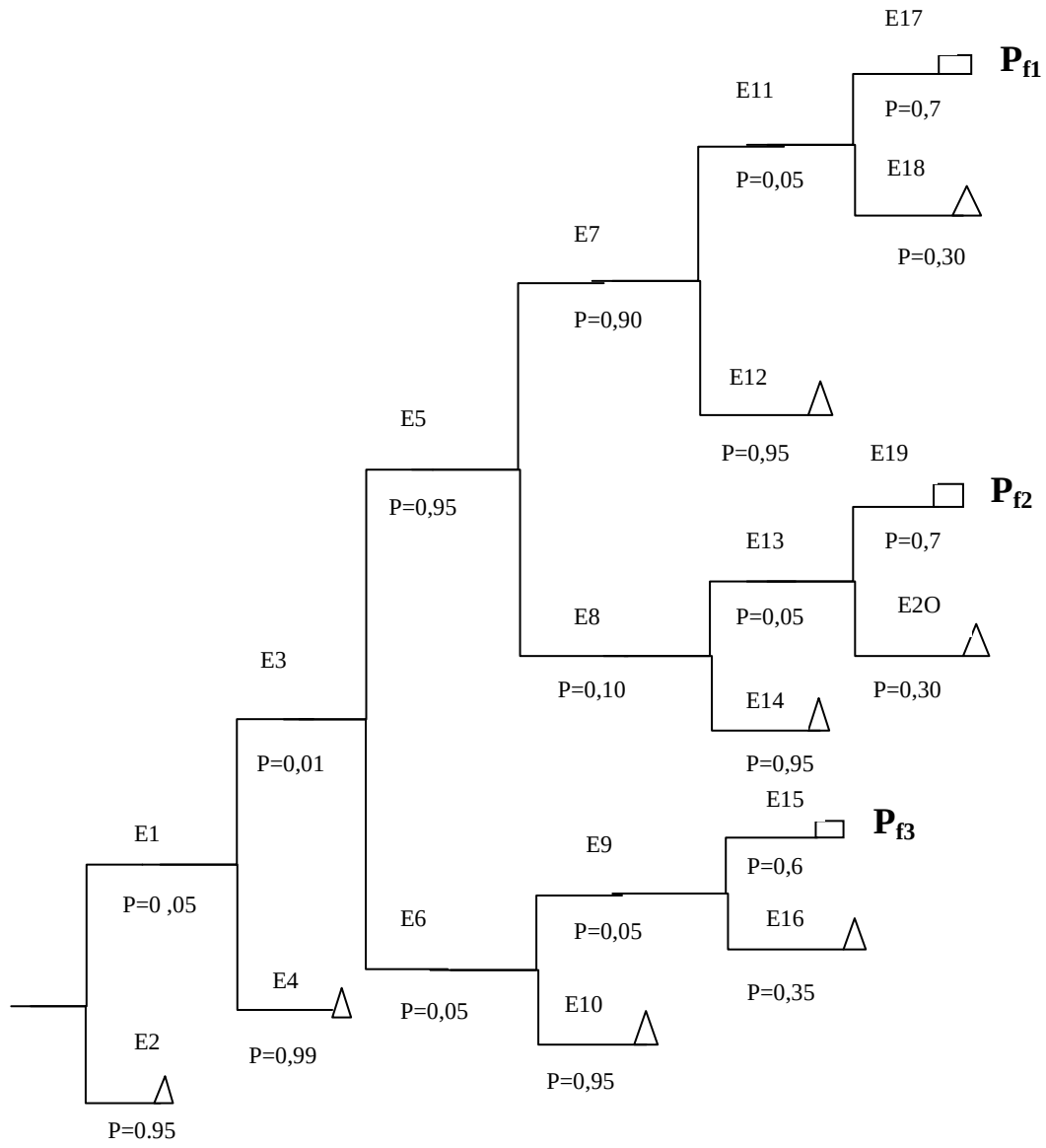
$$P_{f2}=P_1\ P_3 P_5\ P_8\ P_{13}\ P_{19}=1{,}7\ .10^{-6}$$

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

Probabilité de rupture (p_{max}) :

$$p_{max}=\sum p_{fi}= P_{f1}+ P_{f2}+ P_{f3}=5{,}6\ .10^{-6}$$

$$p_{max}=5{,}6\ .10^{-6}$$



△ Stable ; ▭ rupture ;

Scenario 2 :

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

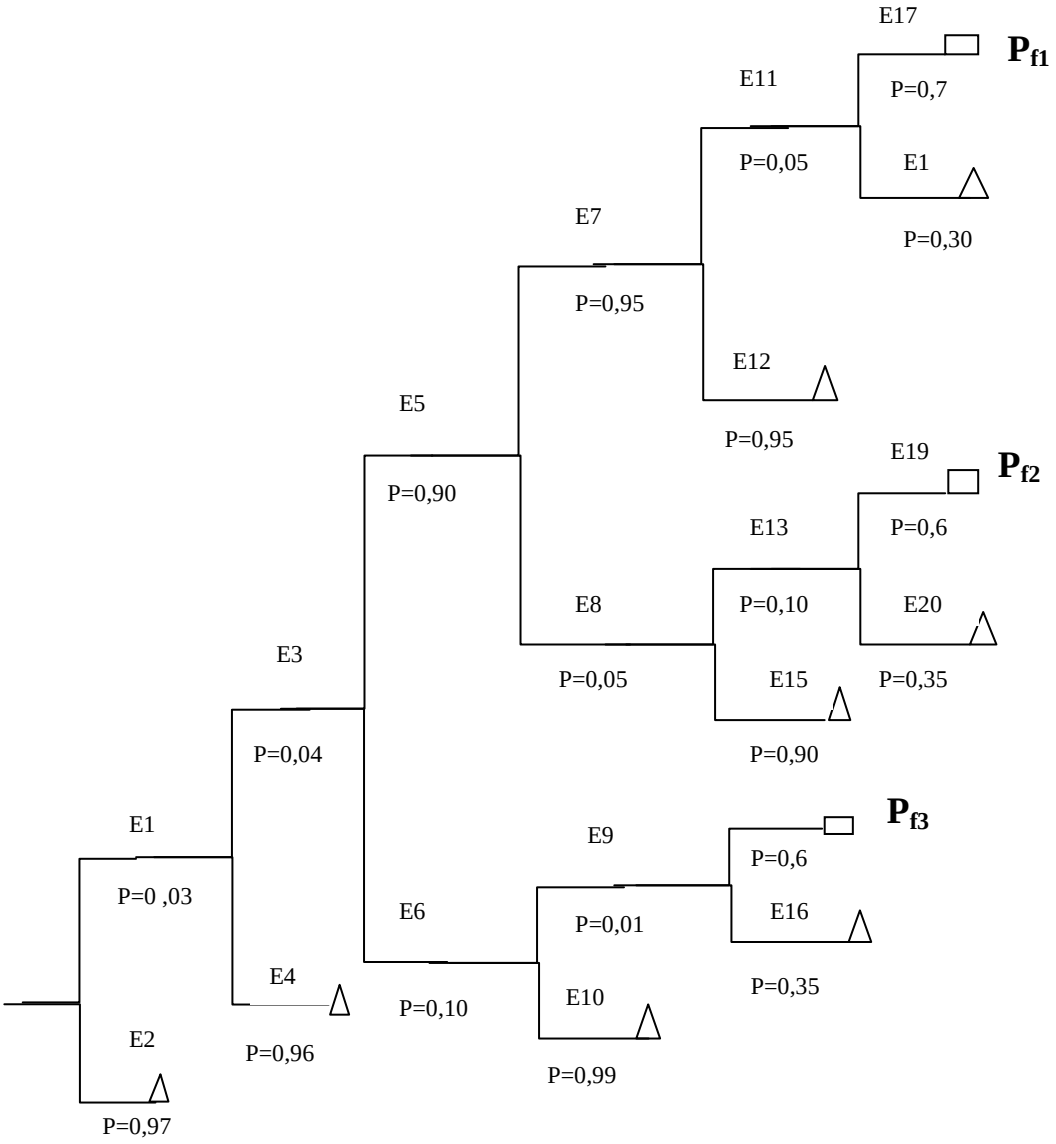
$\mathbf{P_{f2}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_8\ P_{13}\ P_{19}=3{,}5.10^{-6}$

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

Probabilité de rupture (p_{max}) :

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

$\mathbf{p_{max}}=4{,}03\ .10^{-5}$



△ Stable ; ▭ rupture ;

Scenario 3:

$\mathbf{P_{f1}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_7\ P_{11}\ P_{17}=8{,}2\ .10^{-5}$

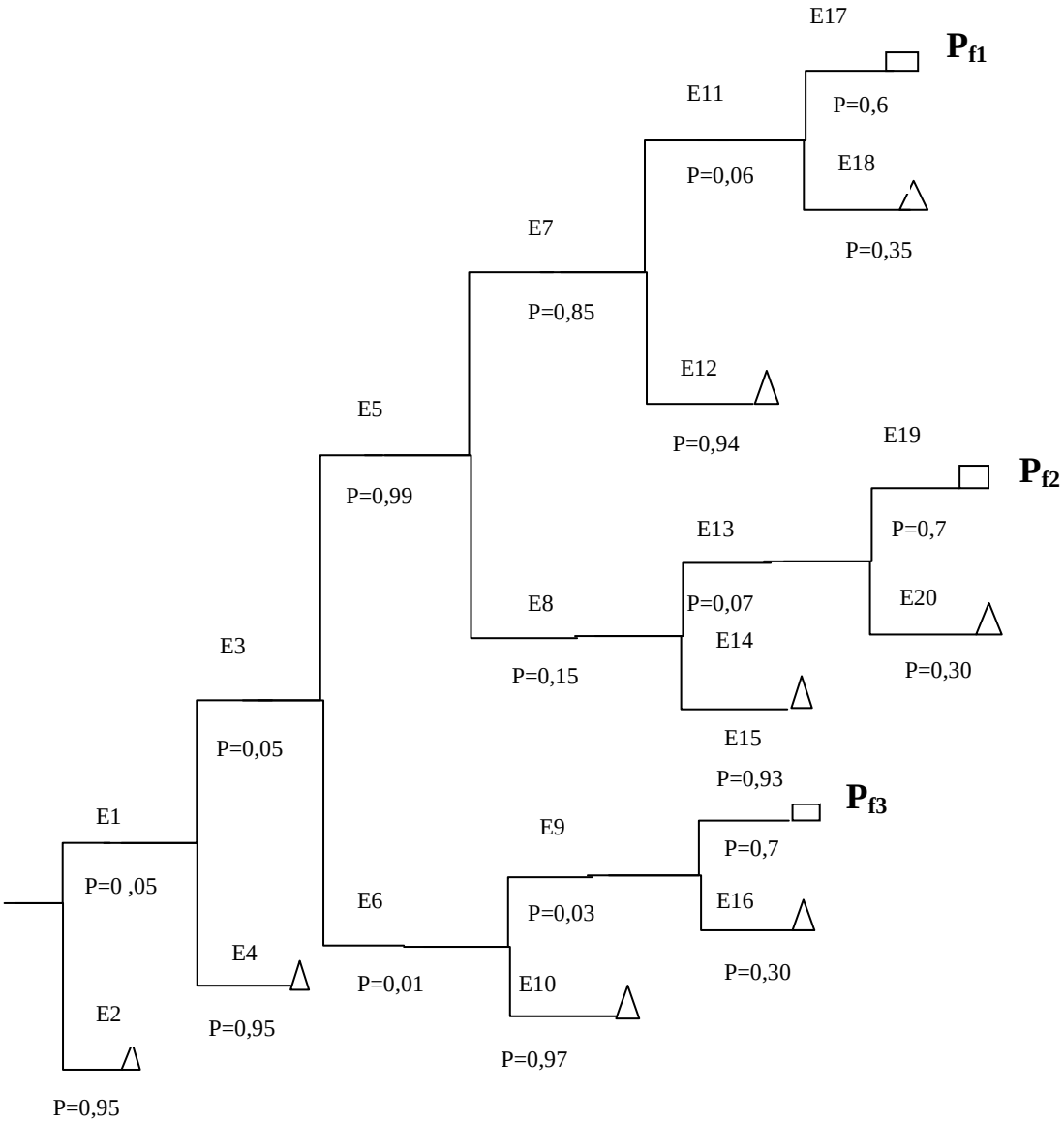
$\mathbf{P_{f2}}=P_1\ P_3\ P_5\ P_8\ P_{13}\ P_{19}=1{,}8\ .10^{-5}$

$\mathbf{P_{f3}}=P_1\ P_3\ P_6\ P_9\ P_{15}=5{,}3\ .10^{-7}$

Probabilité de rupture (p_{max}) :

$\mathbf{p_{max}}=\sum \mathbf{p_{fi}}= \mathbf{P_{f1}}+ \mathbf{P_{f2}}+ \mathbf{P_{f3}}=1{,}005\ .10^{-4}$

$\mathbf{p_{max}}=1{,}005\ .10^{-4}$



△ Stable ; ▭ rupture ;

Remarque :La probabilité annuelle de rupture est la somme des probabilités de rupture pour chacun des scénarios.

Resulta :

Le risque de rupture éxiste 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

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.

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. Les risques peuvent être le résultat des causes techniques, humaines où bien d'un phénomène naturel (séisme, inondation, glissement de terrain…).

A partir de la méthode de l'arbre des événements (conséquences) 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 conséquences, pour évaluer le risque indirect. Mais l'étude des causes de rupture du barrage 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 termes de coût.

Après l'analyse des causes et conséquences des risques du barrage, on a établit une étude de traitement de risque aux étapes suivantes:

- 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 le présent 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 probabilité.

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).

XXIII$_{iemes}$ Rencontres Universitaires de Génie Civil. Risque et Environnement.

[3] American Nuclear Society, 1983: (PRA) Probabilistic risk assessment. Guide: A guide to the performance of probabilistic risk assessment for nuclear power

plants.NUREG/CR.2300. US Nuclear Regulatory Commission, Washington.

[4] Andersen. G. R, Chouinard. L. E, and Al. 2001: Risk indexing tool to assist in prioritizing improvements to embankment dam inventories. Journal of Geotechnical and Geo- environmental Engineering.

[5] Ang. A, Tang. W, 1984: Probability concepts in engineering planning and design. Volume II, Decision, Risk and Reliability.

[6] Ayyub. B. M, et Beach. J. E, et al. 2001: Risk analysis and management for marine systems. International cooperation on marine engineering systems. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

[7] Bekkouche. A, **1987** : Sécurité des grands barrages en terre. Approche probabiliste des problèmes d'écoulement lies aux reconnaissances et contrôles. Thèse de Docteur, Ecole Centrale de paris.

[8] Bekkouche A. 1991 « Les grands barrages, incidents et enseignements », Journées d'étude sur les barrages, Institut de génie civil, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, le 30 et 31Mai.

[9] Benadda. L, 2004 : Etude de la pollution du bassin versant de l'oued Mouillah (haut Tafna). Thèse de Magister d'Hydraulique. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.

[10] Bourdarot. E, 2001 : Analyse du comportement à long terme des barrages voûtes. 3éme Conférence Nationale Fiabilité des Matériaux et des Structure ''JNfiab3'', Bordeaux, Février 2001.

[11] Bruno. M, et Cyril. N, 2000 : Les risques dans la conduite de projet: généralités et exploration de la méthode MMR. Ecole des Mines de Saint Etienne.

[12] Bureau of Reclamation, **2003**: Dam Safety Risk Analysis Methodology.

[13] Bureau of Reclamation, Pacific Northwest Region 1998 «The faillure of Teton dam», note d'information.

[14] Colin. F, 2000: Approche spatiale de la pollution chronique des eaux de surface par les produits phytosanitaires cas de l'atrazine dans le bassin versant du Sousson (Gers, France). Thèse de Doctorat. L'Unité Mixte de Recherche CEMAGREFENGREF « Structures et Systèmes spatiaux », Montpellier.

[15] Comite International des Grands Barrages (1974) :«Leçons tirées des accidents de barrages, édition complète»

[16] Comite International Grands Barrages, 2001: Non-structural risk reduction . Measures. Benefits ad costs for dams.

[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] Costet J et Sanglerat. G, 1975 : Cours pratique de mécanique des sols tome I plasticité et calcul des tassements. Paris

[19] Costet. J et Sanglerat. G, 1975 : Cours pratique de mécanique des sols tome II calcul des ouvrages. Paris.

[20] Degoutte. G, 2002 : Petits barrages recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Comité Français des Grands Barrages.

[21] Degoutte. G, et Royet. R, 2005 : Aide mémoire de mécanique des sols. La publication de l'ENGREF.

[22] Durozoy. G, 1952 : La géologie et les problème de l'eau en algérie. XIX Congrès Géologiques International Alger.

[23] Ezell. B. C, Farr. J. V. al, 2000: Infrastructure risk analysis model. Journal of Infrastructure Systems.

[24] Fasan. L, 2005 : Management des risques appliquée à la gestion de projet.

[25] Favre. J, **1986** : Analyse de la sécurité : fiabilité – risque. Ecole Centrale Paris.

[26] Favre. J, 2004 : Géotechnique sécurité des ouvrages risques modélisation de l'incertain, fiabilité et analyse des risques. Ecole Central Paris

[27] Gagliardini. O, 2004: Principe généraux du dimensionnement des ouvrages. IUP Génie Civil et Infrastructure. UJF. Grenoble.

[28] Ghassan. **Z, 2004** : Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages Thèse de Docteur En Génie Civil – Hydrosystèmes – Géotechnique, Institut National Polytechnique de Lorraine.

[29] Groupement Français Des Associations Du Génie Civil, 2000 : Risque et génie civil. Colloque.

[30] Goro. N, 2004: Etude de dangers – tome 4, dossier établissement – volume 01.

[31] Guide Maghrebien pour l'Execution des Etudes et des Travaux de

Retenues Collinaires 1987: resources en eau dans le pays de l'Afrique du Nord.

[32] Gunzburger. Y et Zornette. N, 2000: Rapport de semaine départementale. Ecole de Mines de Nancy.

[33] Henry. J-B, 2004 : Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine. Thèse de Doctorat. L'Université de Strasbourg I.

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.