



HAL
open science

Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise

Laurent Peyras

► To cite this version:

Laurent Peyras. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise. Sciences de l'environnement. Doctorat spécialité Génie civil, école doctorale des sciences pour l'ingénieur, laboratoire d'études et de recherches en mécanique des structures (LERMES), Université Blaise Pascal II, 2003. Français. NNT: . tel-02581274

HAL Id: tel-02581274

<https://hal.inrae.fr/tel-02581274>

Submitted on 9 Sep 2022

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

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

Année 2003

UNIVERSITE BLAISE PASCAL – CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Thèse

Présentée par

Laurent PEYRAS

Ingénieur ENGEEES

DEA mécanique – Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II)

pour obtenir le grade de :

DOCTEUR D'UNIVERSITE
SPECIALITE : GENIE CIVIL

Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages
Développement de méthodes d'aide à l'expertise

Soutenue publiquement le 9 janvier 2003 devant le jury composé de :

MM	Daniel BOISSIER	Président
	<i>Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) – CUST / LERMES</i>	
	Jean-Jacques FRY	Examinateur
	<i>EDF - CNEH (Chambéry)</i>	
	Jean-Claude MANGIN	Rapporteur
	<i>Université de Savoie (Chambéry) – ESIGEC / LGCH</i>	
	Claude MARCHE	Rapporteur
	<i>Ecole Polytechnique de Montréal (Canada)</i>	
	Paul ROYET	Responsable de thèse
	<i>Cemagref unité de recherche « Ouvrages hydrauliques » (Aix-en-Provence)</i>	
	Alain VERGNE	Directeur de thèse
	<i>Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) – CUST / LERMES</i>	

*Thèse préparée au Cemagref – unité de recherche « Ouvrages hydrauliques »
Et au Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Mécanique des Structures*

Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Cemagref, au sein de l'unité de recherche « Ouvrages hydrauliques » à Aix-en-Provence, en collaboration avec le Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Mécanique des Structures (LERMES) à Clermont-Ferrand.

Je remercie Monsieur Alain VERGNE, Professeur à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) et Directeur Régional de la Recherche et de la Technologie de la région Auvergne, Daniel BOISSIER, Professeur au LERMES et à l'Institut des Sciences pour l'Ingénieur CUST (Université Blaise Pascal), Paul ROYET, ingénieur en chef du génie rural au Cemagref, et Patrice MERIAUX, responsable de l'unité de recherche « Ouvrages hydrauliques » à Aix-en-Provence. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour l'encadrement et le soutien qu'ils ont su m'apporter tout le long de ces trois années.

J'exprime ma sincère reconnaissance à :

- Monsieur Jean-Jacques FRY, Docteur à Electricité de France (Chambéry) et Secrétaire Général du Comité Français des Grands Barrages (CFGB),
 - Monsieur Jean-Claude MANGIN, Professeur au Laboratoire Génie Civil et Habitat (LGCH) et à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Chambéry ESIGEC (Université de Savoie),
 - Monsieur Claude MARCHE, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Montréal (Canada),
- pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger cette thèse, de présider le jury, d'en être les rapporteurs ou examinateurs. Je les remercie vivement de l'intérêt porté à mon travail et du temps qu'ils ont consacré à l'examiner.

Je suis extrêmement reconnaissant à toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail, en particulier les membres du comité de pilotage et ceux qui y ont apporté leur contribution active.

Je souhaiterais également remercier les personnes que j'ai côtoyées au Cemagref et au LERMES, tous les ingénieurs, professeurs, techniciens, thésards, secrétaires, pour les échanges, les contacts et l'ambiance de travail que nous avons partagés.

Ma dernière pensée ira à mes enfants, ma femme, toute ma famille et mes proches.

Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages Développement de méthodes d'aide à l'expertise

Le diagnostic et l'analyse de risques sont des missions essentielles pour assurer la sécurité des barrages en service. Pour réaliser ces tâches, des méthodes puissantes ont été développées et apportent une aide précieuse aux ingénieurs spécialisés : modèles physiques, calculs numériques, statistiques, fiabilité...

Toutefois, face à des ouvrages complexes et uniques, dans des contextes présentant des données insuffisantes, lors de diagnostics préliminaires ou en synthèse d'analyses approfondies, il est nécessaire de recourir au jugement des experts. A partir de leurs connaissances et de leur expérience, ces derniers vont fournir alors une interprétation, un avis ou une recommandation à la question posée.

Cette recherche propose des méthodes d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques dans le cadre d'une approche par expertise. Elle vise à assister les ingénieurs spécialisés lors d'analyses préliminaires et rapides ou en synthèse d'études approfondies.

La démarche adoptée met à profit les connaissances et le retour d'expérience des experts. Elle comporte trois étapes :

- un modèle fonctionnel de vieillissement, bâti à partir de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (méthode AMDE) adaptée au domaine des barrages, et utilisant une représentation sous forme de graphes orientés. Il permet de construire des scénarios de vieillissement en enchaînant des séquences successives de défaillances ;
- une méthode qualitative pour constituer des historiques de vieillissement et pour représenter les lois d'évolution des pertes de performance ;
- des méthodes qualitatives pour évaluer la criticité des pertes de performance des barrages et de leurs composants.

La première partie d'une base de connaissances relative à la pathologie des barrages est réalisée et concerne les scénarios de vieillissement des ouvrages poids.

Après la présentation de différentes applications sur des mécanismes de vieillissement (alcali-réaction des barrages en béton et suffusion interne des remblais) et sur des ouvrages représentatifs de ces mécanismes, nous proposons divers développements et perspectives à cette recherche.

Mots-Clefs : Barrage, Diagnostic, Analyse de risques, Vieillissement, Expertise, Analyse Fonctionnelle, AMDE, Scénario, Historique, Criticité

Diagnosis and risk analysis of dam ageing Development of methods to support expertise

Diagnosis and risk analysis are essential to insure safety of dams in operation. In this field, powerful methods have been produced and provide useful aid support: modelling, simulation, statistical analysis, reliability...

However it is necessary to use expert's judgement when the works are complex and unique, when data is imprecise or insufficient, and when preview diagnosis or detailed analysis synthesis are made. Using their experiences and their knowledge, experts are able to provide answers and recommendations to a specific problem.

This work proposes methods to support diagnosis and risk analysis tasks, within an expertise approach. It is used for specialised engineers during preview diagnosis or studies synthesis.

Our approach is based on capitalising on expert's knowledge and feedback. It is composed of three parts:

- an ageing functional model, built up with FMEA method, adapted to dam context and using a Causal Graph representation. This modelling represents ageing scenarios leading to loss of functions,
- a qualitative method to write dam ageing history and to represent evolution laws of performance loss,
- qualitative methods to assess the criticality of performance loss of dams and their components.

The first part of a knowledge database about dam ageing has been produced, concerning gravity dam mechanisms.

After applying these methods to specific ageing mechanisms (alkali-aggregate reaction on concrete gravity dam and internal erosion on embankment dams) and to example of dams concerned by these mechanisms, we propose various developments and prospects to this work.

Keywords: Dam, Diagnosis, Risk analysis, Ageing, Expertise, Functional analysis, FMEA, Scenario, Ageing History, Criticality

<i>Introduction</i>	1
---------------------	---

Partie 1 : Contexte du diagnostic et de l'analyse de risques dans le domaine des barrages

I. Les principaux dispositifs de gestion des ouvrages de génie civil	3
I.1. Les concepts généraux de gestion des ouvrages de génie civil	3
I.2. Les différents dispositifs de gestion	5
I.3. Les parcs d'ouvrages hétérogènes	6
I.4. Synthèse	7
II. Le parc de barrages relevant du contrôle du ministère chargé de l'environnement	8
II.1. Présentation du parc de barrages	8
II.2. Les dispositifs de gestion du parc de barrages	12
III. Le diagnostic et l'analyse de risques des barrages	17
III.1. Le diagnostic et l'analyse de risques dans le contexte général de l'industrie	17
III.2. Les pratiques du diagnostic et de l'analyse de risques dans le contexte des barrages	23
III.3. Approche du diagnostic et de l'analyse de risques pour les barrages relevant du ministère de l'environnement	33
IV. Proposition	35

Partie 2 : Les mécanismes de vieillissement des barrages

I. Introduction à l'étude des mécanismes de vieillissement	37
I.1. Support bibliographique	37
I.2. Cadre de l'étude	37
I.3. Classification des mécanismes de vieillissement	39
II. Les mécanismes de vieillissement des barrages poids	40
II.1. Les différents barrages poids	40
II.2. Les scénarios de vieillissement de la fondation	41
II.3. Les scénarios de vieillissement du corps du barrage	43
III. Les mécanismes de vieillissement des barrages en remblai	50
III.1. Les différents barrages en remblai	50
III.2. Les scénarios de vieillissement de la fondation	51
III.3. Les scénarios de vieillissement du remblai	54
IV. Synthèse	61

Partie 3 : Modélisation des scénarios de vieillissement

I. Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes	62
I.1. Analyse fonctionnelle des systèmes	62
I.2. Les techniques de la Sécurité de Fonctionnement	65
I.3. Les modèles issus du raisonnement qualitatif	72
I.4. Principes et démarche d'analyse du vieillissement des barrages	75
II. Proposition d'un modèle pour les scénarios de vieillissement des barrages	77
II.1. Analyse fonctionnelle des barrages	77
II.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leur Effets pour les barrages	85
II.3. Représentation des scénarios de vieillissement sous forme de graphe causal	91
III. Modélisation des mécanismes de vieillissement des barrages	94
III.1. Classification des fonctions	94
III.2. Classification des phénomènes	96
III.3. Classification des symptômes	99
III.4. Constitution de la collection de scénarios de vieillissement	104
IV. Synthèse	107

Partie 4 : Analyse de la criticité

I. Généralités et principes	110
I.1. Concept de criticité	110
I.2. Les différentes approches pour l'évaluation de la criticité	111
I.3. Les données des détériorations des barrages	114
I.4. Proposition pour l'analyse de la criticité	116
II. Analyse qualitative des dégradations	117
II.1. Analyse de l'état des dégradations à l'échelle du composant	117
II.2. Analyse de l'évolution de la performance à l'échelle du composant	124
II.3. Analyse de la performance globale d'un barrage	128
III. Modélisation des historiques de vieillissement	132
III.1. Démarche de la modélisation des historiques	132
III.2. Constitution de la base de données d'historiques de vieillissement	133
IV. Analyse qualitative de la criticité	135
IV.1. Analyse de la criticité à l'échelle du composant	135
IV.2. Analyse de la criticité globale d'un barrage	142
IV.3. Prise en compte des événements exceptionnels	143
V. Synthèse	148

Partie 5 : Applications et Valorisation

I. Applications	150
I.1. Modélisation d'un scénario de vieillissement de barrage poids : l'alcali-réaction	150
I.2. Modélisation d'un historique de vieillissement de barrage poids : le barrage du Chambon	153
I.3. Analyse de la criticité appliquée au barrage du Chambon	161
I.4. Modélisation d'un scénario de vieillissement de barrage en remblai : la suffusion interne	163
I.5. Modélisation d'un historique de vieillissement de barrage en remblai : le barrage de Cublize	167
I.6. Analyse de la criticité appliquée au barrage de Cublize	176
I.7. Synthèse des applications	178
II. Valorisation	179
II.1. Recherche et développement	179
II.2. Utilisation	181

Conclusion 185

Bibliographie 188

Index des tableaux et figures 196

Annexes

AMDE : Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

Méthode inductive d'analyse de système utilisée pour l'étude systématique des causes et effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système (NF X60-510, CEI 812-1985, norme MIL-STD 1629A).

Analyse fonctionnelle

Démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions (NF X50-150).

Analyse de la valeur

L'*analyse de la valeur* a pour objectifs, à partir de l'expression d'un besoin, de déterminer les différentes solutions susceptibles de répondre à ce besoin et de parvenir à la meilleure optimisation technico-économique du couple besoin-solution [ZWINGELSTEIN,95].

Besoin

Le *besoin* est la nécessité ou le désir éprouvé par un utilisateur (NF X50-150).

Composant

Élément matériel ou ensemble matériel remplissant une fonction particulière dans un système ou un sous-système [ZWINGELSTEIN,96].

Criticité/Analyse de la criticité

Criticité : risque de dégradation ou de défaillance d'une fonction d'un composant d'un système.

Analyse de la criticité : activité qui consiste à classer chaque mode de défaillance en prenant en compte simultanément l'influence de la classification de la sévérité et sa probabilité d'apparition (MIL-STD-1269A).

Défaillance

Altération ou cessation de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques (NF X60-010).

Dégradation (d'une fonction)

Catégorie de perte de performance, correspondant à une diminution de la performance d'une fonction restant néanmoins supérieure au seuil fonctionnel [CREMONA,02].

Dégradation (d'une entité)

L'état d'une entité présentant une perte de performance d'une de ses fonctions ou un sous-ensemble lui-même dégradé [ZWINGELSTEIN,96].

Détérioration (des barrages)

Tout comportement défectueux du point de vue de la sécurité et des performances, y compris les accidents et les ruptures [ICOLD,83].

Diagnostic

Identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test (AFNOR, CEI).

Durabilité

Aptitude d'une entité à accomplir une (des) fonction(s) requise(s) dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un (des) état(s) limite(s) soit (soient) atteint(s) (NF X60-500).

Fiabilité

Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné (NF X60-500).

Fonction

Actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées exclusivement en terme de finalité (NF X50-150).

Expert/Expertise/Jugement expert

Expert : personne disposant d'un savoir et d'un savoir-faire [ZWINGELSTEIN,95].

Expertise : ensemble d'activités ayant pour objet de fournir à un client, en réponse à la question posée, une interprétation, un avis ou une recommandation aussi objectivement fondés que possible, élaborés à partir des connaissances disponibles et de démonstrations, accompagnés d'un jugement professionnel (norme x50-110).

Jugement expert : processus intellectuel d'appréciation, d'évaluation, d'estimation ou d'explication conduisant à énoncer une opinion, sur un sujet ou un objet, fondé sur l'expérience professionnelle dans un domaine défini (norme x50-110).

Granularité

Finesse « d'un grain » d'un modèle. La *granularité spatiale* est l'échelle spatiale de description d'un système ; la *granularité temporelle* est la finesse du pas de temps dans la description d'une chronologie.

Historique de vieillissement

Chronologie de détérioration d'un barrage ou de dégradation de ses fonctions et de celles de ses composants.

Imprécis/Imprécision

Il concerne des informations mal définies ; on lui associe les qualificatifs de type : « environ », « à peu près », « dans l'intervalle », « compris entre et entre », « approximativement »... ; il représente la qualité de la connaissance que nous avons d'un phénomène [BOISSIER,00].

Incertain/Incertitude

Il résulte essentiellement d'une épreuve dont le résultat n'est pas connu a priori et peut changer si on recommence ; il représente la variabilité d'un phénomène. Dans notre domaine, certaines données (charges et résistances par exemple) sont, par nature même, *incertaines* ; leur variabilité spatio-temporelle est irréductible (données climatiques, propriétés des matériaux, charges d'exploitation...) [BOISSIER,00].

Incomplet/Incomplétude

Absence de connaissance ou connaissance partielle, c'est-à-dire impossibilité d'obtenir certains renseignements [BOUCHON-MEUNIER,95].

Maintenance

Toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management (NF X60-010).

Mode de défaillance

Un mode de défaillance est la non-réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte de fonction, dégradation de fonction, fonction intempestive. [ISDF]

Mécanisme de vieillissement

Processus de vieillissement. Idem que « scénario de vieillissement »

Pathologie

Science qui a pour objet l'étude des maladies, des effets qu'elles provoquent (Robert).

Performance

Aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue. Par extension, on parle de *performance d'une fonction* pour indiquer l'état de réalisation de la fonction.

Occurrence/Mesure de l'occurrence

Occurrence : cas, circonstance (Robert).

Mesure de l'occurrence d'un événement : évaluation de l'apparition d'un événement (probabilité ou délai temporel d'apparition de l'événement).

Risque/ Analyse de risques

Risque : mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences [VILLEMEUR,88].

Analyse de risques : activité qui consiste à répondre aux trois questions suivantes :

- qu'est-ce qui peut conduire à des situations de danger ?
- quelles sont les chances que ces situations se produisent ?
- si elles se produisent, à quelles conséquences doit-on s'attendre ? [KAPLAN,97]

Rupture (d'un barrage)

Rupture ou mouvement d'une partie d'un barrage ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau. En général, le résultat sera une « lâchure » d'un volume d'eau important [ICOLD,95].

Scénario de vieillissement (des barrages)

Enchaînement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques et propriétés des barrages et de leurs ouvrages annexes [ICOLD,93a].

Sûreté de Fonctionnement/sûreté de fonctionnement

La *Sûreté de Fonctionnement* est la Science des Défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise [VILLEMEUR,88].

La *sûreté de fonctionnement* est l'aptitude d'une entité à accomplir une ou plusieurs fonctions requises, dans des conditions données. La sûreté de fonctionnement est caractérisée par différents concepts, notamment la *fiabilité* et la *durabilité* [VILLEMEUR,88].

Système

Ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction [VILLEMEUR,88].

Vieillessement (des barrages)

Catégorie de détérioration due aux altérations au cours du temps des propriétés des matériaux et des structures [ICOLD,93a]. Dans le rapport, nous parlons de *vieillessement* dès lors que la détérioration n'est pas liée à un seul défaut d'adaptation ou de réglage de l'ouvrage immédiatement après sa construction.

Introduction

Evaluer la sécurité d'un ouvrage de génie civil en service, détecter les comportements anormaux, déterminer les origines d'une dégradation ou expertiser les causes d'un incident, prévoir les évolutions futures et les risques potentiels, décider des mesures appropriées ... telles sont les missions de diagnostic et d'analyse de risques accomplies par les ingénieurs spécialisés du génie civil. Pour réaliser ces tâches, des méthodes puissantes existent et apportent une aide précieuse : modèles physiques, calculs numériques, statistiques, fiabilité...

Toutefois, face à des ouvrages complexes et uniques, dans des contextes présentant des données insuffisantes, lors de diagnostics préliminaires, en situation d'urgence... ou encore en synthèse d'analyses approfondies, il est nécessaire de recourir au jugement des experts. A partir de leurs connaissances et de leur expérience, ces derniers vont fournir alors une interprétation, un avis ou une recommandation à la question posée.

Dans le domaine du génie civil, les barrages ont toujours été considérés comme des ouvrages d'art spécifiques. Les raisons se trouvent, 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. A ce titre, les règlements du génie civil excluent les barrages de leur champ d'application, comme les Directives Communes de 1979, le fascicule 62 titre V et, plus récemment, les Eurocodes.

De fait, là encore plus que dans le reste du génie civil, l'expert joue un rôle incontournable pour le diagnostic et l'analyse de risques des ouvrages en service.

Disposer d'une capacité d'expertise de haut niveau apparaît donc comme un objectif essentiel des exploitants de barrages, des bureaux spécialisés qui les assistent et des services de l'administration qui les contrôlent. Les enjeux sont avant tout d'assurer la sécurité des personnes et des biens menacés en cas de rupture, mais aussi la gestion des ouvrages la mieux adaptée (continuité de service, optimisation de leur maintenance, programmation des travaux plus lourds).

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 mises au point : modélisation des lois de comportement, calculs par éléments finis, modèles statistiques, études de sûreté de fonctionnement... A partir de données abondantes (auscultation, essais...) et appuyées par l'analyse experte, ces approches sont performantes pour le diagnostic et l'analyse de risques approfondis des barrages.

En revanche, il n'y a eu que peu de travaux destinés à développer l'approche experte et les quelques initiatives visant à constituer des bases de données d'incidents de barrages ou, de façon plus large, visant à capitaliser le retour d'expérience, n'ont pas donné encore de résultats probants. Les difficultés apparaissent très importantes : absence de méthodologie, données variées et dynamiques, mécanismes de vieillissement complexes et multiples, imprécision et incomplétude des informations, manque de transparence et réticence à la communication...

Remarquons que cette démarche consistant à sauvegarder l'expérience, la connaissance des systèmes en exploitation ou l'histoire des événements est néanmoins présente, à un stade plus ou moins avancé, dans de nombreux domaines : l'industrie à risque technologique et de production, le génie civil à grand linéaire (réseaux enterrés, routiers...) ou les ouvrages d'art (ponts, tunnels, barrages...), les disciplines à approche événementielle (hydrologie, mouvements de terrain, avalanches...).

L'objectif de notre recherche est de proposer des méthodes d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques dans le cadre d'une approche par expertise. Elle vise à assister les ingénieurs spécialisés lors d'analyses préliminaires et rapides ou lors de synthèses d'études approfondies. Le principe de notre démarche est de tirer profit des connaissances et de l'abondant retour d'expérience accumulés par les experts pour de nouvelles missions. D'autres objectifs sont sous-jacents : sauvegarder l'expérience des experts seniors, aider les jeunes ingénieurs, accéder rapidement aux informations...

Notre travail s'inscrit clairement dans le cadre d'un environnement professionnel fort, à vocation de contrôle, de diagnostic et de suivi des ouvrages hydrauliques de génie civil et plus particulièrement des barrages. Par conséquent, il est nécessairement mené en considérant les pratiques de la profession et présente une vocation applicative.

Nous présentons dans une première partie le contexte dans lequel nous travaillons. Après avoir rappelé les dispositifs généraux de gestion des ouvrages de génie civil, nous présentons le parc de barrages relevant du contrôle du ministère chargé de l'environnement qui va plus particulièrement nous intéresser tout le long de cette étude et nous relevons alors les spécificités de ces ouvrages et de leur mode de gestion.

Dans cette analyse, il nous a semblé intéressant de faire un point bibliographique sur les méthodes de diagnostic et d'analyse de risques utilisées dans le contexte industriel puis dans celui des barrages, permettant ensuite d'établir des propositions pour conduire notre recherche.

Dans la seconde partie, nous établissons une synthèse sur la pathologie des barrages, en distinguant les ouvrages poids et les remblais. Ce travail permet de disposer d'une collection complète de mécanismes de vieillissement à laquelle nous nous référons tout au long du rapport.

Nous proposons ensuite un modèle de vieillissement qui est exposé en détail dans la troisième partie. Nous présentons les méthodes disponibles, la démarche adoptée, les techniques utilisées et les adaptations qu'elles ont nécessitées. Nous détaillons l'Analyse Fonctionnelle et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets, qui ont été aménagées pour pouvoir être développées au contexte particulier des barrages.

Dans la partie 4 consacrée à la constitution des historiques de vieillissement et à l'analyse de la criticité, nous examinons l'évolution au cours du temps des mécanismes. Les informations en jeu concernent les incidents de barrages et leur vieillissement au cours de leur vie. Il s'agit donc de données historiques issues du retour d'expérience, qui sont moins nombreuses et documentées que celles traitées dans la partie 3 et liées aux mécanismes, motivant ainsi leur analyse dans une partie distincte.

A partir de méthodologies qualitatives, nous détaillons comment constituer des historiques de vieillissement, puis comment évaluer la criticité d'un barrage soumis à un mécanisme.

Nous proposons enfin en dernière partie des applications sur deux mécanismes distincts relatifs aux barrages poids et en remblai (l'alcali-réaction et la suffusion interne), puis sur deux barrages représentatifs de ces processus d'altération. Pour chacun d'eux, nous examinons successivement la modélisation du scénario, de l'historique de vieillissement et l'analyse de la criticité.

Nous concluons cette dernière partie par les valorisations que nous envisageons à court terme, dans les axes de recherche et développement (base de connaissances, base de données d'historiques) et d'utilisation (outils informatiques d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques).

Partie 1

Contexte du diagnostic et de l'analyse de risques dans le domaine des barrages

I. Les principaux dispositifs de gestion des ouvrages de génie civil

II. Le parc de barrages relevant du contrôle du ministère chargé de l'environnement

III. Le diagnostic et l'analyse de risques des barrages

IV. Proposition

I. Les principaux dispositifs de gestion des ouvrages de génie civil

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux concepts liés à la gestion et la maintenance des ouvrages de génie civil (I.1). Nous esquissons ensuite un panorama des différents dispositifs de gestion de ces ouvrages (I.2) et nous examinons plus en détail le cas des parcs hétérogènes (I.3).

I.1. Les concepts généraux de gestion des ouvrages de génie civil

I.1.1. Définitions générales

Un *système de génie civil* (un ouvrage ou un ensemble d'ouvrages) se définit, d'une part à partir des éléments structurels (ou des sous-systèmes) qui le composent, et d'autre part à partir des fonctions qu'il accomplit. A chaque niveau de décomposition du système, les éléments structurels remplissent à leur tour des fonctions qui contribuent à la réalisation des fonctions globales de l'infrastructure (Figure 1.1). [CREMONA,02]

Ainsi, deux types d'analyses permettent de définir un système de génie civil : **structurelle** et **fonctionnelle**.

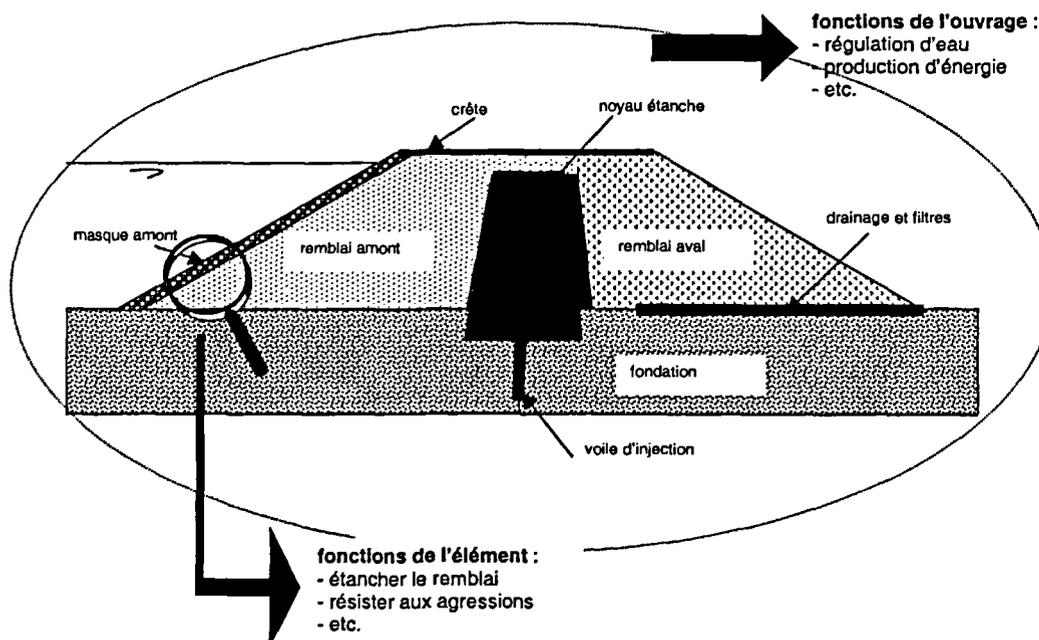


Figure 1.1 : *Éléments et fonctions d'un système de génie civil particulier (barrage)*

L'aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue est appelée la **performance**. Les performances d'un système de génie civil sont amenées à évoluer durant sa vie : les fonctions initialement prévues lors de la construction peuvent être modifiées volontairement par le gestionnaire ou encore des événements extérieurs et des dégradations

peuvent perturber les fonctions initiales. Trois principales causes peuvent provoquer les pertes de performances : [CREMONA,02]

- le vieillissement de l'infrastructure ;
- les causes humaines s'exerçant par erreur ;
- les causes extérieures prévues ou imprévues.

On considère deux catégories de perte de performance (Figure 1.2) :

- la **dégradation** qui est une diminution de la performance d'une fonction restant néanmoins supérieure au seuil fonctionnel ou à l'état-limite (état ou phénomène que l'on souhaite éviter) [CREMONA,02] ;
- la **défaillance** qui est « altération ou la cession de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou (ses) fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques » (norme NF X60-010). Dans ce cas, une au moins des performances est inférieure au seuil fonctionnel.

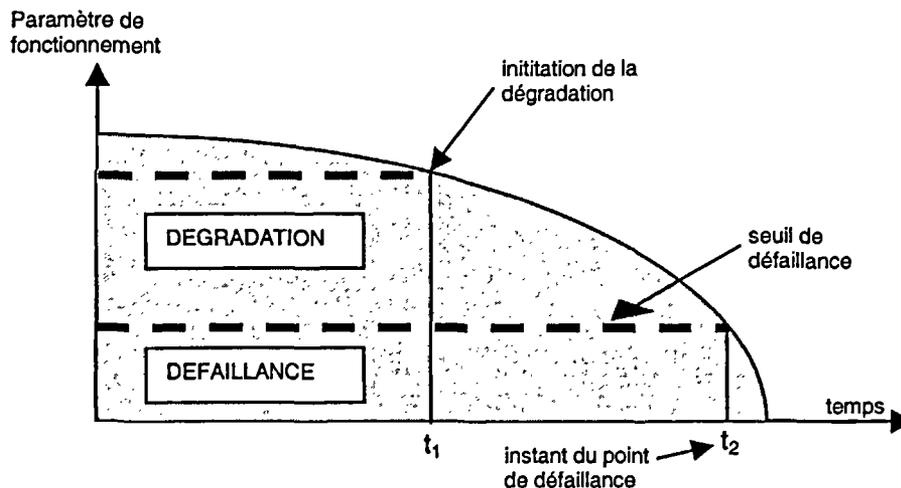


Figure 1.2 : Dégradation et défaillance [ZWINGELSTEIN,96]

La performance d'un ouvrage de génie civil est caractérisée par plusieurs critères, définis par la norme (NF X60-500), notamment :

- la **fiabilité** est l'aptitude de l'ouvrage à assurer ses fonctions, dans des conditions données, pendant une période de temps donnée ;
- la **durabilité** est l'aptitude à demeurer en état d'accomplir ses fonctions, dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

L'évaluation de la performance d'un ouvrage de génie civil en service comprend une évaluation de son état, puis une évaluation de sa performance [CREMONA,02].

L'évaluation de l'état est une étape de diagnostic où les dégradations de l'ouvrage et leur histoire sont recherchées ; la qualité des informations disponibles sur la structure y est fondamentale.

L'évaluation de la performance est ensuite réalisée comme en conception, mais avec l'état structural réel de l'ouvrage en cours d'exploitation.

1.1.2. Maintenance et surveillance des ouvrages de génie civil

La **maintenance** comprend « toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management » (norme NF X60-010).

En fonction du type de structure et de la politique d'exploitation des ouvrages, on rencontre deux principales stratégies de maintenance pouvant s'appliquer aux ouvrages : **corrective** et **préventive**, dont les détails apparaissent à la figure 1.3. [ZWINGELSTEIN,96]

La maintenance préventive va chercher à anticiper les pertes de performances au moyen d'un suivi rapproché de l'état de l'ouvrage et à apporter les mesures correctives avant la défaillance. Elle est appliquée pour les ouvrages présentant des risques forts, comme les grands barrages [COTTIN,02] ou les grands ouvrages d'art routiers [BOIS,02].

A contrario, la maintenance corrective intervient après le constat de la défaillance ou de la dégradation et est mise en œuvre dans des contextes où l'enjeu est plus limité, comme les réseaux enterrés d'assainissement [BREYSSE,02].

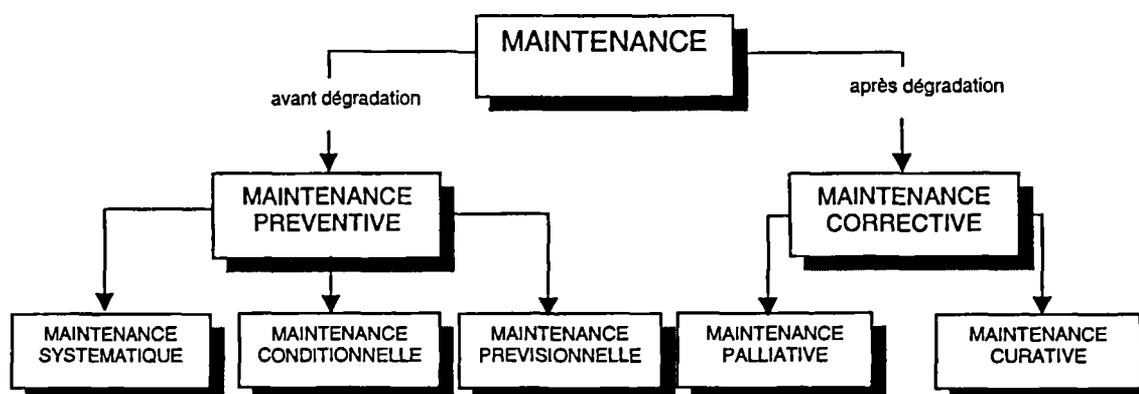


Figure 1.3 : Les stratégies de maintenance

La pratique de la maintenance des ouvrages de génie civil consiste essentiellement en des mesures de **surveillance**, régies le plus souvent par la réglementation. La surveillance comprend des techniques d'**inspection** pour lesquelles on retrouve un cadre commun aux différents ouvrages de génie civil : les *inspections régulières visuelles* réalisées plusieurs fois par an (détection des anomalies et maintenance préventive), les *inspections détaillées* correspondant à la fréquence d'une ou quelques années (grosse maintenance) et la *haute surveillance* en cas de sollicitations accidentelles, de dégradations évolutives ou de risque imminent. La surveillance inclut également l'**auscultation** des ouvrages et les mesures en continue. [CREMONA,02]

1.2. Les différents dispositifs de gestion

La gestion d'un parc d'ouvrages ou la politique d'Inspection Maintenance Réparation (IMR) a pour objectifs principaux : [CREMONA,02]

- d'assurer la sécurité des usagers et la protection de l'environnement ;
- d'assurer que l'ouvrage remplisse ses fonctions requises ;
- d'assurer la conservation d'un patrimoine pour une durée déterminée, se plaçant généralement sur du long terme.

Pour répondre à ces objectifs, le **dispositif de gestion** (ou le dispositif d'IMR) comprend les procédures destinées à assurer la maintenance. Il inclut les méthodes et outils (surveillance, acquisition et traitement de données...), les modes d'organisation, les personnels aux différents niveaux de qualification, les bases de données (inspection, historiques...) et la réglementation.

Les stratégies de maintenance reposent sur la prévision de l'évolution des ouvrages, en fonction de son environnement et des sollicitations auxquelles il sera soumis. Elles dépendent de la typologie du parc d'ouvrages, en particulier de son **homogénéité** ou de son **hétérogénéité**. [CREMONA,02]

Dans le contexte d'un parc important *d'ouvrages homogènes* où des données statistiques sont disponibles et où les mécanismes sont bien maîtrisés, la **maintenance basée sur la fiabilité** est une alternative intéressante aux approches déterministes. Elle est fondée entre autres sur la connaissance des taux de fiabilité des éléments du système : [ZWINGELSTEIN,96]

- identification des paramètres rentrant dans les conditions d'états-limites ;
- caractérisation statistique de ces paramètres (lois et moments) ;
- recherche des probabilités de non respect des conditions d'état-limite.

Cette approche est couramment appliquée dans l'industrie Offshore [GOYET,01-02] et le nucléaire [ARDILLON,02], mais aussi aux réseaux de distribution [MALANDAIN,99]. Nous renvoyons le lecteur intéressé vers [ZWINGELSTEIN,96].

La maintenance basée sur la fiabilité trouve ses limites dès lors que les données sont en quantités insuffisantes : mesures expérimentales difficiles, données statistiques peu nombreuses... Les calculs de probabilité deviennent alors rapidement insurmontables, voire impossibles.

1.3. Les parcs d'ouvrages hétérogènes

1.1.3. Gestion basée sur le retour d'expérience

Face à un parc *d'ouvrages hétérogènes* ou d'ouvrages homogènes en petit nombre, dans des situations de structures mal connues, les données disponibles sont de mauvaise qualité ou en petite quantité et rendent difficile la prévision de l'évolution des dégradations.

Dans ce contexte, la façon la plus simple d'évaluer les évolutions futures des dégradations est d'examiner les lois d'évolution d'ouvrages existants de même conception et ayant connu des mécanismes analogues. [CREMONA,02]

Nous présentons le principe de ce raisonnement à la figure 1.4.

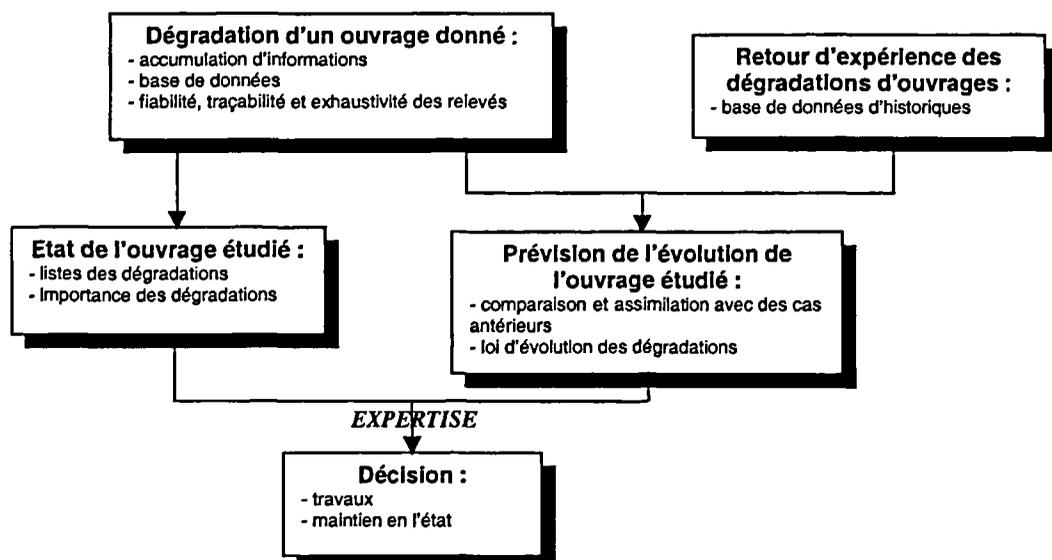


Figure 1.4 : Démarche de gestion basée sur le retour d'expérience

Quelques gestionnaires de parcs d'ouvrages hétérogènes pratiquent cette approche basée sur le retour d'expérience et appuyée par l'expertise. Nous présentons l'exemple du parc des tunnels en briques, exploité par le Réseau Ferré de France (RFF), représentatif de ce mode de gestion. Les informations liées à cet exemple sont issues de [THIAUDIERE,02].

1.1.4. Un exemple représentatif de gestion d'un parc d'ouvrages hétérogènes

Le patrimoine du RFF comporte quelques 1500 ouvrages souterrains, composés de différentes populations : les tunnels où la roche était laissée à nu, les tunnels avec revêtement en maçonnerie de moellons et les tunnels en maçonnerie de briques. Ces derniers ne représentent qu'une petite partie du linéaire, constituant une population hétérogène à l'intérieur du parc. Il s'agit d'ouvrages anciens présentant un étalement des constructions assez large entre 1850 et 1900. Pendant cette période, les techniques de percement ont évolué avec l'expérience et les moyens de forage, donnant autant de conceptions différentes.

Si les principaux mécanismes de vieillissement de ces ouvrages sont bien connus, il n'existe en revanche pas de méthodes de calcul de stabilité. Par conséquent, la stratégie de maintenance est basée sur la surveillance des ouvrages et de leurs éléments critiques et la traçabilité des inspections. Ainsi, le gestionnaire a mis en œuvre un dispositif formel de suivi, axé sur :

- ❶ le choix d'un personnel qualifié, spécialement formé à l'observation des ouvrages d'art ;
- ❷ des visites cycliques réglementaires, comprenant :
 - les visites annuelles : contrôle des constatations faites lors de l'inspection détaillée ; report des évolutions ;
 - les inspections détaillées (tous les cinq ans) : enregistrement des avaries à l'aide de fiches synthétiques ; application d'une note à chaque type d'avarie ; détermination d'une note d'état globale pour chaque ouvrage ; prévision de l'évolution des dégradations à 10 ans basée sur le retour d'expérience.
- ❸ l'engagement dans une démarche qualité pour homogénéiser les relevés d'avaries entre opérateurs de terrain lors des inspections détaillées.

Ainsi, la gestion des tunnels en briques correspond à une approche basée sur le retour d'expérience (Figure 1.4), qui se caractérise par les étapes suivantes :

- accumulation d'informations ;
- comparaison et analogie avec des cas antérieurs ;
- préfiguration de l'évolution future de l'ouvrage (expertise) ;
- prescription de travaux et ordre de priorité de réalisation.

1.4. Synthèse

La gestion d'un parc d'ouvrages de génie civil vise, d'une part à assurer les fonctions fixées par le gestionnaire (notamment la sécurité), et d'autre part la conservation d'un patrimoine sur le long terme. Pour cela, la maintenance et la surveillance (l'activité d'IMR) sont des tâches essentielles pour maintenir les performances des ouvrages.

Le mode de gestion est étroitement lié à la typologie du parc d'ouvrages, en particulier son homogénéité ou son hétérogénéité, ou encore aux données disponibles et à la connaissance des mécanismes de vieillissement ; en fonction de ces caractéristiques, les approches peuvent être basées sur la fiabilité ou sur le retour d'expérience et l'expertise.

Par conséquent, il apparaît primordial de présenter avec précision le contexte de nos travaux et le parc d'ouvrages concerné. Nous allons examiner successivement leur typologie, les dispositifs de gestion, les mécanismes de vieillissement et les données disponibles. Cet état des lieux servira de base à la présentation de propositions pour améliorer la gestion de ces ouvrages.

II. Le parc de barrages relevant du contrôle du ministère chargé de l'environnement

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte général des ouvrages de génie civil qui vont nous intéresser tout le long de notre étude. Il s'agit du parc de barrages relevant du contrôle du ministère chargé de l'environnement, dont nous faisons tout d'abord une présentation (II.1). Nous résumons ensuite le dispositif de gestion de ces ouvrages (II.2) et les pratiques d'IMR.

II.1. Présentation du parc de barrages

II.1.1. Définition et tutelle

En France, l'Etat ne prévoit un contrôle particulier que pour les barrages intéressant la sécurité publique. Ces derniers sont « ceux dont la rupture éventuelle aurait des répercussions graves pour les personnes » (circulaire n°70/15 du 14.08.1970). Cette notion fait intervenir, outre l'importance du barrage, l'occupation de la vallée à l'aval. On trouve ainsi : [COTTIN,94]

- les barrages de plus de 20 m de hauteur au-dessus du sol ;
- les barrages pour lesquels le coefficient $H^2.V^{1/2}$ est supérieur à 1000 (H la hauteur au-dessus du sol en mètres, V la capacité du réservoir en millions de m³) ;
- les barrages moins importants mais situés en amont d'agglomérations ou de voies importantes de communication.

Il y a environ 400 barrages intéressant la sécurité publique en France. Le contrôle de ces ouvrages est réparti entre les ministères en fonction de leur usage. Ainsi, on distingue trois catégories avec chacune leur organisation en matière de contrôle (Figure 1.5) : [ROYET,99]

❶ Environ 35 barrages intéressant la navigation sont classés au titre du ministère chargé des transports. Il s'agit de barrages d'alimentation des canaux, dont l'importance est relativement modeste (la plupart font moins de 20 m de hauteur). Ils sont gérés par Voies Navigables de France (VNF) appuyées par le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF).

❷ Pour la production d'électricité, 155 barrages sont classés au titre du ministère chargé de l'industrie et essentiellement concédés à deux exploitants (Electricité de France, Compagnie Nationale du Rhône) aux compétences techniques affirmées. Cette catégorie inclut la plupart des plus grands barrages français. Le contrôle est assuré par les directions de l'industrie (DRIRE), appuyés par une cellule centrale, le Bureau d'Etudes Techniques et de Contrôle des Grands Barrages (BETCGB).

❸ ***Le parc de barrages qui intéressent nos travaux relèvent du contrôle du ministère chargé de l'environnement. Il est constitué d'environ 220 barrages intéressant la sécurité publique.***

Ces barrages sont contrôlés par les services départementaux de police des eaux (DDAF ou DDE), appuyés par le Cemagref (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement). [ROYET,01]

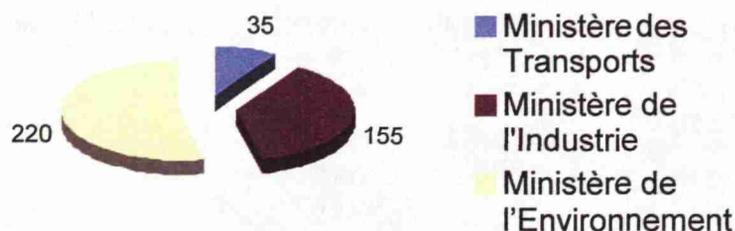


Figure 1.5 : Répartition des barrages en France selon leur contrôle

II.1.2. Un parc de barrages hétérogènes et vieillissants

En 1990, le ministère de l'environnement a fait réaliser une enquête nationale visant à analyser les ouvrages intéressant la sécurité publique (inventaire avec avis succinct sur la sécurité), ainsi que les conditions de surveillance et de contrôle. De 1990 à 1994, ce sont quelque 220 ouvrages intéressant la sécurité publique qui ont été passés en revue. Nous analysons le parc de barrages à partir des données issues de cette enquête [Cemagref,94].

Notre première constatation est l'hétérogénéité des ouvrages liée avant tout à leur typologie.

En utilisant les conventions proposées par le Registre Mondial des Barrages [CIGB,84c], nous pouvons représenter l'éclatement du parc dans les différents types (Figure 1.6) : barrages poids béton (BE) ou maçonnerie (MA), barrages voûtes (VA) ou multi-voûtes (MV), barrages en remblai en terre (TE) ou en enrochements (ER) et quelques barrages de type plus marginal.

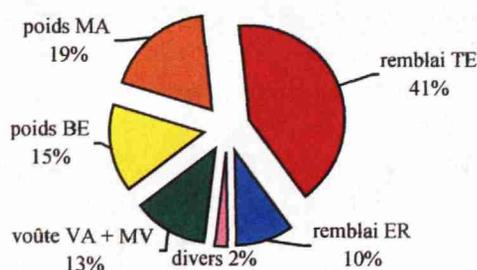


Figure 1.6 : Répartition des barrages dans les différents types

En examinant les critères liés à l'importance des barrages, nous constatons que le parc apparaît également éclaté.

Ainsi, le critère « hauteur au-dessus du terrain naturel » (Figure 1.7) montre une répartition allant du petit barrage (hauteur inférieure à 10 m) aux grands barrages (hauteur supérieure à 30 m). Le même constat est établi en considérant le volume de la retenue.

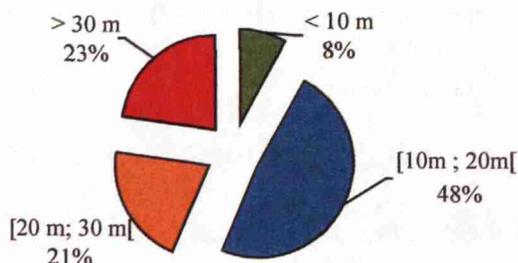


Figure 1.7 : Répartition des barrages en fonction de leur hauteur

A partir de l'analyse des années de construction, nous observons un large étalement de l'âge des ouvrages, donnant autant de conceptions différentes.

En outre, nous constatons le vieillissement général du parc, la grande majorité des barrages ayant plus de 10 ans (94%) et la moitié plus de 30 ans (Figure 1.8).

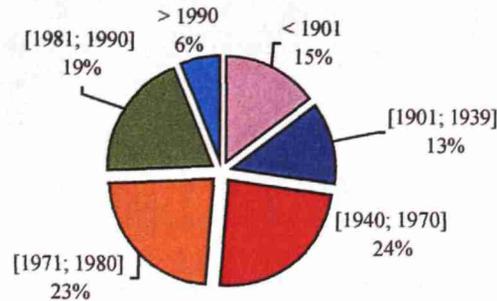


Figure 1.8 : Répartition des barrages en fonction de leur âge

II.1.3. Un parc de barrages présentant une sécurité variable

L'enquête nationale a permis d'établir un bilan de la sécurité des barrages, sur la base d'une méthodologie de diagnostic rapide mise au point à cette occasion [DEGOUTTE,92] :

❶ La sécurité « mécanique » des ouvrages a été évaluée à partir de leur état général et de leur stabilité. Trois éléments d'appréciation ont été pris en compte :

- la conception générale : les matériaux rentrant dans la composition des ouvrages, les dispositifs de drainage et d'étanchéité, les dispositifs d'auscultation efficaces.
- le dimensionnement mécanique : la géométrie de l'ouvrage et les coefficients de sécurité vis-à-vis des différents états-limites.
- l'état général des ouvrages : les fuites ou les suintements, l'état de fissuration et la végétation.

❷ La sécurité des ouvrages vis-à-vis des crues a été évaluée en considérant :

- le dimensionnement hydraulique : il a été apprécié sur la base de la vérification de la crue de projet à partir de formules simplifiées et de l'analyse de la capacité de l'évacuateur de crues.
- le fonctionnement mécanique et/ou hydraulique : il a consisté en une analyse rapide des risques tels que le fonctionnement et la conception des vannes, la protection contre les embâcles.

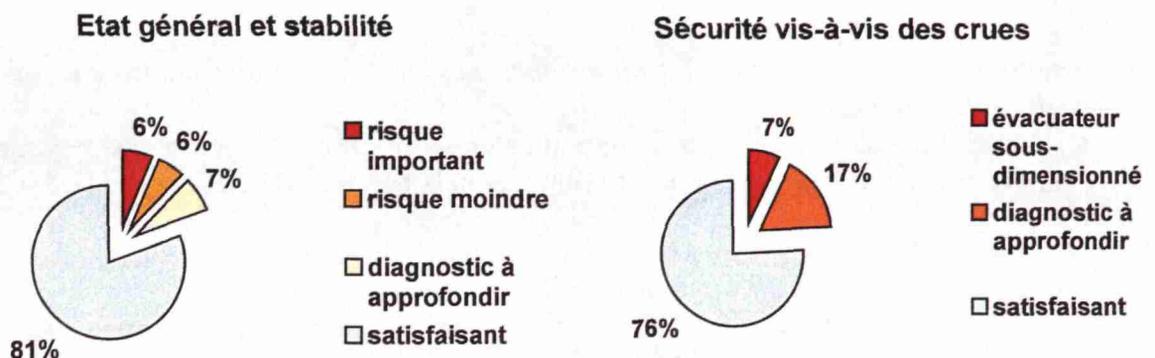


Figure 1.9 : Etat de la sécurité du parc de barrages (en 1990-94)

L'enquête de 1990 a fait apparaître les constats suivants (Figure 1.9) : [ROYET,98]

❶ Etat général et stabilité

Si la majorité des ouvrages présentait des conditions de stabilité et d'état général satisfaisantes, 19 % affichaient des risques faibles à importants.

❷ La sécurité des ouvrages vis-à-vis des crues

Les résultats faisaient apparaître 7 % d'évacuateurs de crues manifestement sous-dimensionnés ou entravés, et 17% nécessitaient un diagnostic hydrologique ou hydraulique plus approfondi.

Au final, nous constatons que cet état des lieux relatif à la sécurité présentait un bilan en demi-teinte et mettait en évidence de nombreux ouvrages présentant des risques potentiels.

II.1.4. Une surveillance et un contrôle de qualité hétérogène

La figure 1.10 donne un aperçu de la situation constatée lors de l'enquête nationale en matière de surveillance des barrages par les propriétaires. En ce qui concerne l'auscultation, il apparaît que 41% des ouvrages étaient dotés d'un dispositif insuffisant, voire inexistant. Lorsqu'il existait, les mesures n'étaient pas toujours faites régulièrement et leur analyse était souvent très sommaire. Finalement, seuls 37 % des barrages étaient dans une situation satisfaisante.

Par ailleurs, un constat analogue fut fait en matière de contrôle des barrages : [ROYET,98]

- 40 % faisaient l'objet de visites de contrôle annuelles et décennales régulières ;
- 23 % étaient soumis à des visites irrégulières ;
- 28 % ne faisaient l'objet d'aucune visite récente du service de contrôle, le pourcentage restant relevant de cas particuliers.

En synthèse de l'enquête nationale, nous constatons qu'une minorité de barrages faisait l'objet d'une surveillance correcte du propriétaire et d'un contrôle satisfaisant par l'administration.

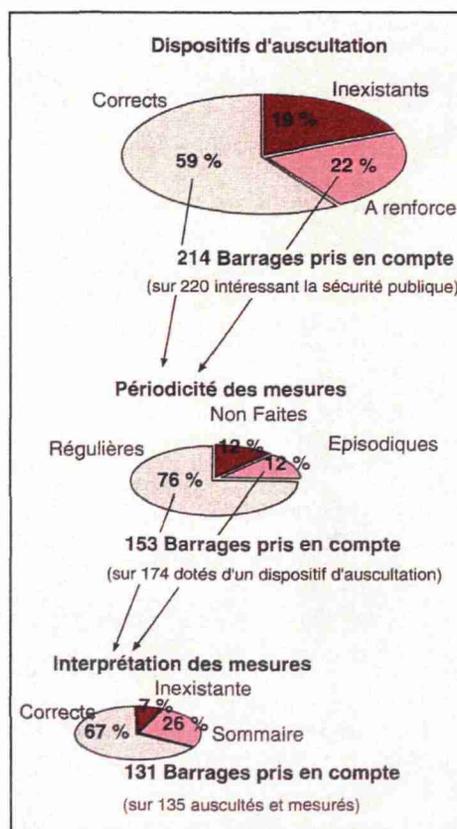


Figure 1.10 : Surveillance du parc de barrages (en 1990-94) [ROYET,98]

II.1.5. Des barrages pas toujours bien documentés

Les ouvrages n'apparaissent pas toujours bien documentés et les informations disponibles (historique, données d'auscultation...) sont également de qualité variable : [ROYET,01a]

- ❶ Les barrages exploités par des organismes compétents sont, de façon générale, bien connus, particulièrement en ce qui concerne les informations relatives à l'exploitation :
 - l'analyse et les rapports d'auscultation ;
 - les rapports annuels d'exploitation ;
 - le registre journal (observations quotidiennes, interventions et faits marquants).
- ❷ Les ouvrages dont l'exploitation et le contrôle ne sont pas satisfaisants, restent le plus souvent mal documentés (données d'auscultation et analyse insuffisantes ou absentes...).
- ❸ Les barrages anciens sont souvent pauvres en informations historiques, particulièrement en ce qui concerne la conception, la réalisation et les travaux de confortement.

II.1.6. Synthèse de la présentation du parc de barrages

Le parc de barrages relevant du contrôle du ministère de l'environnement se caractérise par une hétérogénéité importante des ouvrages, dans leur conception, leur typologie, leur importance et leur âge, donnant des populations de barrages homogènes réduites.

Par ailleurs, la qualité du suivi et du contrôle de ces barrages est apparue, lors de l'enquête, comme perfectible et les données disponibles pas toujours complètes.

Au final, la sécurité affichée par ces ouvrages est variable, malgré des améliorations sensibles dans la dernière décennie. La pathologie en jeu est diverse, impliquant de nombreux mécanismes de vieillissement.

II.2. Les dispositifs de gestion du parc de barrages

II.2.1. Contexte réglementaire général des barrages en France

II.2.1.1. Les intervenants

La réglementation relative aux barrages en France trouve ses origines à des dates relativement anciennes. Elle a été régulièrement renforcée tout au long du 20^{ème} siècle, en particulier à la suite de la rupture du barrage de Malpasset en 1959, avec la création du Comité Technique Permanent des Barrages. Le lecteur intéressé pourra consulter [Cemagref,99] ou [COTTIN,94].

Nous pouvons dégager deux principes majeurs de la réglementation basés sur les intervenants suivants (Figure 1.11) :

❶ Le **propriétaire** (ou le **concessionnaire**) est pleinement responsable de son ouvrage : il doit le surveiller (en faisant au besoin appel à un **exploitant**), régulièrement le diagnostiquer (en faisant au besoin appel à un **bureau d'études spécialisé**) et engager les travaux nécessaires (entretien, grosse maintenance et requalification).

❷ Les **services de contrôle** sont chargés de contrôler l'efficacité du dispositif mis en place par le propriétaire et d'en vérifier la conformité par rapport à la réglementation. Ils peuvent être épaulés à des périodes particulières de la vie d'un barrage par des **services spécialisés** dans le domaine des barrages (BETCGB, Cemagref).

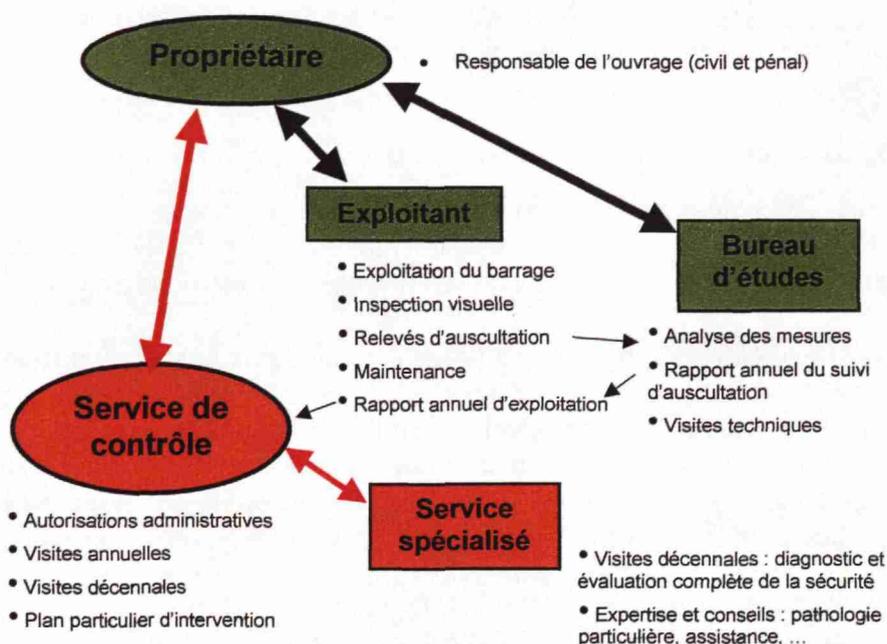


Figure 1.11 : Les différents intervenants dans la gestion des barrages

II.2.1.2. Les responsabilités du propriétaire

Le Code Civil (articles 1382 à 1386) rend le propriétaire civilement et pénalement responsable de son ouvrage. Le cadre général de ses missions est fixé par la réglementation (notamment la circulaire n°70/15) dont nous faisons une rapide présentation.

La surveillance constitue une des tâches fondamentales du propriétaire.

Les principales mesures consistent à :

- ❶ L'inspection visuelle régulière de l'ouvrage, des abords et des organes d'évacuation (une fois par semaine ou par quinzaine en règle générale).
- ❷ L'auscultation du barrage, des fondations et des berges.
Il peut s'agir de mesures simples (débits de drain, niveaux piézométriques, lectures de pendules) pouvant être confiées à un personnel d'exploitation local ou de mesures plus complexes (topographies, ouvertures de joints) exigeant de faire appel à un personnel qualifié. La périodicité des mesures dépend du type d'instruments et de l'importance du barrage et varie entre une semaine (débit des drains et piézométrie) à un an (topographie). [ROYET,01a]
- ❸ Les essais réguliers des organes de sécurité et des vannes.

Une autre mission de base du propriétaire est d'assurer régulièrement le diagnostic du barrage :

- ❶ L'interprétation des mesures d'auscultation, qui se fait en deux étapes :
Tout d'abord, il s'agit de procéder à une exploitation immédiate des résultats de l'auscultation de façon à détecter tout de suite des anomalies. Ensuite, les mesures doivent être interprétées par des ingénieurs spécialisés afin d'apprécier l'évolution de l'ouvrage dans le temps.
- ❷ Le rapport d'exploitation établit un bilan annuel de la surveillance et de l'auscultation du barrage et comporte tous les deux ans une analyse approfondie du comportement de l'ouvrage.

Enfin, le propriétaire est responsable des travaux sur le barrage :

- ❶ Travaux réguliers d'entretien réalisés tout le long de l'année : nettoyage des structures, entretien des parements en terre, entretien de la robinetterie et de l'électromécanique.
- ❷ Travaux de grosse maintenance : gros entretien, réfection d'étanchéité, curage des drains...

③ **Travaux exceptionnels** : travaux lourds de remise à niveau de la sécurité (confortement) ou de requalification (rehausse), entrepris dans le cadre de la révision spéciale des barrages anciens (circulaire n°75/65).

II.2.1.3. Le contrôle des barrages par l'administration

Le contrôle des ouvrages par l'administration s'effectue tout le long, et lors des étapes importantes, de la vie du barrage. Nous présentons les trois principales visites de contrôle, fixées par la réglementation (circulaire n°70/15), qui vont rythmer la politique d'IMR de l'ouvrage :

① **La première mise en eau** constitue une phase essentielle de la vie du barrage (de nombreuses ruptures surviennent à cette occasion [ICOLD,95]). La surveillance pendant cette période est complète et les mesures techniques de premier remplissage sont définies dès la conception.

② **Les visites annuelles** permettent une inspection visuelle des parties non noyées, le contrôle de l'état de fonctionnement des organes d'évacuation des eaux (vidanges, évacuateur de crues) et des dispositifs d'auscultation et le contrôle des missions de surveillance et d'entretien.

③ **Les visites complètes décennales** sont effectuées en principe après vidange complète de la retenue. D'une part, elles visent à établir une évaluation complète de la sécurité de l'ouvrage. D'autre part, elles permettent au propriétaire d'engager des travaux plus lourds, programmés lors de précédents diagnostics. Il peut s'agir de travaux courants de maintenance ou de réparation d'équipements habituellement noyés (remplacement de vannes), mais également des travaux importants de remise à niveau de la sécurité ou de requalification.

II.2.2. Les différents propriétaires et usages du parc de barrages

A partir du fichier national WBAR des barrages intéressant la sécurité publique (II.2.3), nous pouvons analyser les différents types de propriétaires et les usages associés (Figure 1.12) : production d'eau potable ou loisirs pour les villes et leurs groupements, gestion des crues pour les Conseils Généraux, irrigation pour les sociétés d'aménagement régional...

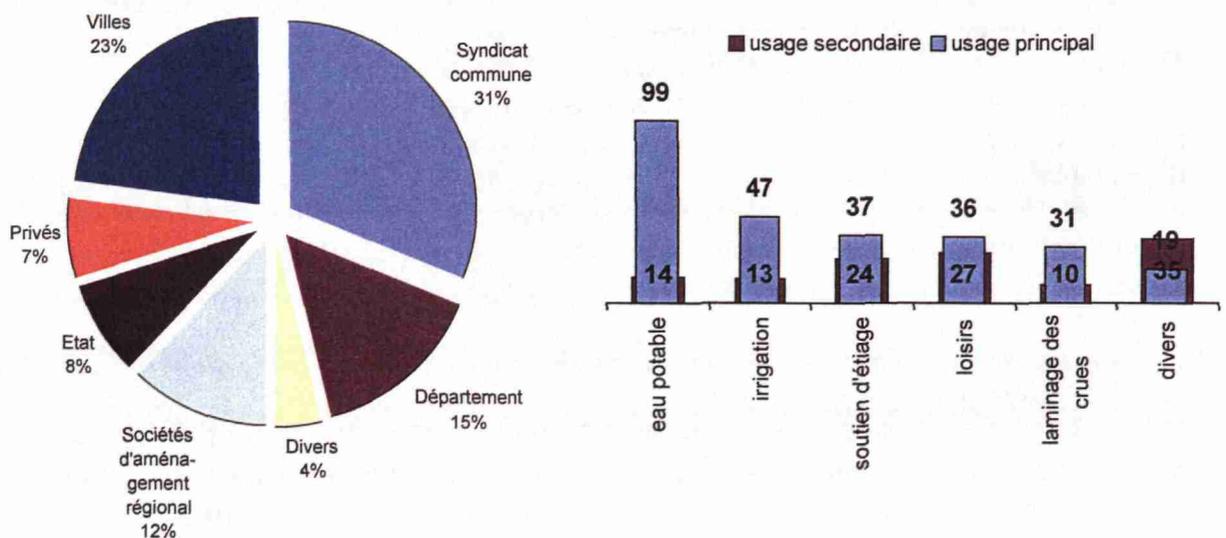


Figure 1.12 : Les différents propriétaires et les usages

Nous pouvons dégager schématiquement deux catégories de propriétaires : [ROYET,93]

Quelques grands maîtres d'ouvrage (les sociétés d'aménagement régional, certaines collectivités territoriales) possèdent plusieurs barrages et assurent directement leur gestion et exploitation. Ils sont dotés de services techniques à compétences fortes et y consacrent les moyens nécessaires pour la surveillance, l'auscultation et son suivi, et l'entretien des ouvrages.

A l'opposé, beaucoup de propriétaires (collectivités locales, propriétaires privés) ne possèdent qu'un seul barrage et ne disposent pas de compétences techniques particulières (Figure 1.13). La surveillance et l'entretien du barrage sont perfectibles, autant par ignorance que par négligence.

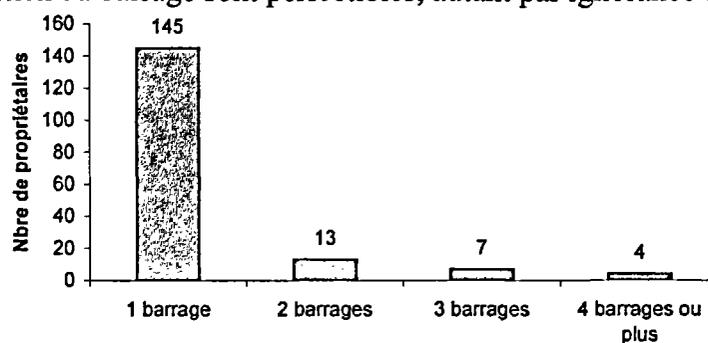


Figure 1.13 : Analyse du nombre de barrages par propriétaire

En résumé, nous constatons une grande diversité de propriétaires et d'usages, conduisant à des modes de gestion hétérogènes, liés à des cultures et des objectifs différents.

A l'exception de quelques grands maîtres d'ouvrages bien identifiés, une très large majorité des propriétaires ne peuvent développer par leurs propres moyens une gestion satisfaisante, que ce soit pour la politique générale d'IMR ou la valorisation du retour d'expérience.

II.2.3. Le dispositif de gestion du parc

Partant de ce constat, le ministère chargé de l'environnement a mis progressivement en place, depuis 1994, un dispositif de gestion du parc de barrages bâti autour de deux principes.

Le premier principe du dispositif de gestion est de fixer la pratique de l'IMR sur le cadre réglementaire.

Pour cela, il convenait d'améliorer le contrôle des ouvrages de façon à faire engager par le propriétaire, le cas échéant, des mesures de remise à niveau. Nous résumons les différentes actions, s'inscrivant sur des durées différentes, mises en place.

Tout d'abord, le renforcement et la remise à niveau du personnel des services de contrôle ont été engagés : programme important de formation ; guides techniques et méthodologiques ([ROYET,94], [DEGOUTTE,92-93-97] et [EDF-Cemagref,98]).

Ensuite, un dispositif de haut niveau technique pour le contrôle de la sécurité des barrages est mis en œuvre à travers l'appui technique du Cemagref [ROYET,98a]. Il consiste en des missions systématiques d'évaluation de la sécurité des barrages à l'occasion des visites décennales et à des expertises ponctuelles lors de détérioration particulière ou d'incidents (circulaire du 4/10/1999).

Enfin, les services de contrôle ont incité les propriétaires à faire appel aux bureaux spécialisés d'ingénierie pour le suivi de l'auscultation, le diagnostic approfondi et la maîtrise d'œuvre.

Le second volet du dispositif de gestion est de se doter d'une capacité d'expertise de haut niveau et de développer des outils pour capitaliser le retour d'expérience.

Compte tenu de l'éclatement du nombre de propriétaires, il est apparu nécessaire de centraliser les informations et le retour d'expérience provenant de l'ensemble des barrages [FRY,00].

Tout d'abord, en 1993, un fichier central des barrages intéressant la sécurité publique (fichier *WBAR*) a été réalisé. Pour chaque ouvrage, la base de données contient les renseignements administratifs et une description technique approfondie. [ROYET,95]

Ensuite en 1995, des travaux visant à concevoir une base de données informatique sur le vieillissement des barrages en service ont débuté [RAVENET,95] et ont donné lieu au projet *CASCAD*. Nous reviendrons ultérieurement sur ces travaux (partie 5).

II.2.4. Synthèse de la gestion du parc de barrages

Le premier aspect de la gestion du parc de barrages concerne la pratique de l'IMR qui est maintenant bien en place : elle est marquée par les échéances et les pas de temps clés fixés par la réglementation, rythmant les fréquences des opérations courantes réalisées par le propriétaire, les périodes de travaux plus lourds et les visites de contrôle (Figure 1.14).

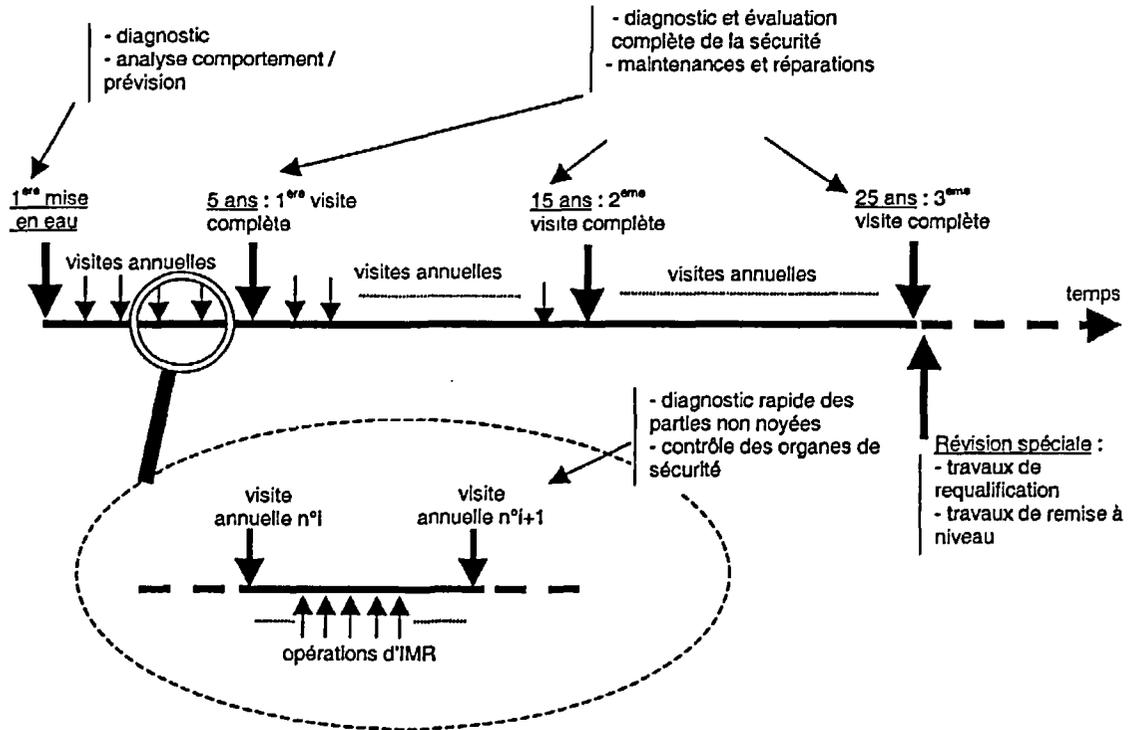


Figure 1.14 : Dates clés de la vie d'un barrage et opérations d'IMR associées

Nous résumons au tableau 1.1 les échelles de temps associées aux différentes opérations d'IMR :

Echelle de temps	opérations d'IMR
le jour / la semaine	- surveillance visuelle ; - mesures d'auscultation courantes : niveau d'eau, température, pluviométrie, piézométrie, pressions interstitielles, débit.
le mois	- mesures d'auscultation : déplacement des pendules, variation de pente des inclinomètres, mesures des contraintes aux extensomètres ; - maintenance et réparation courante : nettoyage des chambres des vannes, des appareils de mesures des débits, etc.
le semestre / l'année	- les mesures d'auscultation complexes : topographie, déplacements, tassements ; - maintenance courante : nettoyage du génie civil, traitement de la végétation, entretien des abords ; - réparation courante : mise en place des recommandations du service de contrôle émises lors de la précédente visite annuelle ; - visite annuelle de contrôle.
les 10 ans	- revue complète de la sécurité de l'ouvrage ; - grosses réparations et maintenance ; - réparations et maintenance des parties habituellement immergées ; - visite complète décennale ; - éventuellement, travaux lourds de remise à niveau ou de requalification.

Tableau 1.1 : Les opérations d'IMR et les échelles de temps associées

Le second aspect de la gestion du parc est la centralisation des données générales des ouvrages et du retour d'expérience relatif à la pathologie. L'objectif est de se doter d'une capacité d'expertise de haut niveau pour le diagnostic et l'analyse de risques des ouvrages.

L'enjeu est considérable : il vise à produire des méthodes pour la capitalisation des informations relatives au vieillissement des barrages. Notre recherche s'inscrit dans ce cadre.

III. Le diagnostic et l'analyse de risques des barrages

Dans ce chapitre, nous examinons les concepts généraux de diagnostic et de risque dans le cadre industriel (III.1), puis nous dressons un état de la pratique dans le domaine des barrages (III.2). Enfin, nous développons l'approche retenue pour le parc du ministère de l'environnement (III.3).

III.1. Le diagnostic et l'analyse de risques dans le contexte général de l'industrie

L'industrie a développé et utilise depuis de nombreuses années des techniques pour identifier, analyser, gérer et réduire 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 et ont ensuite été développées dans les années 1980 dans l'industrie de production [VILLEMEUR,88].

III.1.1. Définitions générales

Qu'est-ce-que le diagnostic ?

Nous retenons la définition technique proposée par l'AFNOR : « ***le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test*** ».

Dans les systèmes complexes, une défaillance d'un mode de fonctionnement peut être liée à différentes causes indépendantes ou combinées. Ainsi, deux tâches sont essentielles pour la pratique du diagnostic [ZWINGELSTEIN,95] :

- observer et analyser les symptômes liés à la défaillance ;
- rechercher la ou les raison(s) possibles de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations précédentes.

Qu'est-ce-que le risque ?

Le concept de **risque** possède un grand nombre d'acceptions et la confusion est souvent faite avec le concept de probabilité, que ce soit dans le langage courant ou dans les références techniques. Nous renvoyons le lecteur à [NIEUWHOF,85] qui discute les différentes définitions.

Néanmoins dans le contexte industriel, nous trouvons un consensus sur les définitions généralement admises du **risque**, qui visent toujours à associer deux entités à partir desquelles il est plus généralement défini : **probabilité** et **conséquence** [LEROY,92]. Ainsi [MODARRES,93] parle d'un potentiel de conséquences résultant d'un danger et [LONDICHE,90] d'une mesure du niveau de danger. Dans la suite, nous retenons la définition de [VILLEMEUR,88] :

« ***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*** ».

Le risque est donc une fonction de ces deux variables. Pour l'obtenir, nous recherchons :

- 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'événements 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, coût économique...).

Le risque est souvent alors exprimé par la multiplication des deux mesures [LONDICHE,90], [MARCHE,00a]. Une représentation désormais classique a été introduite dans le domaine du nucléaire dans le milieu des années 60 [FARMER,67] et consiste en un affichage du risque dans un plan gravité/fréquence (Figure 1.15).

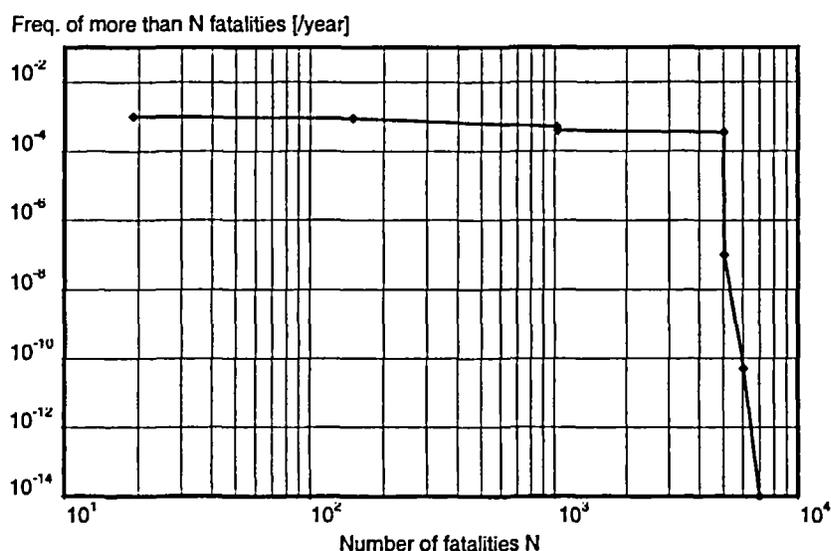


Figure 1.15 : Risque « inondation » lié à un polder au Pays-Bas [VRIJLING,01]

Cette représentation permet de définir trois zones de risque (Figure 1.16) : la limite supérieure au-delà de laquelle le risque n'est plus acceptable, la limite inférieure où le risque devient négligeable et une zone intermédiaire (zone ALARP : *As Low As Reasonably Pratical*) correspondant à un niveau de risque aussi bas que raisonnable. Nous ne développons pas plus longuement ces notions de risque acceptable et de perception du risque et nous renvoyons le lecteur à [FISCHHOFF,99].

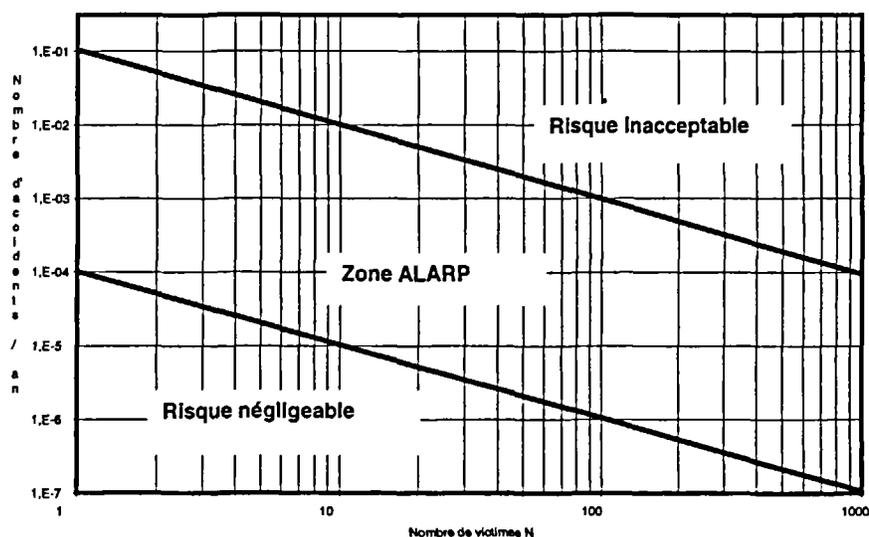


Figure 1.16 : Diagramme de risque acceptable

III.1.2. Les différentes approches du diagnostic dans l'industrie

Pour l'identification de la (ou des) cause(s) d'une défaillance d'un système, plusieurs méthodes d'aide au diagnostic sont disponibles, regroupées dans deux familles : [ZWINGELSTEIN,95]

- ❶ les méthodes internes de diagnostic qui reposent sur la modélisation du système ;
- ❷ les méthodes externes de diagnostic utilisées lorsqu'aucun modèle du système n'existe.

III.1.2.1. Les méthodes internes de diagnostic

Les méthodes internes de diagnostic sont basées sur la connaissance profonde du fonctionnement du système. A partir de modèles physiques ou de comportement, le diagnostic est alors ramené à la résolution d'un problème inverse entre la cause et son effet possible.

Selon le type de modèle décrivant le fonctionnement du système, on distingue différentes méthodes : [ZWINGELSTEIN,95]

❶ Les méthodes de diagnostic des défaillances par modélisation physique

Elles reposent sur la modélisation physique des processus de dégradation au sein du système, en prenant en compte les équations régissant les phénomènes internes. Elles impliquent une connaissance approfondie du système sous la forme de modèles mathématiques et de simulations numériques. La figure 1.17 résume le principe des méthodes de diagnostic par modèle physique.

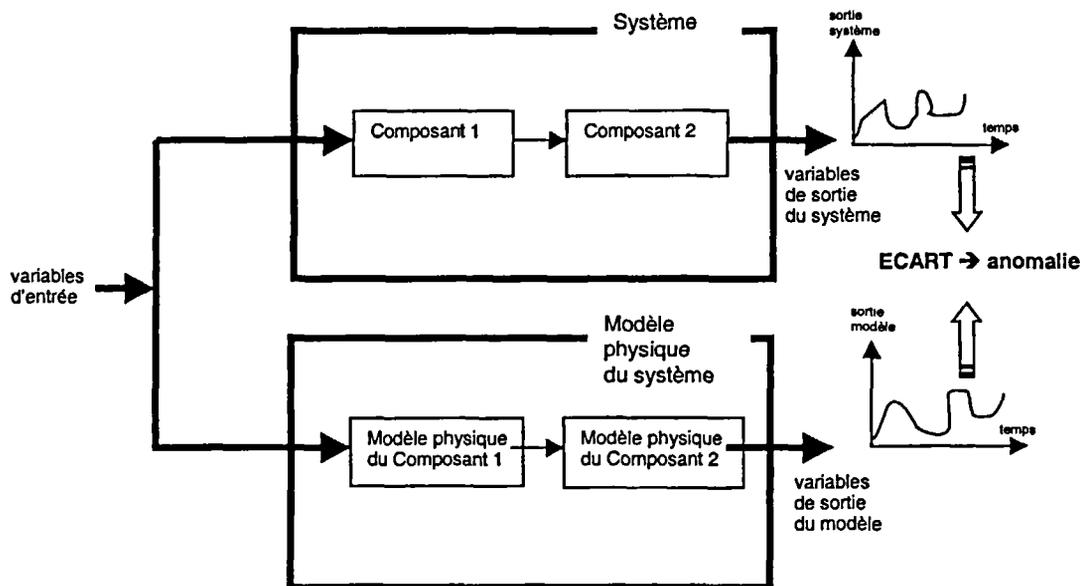


Figure 1.17 : Méthode de diagnostic par modèle physique

❷ Les méthodes de diagnostic des défaillances par modélisation fonctionnelle

Elles reposent sur les techniques de modélisation fonctionnelle des systèmes. Un système est un ensemble matériel complet destiné à remplir des fonctions précises. Il est constitué d'un nombre déterminé de composants interconnectés, qui assurent également des fonctions contribuant à la réalisation des fonctions du système (Figure 1.18).

Le principe des méthodes de modélisation fonctionnelle est de déterminer les interactions entre les composants du système et son environnement, de façon à d'établir de manière formelle et exhaustive les liens entre les défaillances, leurs causes et leurs effets.

Il existe différentes techniques de la Sûreté de Fonctionnement qui permettent la modélisation fonctionnelle des systèmes : l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets), l'AMDEC (AMDE complétée par une analyse de la Criticité), les méthodes de l'Arbre des Conséquences ou d'Événements... Nous examinons plus en détail ces techniques dans la partie 3.

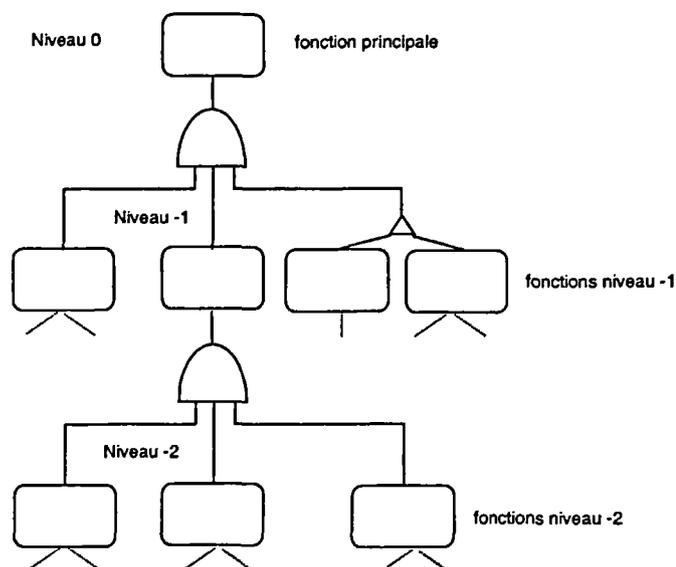


Figure 1.18 : Décomposition d'un système sous forme d'un arbre fonctionnel

Les limites de ces méthodes se situent dans leur mauvaise aptitude à déterminer les modes de propagation des défaillances ou à prendre en compte les dégradations partielles, en raison de la nature binaire de la modélisation (défaillance ou non défaillance).

Enfin, leur mise en œuvre exige un investissement lourd et des compétences pluridisciplinaires (animateur spécialiste en Sécurité de Fonctionnement, différents experts du domaine).

III.1.2.2. Les méthodes externes de diagnostic

Les méthodes externes de diagnostic s'appliquent dans des contextes où la modélisation des mécanismes physiques ou fonctionnels n'est pas techniquement possible, compte tenu de leur complexité ou de leur coût. En fonction des informations disponibles, on distingue les méthodes basées sur l'analyse statistique ou l'expertise. [ZWINGELSTEIN,95]

❶ Les méthodes basées sur l'analyse statistique

Elles nécessitent un retour d'expérience riche et parfaitement documenté, ce qui est le cas dans les parcs importants de matériels identiques. Les méthodes statistiques appliquées aux données du retour d'expérience permettent d'établir des corrélations entre les défaillances et les symptômes.

Parmi celles ci, on trouve les méthodes de reconnaissance de forme, les réseaux de neurones, les techniques d'intelligence artificielle... développées en détail dans [ZWINGELSTEIN,95].

❷ L'expertise

En présence d'un nombre réduit, voire unique, d'exemplaires, l'expert humain est le seul capable d'établir les corrélations pour le diagnostic des défaillances. L'analyse par expertise pure [ZWINGELSTEIN,95] intervient alors en dernier ressort lorsqu'aucune des autres approches n'est applicable.

III.1.3. La pratique de l'analyse de risques dans l'industrie

III.1.3.1. Qu'est-ce-que l'analyse de risques ?

A partir de la définition du risque vue précédemment, l'activité d'analyse de risques consiste logiquement à répondre aux trois questions suivantes [KAPLAN,97] :

- 1/ qu'est-ce-qui peut conduire à des situations de danger ?
- 2/ quelles sont les chances pour que ces situations se produisent ?
- 3/ si elles se produisent, à quelles conséquences doit-on s'attendre ?

La première question revient à rechercher les scénarios (S_i) pouvant conduire à une défaillance. Deuxièmement, l'analyse de risques va évaluer la possibilité d'apparition de chaque scénario ; elle est réalisée généralement à partir de la probabilité P_i associée au scénario S_i . La troisième question s'attache à décrire et à estimer les conséquences C_i (humaines, économiques) liées au scénario S_i .

Ainsi, l'activité d'analyse de risques consiste à évaluer le risque quantitatif R défini par l'ensemble des triplets [MODARRES,93] : $R = \langle S_i, P_i, C_i \rangle$

avec :
 S_i est le $i^{\text{ème}}$ scénario conduisant à une situation de danger ou une défaillance
 P_i est la probabilité d'occurrence du scénario S_i pendant une période de référence
 C_i est une mesure des conséquences liées au scénario S_i .

III.1.3.2. Démarche d'une étude d'analyse de risques d'un système industriel

Pour conduire une étude relative à la sûreté de fonctionnement d'un système (ou encore à une analyse prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement), on procède à quatre étapes principales résumées à la Figure 1.19. [VILLEMEUR,88], [LEROY,92]

❶ L'analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle identifie les interactions au sein du système et avec les milieux extérieurs, et recherche les fonctions réalisées par le système et ses composants.

Elle consiste à définir le système (composants, matériaux) et son environnement (autres systèmes, milieux extérieurs en interaction), à examiner les processus de conception et de réalisation et les modes d'exploitation. Après avoir précisé ce sur quoi on travaille et à quel niveau de précision, on identifie de façon systématique les fonctions remplies par le système et ses composants.

❷ Modélisation de la sûreté de fonctionnement

La modélisation de la sûreté de fonctionnement d'un système a pour objectif d'identifier les risques potentiels du point de vue des fonctions à remplir. Il s'agit de rechercher toutes les causes de défaillance et tous les mécanismes pouvant affecter son fonctionnement.

De nombreuses méthodes existent (AMDE, Arbres des Conséquences, Arbres d'Evénements...) et l'art du spécialiste consiste à choisir la méthode la mieux adaptée aux objectifs de l'étude.

❸ Mesure de la sûreté de fonctionnement

Cette étape tire profit de la modélisation précédente et caractérise par des mesures la sûreté de fonctionnement du système.

Les mesures de la sûreté de fonctionnement sont le plus souvent quantitatives et proviennent du traitement mathématique du modèle et des données statistiques relatives aux défaillances. On

parle alors d'**analyse quantitative** [LEROY,92]. Lorsque les données disponibles sont insuffisamment nombreuses ou précises, une **analyse qualitative** appuyée par une forte expertise peut alors être réalisée [ZWINGELSTEIN,95].

Ces analyses sont ensuite généralement testées et validées par des simulations et des études de sensibilité, qui visent à examiner l'impact sur le résultat final, des incertitudes sur les données et sur les hypothèses retenues pour la modélisation.

④ Synthèse et conclusions

La synthèse d'une étude d'analyse de risques met en évidence les défaillances et leurs combinaisons qui compromettent la sûreté de fonctionnement du système, ainsi que les composants les plus critiques.

Il est alors possible de proposer des évolutions techniques susceptibles d'améliorer la sûreté de fonctionnement. Cette phase s'accompagne généralement d'une vérification et d'une validation des résultats par les experts du domaine.

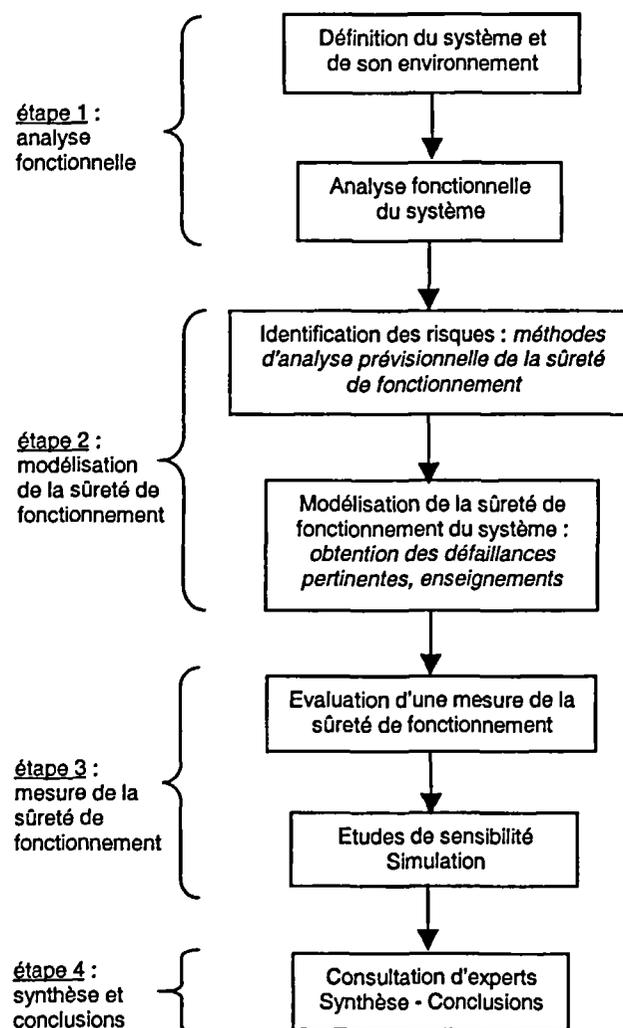


Figure 1.19 : Démarche d'une étude d'analyse de risques

III.1.4. Synthèse du diagnostic et de l'analyse de risques dans l'industrie

Cette synthèse a permis de recenser les différentes approches du diagnostic et de l'analyse de risques pratiquées dans l'industrie. Les méthodes internes sont utilisées de façon prioritaire dès lors que la connaissance du système permet sa modélisation : les modèles physiques lorsque le système reste relativement simple ou les modèles fonctionnels pour les systèmes complexes. A contrario, on utilise les méthodes externes quand la modélisation est impossible : les techniques statistiques lorsqu'on dispose de données abondantes et, en dernier recours, l'expertise.

Par ailleurs, nous avons vu que certaines techniques de diagnostic et d'analyse de risques étaient communes, notamment celles permettant la modélisation fonctionnelle. Cela nous amène à considérer les liens entre *diagnostic* et *analyse de risques* (Figure 1.20).

Ainsi, face à un système défaillant ou dégradé, l'activité de diagnostic consiste à rechercher dans le passé les mécanismes de vieillissement ayant conduit à cet état ; une fois le diagnostic établi, l'analyse de risques va projeter le système dans le futur en envisageant son évolution, notamment celle des dégradations et les conséquences futures des défaillances.

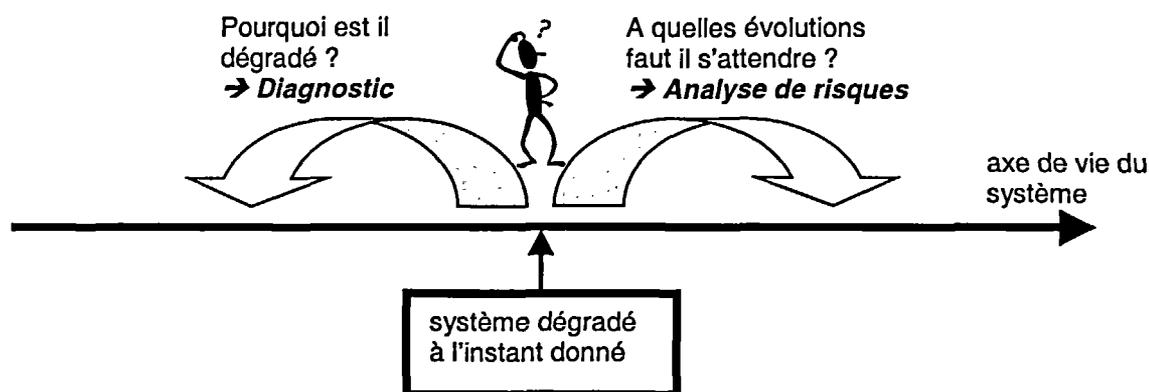


Figure 1.20 : Le diagnostic et l'analyse de risques

III.2. Les pratiques du diagnostic et de l'analyse de risques dans le contexte des barrages

Dans cette section, nous dressons un panorama des pratiques du diagnostic et de l'analyse de risques appliqués aux barrages, en examinant successivement les approches développées dans leur contexte général : modélisations physique et fonctionnelle, approche statistique et expertise.

III.2.1. La modélisation physique

Nous pouvons classer les modèles physiques disponibles en deux catégories : les modèles d'analyse de la stabilité et les modèles d'étude du comportement.

III.2.1.1. Les modèles d'analyse de la stabilité

Les modèles d'analyse de la stabilité permettent d'apprécier la sécurité d'un ouvrage en déterminant les critères de stabilité liés aux états-limites dans les conditions réelles d'exploitation.

Les modèles de stabilité des barrages correspondent le plus souvent à des modèles de rupture (états-limites ultimes), parmi lesquels nous trouvons : [ROLLEY,89], [USBR,87]

- pour les barrages poids : le glissement du barrage sur la fondation, le cisaillement de sections horizontales dans les plots, le renversement sur le pied aval, l'ouverture de fissures ;
- pour les barrages en remblai : le glissement circulaire (Figure 1.21).

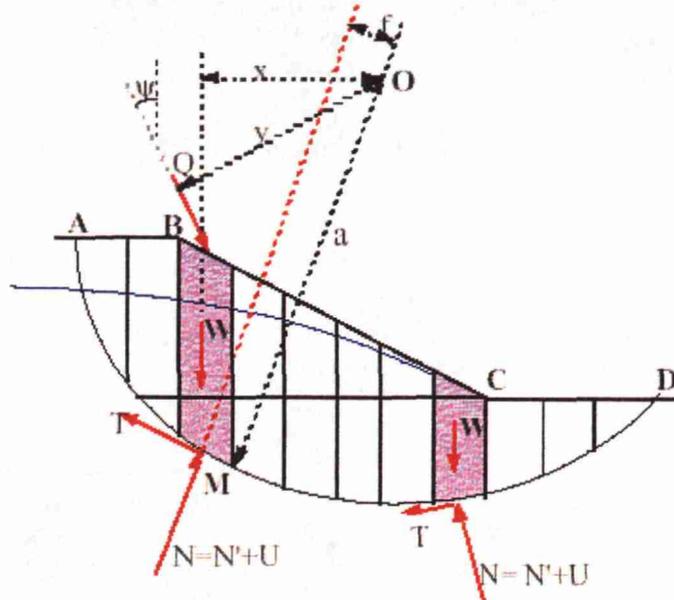


Figure 1.21 : Modèle de rupture d'un remblai : méthode des tranches [FRY,01]

III.2.1.2. Les modèles d'analyse du comportement

Les modèles d'analyse du comportement sont mis en œuvre en diagnostic et en analyse de risques afin d'apprécier la normalité des déplacements ou des écoulements, d'évaluer les déplacements futurs ou de déterminer les contraintes et les déformations. Nous renvoyons le lecteur vers [CARRERE,01], [LINO,01] et [FRY,01] qui établissent un panorama des modèles disponibles pour reproduire le comportement respectivement des barrages voûtes, poids et en remblai.

A titre d'illustration, la figure 1.22 présente la déformée en plan d'un barrage voûte type sous cas de charge hydrostatique, obtenue par modélisation aux éléments finis. [BOURDAROT,01]

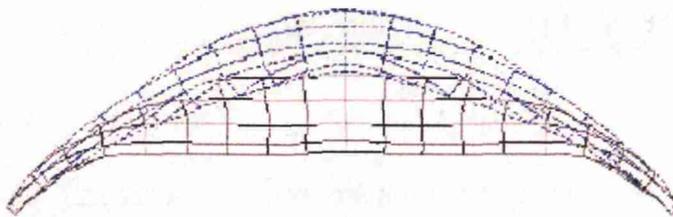


Figure 1.22 : Modélisation de la déformée d'un barrage voûte [BOURDAROT,01]

III.2.1.3. Synthèse des modèles physiques

En résumé, la modélisation physique est mise en œuvre pour le diagnostic et l'analyse de risques d'un barrage dont on cherche à vérifier la stabilité vis-à-vis d'un mécanisme de rupture ou à étudier le comportement. Elle fournit alors des résultats de grande précision.

Ces études restent cependant réservées au diagnostic et à l'analyse de risques approfondis ou à l'étude d'un mécanisme particulier. Nous ne pouvons envisager d'appliquer ce type d'approche à l'échelle d'un parc entier et pour l'ensemble des mécanismes de vieillissement.

III.2.2. La modélisation de la sûreté de fonctionnement

III.2.2.1. Les principales références

L'analyse de risques des barrages, abordée à partir des techniques de la Sûreté de Fonctionnement, date de la fin des années 1980 et est actuellement un sujet de recherche en plein essor. La bibliographie s'y rattachant est abondante et en constante évolution. Elle est largement alimentée par les pays nord-américains (USA et Canada), les pays d'Europe du Nord (Norvège, Suède, Pays-Bas) et l'Australie, qui ont une culture du risque plus évoluée que dans les pays de l'Europe centrale ou du Sud, beaucoup plus attachés aux approches déterministes. [CFGB,99]

Certains pays ou organismes disposent de recommandations ou de règlements pour l'analyse de risques. Les principales références internationales utilisées pour cette synthèse sont les suivantes :

- en Suède, une étude pour l'application de l'analyse de risques a été conduite [GRAHAM,95] ;
- en Australie, des recommandations pour l'analyse et la gestion du risque ont été produites par le Comité Australien des Grands barrages [ANCOLD,98] ;
- au Canada, le CEA (Canadian Electricity Association), regroupant les principaux exploitants de barrages (BC Hydro, Hydro Quebec...), et d'autres grands gestionnaires internationaux (VATTENFALL, USBR) ont produit des recommandations très complètes [CEA,00] ;
- aux Etats-Unis, l'USBR (United States Bureau of Reclamation) qui contrôle quelques 350 ouvrages, dispose de recommandations opérationnelles, décrites dans [CYGANIEWICZ,01] ;
- en Norvège, la *Norwegian Electricity Industry Association*, regroupant les industriels de l'hydro-électricité, a produit des recommandations pour l'analyse de risques [AMDAL,01].

En synthèse de ces références, la CIGB prépare un bulletin consacré à l'analyse, la maîtrise et la gestion du risque, établissant un état de la pratique actuelle [ICOLD,01].

Nous trouvons dans ces précédentes références une analyse commune du **processus de gestion du risque** (*Risk Assessment*) en deux phases (Figure 1.23). [FELL,97], [ICOLD,01], [CEA,00]

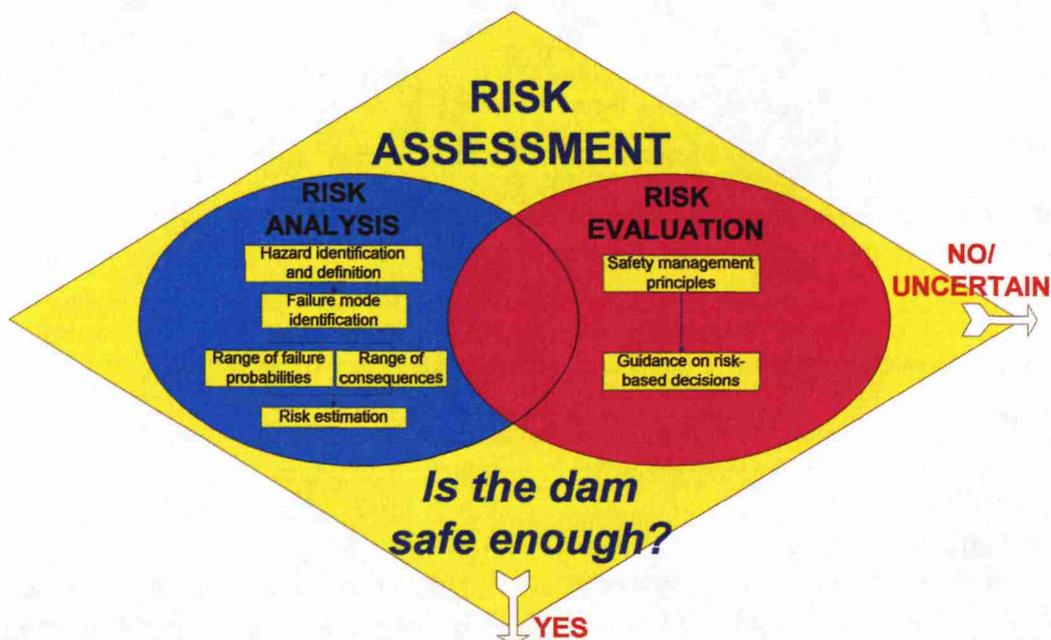


Figure 1.23 : Processus de gestion du risque [ICOLD,01]

L'**analyse de risques** (*Risk Analysis*) comprend les quatre étapes d'une analyse de la sûreté de fonctionnement, telles que nous les avons développées dans leur cadre général (Figure 1.19).

La maîtrise et la gestion du risque (*Risk Evaluation*) touchent les domaines liés à la représentation du risque, l'évaluation des conséquences et la perception du risque, la communication et la prise de décision. Nous ne développons pas plus longuement ce domaine qui n'intéresse pas directement nos travaux et nous renvoyons le lecteur intéressé vers [ICOLD,01].

III.2.2.2. La pratique de l'analyse de la sûreté de fonctionnement des barrages

→ étape ① : analyse fonctionnelle

Parmi ces références, seule [CEA,00] aborde avec précision l'analyse fonctionnelle. Elle est très rapidement indiquée dans [ICOLD,01] et n'est pas formellement identifiée comme une étape à part entière dans les autres références.

→ étape ② : modélisation de la sûreté de fonctionnement

Trois techniques de la Sûreté de Fonctionnement apparaissent dans les recommandations :

- la méthode des Arbres d'Événements (*Event Tree Analysis*) est recommandée de façon systématique dans toutes les références et est la plus largement utilisée dans les applications ;
- la méthode des Arbres des Causes (*Fault Tree Analysis*) est préconisée pour les applications liées aux systèmes électromécaniques (commande de vannes, de clapets...); [ICOLD,01], [CEA,00], [GRAHAM,95]
- l'AMDEC (*Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité* ou *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) est décrite uniquement dans [ICOLD,01] et [CEA,00].

→ étapes ③ et ④ : mesure de la sûreté de fonctionnement et synthèse

L'ensemble des recommandations se rejoignent pour indiquer la difficulté d'obtenir des mesures de la sûreté de fonctionnement d'un ouvrage ou de ses 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, etc.

Ainsi, le jugement de l'expert est à la base de l'évaluation des probabilités et toutes les publications consultées s'accordent sur ce point, notamment [HARTFORD,01].

L'analyse quantitative type recommandée dans les références repose sur la construction d'arbres d'événements conduisant à la rupture, ce qui revient à modéliser les scénarios de rupture sous forme d'arborescence descendante. Nous donnons un exemple représentatif d'arbre d'événements correspondant à la rupture par surverse d'un barrage en remblai (Figure 1.24) [CEA,00].

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 (par exemple la méthode du Gradex pour l'hydrologie [DUBAND,88]) ; les probabilités associées à chaque séquence de l'arbre proviennent du jugement des experts. La probabilité totale associée au scénario résulte ensuite de la multiplication des probabilités rattachées à chaque événement. Au final, on obtient des *probabilités subjectives* d'occurrence d'un événement (défaillance) lié à un mécanisme. [CEA,00], [STEWART,00b].

Les recommandations proposent que le travail d'évaluation des probabilités soit réalisé dans le cadre d'équipes pluridisciplinaires constituées par des experts du domaine et animées par un spécialiste de la Sûreté de Fonctionnement [CEA,00]. Nous trouvons des exemples de plans de travail de ces équipes dans [CYGANIEWICZ,01] et [AMDAL,01].

De telles estimations basées sur la connaissance des experts entraînent souvent des erreurs. Ainsi, [CEA,00] et [VICK,97] évoquent de façon théorique le biais de « l'excès de confiance » (*overconfidence*), mais nous n'avons pas connaissance d'applications aux barrages prenant en compte ce type d'erreur.

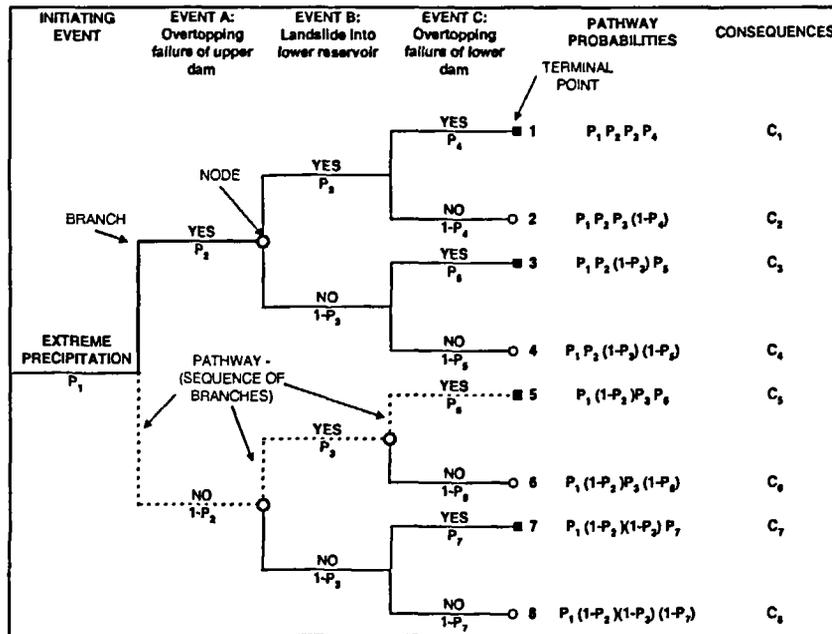


Figure 1.24 : Surverse d'un barrage en remblai modélisée par un arbre d'événements

Nous trouvons quelques traitements plus sophistiqués de l'estimation des experts. Ainsi, [DISE,01] propose que chaque événement de l'arborescence soit rattaché à une distribution de probabilité floue de forme symétrique dont le centre correspond à la probabilité « la plus probable » exprimée par chaque expert. Les distributions de chaque événement sont ensuite agrégées par des simulations de Monte Carlo, permettant d'obtenir une distribution globale de probabilité correspondant au scénario de rupture.

[CEA,00] développe théoriquement les méthodologies du traitement statistique et fiabiliste des informations liées aux défaillances des ouvrages. En application, nous n'avons connaissance que de deux études qui se sont efforcées de privilégier l'approche probabiliste plutôt que celle de l'expertise : analyse de moment de second ordre (*FOSM reliability analysis*), utilisation de données d'accidents de barrages issues de [ICOLD,95], simulations de Monte Carlo. Toutefois, ces travaux n'ont pas permis d'obtenir des mesures de sûreté de fonctionnement précises, ni de conclure sur la sécurité des ouvrages. [McDONALD,01], [CEA,00]

Finalement, compte tenu de la forte implication de l'expertise dans l'analyse quantitative, de récents articles sont venus modérer la portée des études d'analyse de risques [STEWART,00a-b]. S'ils reconnaissent la nécessité de passer par le jugement de l'expert, ils insistent sur la subjectivité des mesures qui en découlent : elles doivent être utilisées pour déterminer les scénarios les plus critiques pour un ouvrage donné, mais ne doivent en aucun cas être déplacées de leur contexte pour établir des comparaisons de risques avec d'autres barrages d'un autre parc, voire d'autres risques industriels.

III.2.2.3. Les applications aux barrages

Malgré l'intérêt que suscitent ces approches puissantes pour le diagnostic et l'analyse de risques, on ne compte toutefois pas beaucoup d'études de sûreté de fonctionnement des barrages. Parmi celles-ci, nous retrouvons des pratiques communes : travail d'équipe pluridisciplinaire, examen des principaux aléas (hydrologique et sismique), modélisation des scénarios de rupture, analyse quantitative par jugement d'experts.

La plupart des études mettent en œuvre la méthode des arbres d'événements :

- deux références relatives à des ouvrages de l'USBR ; [DISE,01], [VON THUN,96] ;
- huit grands barrages dans le parc de BC Hydro ; [NIELSEN,94], [VICK,01]
- quatre études en Norvège et une en Suède. [JOHANSEN,96-97], [FUNNEMARK,01] [BARTSCH,01]

Nous n'avons connaissance que d'une seule étude pilote faisant appel à la méthode AMDEC, réalisée sur un barrage en Suède. [VATTENFALL,00], [BARTSH,01]

Nous donnons à titre d'exemple les résultats d'une étude de sûreté de fonctionnement menée sur trois barrages en Norvège en enrochements de conception analogue : [JOHANSEN,97]

Dam	Hydrologic, p_h	Seismic, p_s	Internal erosion, p_e	Total, p_f
Viddalsvatn	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
Dravladalsvatn	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
Svartevatn	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$

Tableau 1.2 : Probabilités annuelles de rupture de trois barrages norvégiens

III.2.2.4. Synthèse des approches par modélisation fonctionnelle

En résumé, les techniques de la Sûreté de Fonctionnement sont apparues depuis peu de temps dans le domaine des barrages et ont été appliquées sur quelques grands ouvrages. La méthode des arbres d'événements est privilégiée pour la modélisation. Elle fournit des mesures de sûreté de fonctionnement correspondant à des probabilités subjectives, obtenues par jugement d'experts.

Ces techniques constituent des approches puissantes pour le diagnostic et l'analyse de risques. Elles mettent en évidence, pour un ouvrage donné, les scénarios de rupture et les composants les plus critiques, et à l'échelle d'un parc entier, les ouvrages les plus dangereux. Ces études sont donc efficaces pour la mise en place de programmes de travaux. [BOWLES,93], [VICK,01] Cependant, le coût de telles études est important et cette approche reste réservée aux grands ouvrages dont on veut connaître la sécurité et prioriser les actions. Nous ne pouvons donc pas envisager d'appliquer ce type d'approche à l'échelle d'un parc complet de barrages de moyennes dimensions.

Les techniques de la Sûreté de Fonctionnement présentent cependant des avantages pour nos travaux, en particulier pour la modélisation du fonctionnement des barrages et des mécanismes de vieillissement.

III.2.2.5. Des approches simplifiées d'analyse de risques

A côté de ces études lourdes de sûreté de fonctionnement, des approches simplifiées d'analyse de risques ont été mises au point pour le diagnostic et l'analyse de risques des barrages.

Dans ce cadre, nous trouvons des méthodes à base d'index.

EDF a développé récemment cette approche pour la planification des dépenses de maintenance de son parc d'ouvrages [LALEU,01]. Chacun ouvrage fait l'objet d'une évaluation de son état et de sa vitesse de dégradation, conduisant à un *index technique*. Par ailleurs, l'importance stratégique est évaluée en termes d'enjeux externe (sécurité publique, environnement) et interne (contribution énergétique, économie), conduisant à un *index d'impact*. Le croisement des deux index donne un *index global* correspondant à une mesure simplifiée du risque (Figure 1.25). Le Cemagref a développé une méthodologie semblable pour l'évaluation du parc de barrages des Sociétés d'Aménagement Régional [ROYET,00].

Citons également les travaux de [MARCHE,00b] qui proposent une approche multicritère pour évaluer la sécurité d'un ouvrage. Le principe consiste à croiser, d'une part un *indice de dangerosité* intégrant les conséquences potentielles de la rupture, pondérée par la réactivité de l'exploitant et des populations (présence de plan d'alerte, etc.), et d'autre part un *indice d'état* indiquant la capacité de l'ouvrage à résister aux situations exceptionnelles (crues, séisme).

Les méthodes à base d'index permettent une évaluation simplifiée et rapide du risque et trouvent ainsi leurs principales applications dans la planification de la maintenance. Toutefois, le diagnostic et l'analyse de risques qui en résultent restent sommaires et ne répondent pas à nos objectifs.

Exemple de notation technique d'un tronçon de canal
Example of technical mark for a section of canal

Nom de l'ouvrage : Canal d'Oraison (Pk 13,8/14,17) Note Stratégique ISG : 12,8		Point concerné (C = 1) ou non (C = 0)	Importance fonctionnelle pour l'ouvrage (pondération)		Etat Élémentaire de la partie d'ouvrage	Évolution de la partie d'ouvrage	État structurel élémentaire
			Note	Poids			
Partie d'ouvrage	Points à noter.	C 0 ou 1	1, 2 ou 3	p	Ne Notes de 1 à 4	Nev Notes 1, 3 ou 4	Ng = (Ne+ Nev) x p
Parement intérieur	Fissures dans la zone de marnage	1	2	2,75	3	3	16,5
	Fissures immergées	1	3	8	3	3	48
	Etat des joints dans la zone de marnage	0		0			0
	Etat des joints immergés	0		0			0
	Présence de végétation dans les joints	0		0			0
	Géométrie des dalles - Déformation	1	3	8	3	3	48
Parement aval	Suintements	1	3	8	1	4	40
	Déformation	0		0			0
	Végétation	1	1	1	1	1	2
Corps de l'ouvrage	Débit du réseau de drainage	1	2	2,75	4	1	13,75
	Etat supposé du réseau de drainage	1	3	8	1	1	16
Terrains avoisinants et contre canal	Débites et nature des fuites (renard)	0		0			0
						Note Technique NT	11,96

Figure 1.25 : Evaluation d'un ouvrage avec la méthode EDF
à base d'index [LALEU,01]

Par ailleurs, nous trouvons des méthodes simplifiées basées sur l'analyse des historiques d'accidents de barrages. Elles sont utilisées pour l'évaluation préliminaire de la sécurité d'un ouvrage ou pour l'identification des ouvrages à risque au sein d'un parc.

Cette approche a été développée par R. FELL dans les travaux [FOSTER,98-99a,b-00a,b] et [DOUGLAS,98]. La méthode UNSW (University of New South Wales) est basée sur l'analyse des statistiques des ruptures et des accidents de barrages dans le monde, issues de [ICOLD,95]. Une mesure de la sûreté de l'ouvrage est estimée en ajustant la fréquence historique de rupture pour un scénario donné au moyen de facteurs de pondération qui prennent en compte les propriétés intrinsèques de l'ouvrage étudié (géométrie, conception, âge, géologie, surveillance...).

L'inconvénient majeur de ce type d'approche réside dans le mélange, dans les statistiques mondiales, de populations d'ouvrages très différents dans leur conception, leur âge et leur niveau de sécurité. Elles rentrent alors dans le cadre de diagnostic et d'analyse de risques préliminaires, permettant des décisions de premier ordre de grandeur.

III.2.3. L'approche statistique

Dans le domaine des barrages, l'application privilégiée de l'approche statistique est l'analyse des données d'auscultation (piézométrie, débits, déplacements) : on dispose de nombreuses mesures relevées à différents pas de temps et on essaie de déterminer les corrélations résultant de combinaisons complexes de multiples facteurs explicatifs. La modélisation physique des phénomènes est rendue difficile compte tenu de la complexité des mécanismes et on s'oriente vers le traitement statistique des données d'auscultation.

Le modèle statistique HST est le plus largement répandu [ICOLD,89] et doit son origine à EDF. Il s'agit de corrélérer les données d'auscultation à trois facteurs explicatifs : [WILLM,67], [EDF,70]

- le niveau du plan d'eau dont l'effet hydrostatique est noté « H » ;
- la date dans l'année ou l'effet saisonnier, noté « S » ;
- le facteur temps « T » :

Il a connu des évolutions récentes avec la prise en compte du facteur pluie « P » [BONELLI,98].

Les deux premiers facteurs provoquent des effets réversibles et l'analyse statistique permet de ramener les mesures à conditions identiques afin de quantifier les phénomènes évolutifs et irréversibles. Il est alors possible d'établir un diagnostic du comportement du barrage et de prévoir son évolution future.

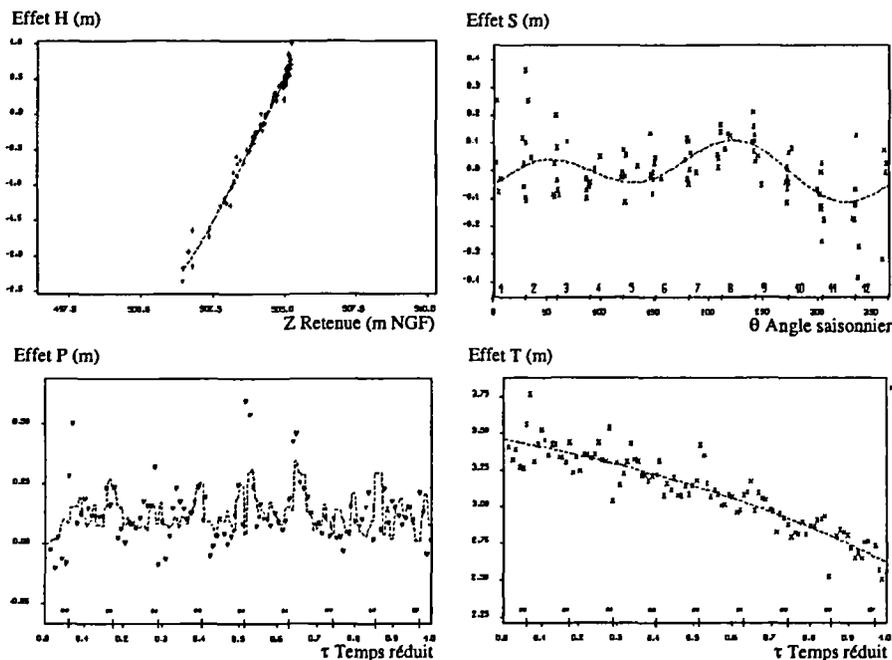


Figure 1.26 : Traitement statistique de la piézométrie d'un barrage [BONELLI,98]

Le modèle HST prend en compte, pour la description des différents facteurs explicatifs, des fonctions d'évolution rattachées, même de façon éloignée, à des modèles physiques de comportement. Il existe des développements totalement statistiques du traitement des données de l'auscultation au moyen de réseaux de neurones, décrits dans [LINO,00].

Les évolutions actuelles tendent à introduire, pour l'analyse statistique des facteurs explicatifs, des lois d'évolution correspondant au comportement physique des structures. Nous renvoyons le lecteur vers des travaux récents : [CARRERE,00] qui propose un outil d'aide à l'interprétation des mesures d'auscultation par la modélisation physique et [BONELLI,01] un modèle statistique basé sur les lois physiques d'écoulements dans les remblais prenant en compte les effets retardés.

En résumé, l'approche statistique reste réservée au traitement des données d'auscultation, qui est le seul domaine des barrages où l'on dispose généralement d'informations abondantes. Elle constitue alors une méthode puissante pour le diagnostic et l'analyse de risques approfondis. En revanche, l'approche statistique ne peut être mise en œuvre pour les ouvrages non ou peu auscultés, ni pour le traitement des données relatives aux incidents ou au vieillissement qui ne sont pas en nombre suffisant.

III.2.4. L'approche par expertise

III.2.4.1. Le rôle de l'expertise dans l'ensemble des approches

L'expertise a un rôle prépondérant dans toutes les activités de diagnostic et d'analyse de risques relatives aux barrages. D'une part, elle intervient dans toutes les approches examinées précédemment :

- pour le calage des hypothèses des modèles physiques (actions, résistances des matériaux) ;
- pour l'évaluation des probabilités subjectives dans les modèles fonctionnels ;
- pour la vérification des données d'auscultation dans les modèles statistiques.

Dans ces modèles, l'expertise permet en outre l'interprétation et la validation des résultats.

D'autre part, lors d'un diagnostic approfondi d'un ouvrage, les différentes approches sont complémentaires et peuvent être conduites simultanément. L'expert intervient alors pour synthétiser l'ensemble des résultats et donner les conclusions.

III.2.4.2. Le diagnostic et l'analyse de risques par expertise pure

Le diagnostic et l'analyse de risques peuvent être réalisés par **expertise pure** (ou *expertise vraie* [ZWINGELSTEIN,95]), sans faire appel aux autres approches. Elle rentre dans le cadre d'études préliminaires ou de diagnostic rapide.

L'enquête nationale menée sur le parc de barrages du ministère de l'environnement illustre cette démarche de diagnostic et d'analyse de risques par expertise pure. A cette occasion, les experts sont intervenus sur des ouvrages pour lesquels ils ne disposaient parfois que de très peu d'informations, le diagnostic étant alors réalisé uniquement par l'analyse des données de terrain et de l'inspection visuelle. Cette approche repose sur les seules connaissances et retour d'expérience des experts.

En résumé, l'expertise est l'approche privilégiée dans le diagnostic et l'analyse de risques des barrages :

- *elle intervient de façon systématique dans les études approfondies pour la validation et l'analyse des modèles physiques, fonctionnels ou statistiques ;*
- *l'expertise pure est largement utilisée pour les études rapides ou préliminaires.*

III.2.5. Synthèse des différentes approches pour le diagnostic et l'analyse de risques des barrages

L'approche par expertise est utilisée prioritairement dans le cadre de diagnostic rapide, sur des ouvrages où l'on dispose de peu d'informations et lors d'études préliminaires de sécurité. Elle intervient également en synthèse et validation d'analyses approfondies.

Pour des études précises, la modélisation physique permet l'analyse de la stabilité d'un ouvrage et de son comportement.

L'approche statistique est réservée au traitement des données d'auscultation, qui est le seul domaine des barrages où les informations disponibles sont abondantes.

Enfin, l'approche par modélisation fonctionnelle a été mise en œuvre récemment sur quelques études de sûreté de fonctionnement de grands ouvrages. Il s'agit d'une approche systémique, qui permet de déterminer les risques les plus importants et de hiérarchiser les actions de maintenance sur un ouvrage ou au sein d'un parc. Toutefois, elle relève encore du domaine de la recherche et de développement.

Pour ces trois dernières approches, le jugement expert reste fortement impliqué.

La figure 1.27 synthétise les différentes approches du diagnostic et de l'analyse de risques pratiquées dans le domaine des barrages.

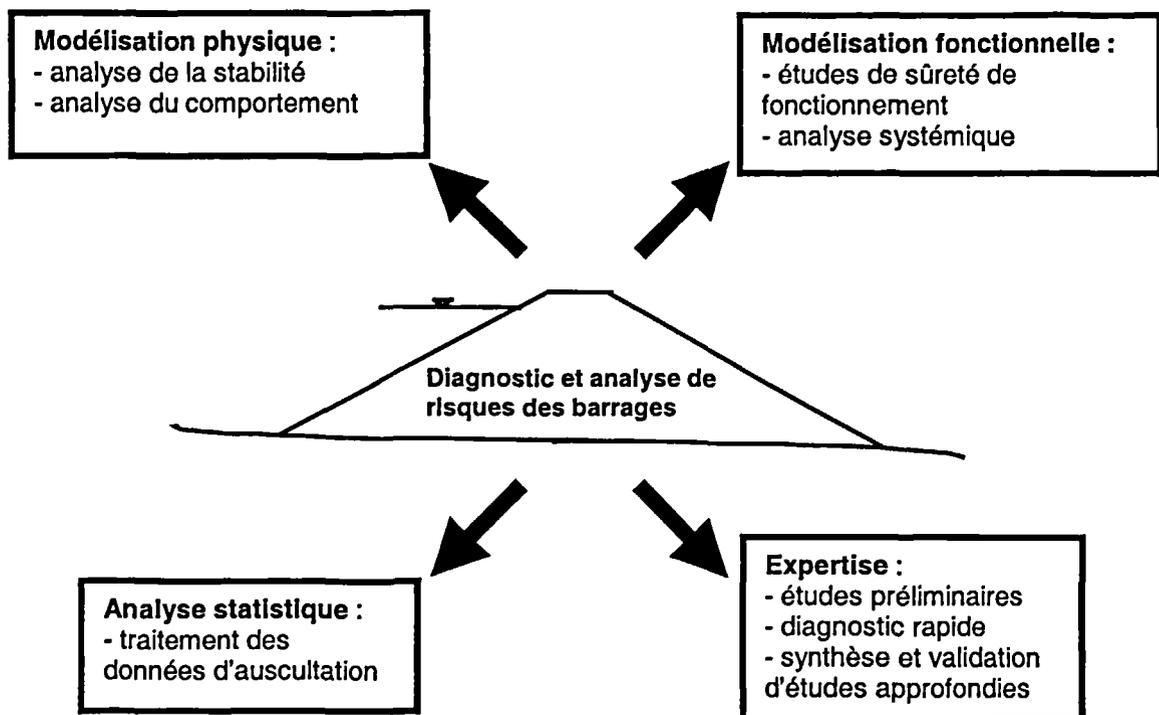


Figure 1.27 : Les approches du diagnostic et de l'analyse de risques dans le domaine des barrages

III.3. Approche du diagnostic et de l'analyse de risques pour les barrages relevant du ministère de l'environnement

III.3.1. Privilégier l'approche experte

Nous avons mis en évidence au chapitre II les principales caractéristiques du parc de barrages relevant du ministère de l'environnement :

- des ouvrages hétérogènes ;
- des niveaux de sécurité variables ;
- des ouvrages pas toujours bien documentés ;
- des données relatives aux incidents et défaillances peu abondantes ou incomplètes.

Dans un tel contexte, l'approche naturellement privilégiée pour le diagnostic et l'analyse de risques des barrages contrôlés par le ministère de l'environnement est l'expertise. D'une part, elle intervient dans le cadre d'un diagnostic approfondi (synthèse et validation d'études physiques du comportement et de traitement statistique de données d'auscultation). D'autre part, l'expertise pure constitue l'approche de base pour le diagnostic rapide et préliminaire.

III.3.2. L'expertise : principaux concepts et utilisation

III.3.2.1. Quelques concepts généraux liés à l'expertise

L'étymologie du terme « expert » se trouve dans l'expérience, c'est-à-dire l'épreuve. L'expert est donc celui qui a éprouvé. [ZWINGELSTEIN,95] définit l'expert comme une personne disposant d'un savoir et d'un savoir-faire ; son raisonnement fait appel à ses connaissances théoriques (connaissance fine du système dont il est expert) et à la longue expérience dont il tire des précédents, des enseignements (son savoir-faire).

Ainsi, le jugement expert est selon la norme (x50-110 *qualité en expertise*) le « processus intellectuel d'appréciation, d'évaluation, d'estimation ou d'explication conduisant à énoncer une opinion, sur un sujet ou un objet, fondé sur l'expérience professionnelle dans un domaine défini » [Norme x50-110,02].

Nous retenons les deux bases du jugement de l'expert, repris dans [MODARRES,93] : la connaissance et l'expérience.

De cette façon, l'expertise suppose un lien particulier entre un « avant » (l'expérience acquise) et un « pendant » (une épreuve que l'expert affronte avec succès, parce qu'il a vécu une situation analogue et qu'il sait comment l'aborder). [TREPOS,96]

L'expertise consiste donc à traiter « une situation problématique (diagnostic et analyse de risques d'un barrage), requérant un savoir de spécialiste (connaissance technique), qui se traduira par un avis (évaluation de la sécurité et du risque), donné à un mandant, pour qu'il prenne une décision » [TREPOS,96]. Nous retrouvons ces mêmes notions dans la norme x50-110 qui définit l'expertise comme un « ensemble d'activités ayant pour objet de fournir à un client, en réponse à la question posée, une interprétation, un avis ou une recommandation aussi objectivement fondés que possible, élaborés à partir des connaissances disponibles et de démonstrations, accompagnés d'un jugement professionnel ».

III.3.2.2. L'utilisation du jugement expert

L'utilisation du jugement expert est classiquement réalisée en deux étapes :

- *le recueil de la connaissance experte ;*
- *l'analyse et l'agrégation des opinions expertes.*

Pour recueillir la connaissance auprès des personnes qui la détiennent, de nombreuses méthodes de recueil d'expertise sont disponibles. Les interviews individuelles ou de groupe [SCOTT,91] et les techniques d'élicitations indirecte ou directe, la méthode Delphi... font partie de ces méthodes. Nous renvoyons le lecteur vers [LAIR,00] qui recense les méthodes de recueils d'expertises.

Plusieurs techniques sont également disponibles pour l'analyse des opinions d'experts, allant de la moyenne arithmétique des estimations à des techniques d'agrégations non linéaires telles que la méthode de la moyenne géométrique ou l'approche Bayésienne. [MODARRES,93]

Nous n'avons pas étudié ces différentes techniques et nous nous sommes limité à l'utilisation des recueils d'expertise existants (ouvrages de synthèse et monographies).

III.3.3. Le raisonnement par analogie pour le diagnostic et l'analyse de risques par expertise

Dans une approche basée sur l'expertise, la démarche générale repose sur le **raisonnement par analogie**, décrit dans [CATHALA,98a]. Nous retrouvons classiquement ce mode de raisonnement dans la pratique du diagnostic et de l'analyse de risques au sein de parcs d'ouvrages hétérogènes, tels que les tunnels en briques (I.1.4). Il consiste en ceci :

Pour la phase de diagnostic, l'expert cherche à identifier, à partir d'une séquence de faits observés sur un ouvrage, un ou plusieurs mécanismes de comportement déjà vus par lui sur d'autres structures du même type. Il en déduit alors le mécanisme de vieillissement auquel l'ouvrage étudié est censé être soumis.

Des investigations complémentaires (essais, auscultation, mesures, etc.) peuvent être demandées pour confirmer ou affiner le diagnostic.

Une fois le ou les mécanismes identifiés, le raisonnement par analogie est également mis en œuvre pour la phase d'analyse de risques : l'expert cherche à prévoir les évolutions futures des dégradations en examinant les lois d'évolution d'ouvrages du même type.

Il devient alors possible d'anticiper l'évolution de l'ouvrage et de définir les dispositions correctives pertinentes : réparation, confortement, mesures d'urgence le cas échéant...

IV. Proposition

Compte tenu de l'hétérogénéité du parc de barrages relevant du contrôle du ministère de l'environnement et de la diversité des mécanismes de vieillissement en jeu, mais également compte tenu de la disponibilité parfois perfectible des informations rattachées à ces ouvrages, l'expertise, parmi les différentes approches disponibles, est naturellement privilégiée pour le diagnostic et l'analyse de risques.

Nos travaux vont s'attacher alors à développer des méthodes et des outils pour l'aide au diagnostic et à l'analyse de risques par expertise.

Nous visons deux contextes d'utilisation : prioritairement, le diagnostic rapide et préliminaire, où l'expertise pure constitue l'approche de base, mais également le diagnostic approfondi qui intervient lors de l'analyse et de la validation de modèles physiques ou fonctionnels et de traitement statistique des données d'auscultation.

Face à un ouvrage dégradé, l'expert cherche à savoir quels sont les mécanismes impliqués (phase de diagnostic) et à quelles évolutions il faut ensuite s'attendre dans le temps (phase d'analyse de risques). Pour cela, les besoins de l'expert pour accomplir sa mission de diagnostic et d'analyse de risques des barrages peuvent être identifiés :

- ❶ une base de connaissances de mécanismes de vieillissement de barrages pour le diagnostic ;
- ❷ une base de données d'historiques de vieillissement pour l'analyse de risques.

L'objectif de ces bases de données est de permettre à l'expert leur utilisation dans le cadre d'un raisonnement par analogie, pour l'identification et la prévision des évolutions des mécanismes (Figure 1.28).

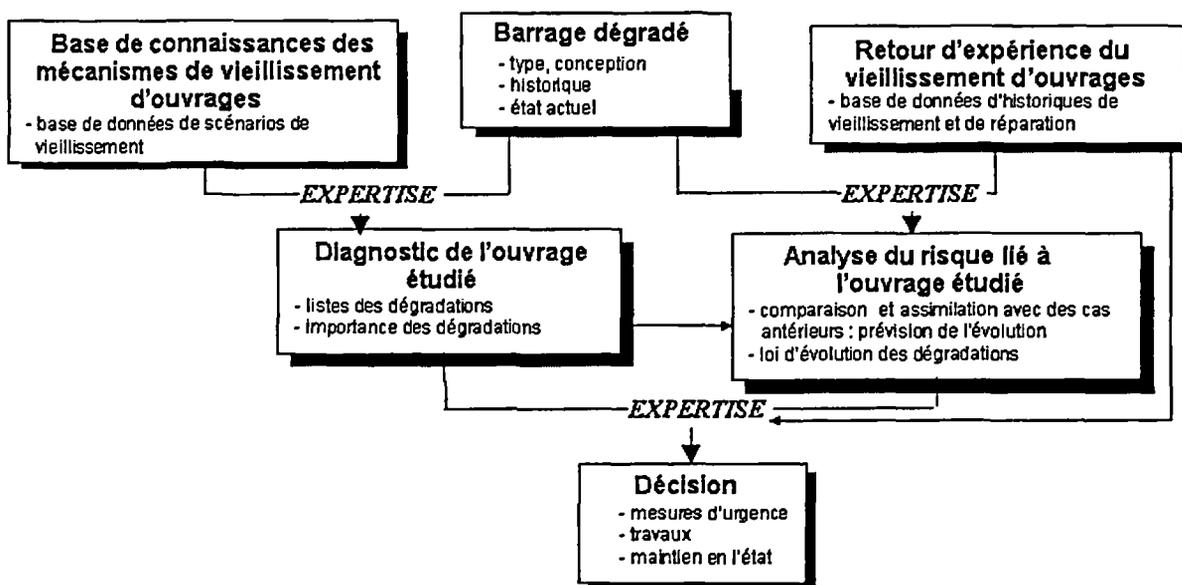


Figure 1.28 : Le raisonnement par analogie pour le diagnostic et l'analyse de risques par expertise

Dans ce cadre, la réalisation d'un modèle de vieillissement et d'analyse de risques des barrages constituerait au final une méthode puissante pour répondre aux besoins des experts.

Des systèmes variés (typologie variée, unicité de chaque ouvrage), des mécanismes multiples et complexes et des environnements incertains (méconnaissance du système, de l'environnement, aléas hydrologique et sismique) rendent la modélisation du vieillissement difficile.

Des informations relatives aux incidents de barrages peu abondantes, souvent imprécises et incomplètes et des données difficilement transposables d'un ouvrage vers un autre, impliquent le jugement de l'expert pour l'évaluation des risques.

Par ailleurs, il n'existe pas de modèle disponible susceptible, d'une part de décrire tous les mécanismes, de prendre en compte leurs redondances et les états de dégradation intermédiaire des composants, et d'autre part d'évaluer le risque potentiel lié à un mécanisme de vieillissement.

Toutefois, nous disposons :

- d'un parc d'ouvrages qui nous fournit un retour d'expérience et des informations historiques relatifs au vieillissement;
- de nombreux recueils d'expertise décrivant avec précision les mécanismes physiques de vieillissement des barrages (partie II) ;
- d'outils de représentation et de modélisation du comportement de systèmes complexes : les techniques de la Sûreté de Fonctionnement (partie III) ;
- d'outils pour la prise en compte des connaissances imprécises et hétérogènes, relevant de différents facteurs : le raisonnement qualitatif (partie IV).

Notre travail va alors consister à produire des méthodes pour modéliser les mécanismes de vieillissement et pour analyser les risques, dont les objectifs principaux sont (Figure 1.29) :

- la capitalisation de la connaissance relative à la pathologie des barrages pour le diagnostic ;
- la capitalisation du retour d'expérience et les historiques de vieillissement pour mieux anticiper les évolutions prévisibles d'un mécanisme ;
- l'évaluation du risque lié à un ouvrage dégradé.

Il est bien sûr évident que ce travail doit aboutir à des méthodes utilisables à court ou moyen terme par le Cemagref et adaptées aux experts du domaine.

Cela signifie que notre recherche doit permettre des développements ultérieurs vers des outils d'aide à la décision destinés aux ingénieurs spécialisés, tels que des bases de données relatives au vieillissement.

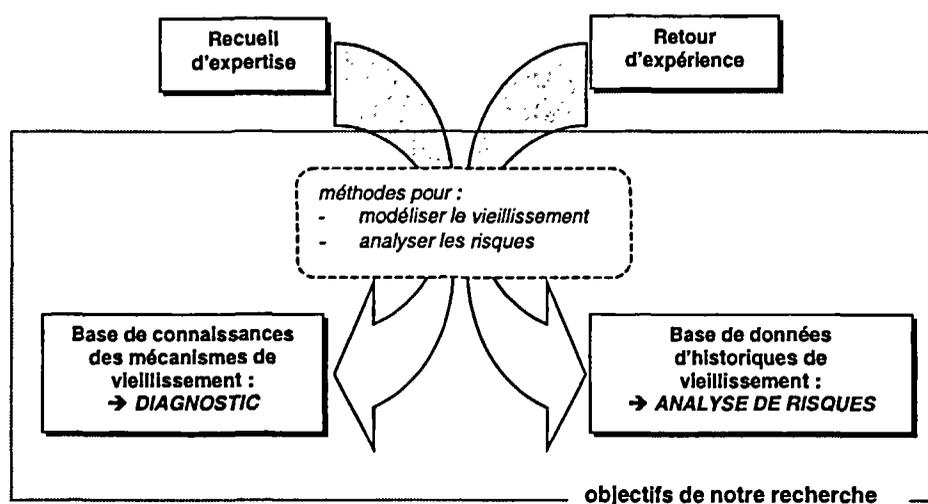


Figure 1.29 : Démarche de notre recherche

Partie 2

Les mécanismes de vieillissement des barrages

*I. Introduction à l'étude
des mécanismes de vieillissement*

*II. Les mécanismes de vieillissement
des barrages poids*

*III. Les mécanismes de vieillissement
des barrages en remblai*

IV. Synthèse

I. Introduction à l'étude des mécanismes de vieillissement

Dans cette partie, nous établissons une synthèse des principaux mécanismes de vieillissement des barrages. Nous traitons distinctement les mécanismes des ouvrages poids (chapitre II) et les mécanismes des remblais (chapitre III). Les barrages voûtes et certains ouvrages plus marginaux (multi-voûtes, contreforts) ne sont pas examinés, sachant toutefois que certains mécanismes sont analogues à ceux des ouvrages poids. Le cas échéant, nous en ferons état.

Les mécanismes de vieillissement que nous décrivons sont représentatifs de ceux qui sont observés sur les barrages du ministère de l'environnement, et à ce titre, nous illustrons cette synthèse à partir d'exemples empruntés à ce parc.

1.1. Support bibliographique

Les principales sources d'informations disponibles relatives aux détériorations des barrages proviennent de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB ou *International Commission On Large Dams - ICOLD*). Celle-ci a notamment produit de nombreux travaux sur la **détérioration des barrages**, définie au sens large, selon la CIGB, comme :

« *tout comportement défectueux du point de vue de la sécurité et des performances, y compris les accidents et les ruptures* » [ICOLD,83].

Ainsi, un recueil d'informations colossal a permis d'analyser, entre 1972 et 1984, quelques 1105 études de cas de détériorations recueillies (dont 94 ruptures) à partir d'un échantillon de 14700 ouvrages sur 33 pays. Ce travail a donné lieu à des publications incontournables : [ICOLD, 74-83-84a-84b-95]. Ces références visaient, d'une part, à ordonner les informations recueillies et à illustrer les détériorations par des exemples représentatifs, d'autre part, à analyser les différentes détériorations pour connaître leurs fréquences et les populations d'ouvrages concernées.

Ces travaux ont servi de base à la rédaction du bulletin 93 relatif à l'étude des scénarios de vieillissement des barrages et de leurs ouvrages annexes [ICOLD,93a], qui constitue la synthèse la plus aboutie de la CIGB sur la pathologie des barrages. Nous utilisons cette référence, dont on conserve la classification et la terminologie des scénarios de vieillissement, pour présenter les mécanismes.

Par ailleurs, afin d'approfondir l'analyse d'un mécanisme particulier, nous exploitons des publications spécifiques, telles que [ICOLD,91] pour l'alcali-réaction dans les barrages poids, [CFGB,97] pour l'érosion interne et d'autres références citées au fil du texte.

1.2. Cadre de l'étude

Les études de la CIGB considèrent différentes classifications de détérioration des barrages : [ICOLD,93a] distingue, d'une part « les processus de détérioration liés aux actions imprévues ou exceptionnelles, ou encore à des pannes du matériel, et d'autre part ceux associés à une dégradation des matériaux de la fondation ou des ouvrages » ; [ICOLD,83] considère les détériorations conduisant à « une dégradation de la sécurité ou de la performance » et « les accidents ou les ruptures ».

Nous retrouvons ces distinctions dans les justifications semi-probabilistes aux états-limites des constructions de génie civil [CALGARO,96] : les *états-limites de service* correspondant à des

critères de fonctionnalité (durabilité de la structure ou des matériaux) prenant en compte les actions permanentes et les intensités usuelles des actions variables ; les *états-limites ultimes* correspondant à des pertes d'équilibre statique ou à des modes de ruine, considérant les intensités exceptionnelles des actions variables et les actions accidentelles.

Les détériorations sont à examiner dans le cadre des étapes importantes de la vie du barrage (partie 1 - II.2.4). Ainsi, [ICOLD,93a] distingue les détériorations qui se produisent pendant les cinq premières années d'exploitation et qui sont jugées comme étant « des **maladies de jeunesse** dont les origines se trouvent dans des insuffisances du projet, de la construction ou des opérations de mise en service », et le **vieillissement** qui est défini comme (Figure 2.1) :

« une catégorie de détérioration due aux altérations au cours du temps des propriétés des matériaux et des structures » et « survenant après les cinq premières années d'exploitation ».

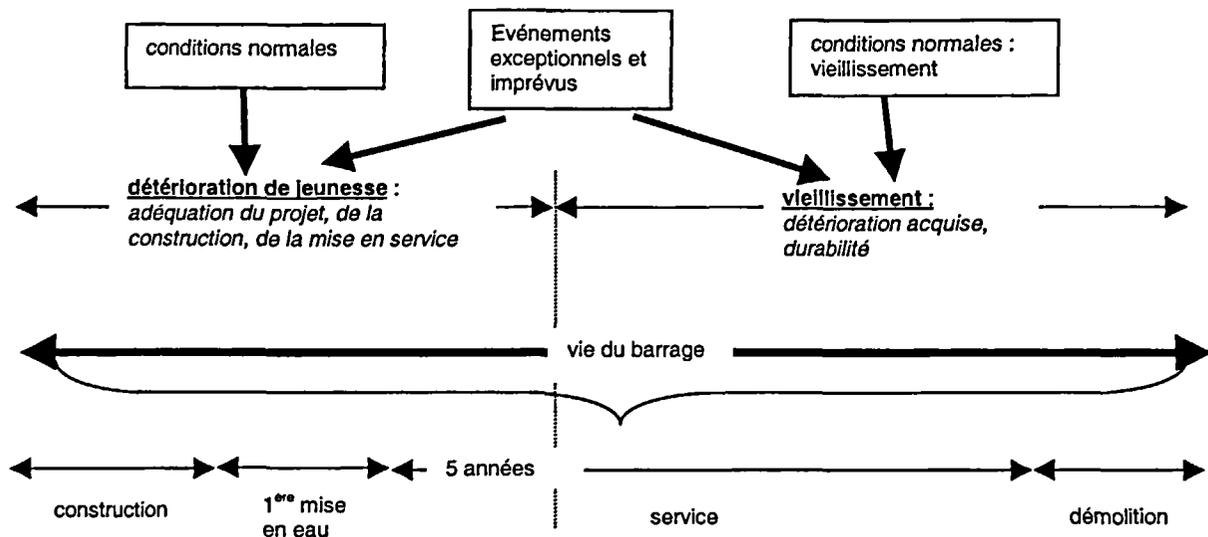


Figure 2.1 : *Détériorations d'un barrage au cours de sa vie [ICOLD,93a]*

Ce découpage entre *détérioration de jeunesse* et *vieillissement* autour d'un seuil placé à cinq années d'exploitation est, à notre sens, quelque peu arbitraire. En effet, les exemples que nous développons en partie 5 montrent que des détériorations diagnostiquées après plus de cinq années de service trouvent souvent leur origine dans des insuffisances de la conception ou la réalisation.

Ainsi, dans la suite du rapport, nous parlons de vieillissement dès lors que la détérioration en jeu n'est pas liée à un seul défaut d'adaptation ou de réglage de l'ouvrage immédiatement après sa construction, sans considération de l'âge.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la description des principaux mécanismes de vieillissement pouvant apparaître dès la mise en service de l'ouvrage. Dans la suite du rapport, nous verrons de quelle façon des actions exceptionnelles ou accidentelles sont susceptibles d'initier ou d'accélérer un mécanisme de vieillissement.

1.3. Classification des mécanismes de vieillissement

Qu'est-ce-qu'un scénario de vieillissement ?

« Un scénario de vieillissement est un enchaînement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques et propriétés des barrages et de leurs ouvrages annexes » [ICOLD,93a]. Nous appellerons également ces chaînes d'événements « mécanisme de vieillissement ».

Compte tenu des différences entre les processus en jeu, nous distinguons les barrages poids et les barrages en remblai [ICOLD,88a] :

Les **barrages poids** (en béton ou en maçonnerie) sont des ouvrages rigides, construits sur des fondations rocheuses de bonne qualité [DEGOUTTE,97]. Les scénarios de vieillissement sont essentiellement liés aux altérations des propriétés des matériaux (par processus chimique ou physico-chimique) ou à la faible résistance mécanique des structures. Les principales disciplines concernées sont la mécanique des roches (pour les fondations et les ancrages), la mécanique des solides (pour le corps du barrage) et la chimie (réactions avec le béton et les roches).

Les **barrages en remblai** sont des ouvrages souples, construits le plus souvent sur des sols meubles, mais qui peuvent l'être également sur des fondations rocheuses [DEGOUTTE,97]. Les scénarios de vieillissement des remblais et des fondations meubles sont essentiellement liés à des mécanismes d'infiltration et d'érosion (processus hydromécanique) ou de stabilité mécanique, mais aussi à des processus chimiques dans le cas de remblai construit sur des fondations rocheuses. Les principales disciplines concernées sont la mécanique et l'hydraulique des sols.

Pour chacune de ces deux catégories, nous distinguons les mécanismes s'opérant dans le *corps du barrage* de ceux s'opérant dans la *fondation*.

II. Les mécanismes de vieillissement des barrages poids

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux mécanismes de vieillissement des barrages poids en béton ou en maçonnerie, résumés dans le tableau 2.1 :

Fondations (rocher)	scénario 1.1 : Dissolution et érosion scénario 1.2 : Vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage
Corps du barrage (béton ou maçonnerie)	scénario 2.1 : Alkali-réaction scénario 2.2 : Retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau scénario 2.3 : Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu scénario 2.4 : Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées scénario 2.5 : Faible résistance au gel dégel scénario 2.6 : Vieillissement des revêtements amont

Tableau 2.1 : Les principaux scénarios de vieillissement des barrages poids

II.1. Les différents barrages poids

La typologie des barrages poids est établie à partir des matériaux les constituant et de leur évolution. On distingue : [DEGOUTTE,97]

- les *barrages poids en maçonnerie* ;
- les *barrages poids en béton conventionnel vibré (BCV)* ;
- les *barrages poids en béton compacté au rouleau (BCR)*, mettant en œuvre un béton maigre (100 à 150 kg de ciment par m³) travaillé comme un matériau meuble ;
- les *barrages poids en remblai dur*, qui est une variante du BCR avec des teneurs en ciment encore plus réduite et pouvant mettre en œuvre des alluvions naturelles.

Les profils des barrages poids ont évolué avec les progrès de l'ingénierie et des matériaux :

- les *profils arqués* ont été employés pour les ouvrages en maçonnerie construits au 19^{ème} siècle et donnent des ouvrages généralement minces ;
- les *profils trapézoïdaux* avec parements amont verticaux sont les plus classiques et correspondent aux ouvrages en BCV et aux ouvrages récents en BCR ;
- les *profils symétriques* ont été récemment utilisés pour des ouvrages en BCR ou remblai dur construits sur des fondations de faibles caractéristiques mécaniques (rocher altéré, fondations alluviales) et permettent de limiter les sollicitations portées au sol.

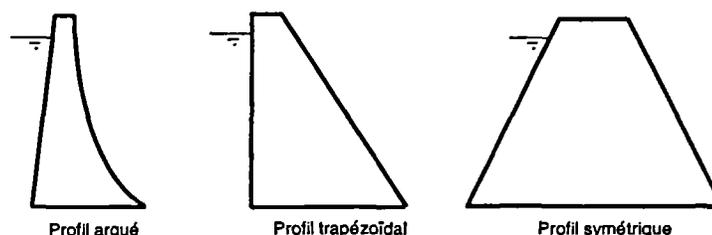


Figure 2.2 : Les profils des barrages poids

II.2. Les scénarios de vieillissement de la fondation

II.2.1. Dissolution et érosion (scénario 1.1)

Le mécanisme de *dissolution et érosion* des fondations rocheuses d'un barrage poids met en jeu, à l'origine, des réactions chimiques entre les composants de la fondation et les eaux d'infiltration. Ces attaques chimiques se traduisent par la *dissolution* de la masse rocheuse elle-même, des matériaux de remplissage des discontinuités et des joints ou des rideaux d'injection et des coulis de traitement de sol. Ensuite, la circulation d'eau au sein de la fondation conduit au transport des particules dissoutes puis peut provoquer *l'érosion* des matériaux et leur entraînement vers l'aval.

La réaction de *dissolution* est principalement influencée par les caractéristiques chimiques des eaux d'infiltration provenant de la retenue. A ce titre, des eaux pures ou très faiblement minéralisées, telles qu'on les rencontre dans les retenues en zone de montagne, sont particulièrement agressives. Egalement, les caractéristiques de la fondation (type de roche, qualité des coulis d'injection, etc.) déterminent sa capacité à résister aux réactions chimiques produites par les eaux d'infiltration.

La dissolution et l'érosion des matériaux entraînent une diminution de l'étanchéité de la fondation (c'est-à-dire une augmentation de la perméabilité), et par conséquent, une augmentation des infiltrations et des pressions interstitielles. Par ailleurs, l'altération et la perte des matériaux par dissolution et érosion diminuent la résistance mécanique des fondations, pouvant conduire à leur déformation, puis à celle du barrage.

Le processus de *dissolution* peut être détecté et suivi par l'analyse de l'évolution de la teneur en sels dissous dans les eaux de fuite et par la comparaison avec les concentrations naturelles des eaux de la retenue. La mise en place de dispositifs de décantation à l'exutoire des réseaux de drainage permet de détecter la présence de particules solides entraînées et de rendre compte du processus *d'érosion*. Enfin, le mécanisme de *dissolution et érosion* des fondations se manifeste par une augmentation des débits de fuites et de la piézométrie.

II.2.2. Vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage (scénario 1.2)

Le *vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage* d'un barrage poids constitue un cas particulier du mécanisme de *dissolution et érosion* (scénario 1.1). Pour les barrages voûtes, il peut également relever du mécanisme lié à la *faiblesse des fondations au regard des actions prolongées ou répétées*, que nous ne développerons pas. Le lecteur intéressé pourra se référer à [ICOLD,93a-93b].

Le *vieillissement des rideaux d'injection* résulte le plus souvent d'un défaut de conception, en particulier d'une mauvaise adéquation entre les matériaux injectés et l'agressivité des eaux. Cela conduit alors à la dissolution du coulis d'injection par réaction chimique. Pour limiter ce processus, on améliore la résistance des coulis de ciment par des additifs minéraux appropriés au contexte tels que la bentonite, les cendres volantes, les pouzzolanes, etc. Il est parfois nécessaire de recourir à des résines acryliques ou de silicates.

La dégradation des rideaux d'injection peut être également due à une réalisation inadaptée : pression d'injection, volume injecté, densité des injections, profondeur... Cela conduit alors à des percolations à travers la zone de la fondation traitée (entraînant alors des mécanismes de dissolution et d'érosion) ou au contournement du rideau d'injection en profondeur ou en rive.

Quant au *vieillissement des réseaux de drainage*, il résulte d'un dispositif inadapté ou mal exécuté (densité de forages, profondeur et diamètre des drains, exutoire, etc.) ou du colmatage des drains par dépôt des produits de la dissolution ou de l'érosion des fondations.

Le mécanisme de *vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage* peut être détecté par une augmentation de la piézométrie dans la fondation, liée aux percolations dans la partie en aval du rideau d'injection ou du réseau de drainage. En outre, le *vieillissement du voile d'injection* va se traduire par une augmentation des débits de drainage et, a contrario, le *vieillissement des réseaux de drainage* par leur diminution.

Le barrage de la Neste du Louron (65) illustre le mécanisme de colmatage du dispositif de drainage sous l'effet de la dissolution du voile d'injection. Les informations indiquées sont issues de [POULAIN,03]. Il s'agit d'un barrage poids en BCV, construit en 1975 et constitué de quatre plots de 16 m de hauteur. Le parement amont est vertical et le fruit aval (rapport de la base sur la hauteur) est de 0,85. L'ouvrage est fondé sur une roche fracturée composée de schistes compacts, renforcée par un rideau d'injection. En aval de ce dernier, un dispositif de drainage est composé de cinq drains forés (diamètre 76 mm) débouchant dans une galerie de visite (Figure 2.3).

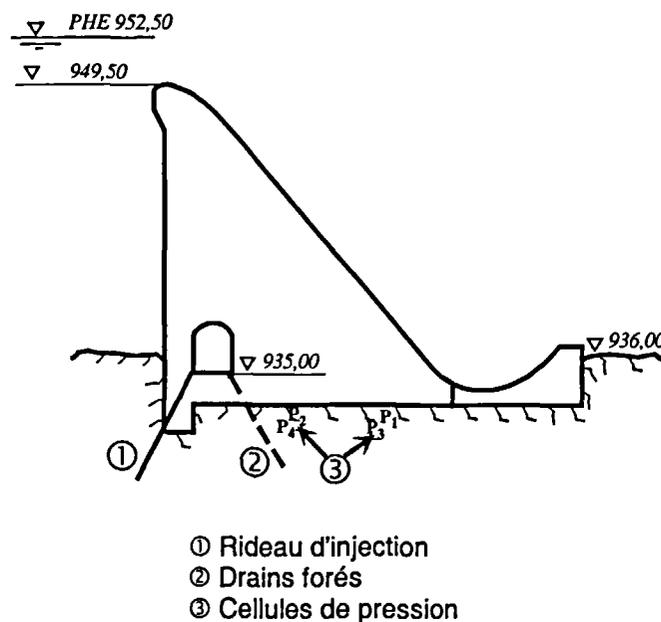


Figure 2.3 : Profil du barrage de la Neste du Louron (65)

Deux plots sont équipés de cellules de pression interstitielle situées à l'interface barrage-fondation, permettant de suivre les sous-pressions exercées par la fondation sous la structure : P1 et P2 en rive gauche ; P3 et P4 en rive droite.

Sous l'effet de la dissolution lente du voile d'injection, le dispositif de drainage connaît des cycles de colmatage progressif par dépôt des carbonates dans les drains, nécessitant des opérations régulières d'hydrocurage pour décolmater les forages. La figure 2.4 indique l'évolution des diagrammes de sous-pressions à l'interface barrage-fondation (aux profils rives gauche et droite) et à différentes dates :

- ① : diagramme des sous-pressions avec les drains totalement colmatés (juillet 1977)
- ② : diagramme des sous-pressions après hydrocurage des drains (mars 1978)
- ③ : diagramme des sous-pressions avec léger colmatage (juin 1987)
- ④ : diagramme des sous-pressions avec colmatage sensible (janvier 2002)

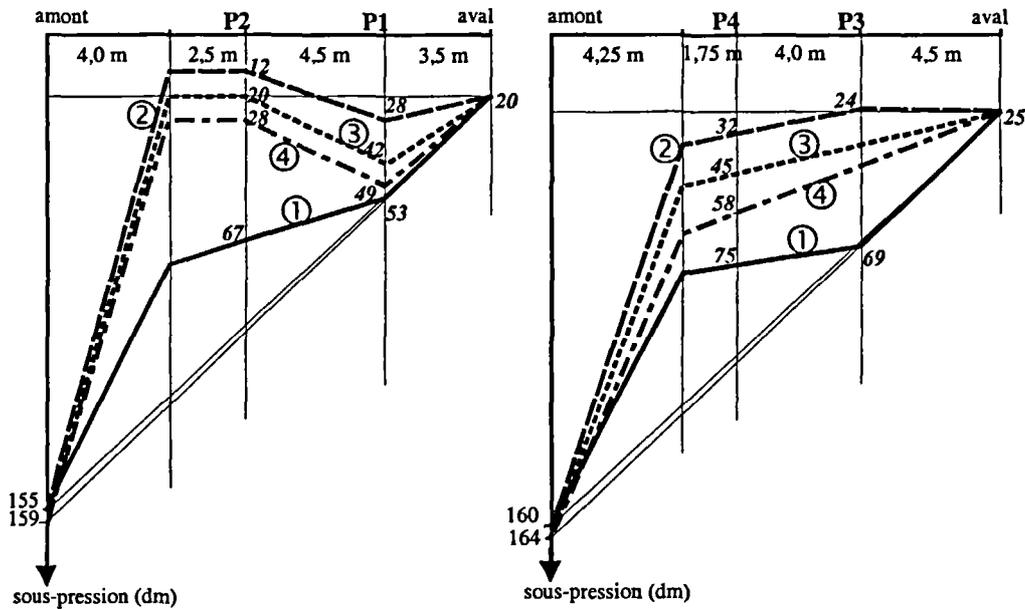


Figure 2.4 : Evolution du diagramme des sous-pressions (la Neste du Louron)

Cet exemple montre clairement l'augmentation de la piézométrie dans la fondation sous l'effet conjugué de la dissolution du voile d'injection et du colmatage progressif du réseau de drainage. Cet accroissement des sous-pressions a pour conséquence de diminuer sensiblement la sécurité du barrage vis-à-vis du glissement. Pour certains ouvrages, la stabilité peut être menacée.

II.3. Les scénarios de vieillissement du corps du barrage

II.3.1. Alkali-réaction (scénario 2.1)

L'alkali-réaction est une réaction chimique entre les alcalins contenus dans la phase liquide interstitielle du béton et les granulats du béton. Elle correspond à une attaque des granulats par le milieu basique du béton et provoque la formation de gel de réaction, dont l'expansion peut engendrer un gonflement. Le gonflement met en compression les granulats et en traction le ciment qui finit par se fissurer. Nous utilisons la référence [ICOLD,91] pour l'analyse du mécanisme.

La réaction d'alkali-granulats est due à l'influence simultanée de plusieurs paramètres que nous pouvons regrouper en trois ensembles :

❶ les propriétés des matériaux : granulats, ciments

Cette réaction nécessite la présence de produits réactifs dans les granulats (minéraux ou roches réactifs). Par ailleurs, la teneur très élevée en alcalins dans la phase aqueuse interstitielle est généralement due à la dissolution des alcalis du ciment ou d'autres liants ou d'adjuvants.

❷ les effets extérieurs : humidité, température et contraintes de compression

Une humidité relative importante (80% ou plus) est très favorable à l'alkali-réaction. A un moindre niveau, la vitesse de la réaction chimique augmente avec la température. Enfin, l'expansion et les dommages dus à l'alkali-réaction sont fortement dépendants du confinement et des contraintes, le gonflement du béton étant limité dans les zones comprimées.

③ le temps :

Les fissures apparaissent à des pas de temps variables. L'expansion du béton peut être progressive ou se produire tardivement mais alors brutalement.

Les effets du gonflement sur un plot d'un barrage poids sont les suivants :

① des déformations

Un barrage étant confiné selon l'axe de sa crête, il se produit toujours un déplacement en crête vers le haut. Par ailleurs, on observe le plus souvent un déplacement axial, vers l'amont ou l'aval selon la configuration du site et de l'ouvrage. Le gonflement étant d'autant plus rapide que le béton est humide, la zone amont est donc la plus exposée.

② la fissuration

Un premier type de fissures liées au gonflement se produit dans la masse du béton et apparaît en surface sous forme de *faïençage* à mailles plus ou moins larges ou en étoiles. Ces fissures favorisent la pénétration d'eau et l'action des sous-pressions.

Ces infiltrations, combinées au confinement, continuent à alimenter le gonflement et peuvent alors entraîner un deuxième type de fissures plus profondes : les *fissures structurales*.

③ des exsudats blanchâtres formés de calcite et parfois de gels translucides.

Nous développons dans la partie 5 l'exemple remarquable du barrage du Chambon qui est un des ouvrages français dont le gonflement a été le plus spectaculaire atteignant 80.10^{-6} par an.

D'autres mécanismes physico-chimiques moins fréquents, tels que l'attaque par les sulfates ou la réaction de certains ciments, peuvent conduire au gonflement du béton et à des effets analogues.

11.3.2. Retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau (scénario 2.2)

Le scénario de *retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau*, très connu et dangereux pour les barrages voûtes, n'entraîne pas de conséquences importantes pour les barrages poids. Tout d'abord, les effets du *fluage* du béton dans un ouvrage poids sont négligeables car les contraintes internes sont très faibles. Seul le *retrait* du béton peut conduire à certains désordres ne mettant toutefois pas en cause la stabilité du barrage.

Le phénomène de *retrait* peut avoir deux origines : thermique ou hydraulique. Le retrait thermique est surtout dû à la chaleur d'hydratation et est fortement influencé par le type de ciment choisi et son dosage. Le retrait hydraulique provient de la perte d'eau de gâchage par évaporation dans une atmosphère à faible humidité relative.

Les retraités ou contractions combinés à un confinement latéral du barrage ou à des joints insuffisants (en nombre ou en type) donnent naissance à des fissures verticales traversantes du plot, qui se développent au cours des premiers mois de la vie du barrage après la prise du béton. Dans ce cas, des fuites plus ou moins importantes peuvent apparaître aux sorties des fissures sur le parement aval.

Le récent barrage de la Touche Poupard (79) illustre le phénomène de retrait. Il s'agit d'un ouvrage poids à profil trapézoïdal classique, en BCR avec un masque amont en béton BCV. Construit entre 1993 et 1994, la première vidange complète de la retenue réalisée en octobre 1999

a révélé sur le parement amont des fissures verticales traversantes, placées entre les joints de dilatation. Elles se traduisent par des ouvertures amont-aval de la crête et des fuites éparses donnant de faibles débits à leur exutoire sur le parement aval [PEYRAS,00]. La figure 2.5 montre les fissures de retrait verticales observées sur le parement amont à retenue vide, clairement visibles du fait de leur humidité liée au ressuyage.

Le retrait, de faible ampleur sur ce barrage, peut parfois conduire à des fuites importantes sur d'autres ouvrages, nécessitant d'entreprendre des travaux de traitement localisé des fissures ou d'étanchéification complète du parement amont.

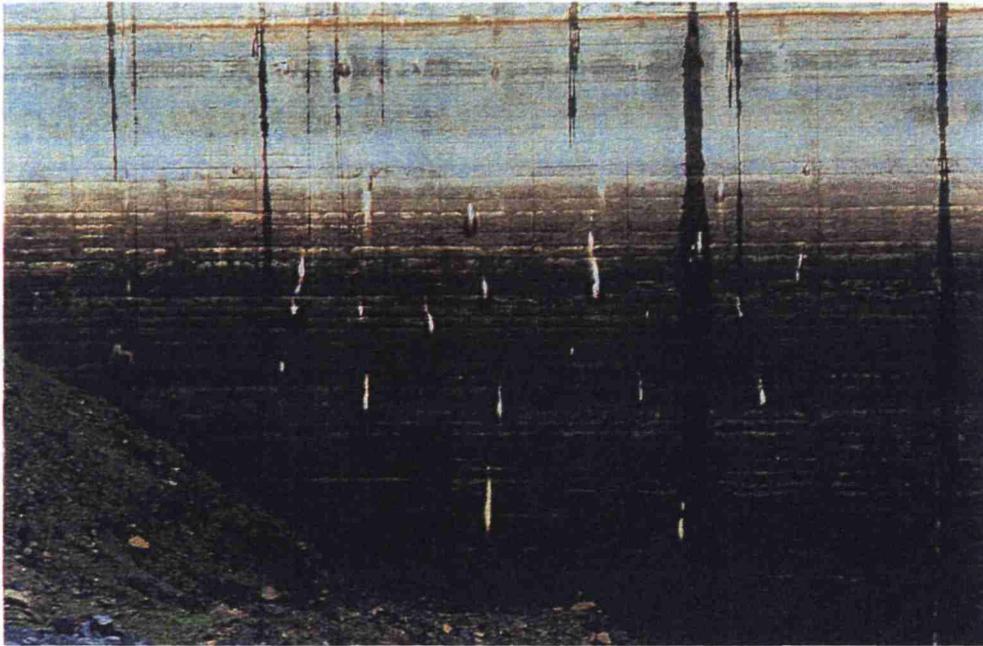


Figure 2.5 : Fissures de retrait verticales (barrage de la Touche Poupard)

II.3.3. Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu (scénario 2.3)

Le mécanisme de *dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu* met en jeu une réaction chimique entre le matériau du barrage (béton ou maçonnerie) et des agents extérieurs, notamment l'eau de la retenue. Ce mécanisme affecte essentiellement les ouvrages en zone de montagne soumis à l'action chimique des eaux pures et est similaire au mécanisme de *dissolution* d'une fondation rocheuse (scénario 1.1). Nous utilisons la référence [ICOLD,89a] pour l'analyse du mécanisme.

Concernant les ouvrages en béton ou en maçonnerie de ciment, les eaux pures attaquent le béton en dissolvant l'hydrate de calcium du ciment durci. Ensuite, par réaction avec l'anhydride carbonique de l'atmosphère ou dissous, il se forme alors du carbonate de calcium (processus de *carbonatation*). La capacité des eaux pures à dissoudre les composés calciques est fonction de la granulométrie et de la perméabilité du béton (quantité du liant, rapport eau/ciment, types d'adjuvants, cure), mais aussi de la résistance intrinsèque du ciment à ce type d'attaque chimique. Ce mécanisme se manifeste par des granulats apparents sur le parement amont, des dépôts et des efflorescences blanchâtres de carbonate de calcium dans les galeries, sur le parement aval et le long des joints.

Un processus chimique semblable se produit sur les ouvrages anciens en maçonnerie, mettant en jeu la dissolution de la chaux et l'érosion du mortier par infiltration d'eau. Il se manifeste par des dépôts importants de calcite sur le parement aval ou dans les galeries.

A long terme, l'effet principal de ce mécanisme est une perte de matériaux par dissolution puis érosion, pouvant conduire, si la perte de poids est importante, à une diminution sensible des critères de stabilité. La dissolution des matériaux induit une augmentation de la perméabilité du barrage, conduisant à une augmentation des débits de drainage (alimentant le mécanisme de dissolution) et des sous-pressions (contribuant à diminuer à nouveau les critères de stabilité).

Le barrage de Reveys (63) illustre ce mécanisme de perte de matériaux due à la dissolution et l'érosion. Les informations indiquées sont issues du rapport interne Cemagref [ROYET,02b]. Il s'agit d'un barrage poids de 17 m de hauteur et d'un fruit global d'environ 0,80. Cet ouvrage datant de 1909 est réalisé en maçonnerie constituée, d'une part de pierres de granit de densité de l'ordre de 3, et d'autre part de mortier de chaux hydraulique et de sable d'arène granitique de densité 1,9, conférant au barrage une densité de 2,56 au moment de sa construction (Figure 2.6).

Au fil du siècle, la maçonnerie s'est progressivement dégradée par dissolution de la chaux et érosion du mortier. Des carottages réalisés en 1999 ont montré que la densité de la maçonnerie n'était plus que de 2,0. Ces essais sont à rapprocher des dépôts très importants de calcite (5 à 10 cm d'épaisseur) observés sur la partie inférieure du parement aval. Les calculs réalisés ont montré des critères de stabilité de l'ouvrage fortement inférieurs aux valeurs recommandées, avec en outre une stabilité non garantie en période de crue, qui ont conduit à abandonner l'ouvrage.



Figure 2.6 : Barrage de Reveys (63) – Parement aval

II.3.4. Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées (scénario 2.4)

Le mécanisme de *faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées* concerne les ouvrages présentant un dimensionnement insuffisant vis-à-vis des critères de sécurité fixés dans les recommandations, en exploitation normale ou en situation de crues ou de séismes de faible à moyenne intensité. Il conduit à un endommagement des structures pouvant compromettre à terme la stabilité. Deux principales catégories d'ouvrages peuvent être affectées par ce mécanisme :

- ceux dont le profil est trop faible compte tenu d'un dimensionnement initialement insuffisant ;
- ceux dont les matériaux se sont dégradés par vieillissement (perte de matériaux par dissolution ou relaxation de tirants précontraints) et qui ne respectent alors plus les critères de sécurité.

Pour les barrages poids, les sollicitations sont essentiellement d'origine hydraulique et sont liées au niveau de la retenue, qui fixe les intensités des pressions hydrostatiques et des pressions interstitielles. Lorsque le dimensionnement de l'ouvrage est insuffisant, ces sollicitations peuvent provoquer l'apparition de contraintes de traction dans le plot côté amont, dépassant la résistance en traction des matériaux et entraînant une fissuration plongeante dans le corps du barrage ou l'ouverture de reprises de bétonnage. Les sections ainsi fissurées sont alors le siège d'infiltrations et de la pleine sous-pression amont, et la résistance au cisaillement des matériaux (notamment la cohésion) est diminuée. Deux états-limites peuvent se produire : [ROYET,02a]

- l'état-limite d'ouverture des fissures qui relève de la catégorie des états-limites de service pour les actions envisagées dans ce scénario ;
- l'état-limite de résistance à l'effort tranchant qui relève des états-limites ultimes et qui est susceptible de conduire à la rupture de l'ouvrage par cisaillement ou glissement.

Le barrage de Cenne-Monesties (11) illustre ce mécanisme de *faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées*. Les informations indiquées sont issues du rapport interne Cemagref [ROYET,02c]. Il s'agit d'un barrage poids en maçonnerie, de 25 m de hauteur et présentant un profil mince d'un fruit global de 0,65. Cet ouvrage ancien datant de 1885 a fait l'objet de travaux importants de confortement en 1966 qui ont consisté à régénérer la maçonnerie par injection (la densité est passée de 2,0 avant travaux à 2,2 après injection) et à réaliser 19 tirants précontraints tendus de façon à rajouter un poids linéaire équivalent de 50 t/ml.

Les critères d'états-limites après les travaux de 1966 étaient alors :

En condition normale d'exploitation

- Etat-limite d'ouverture de fissure : aucune fissure ;
- Etat-limite de résistance à l'effort tranchant : $F = 1,36$ (critère de sécurité au glissement), correspondant à une valeur en léger écart avec les recommandations, le critère de sécurité préconisé étant de 1,5 [DEGOUTTE,97].

En condition de crue d'intensité moyenne

- Etat-limite d'ouverture de fissure : 4 % de la section totale est fissurée ;
- Etat-limite de résistance à l'effort tranchant : $F = 1,18$ correspondant à une valeur en écart sensible avec les recommandations.

Cet ouvrage a fait l'objet d'une réévaluation de sa sécurité en 2002 [ROYET,02c], qui prend en compte la relaxation de la tension des tirants liée au vieillissement (poids linéaire équivalent de 33 t/ml en 2002). Dans ces conditions, les critères de stabilité actuels sont les suivants :

En condition normale d'exploitation

- Etat-limite d'ouverture de fissure : aucune fissure ;
- Etat-limite de résistance à l'effort tranchant : $F = 1,28$, correspondant à une baisse de 6% du critère en 35 ans.

En condition de crue d'intensité moyenne

- Etat-limite d'ouverture de fissure : 25% de la section totale est fissurée, correspondant à une forte fissuration ;
- Etat-limite de résistance à l'effort tranchant : $F = 1,0$ indiquant une stabilité précaire dans cette situation.

Dans son état actuel, le barrage de Cenne-Monesties présente donc une *faiblesse vis-à-vis des actions prolongées ou répétées*, le rendant particulièrement sensible à toute élévation du niveau de la retenue en période de crue.

II.3.5. Faible résistance au gel dégel (scénario 2.5)

Le mécanisme de *faible résistance au gel dégel* concerne essentiellement le parement amont qui est directement en contact avec la retenue et, à un moindre niveau, la crête et le parement aval qui sont soumis aux intempéries. Il conduit à des dégradations de ces composants restant le plus souvent superficielles et ne mettant pas en jeu la stabilité des barrages.

Depuis la retenue, des eaux d'infiltration pénètrent à travers le parement amont dans la couche superficielle du corps du barrage. Lorsque le niveau d'eau baisse (marnage de la retenue), les eaux infiltrées sont susceptibles de geler sous de faibles températures, et d'exercer alors des sollicitations provoquant la fissuration et l'éclatement du béton ou de la maçonnerie. Pour la crête et le parement aval, c'est la stagnation des eaux pluviales combinées au gel qui engendre la fissuration. Dans les deux cas, la perméabilité des matériaux des parements et de la crête est déterminante. Si aucune intervention n'est réalisée, les désordres peuvent progresser plus profondément dans les structures impliquant des réparations lourdes.

Nous donnons à la figure 2.7 l'exemple de la dégradation du parement amont du barrage de Redevis (63) dans la zone de marnage à proximité de l'évacuateur de crues, lié à l'action du gel dégel.

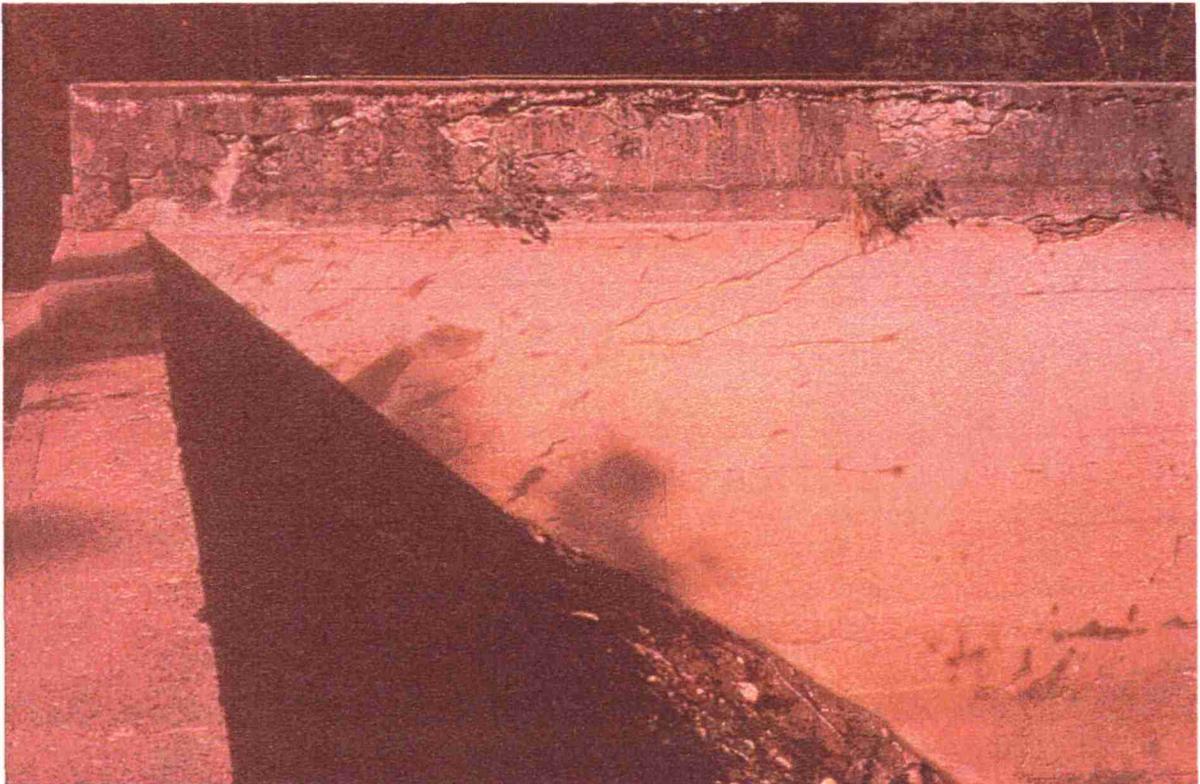


Figure 2.7 : Action du gel dégel dans la zone de marnage (Redevis)

II.3.6. Vieillessement des revêtements amont (scénario 2.6)

Les principaux agents extérieurs susceptibles de conduire au *vieillessement des revêtements amonts* sont les suivants :

- ① Le gel-dégel : il correspond au scénario 2.5 et intéresse la zone supérieure de la retenue où le marnage se produit.
- ② Les gradients thermiques : les fortes et rapides variations de température ambiante provoquent des contraintes élevées sur le revêtement amont. Ces sollicitations thermiques peuvent entraîner la déformation du revêtement amont en membranes souples ou la fissuration d'un masque amont en béton. Ces phénomènes se produisent sur la partie non immergée du barrage, qui n'est pas protégée par l'eau de la retenue.
- ③ Les eaux pures : ce processus chimique est à rapprocher du scénario 2.3 et correspond à l'attaque des revêtements amont, en béton ou en maçonnerie, par les eaux agressives. Les dégradations des revêtements par les eaux pures se produisent sur toute la hauteur du parement, y compris la partie immergée.

Nous donnons à la figure 2.8 l'exemple de la dégradation du parement amont en maçonnerie jointoyée du barrage de Lac Vert (68), situé dans les Hautes Vosges. Le mortier assurant le jointoiement des pierres en granit est progressivement attaqué par les eaux faiblement minéralisées, le cycle moyen de réfection des joints étant de 30 ans. La photographie est prise retenue vide, avant la campagne de réfection des joints. [PEYRAS,01]

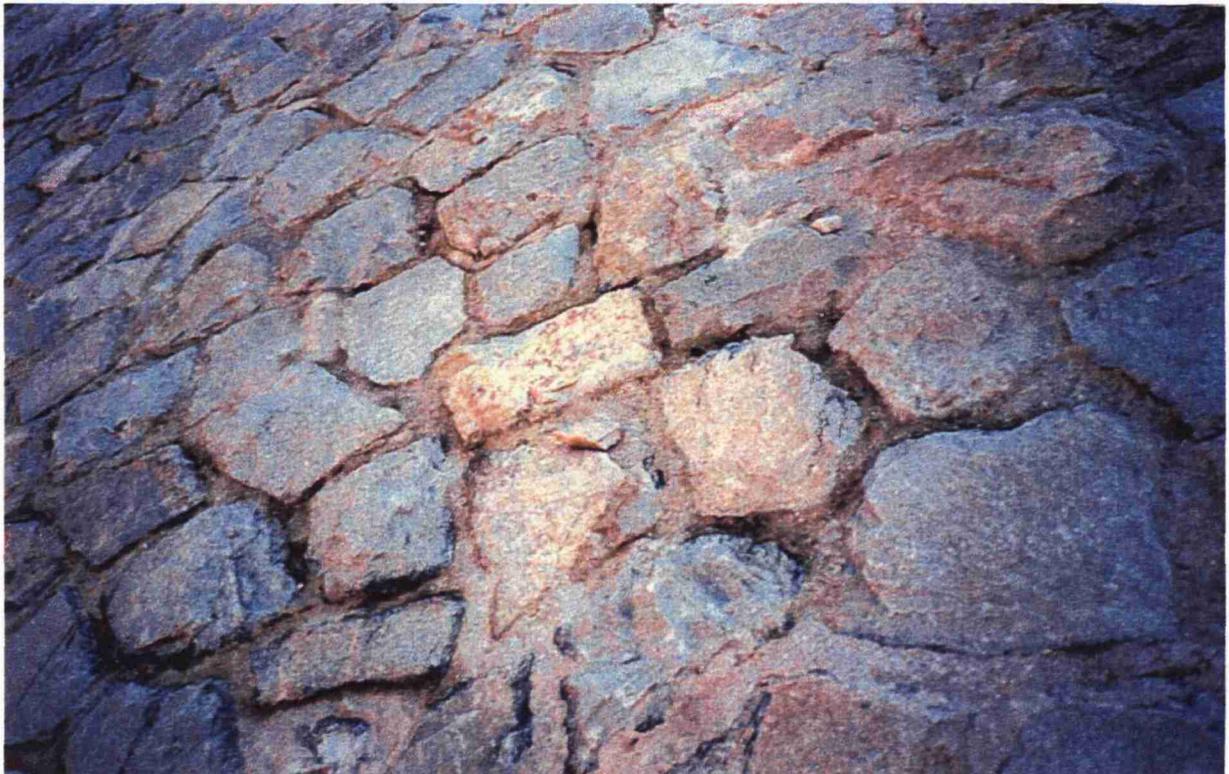


Figure 2.8 : Dégradation du parement amont en maçonnerie jointoyée (Lac Vert)

- ④ Les sous-pressions, apparaissant à l'arrière des revêtements amont lors de la baisse du niveau de la retenue, sont susceptibles de décoller par cloquage les enduits (ciment, mortier...).
- ⑤ Divers agents environnementaux : les UV, l'action mécanique des flottants ou encore les glaces peuvent dégrader les revêtements souples en géomembrane.

III. Les mécanismes de vieillissement des barrages en remblai

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux scénarios de vieillissement des barrages en remblai, résumés dans le tableau 2.2 :

Fondations (sol ou rocher)	<p>scénario 1.1 : Déformation de la fondation</p> <p>scénario 1.2 : Perte de résistance, augmentation des sous-pressions et modification de l'état de contraintes</p> <p>scénario 1.3 : Erosion interne</p> <p>scénario 1.4 : Dégradation de la fondation</p>
Remblai (terre ou enrochements)	<p>scénario 2.1 : Déformation du remblai</p> <p>scénario 2.2 : Perte de résistance</p> <p>scénario 2.3 : Augmentation des pressions interstitielles</p> <p>scénario 2.4 : Erosion interne</p> <p>scénario 2.5 : Glissement du remblai</p> <p>scénario 2.6 : Erosion superficielle</p> <p>scénario 2.7 : Dégradation des masques amont</p>

Tableau 2.2 : Les principaux scénarios de vieillissement des barrages en remblai

III.1. Les différents barrages en remblai

On distingue trois grands types de barrages en remblai (Figure 2.9) : [DEGOUTTE,97]

- type 1 : les barrages homogènes en terre, constitués de matériaux étanches ;
- type 2 : les barrages à zones avec massif amont ou noyau central assurant l'étanchéité ;
- type 3 : les barrages en matériaux perméables munis d'un dispositif d'étanchéité artificielle.

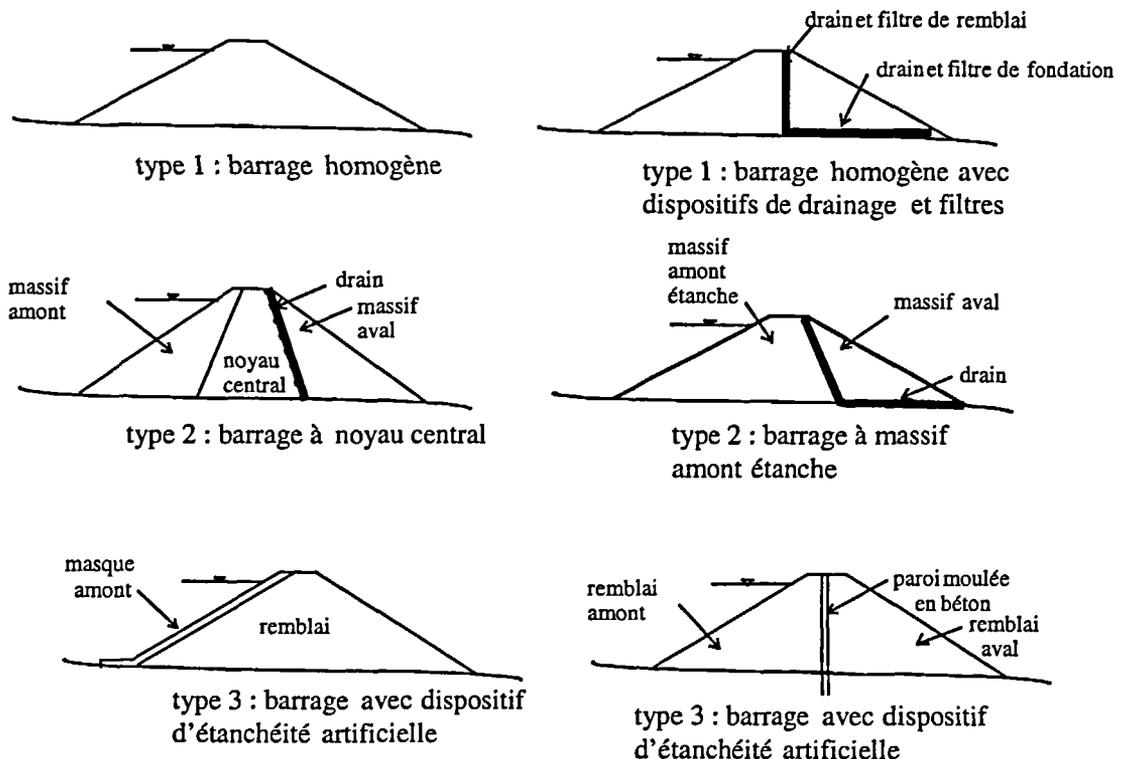


Figure 2.9 : Les différents types de barrages en remblai

III.2. Les scénarios de vieillissement de la fondation

III.2.1. Déformation de la fondation (scénario 1.1)

Ce mécanisme de *déformation de la fondation* concerne essentiellement les fondations meubles, mais peut également affecter le rocher de mauvaise qualité. Les fondations composées de matériaux fins, tels que des argiles, ou des fondations formées de couches alternées de matériaux fins et de matériaux grenus (alternance de couches de sable et d'argile) y sont particulièrement sensibles. Il débute dès la phase de construction de l'ouvrage.

Le mécanisme physique en jeu est la consolidation et le tassement de la fondation sous l'effet du poids du remblai. Les fondations composées de sols grossiers (alluvions) sont peu sensibles à ce mécanisme. En effet, la compressibilité du sol n'est due qu'à la compression du squelette solide et le tassement du sol est rapide avec l'application de la charge et est indépendant de la teneur en eau car les matériaux sont facilement auto-drainants.

En revanche, pour des fondations composées de sols fins, l'application de la charge sur la fondation est, dans un premier temps, reportée totalement sur l'eau interstitielle car la compressibilité de l'eau est largement inférieure à celle de l'assemblage des grains. La première phase du mécanisme correspond à la dissipation de la surpression interstitielle et à l'augmentation en parallèle de la contrainte effective : c'est la *consolidation*. Une fois la surpression interstitielle dissipée, le squelette solide du sol continue à se resserrer : c'est la *consolidation secondaire*. Ces phases sont d'autant plus lentes que le sol est imperméable. [SCHLOSSER,89]

La première conséquence de la déformation générale de la fondation est l'affaissement de la crête du barrage, et donc la diminution de la revanche (distance de sécurité entre le niveau des plus hautes eaux de la retenue et la crête du barrage). En outre, les structures rigides au contact du remblai, tels que la galerie de visite, la conduite de vidange ou l'évacuateur de crues, peuvent connaître des désordres importants.

Par ailleurs, les déformations consécutives à la consolidation et au tassement de la fondation se produisent de façon hétérogène, entraînant des tassements différentiels du remblai. Ce type de mécanisme est dangereux car il peut provoquer la fracturation du remblai. Les fissures consécutives peuvent entraîner des glissements de talus (scénario 2.5), mais constituent surtout des lignes d'écoulement préférentiel à partir de la fondation ou de la retenue. Les fuites qui en résultent sont alors susceptibles de produire des mécanismes d'érosion régressive le long des lignes de fracturation (scénario 2.4).

Le barrage de CARCES (83) illustre ce mécanisme de *déformation de la fondation*. Les informations indiquées sont issues du rapport interne Cemagref [MERIAUX,00]. Il s'agit d'un remblai en terre de 14 m de hauteur retenant 8 hm³ d'eau. Cet ouvrage est fondé sur une couche épaisse (30 m) et hétérogène d'alluvions fines (silts et argiles, plus ou moins tourbeux, vaseux ou sableux), d'origine essentiellement lacustre (Figure 2.10).

Le principal problème posé par cette fondation est lié à son caractère très compressible qui n'a fait l'objet d'aucun traitement particulier à la construction. Depuis la construction en 1933, le cumul maximum des tassements de la crête est de 60 cm sur le profil de plus grande hauteur du barrage (repère de nivellement 4 ou 4' de la crête - Figure 2.11). Le tassement restant à exprimer a été évalué à 40 cm et il faudra attendre le milieu du 21^{ème} siècle pour atteindre 80% du tassement total.

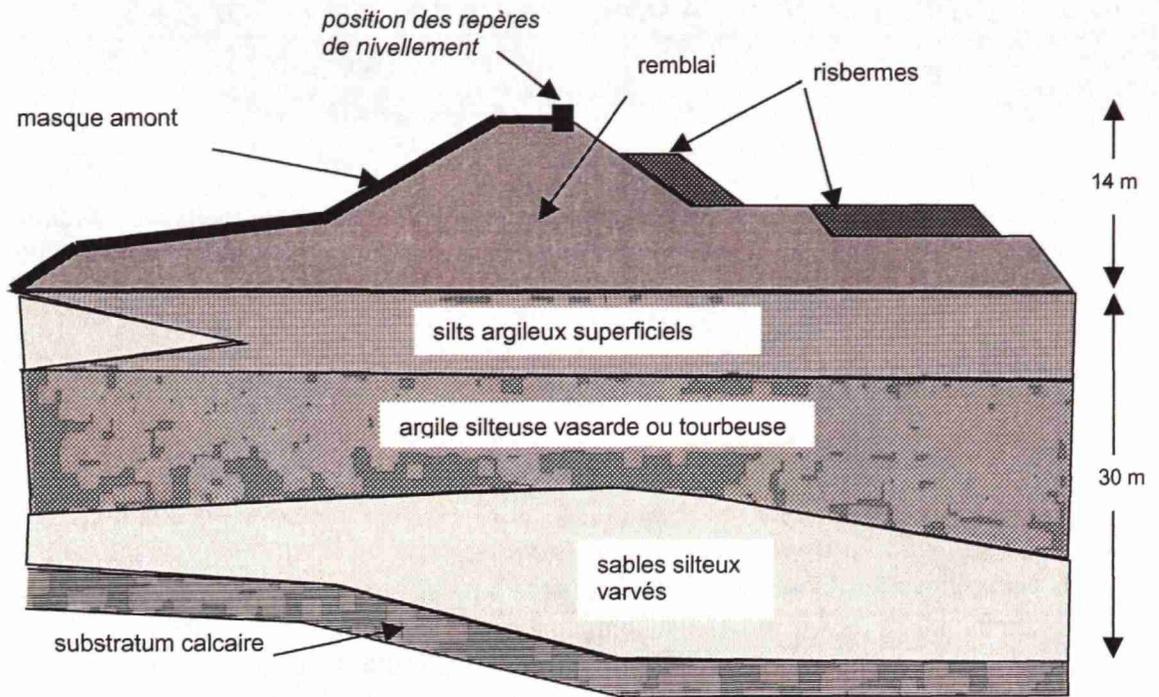


Figure 2.10 : Coupe transversale du barrage CARCES et de ses fondations

La première conséquence directe du tassement général a été l'affaissement de la crête, ce qui a conduit à des travaux importants de rehausse et recharge du remblai en 1977.

La deuxième conséquence est les mouvements verticaux transitoires du remblai, qui ont provoqué des apparitions inopinées de fuites localisées sur le parement aval, accompagnées d'une augmentation soudaine de la piézométrie dans le même secteur (trois événements de ce type au cours de la vie du barrage). A ce stade du mécanisme, le risque à craindre est la formation d'un renard le long des lignes de fracturation (scénario 2.4) et le glissement du talus aval (scénario 2.5).

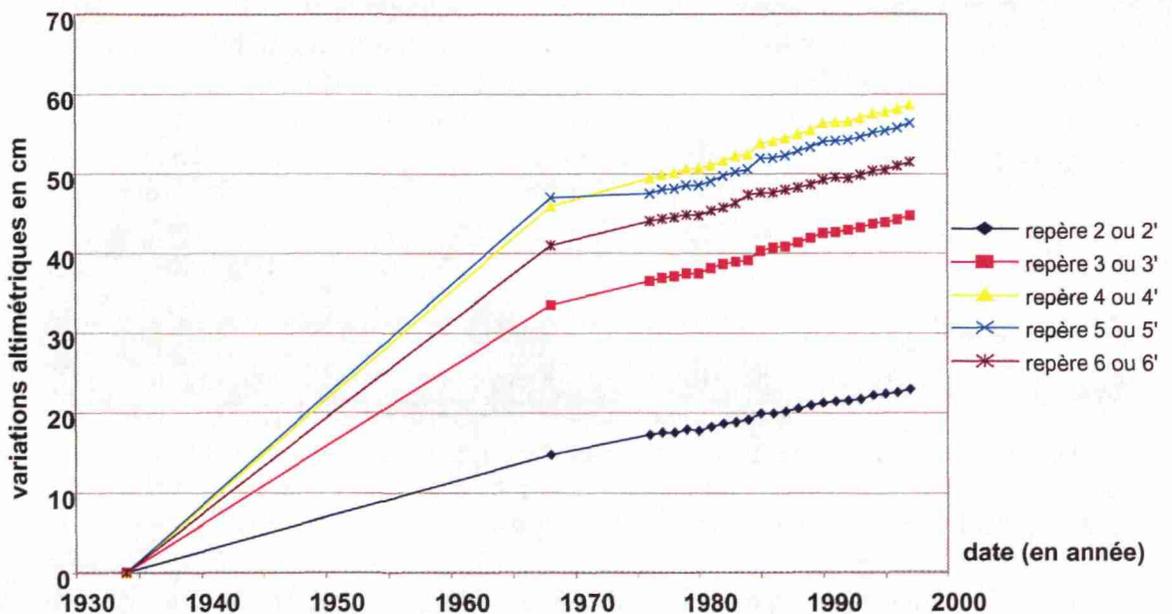


Figure 2.11 : Evolution des tassements de la crête

III.2.2. Perte de résistance, augmentation des sous-pressions et modification de l'état de contraintes (scénario 1.2)

La *perte de résistance*, l'*augmentation des sous-pressions* et la *modification de l'état de contraintes* sont des phénomènes entraînant la diminution de la résistance au cisaillement de la fondation et pouvant conduire à sa rupture par cisaillement. Ils apparaissent généralement de façon combinée. Examinons les principaux scénarios pouvant les provoquer.

❶ La *perte de résistance* concerne les fondations meubles. Elle survient généralement à la suite de déformations excessives ou de la saturation des matériaux cohésifs qui la constituent, selon les processus physiques suivants :

- la résistance au cisaillement des argiles est plus élevée à l'état non saturé qu'à l'état saturé ; ainsi, une argile saturée voit sa cohésion diminuer, et ce d'autant plus que son indice de plasticité est élevé ;
- dans les sols argileux lorsque la déformation dépasse la déformation de résistance maximum, la résistance est alors réduite à la résistance résiduelle.

❷ Les *sous-pressions* dans la fondation augmentent lorsque l'exutoire normal des percolations vient à s'obstruer ou lorsque le débit de fuite excède la capacité locale de drainage. Plusieurs scénarios impliquant l'augmentation des sous-pressions peuvent intervenir :

- une fondation rocheuse au contact du remblai ou sur les strates de surface peut présenter des fissures ouvertes ou des joints remplis de matériaux érodables (silt ou sable). Sous la charge de la retenue, l'eau pénètre dans les joints et fissures, progressant vers l'aval et provoquant des sous-pressions. Eventuellement, les eaux d'infiltration trouvent un passage jusqu'à l'aval de l'ouvrage où une fuite apparaît [ICOLD,93b] ;
- les eaux d'infiltration dans une fondation meuble peuvent entraîner des fines qui, en l'absence de dispositif de filtres, sont susceptibles de colmater progressivement les drains ;
- les eaux d'infiltration à travers une fondation meuble constituée de matériaux très gradués et à granulométrie discontinue sont susceptibles d'entraîner des fines par mécanisme de suffusion (scénario 1.3). En même temps qu'une augmentation des sous-pressions, ce scénario peut produire des tassements.

❸ Les *modifications des états de contraintes* sont liées aux mécanismes suivants :

- pour les barrages construits sur des fondations meubles, l'abaissement de la nappe sous le remblai augmente les contraintes effectives, ce qui peut provoquer des tassements importants ;
- pour les barrages fondés sur le rocher, les variations périodiques des charges hydrostatiques provoquent des contraintes de cisaillement cycliques qui peuvent provoquer, par fatigue, l'ouverture de joints ; [ICOLD,93b]
- le remplissage de la retenue provoque une augmentation des pressions interstitielles dans la fondation, donc une diminution des contraintes effectives pouvant conduire à la rupture en vidange rapide.

III.2.3. Erosion interne des fondations (scénario 1.3)

Le mécanisme physique d'*érosion interne dans les fondations meubles* est identique au mécanisme d'*érosion interne du remblai* (scénario 2.4), décrit à la section III.3.4. Notons qu'un tel mécanisme est plus insidieux en fondation que dans le remblai car il est plus difficilement détectable et car on ne maîtrise pas la structure du sol en place.

L'origine du mécanisme d'*érosion interne des fondations rocheuses* est liée aux infiltrations d'eau à travers les joints de roche. Deux facteurs principaux sont susceptibles de favoriser ces

percolations : la dégradation du rideau d'injection par dissolution (scénario 1.2 - barrages poids) et la fissuration naturelle du rocher.

Le processus d'érosion se présente tout d'abord sous la forme de *dissolution* et d'*entraînement* des matériaux (la contrainte de cisaillement provoquée par l'écoulement est supérieure à la résistance au cisaillement des matériaux), provenant de la roche, du remplissage des discontinuités, des joints (débouillage de matériaux) ou des rideaux d'injection. Ces processus de dissolution et d'entraînement conduisent à l'*arrachement* de particules des matériaux, puis à leur *transport* par les eaux d'infiltration.

III.2.4. Dégradation de la fondation (scénario 1.4)

Le mécanisme de *dégradation de la fondation* (fondation meuble) résulte de la modification des caractéristiques des matériaux meubles, telles que la diminution des paramètres de résistance ou l'augmentation de la perméabilité. Il est susceptible d'entraîner, d'une part la perte de résistance au cisaillement de la fondation (scénario 1.2), et d'autre part des processus d'érosion interne de la fondation (scénario 1.3).

La dégradation des matériaux peut résulter de différents processus physiques ou chimiques : hydratation, dispersion, gonflement, dissolution qui sont tous liés à l'infiltration d'eau dans la fondation.

III.3. Les scénarios de vieillissement du remblai

III.3.1. Déformation du remblai (scénario 2.1)

Il s'agit du *mécanisme de consolidation et de tassement du remblai*, analogue au scénario 1.1 relatif à la fondation. Il peut avoir des conséquences particulières sur les remblais :

- des déformations différentielles (notamment entre les parties saturées en amont et non saturées en aval) pouvant entraîner des fracturations et des risques d'érosions régressives le long des fissures (scénario 2.4) ;
- des tassements au contact d'un ouvrage rigide (prise d'eau, déversoir).

III.3.2. Perte de résistance (scénario 2.2)

La *perte de résistance* du matériau du remblai est un phénomène qui entraîne la diminution de la résistance au cisaillement du remblai, pouvant provoquer des instabilités de talus et des déformations et pouvant conduire à la rupture par glissement (scénario 2.5). Trois principaux scénarios sont à l'origine de ce phénomène :

❶ Le compactage insuffisant des matériaux lors de la phase de construction : cela peut se produire notamment lorsque les matériaux ont été compactés du côté sec de l'optimum d'humidité et avec une énergie de compactage insuffisante pour assurer une réduction suffisante des vides. La mise en eau conduit alors à un effondrement du matériau. Si le sol est de façon uniforme insuffisamment compacté, on constate un tassement général des parties saturées du remblai lors de la mise en eau ; a contrario, si les défauts de compactage sont localisés, on observe des tassements différentiels pouvant produire une fracturation du remblai.

Ces situations favorisent la circulation d'eau dans le remblai. Nous renvoyons le lecteur vers [ICOLD,86b] consacré au contrôle de la réalisation des remblais.

❷ Certains sols ont, à sec, une forte résistance au cisaillement procurée par une cohésion élevée, qui peut diminuer sensiblement dès lors qu'ils sont humides ou saturés (sols fins, argiles).

Plusieurs mécanismes peuvent produire des conditions de saturation élevée : un compactage insuffisant, une nappe de versant au contact du remblai, un régime pluviométrique défavorable ou une défaillance du dispositif de drainage ou d'étanchéité.

❸ Les pertes de résistance peuvent être causées par une modification de l'état de contraintes. A ce titre, les cycles de dessiccation et d'imbibition des matériaux, comme les argiles plastiques des noyaux étanches, peuvent produire des fracturations.

La surélévation d'un remblai peut déformer les matériaux en place au-delà de leur résistance maximum, pouvant conduire à une fissuration du remblai. Le lecteur peut se reporter à [ICOLD,88b] qui développe les recommandations associées aux rehausses des remblais.

III.3.3. Augmentation des pressions interstitielles (scénario 2.3)

L'augmentation des pressions interstitielles dans un remblai conduit à la diminution de sa résistance globale au cisaillement, susceptible de provoquer des instabilités de talus et des déformations (scénario 2.5). Elle est généralement liée à l'ouverture de fissures dans le remblai ou dans le noyau, pouvant provenir de trois scénarios :

- ❶ des tassements différentiels dans la fondation ou dans le remblai (scénarios 1.1 et 2.1) ;
- ❷ une dessiccation prolongée du noyau d'argile, liée à un niveau de retenue maintenu bas pendant une période prolongée et provoquant des fissures de retrait ;
- ❸ une dégradation du remblai ou du noyau par des mécanismes chimiques (scénario 2.6).

D'autres scénarios particuliers, liés à des défaillances d'équipements du barrage, peuvent conduire à l'augmentation des pressions interstitielles :

- ❶ le colmatage ou le contournement (par le haut, le bas ou les rives) du dispositif de drainage du remblai ou de la fondation ;
- ❷ la défaillance du système d'étanchéité (dégradation du masque amont ou du noyau central)

Le barrage de Chamboux (21) illustre le mécanisme d'augmentation des pressions interstitielles. Les informations indiquées sont issues du rapport interne Cemagref [FELIX,00]. Il s'agit d'un remblai en arènes granitiques de 15,50 m de hauteur retenant 4 hm³ d'eau.

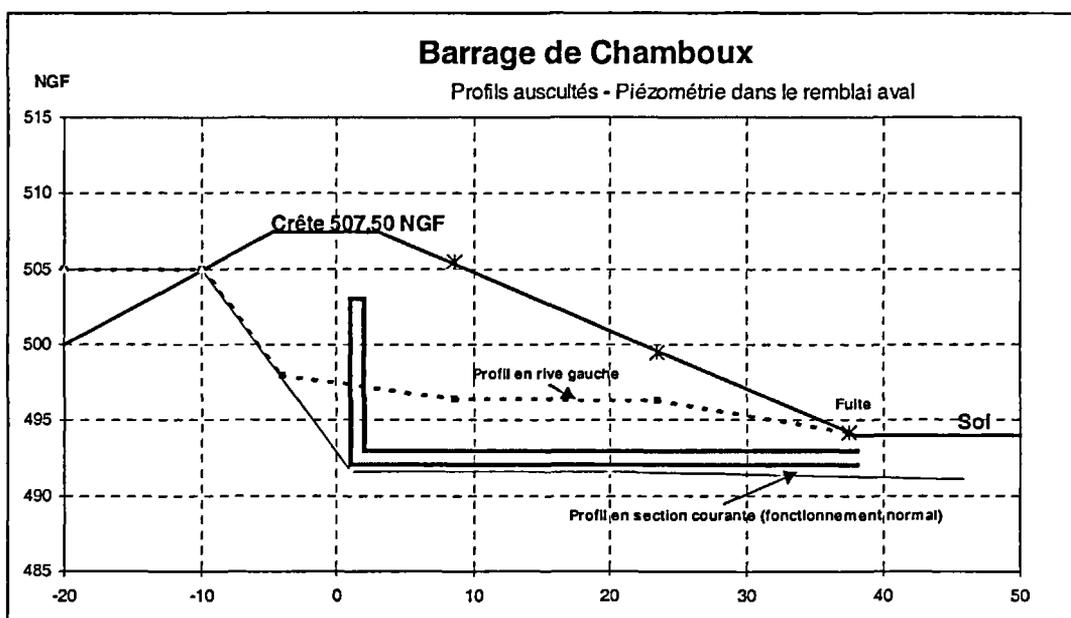


Figure 2.12 : Profil piézométrique du barrage de Chamboux (21)

Ce barrage est particulièrement bien protégé des infiltrations par un dispositif de drainage complet, composé d'un drain vertical central raccordé à l'interface fondation-remblai à un drain tapis horizontal renforcé par des lanières drainantes de pied. Quant aux rives, elles sont équipées de puits de décompression, raccordés aux lanières.

On observe sur cet ouvrage un contournement du dispositif de drainage se produisant au large dans la berge rive gauche, renforcé par une nappe de versant et une forte pluviométrie locale. Ce mécanisme se traduit par une piézométrie élevée dans le remblai aval (Figure 2.12), sachant que son fonctionnement normal est l'absence de sous-pressions. La ligne de saturation coupe le parement aval, provoquant la présence d'une zone humide de plusieurs m² et des fuites localisées au pied aval (Figure 2.13).

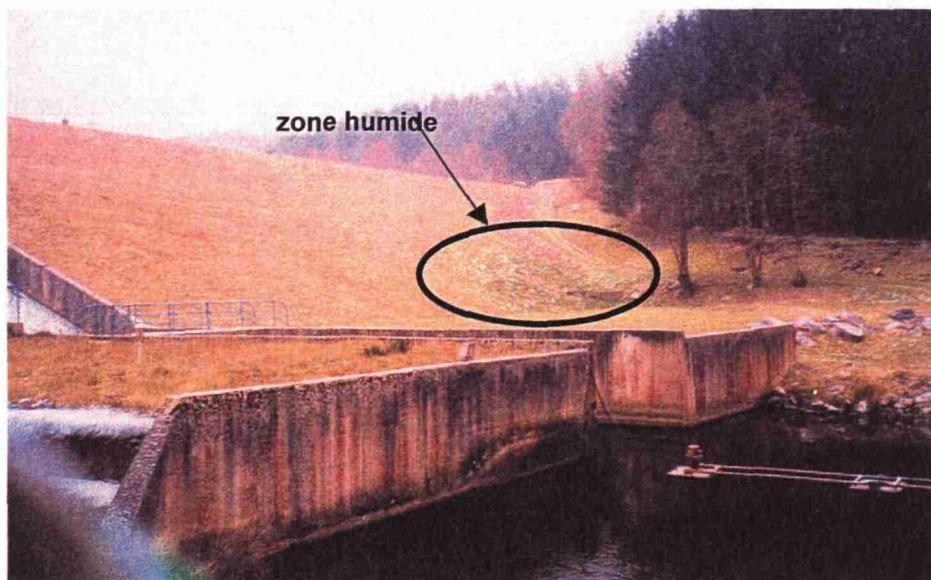


Figure 2.13 : Zone humide sur le parement aval (Barrage de Chamboux)

Les conséquences d'un tel mécanisme de vieillissement sont une diminution sensible de la résistance au cisaillement du talus aval, pouvant conduire à un glissement (scénario 2.5) ; en outre, la présence d'écoulement direct induit un risque important d'érosion interne (scénario 2.4).

III.3.4. Erosion interne (scénario 2.4)

Nous utilisons la référence [CFGB,97] pour l'analyse du mécanisme *d'érosion interne*. Il comprend deux phases :

- *l'arrachement* des particules ;
- *le transport* des particules.

Il existe plusieurs modes d'arrachement des particules :

- *l'entraînement* est le détachement des particules à partir d'une certaine valeur de cisaillement engendrée par l'écoulement ;
- *l'érosion régressive* correspond à l'arrachement des particules sous l'effet de la poussée de l'écoulement percolant à travers le matériau. Le phénomène se propage de l'aval vers l'amont ;
- *la boullance* est l'état d'un volume de sol dans lequel les grains flottent, entourés d'une phase liquide continue ;
- *la dissolution* est la disparition d'une partie des constituants des particules sous une action chimique ou thermique et *la défloculation* est un phénomène physico-chimique qui tend à diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses [ICOLD,90] ;
- *le débouillage* est le nettoyage d'une fissure remplie de matériaux terreux (fondations rocheuses).

La nature du transport conduit à distinguer deux catégories d'érosion interne : le *renard hydraulique* et la *suffusion*.

Dans le mécanisme de *renard hydraulique*, le transport est concentré dans un conduit ou un cheminement préférentiel. Les zones du remblai (ou de la fondation) traversées par ce conduit sont le siège de gradients hydrauliques élevés et sont alors affectées par des *érosions régressives*. Les vitesses d'érosion sont importantes et le renard conduit rapidement à la rupture par création de brèche. Plusieurs situations peuvent favoriser l'apparition d'un renard (Figure 2.14) :

- la présence de cheminements préférentiels tels que des terriers d'animaux, des racines d'arbres, les contacts de conduites enterrées ou l'interface remblai-rocher ;
- la fissuration du remblai (ou de la fondation) ou du noyau ;
- la fuite d'une conduite en charge sous le remblai (ou la fondation) ;
- l'absence de filtre aval, dont le rôle est d'empêcher le départ des fines.

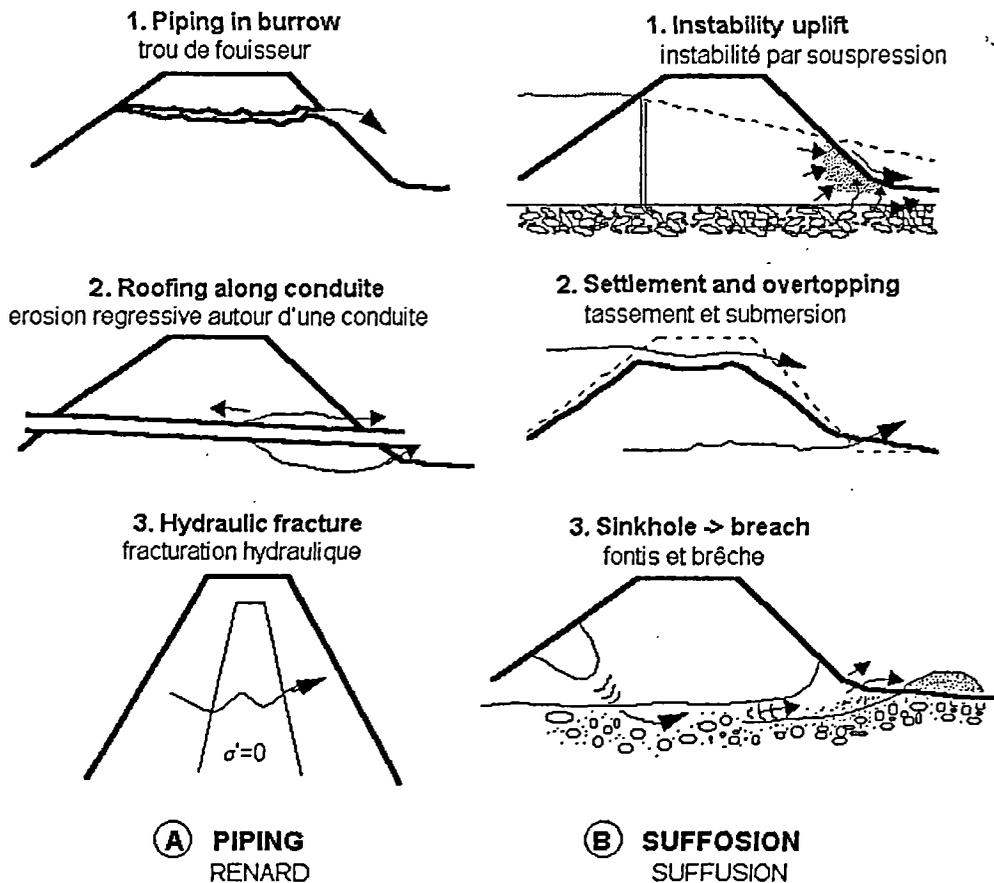


Figure 2.14 : « Renard hydraulique » et suffusion [CFGB,97]

Dans le mécanisme de *suffusion*, le transport est diffus au sein du remblai (ou de la fondation) ou à l'interface de deux matériaux, et les vitesses d'écoulement sont initialement faibles. On distingue, d'une part *la suffusion interne* qui se développe au sein d'un sol très gradué et à granulométrie discontinue qui n'assure pas l'autofiltration, et d'autre part *la suffusion externe* qui se développe aux interfaces d'un matériau grossier et d'un matériau fin. La suffusion est un mécanisme à évolution lente, qui peut conduire à trois modes de ruptures (Figure 2.14) :

- la formation à l'aval du barrage (ou de la fondation) d'une zone dans laquelle la vitesse devient suffisante pour conduire à une érosion régressive puis à un renard hydraulique ;
- la formation d'un fontis en partie centrale du remblai, suite à l'entraînement de matériaux en profondeur ; s'il est de grande taille, cet effondrement peut conduire à un affaissement de la crête, provoquant alors la submersion du barrage ;
- la formation d'une zone instable à l'aval du barrage ou de la fondation, par augmentation des pressions interstitielles (scénario 2.5).

La rupture du barrage des Ouches (63) est représentative du mécanisme de *suffusion interne*, conduisant à la rupture par *renard hydraulique*. Les informations indiquées sont issues du rapport interne Cemagref [PEYRAS,01]. Il s'agit d'un petit ouvrage en remblai de 5 m de hauteur en matériaux aréniques d'origine alluvionnaire. Leur analyse granulométrique a montré la sensibilité du matériau à la suffusion interne (Figure 2.15) : coefficient d'uniformité élevé (D_{60}/D_{10} compris entre 150 et 250) ; granulométrie discontinue (inflexion à 0,08 mm entre les matériaux fins et les sables).

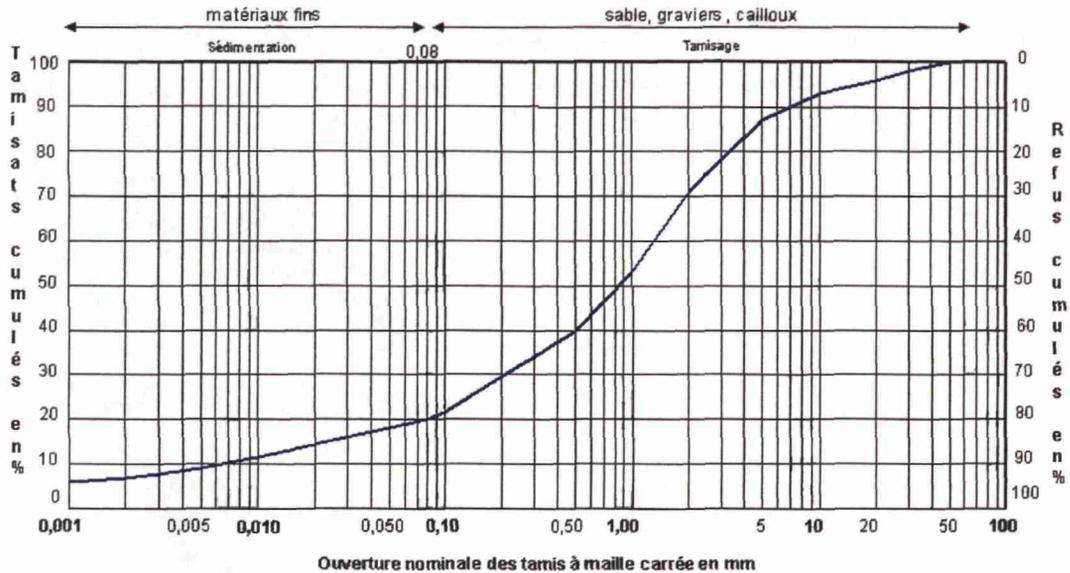


Figure 2.15 : Granulométrie d'un sol sensible à la suffusion interne (les Ouches)

Cet ouvrage très ancien, construit à la fin du 18^{ème} siècle, a été le siège d'un mécanisme généralisé de suffusion interne à évolution lente. La perméabilité médiocre du remblai ($2 \cdot 10^{-6}$ m/s), liée aux moyens de compactage rustiques à la période de sa réalisation, entraînait une saturation importante du talus aval (la ligne de saturation débouchait au 1/3 inférieur du parement aval) et des gradients hydrauliques excessifs (0,30) pour ce type de matériaux. Le mécanisme a évolué défavorablement en renard hydraulique conduisant à l'ouverture d'une brèche en moins d'une heure après le premier constat d'un écoulement direct (Figure 2.16).



Figure 2.16 : Suffusion débouchant sur un renard hydraulique – Les Ouches (63)

III.3.5. Glissement du remblai (scénario 2.5)

Le mécanisme de *glissement du remblai* résulte soit d'une diminution de la résistance des matériaux (scénario 2.2), soit d'une augmentation des pressions interstitielles (scénario 2.3). Nous utilisons la référence [ROLLEY,89] pour l'analyse du mécanisme.

La justification de la stabilité d'un talus est obtenue par un calcul à la rupture. Ce dernier consiste à vérifier que les contraintes de cisaillement le long d'une surface de rupture que l'on se donne a priori restent inférieures à la résistance maximale du sol. La surface de rupture choisie est généralement de forme circulaire (cercle de glissement) et correspond aux observations des glissements de talus. Le critère de rupture adopté dans l'ensemble des méthodes est celui de Mohr-Coulomb : on vérifie que la contrainte de cisaillement développée le long de la surface de rupture reste inférieure à la contrainte maximale de cisaillement : $\tau_{\max} = c' + (\sigma' - u) \cdot \tan \phi'$

- τ_{\max} étant calculée à partir des paramètres de résistance au cisaillement du remblai (c' ; $\tan \phi'$) dans les conditions d'humidité ou de saturation réelles ;
- σ' étant la contrainte effective et (u) la pression interstitielle.

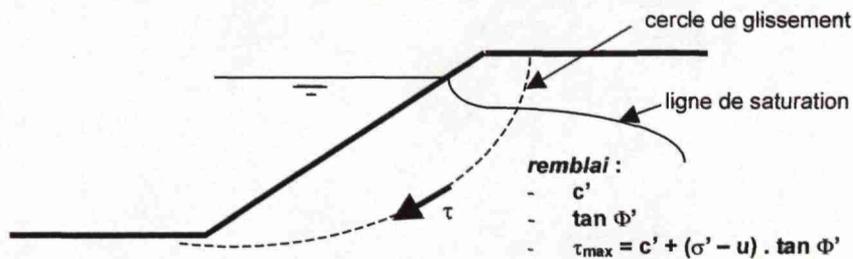


Figure 2.17 : Critère de Mohr-Coulomb dans un remblai

Il existe de nombreuses méthodes proposant différentes hypothèses pour les pressions interstitielles et les contraintes effectives le long de la surface de glissement. La méthode la plus couramment adoptée est celle de Bishop. Nous renvoyons le lecteur intéressé vers [LEPETIT,02] qui établit un état de l'art sur les méthodes disponibles.



Figure 2.18 : Glissement du barrage d'Armous et Cau (32) [LAUTRAIN,97]

Nous illustrons ce mécanisme par le glissement du talus amont du barrage d'Armous et Cau (32). Il s'agit d'un remblai en matériaux argileux, de 14 mètres de hauteur retenant un volume d'eau de $0,43 \text{ hm}^3$. Les fruits des talus amont et aval sont respectivement de 3 et 2. Le talus amont de cet ouvrage a glissé lors d'une vidange, configuration dans laquelle le remblai était saturé, conduisant à des pressions interstitielles maximales et une cohésion quasiment nulle du sol (Figure 2.18).

III.3.6. Erosion superficielle (scénario 2.6)

L'érosion superficielle, bien qu'elle soit très répandue, ne constitue pas un mécanisme de vieillissement grave. Elle concerne les barrages en remblai homogène ou à zones. On distingue les mécanismes s'opérant sur les talus amont et aval et la crête. [LAUTRAIN,97]

L'érosion superficielle de la crête et du talus aval est due :

- à l'action directe de la pluie et du ruissellement en résultant ;
- à une brève submersion accidentelle de la crête.

L'érosion superficielle du talus amont résulte essentiellement de l'action du batillage provenant des vagues de la retenue (Figure 2.19). La dégradation de la protection du talus amont (rip-rap, masque amont...) sous l'action du gel-dégel aggrave l'érosion superficielle [ICOLD,93c].



Figure 2.19 : Talus amont marqué par le batillage – Lussan (32) [LAUTRAIN,97]

III.3.7. Dégradation des masques amont (scénario 2.7)

Ce mécanisme concerne les barrages munis d'une étanchéité artificielle par masque amont. On distingue les masques épais en *béton* ou en *béton bitumineux* et les dispositifs d'étanchéité par *geomembranes*. Ces dispositifs d'étanchéité sont susceptibles de se dégrader sous l'effet de différents agents : actions thermiques (températures élevées, gel-dégel), UV, chocs de flottants...

Le barrage de Sainte Cécile d'Andorge (30) est un ouvrage en enrochements de 40 mètres de hauteur. Son étanchéité est assurée par un masque amont en béton bitumineux constitué de trois couches d'enrobé. Construit en 1967, cet ouvrage destiné à écrêter les crues, est particulièrement exposé aux actions thermiques : forte température en été, refroidissements brutaux... Le masque amont s'est dégradé progressivement jusqu'à atteindre une fissuration en faïençage très marquée de la couche supérieure d'enrobé (Figure 2.20), nécessitant sa réfection en 1995 par mise en place d'une nouvelle couche de béton bitumineux clair.



Figure 2.20 : Dégradation du masque en béton bitumineux – St Cécile d'Andorge (30)

IV. Synthèse

Nous avons répertorié les principaux mécanismes de vieillissement des barrages poids et en remblai, dont la pathologie relève de processus distincts. Ainsi, pour les ouvrages en béton ou en maçonnerie, les processus en jeu sont chimiques (alcali-réaction, retrait, dissolution) et mécaniques (glissement, résistance au cisaillement, à la traction). Pour les ouvrages en terre, les processus sont essentiellement hydromécaniques (percolation, pression interstitielle, érosion interne) et mécaniques (stabilité de pentes, consolidation, tassement).

Ce travail n'est pas exhaustif et certains mécanismes de vieillissement n'ont pas été abordés, notamment ceux concernant les dégradations de composants particuliers (tirants précontraints, etc.) ou les ouvrages poids et en remblai de conception atypique.

Ce travail nous permet de disposer d'une collection des principaux scénarios de vieillissement des barrages, à laquelle nous pourrions nous référer tout le long du rapport. Il n'apporte pas de connaissances nouvelles par rapport aux recueils d'expertise existants, mais constitue une synthèse de la pathologie des barrages poids et en remblai, qui peut éventuellement être extraite du rapport pour une utilisation autre, à caractère pédagogique.

Partie 3

Modélisation des scénarios de vieillissement

I. Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes

II. Proposition d'un modèle pour les scénarios de vieillissement des barrages

III. Modélisation des mécanismes de vieillissement des barrages

IV. Synthèse

I. Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes

Dans ce chapitre, nous présentons, dans le contexte général de l'industrie, les méthodes disponibles pour identifier les risques et modéliser le fonctionnement des systèmes complexes. Successivement, nous examinons les méthodes d'analyse fonctionnelle (I.1), les techniques de la Sûreté de Fonctionnement (I.2) et les modèles issus du raisonnement qualitatif (I.3). Pour chacune d'elles, nous indiquons les applications existantes dans le domaine des barrages. Ce chapitre s'achève par des propositions pour bâtir un modèle de vieillissement des barrages (I.4).

I.1. Analyse fonctionnelle des systèmes

I.1.1. Définitions et concepts généraux

Par opposition à l'approche matérielle, l'analyse fonctionnelle s'appuie sur les fonctions d'un système pour comprendre son fonctionnement. Elle établit de façon systématique et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur d'un système.

Définissons tout d'abord la notion de *fonction*. Selon la norme NF X50-150, une **fonction** est définie comme les « actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées en terme de finalité ».

Au sens de la même norme, l'analyse fonctionnelle est alors définie comme « une démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions ».

Les concepts fondamentaux introduits dans les méthodes d'analyse fonctionnelle sont : [ZWINGELSTEIN,95]

- la description du *besoin* de l'utilisateur vis-à-vis d'un système, en termes de fonctions, indépendamment du choix matériel ;
- la description des choix technologiques imposés au système en terme de *contraintes*. Les contraintes peuvent provenir de l'environnement, de la technologie, de la situation, etc. ;
- la description du système, en terme de fonctions de service ou d'usage (satisfaction du besoin) et en terme de fonctions de contraintes (solutions techniques retenues qui répondent aux contraintes) ;
- une optimisation du besoin sur le plan économique et technique.

Cela nous amène à examiner les différentes fonctions accomplies par un système. Le cahier des charges fonctionnel relatif à un produit (norme NF X50-151) classe les fonctions issues de l'analyse fonctionnelle en différentes catégories :

- les **fonctions principales** de service ou d'usage correspondent aux fonctions essentielles pour lesquelles le système a été réalisé. Les **fonctions complémentaires** de service ou d'usage sont définies comme assurant un besoin complémentaire, d'importance moindre, à assurer au même titre que le besoin principal ;
- les **fonctions de contrainte** résultent de l'action ou de la réaction du système face aux contraintes externes, telles que l'environnement, la réglementation et les normes.

La réalisation d'une analyse fonctionnelle se déroule en trois principales étapes (Figure 3.1) : [ZWINGELSTEIN,95]

❶ *l'analyse fonctionnelle externe* ou l'analyse du besoin :

Le système est considéré comme une « boîte noire » de composition quelconque. Cette étape va consister à déterminer :

- la définition du système ;
- les positions du cycle de vie ;
- les milieux extérieurs ;
- les fonctions principales et complémentaires ;
- les fonctions de contraintes.

❷ *l'analyse fonctionnelle interne* ou l'analyse du produit :

Dans cette étape, on rentre dans la constitution matérielle du système : ses composants et leurs matériaux (*analyse structurelle*), les solutions techniques envisageables pour que le système réalise les fonctions assignées.

❸ *l'optimisation du couple besoin/produit* :

Il s'agit d'optimiser la meilleure solution technique pour remplir les fonctions principales.

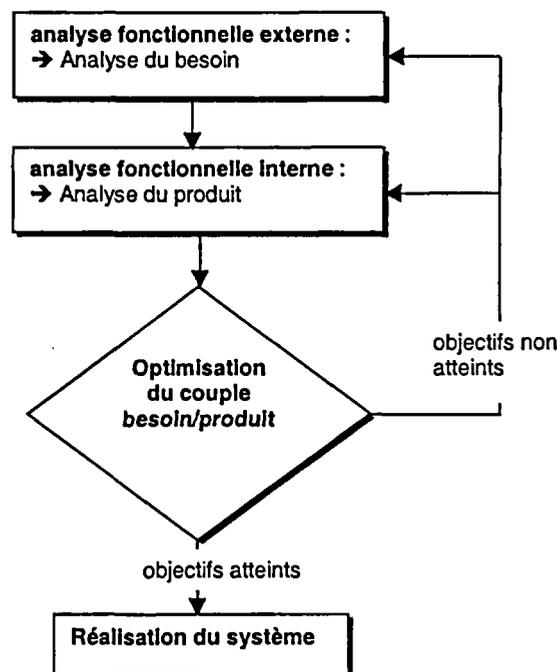


Figure 3.1 : Démarche générale de l'analyse fonctionnelle

1.1.2. Les différentes méthodes et les outils associés

Les méthodes d'analyse fonctionnelle sont nombreuses et liées aux fonctionnalités du système à étudier. On distingue trois familles :

- l'analyse fonctionnelle tirée des techniques d'analyse de la valeur : normes NF X50-150 à X50-153 ; Reliasep ; méthodes FAST, Den, APTE ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée à l'informatique et aux logiciels : SADT et IDEF-0 ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée aux organisations : méthode MESIRE.

Nous renvoyons le lecteur vers [ZWINGELSTEIN,96] pour plus de détails sur ces techniques.

Dans le domaine des systèmes mécaniques, l'expérience tirée de l'utilisation des différentes méthodes a montré que les *méthodes d'analyse de la valeur*, bien que d'application générale, sont particulièrement adaptées [ISDF].

Parmi celles ci, la méthode APTE est l'une des plus utilisées en Sûreté de Fonctionnement et elle est généralement employée en vue d'une analyse AMDE ultérieure. Elle se déroule selon les trois étapes définies précédemment et met en œuvre des outils puissants de l'analyse fonctionnelle : le *Bloc-diagramme Fonctionnel* et le *Tableau d'Analyse Fonctionnelle*. [ZWINGELSTEIN,96]

Le Bloc diagramme Fonctionnel (BdF) est une représentation du système et des milieux extérieurs qui met en évidence (Figure 3.2) : [ZWINGELSTEIN,96]

- les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs ;
- les interactions entre les composants eux-mêmes ;
- les circulations des flux à travers ou à l'intérieur du système et ses composants.

Il permet d'identifier les **fonctions principales** (et complémentaires) de service du système en examinant les flux mettant en relation deux milieux extérieurs via le système, ses **fonctions de contrainte** en examinant les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs et ses **fonctions techniques** engendrées par la conception propre du système.

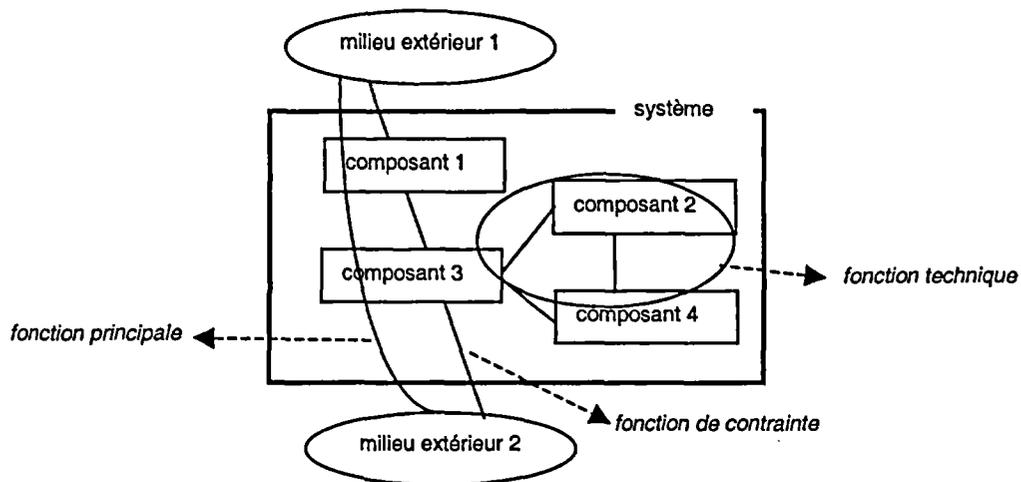


Figure 3.2 : BdF appliqué à un système de quatre composants [ZWINGELSTEIN,96]

Le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) découle de l'analyse du BdF. Il rassemble, d'une part les fonctions de service, de contrainte et techniques du système, et d'autre part les composants et leurs fonctions élémentaires ou **fonctions de conception** (Tableau 3.3). [ZWINGELSTEIN,96]

		Fonction de service / Fonction de contrainte	Fonction de conception
Composants du système	n°1		
	n°2		
	...		
	n°N		

Tableau 3.3 : Structure d'un Tableau d'Analyse Fonctionnelle

1.1.3. Pratique de l'analyse fonctionnelle dans le domaine des barrages

Dans les études de sûreté de fonctionnement de barrages (partie 1 - II.2.2), l'analyse fonctionnelle n'est pas réalisée comme une étape à part entière. L'étude du barrage d'Ajaure en Suède [VATTENFALL,00] est représentative de la pratique. Dans celle-ci, l'analyse fonctionnelle externe n'est pas formellement réalisée : identification du besoin, étude des milieux extérieurs, recherche des fonctions principales et de contrainte.

L'analyse fonctionnelle se résume alors à l'analyse interne : on trouve les décompositions structurelles du barrage et les blocs diagrammes fonctionnels de certains équipements. En

revanche, les tableaux d'analyse fonctionnelle ne sont pas établis et les fonctions de conception ne sont examinées que pour quelques composants.

Enfin, citons des travaux de recherche informatique conduits par EDF sur les barrages en remblai et proposant une analyse fonctionnelle basée sur l'analyse de la valeur [PERRIER,96]. Cette étude est la seule, à notre connaissance, où les différentes étapes de l'analyse fonctionnelle ont été menées de façon rigoureuse : analyse externe et interne, réalisation des TAF, détermination des fonctions de conception.

1.1.4. Synthèse

En préliminaire à l'utilisation d'une technique de la Sûreté de Fonctionnement, nous devons procéder à l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage étudié. Ce travail préalable à l'analyse des défaillances est une étape fondamentale de compréhension et de description des modes de fonctionnement nominaux du système. Il est donc impératif de réaliser cette étape avec soin.

Nous proposons d'appliquer une démarche d'analyse fonctionnelle basée sur la méthode APTE, qui semble la mieux adaptée au contexte du génie civil.

1.2. Les techniques de la Sûreté de Fonctionnement

Dans cette section, nous dressons un panorama rapide des techniques de la Sûreté de Fonctionnement en examinant leur intérêt pour notre étude. Pour des descriptions plus détaillées, le lecteur pourra se reporter à [VILLEMEUR,88], [LEROY,92], [MODARRES,93] et [ZWINGELSTEIN,95] qui servent de base à cette synthèse.

1.2.1. Les techniques qualitatives

Certaines techniques sont **qualitatives** et visent à identifier les risques ou les modes de défaillance. On trouve l'Analyse Préliminaire des Dangers, l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées

1.2.1.1. L'Analyse Préliminaire des Dangers (APD)

L'APD est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels. Elle est mise en œuvre en préliminaire d'une étude de sûreté de fonctionnement plus fine, telle une analyse AMDE.

L'identification des dangers est effectuée à partir de la connaissance et de l'expérience des experts. L'approche peut être déductive (recherche des causes d'une défaillance) ou inductive (recherche des effets d'une défaillance), selon que l'analyse est réalisée avec l'accident potentiel ou avec l'élément dangereux. [VILLEMEUR,88]

L'APD consiste à rechercher les entités dangereuses, les situations dangereuses et les accidents potentiels en découlant. Les résultats obtenus sont présentés dans un tableau (Tableau 3.4).

système	phase	entités dangereuses	événement causant une situation dangereuse	situation dangereuse	accident potentiel	effet	gravité	mesure préventive

Tableau 3.4 : Tableau de l'Analyse Préliminaire des Dangers

Cette technique ne présente pas d'intérêt pour les barrages car les modes de défaillance ou de rupture sont généralement bien identifiés. Ainsi, l'analyse du fonctionnement de ces ouvrages relève d'études de sûreté plus fines, telle que l'AMDE.

1.2.1.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

AMDE dans le contexte général de l'industrie :

La méthode AMDE (*Failure Modes and Effects Analysis*) est apparue dans les années 1960 dans l'aéronautique et est actuellement une des méthodes de la Sécurité de Fonctionnement la plus universellement utilisée dans l'industrie (spatiale, nucléaire, automobile...). Cette méthode fait l'objet de nombreux guides et normes, généralement mis au point pour chaque contexte industriel particulier : NF X 60-510, CEI 812-1985, MIL-STD-1269 A.

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillance (*un mode de défaillance est la non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues* : pas, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive [ISDF]) et leurs effets.

Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux, spécialement conçus pour le type de système étudié. Le déroulement d'une AMDE comprend [VILLEMEUR,88] :

- ❶ une *analyse fonctionnelle* du système ;
- ❷ la recherche systématique des *modes de défaillance* et de leurs *causes* ;
- ❸ la recherche des *effets* des modes de défaillance.
- ❹ dans la méthode AMDEC (AMDE avec analyse de la Criticité), on recherche en plus la *probabilité* et la *gravité* de chaque mode de défaillance qui permettront de caractériser sa Criticité. Le plus souvent, la criticité est renseignée de façon qualitative à l'aide du jugement de l'expert [LEROY,92].

La chronologie des études AMDE répond à une logique de production industrielle, dans laquelle on essaie d'éliminer les défaillances liées aux phases de fabrication : les défauts de conception et de réalisation et les écarts par rapport aux normes et règles d'hygiène et sécurité. Elle comprend généralement trois analyses (Figure 3.3) : [ISDF]

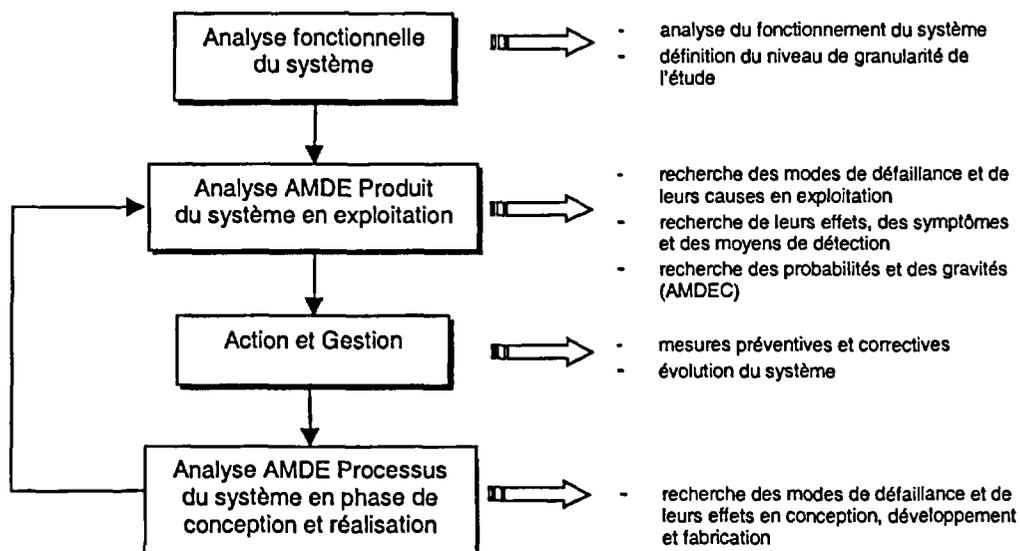


Figure 3.3 : Processus général de l'AMDE

- ❶ l'AMDE Produit est en principe réalisée en première phase : elle vérifie que le système assure en phase d'exploitation de façon satisfaisante les fonctions pour lesquelles il est conçu ;

- ② l'AMDE Processus examine si le produit obtenu est bien conforme à ce qui est prévu. Elle identifie les modes de défaillance liés à la conception et à la réalisation du système ;
- ③ l'AMDE Moyen est parfois réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

L'AMDE est une méthode puissante pour améliorer la sûreté de fonctionnement d'un système. Elle permet de générer une base d'informations qui sert de support pour définir, améliorer, corriger et valider un produit tout le long de sa vie, depuis sa conception jusqu'à l'exploitation.

AMDE dans les études de sûreté de fonctionnement des barrages :

Dans les références citant l'AMDEC ([CEA,00] et [ICOLD,01]), les analyses sont proposées à partir d'un tableau simplifié équivalent à une AMDEC Produit sans recherche des causes des défaillances (Figure 3.4). Il s'en suit des difficultés dans l'enchaînement des séquences de défaillance, que l'on retrouve dans l'étude [VATTENFAL,00]. Par ailleurs, la réalisation partielle de l'analyse fonctionnelle (I.1.3) n'a pas permis dans cette étude de déterminer l'ensemble des fonctions de conception, ce qui ne garantit pas l'exhaustivité des défaillances et pose des difficultés lors de la construction des scénarios.

System_____ Date_____

Indenture Level_____ Sheet_____ of_____

Reference Drawing_____ Complied by_____

Mission_____ Approved by_____

Identification number	Item/functional Identification (nomenclature)	Function	Failure modes and causes	Failure effects			Failure detection method	Compensating provisions	Severity class	Remarks
				Local effects	Next higher level	End effects				

Figure 3.4 : Tableau d'AMDEC proposé dans [ICOLD,01] et [CEA,00]

1.2.1.3. La Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR)

Les analyses AMDE mettent en évidence les défaillances simples du système. Pour prendre en compte la combinaison des modes de défaillance, la méthode MCPR intervient après une étude AMDE en la complétant. Elle recherche de façon inductive les combinaisons de défaillances élémentaires aboutissant à des effets indésirables.

La technique MCPR pourrait présenter un intérêt pour le génie civil, en complément de la réalisation d'une AMDE. En effet, les événements indésirables (les modes de rupture) sont complexes et liés à des combinaisons de plusieurs modes de défaillance des composants.

Toutefois, nous verrons d'autres techniques plus intéressantes pour combiner les modes de défaillance, qui permettront en outre de prendre en compte les dégradations progressives et non chronologiques.

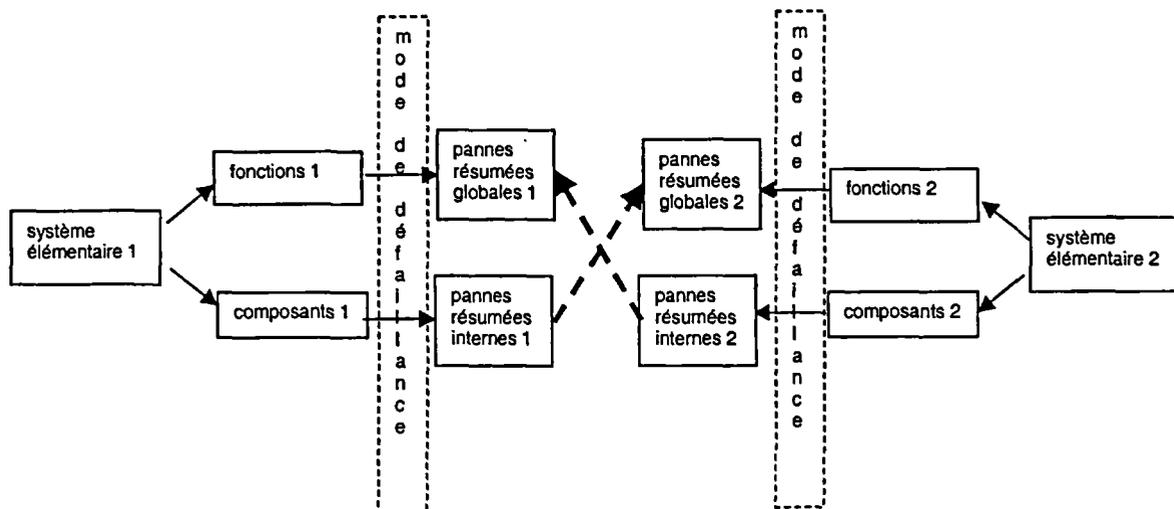


Figure 3.5 : Démarche de la MCPR

1.2.2. Les techniques quantitatives

Certaines techniques sont **quantitatives** et visent, outre l'identification des risques, à produire des mesures de la sûreté de fonctionnement. Les principales sont la Méthode des Arbres d'Evénements (MAE) et la Méthode de l'Arbre des Causes (MAC). D'autres méthodes sont destinées à reproduire le fonctionnement dynamique d'un système : la Méthode de l'Espace des Etats, les réseaux de Petri stochastiques et les simulations de Monte Carlo.

1.2.2.1. La Méthode des Arbres d'Evénements (MAE)

La MAE dans le contexte général de l'industrie :

La MAE (appelée parfois la *Méthode de l'Arbre des Conséquences*) est issue de l'industrie nucléaire. Elle trouve ses applications dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes à fonctionnement binaire (marche ou défaillant) et à évolution chronologique (mécanisme non bouclé). La séquence des événements de l'arbre se déroule de façon inductive (Figure 3.6), à partir de l'événement initiateur jusqu'aux événements finaux, chaque nœud faisant l'objet d'une recherche de probabilité d'occurrence. [VILLEMEUR,88]

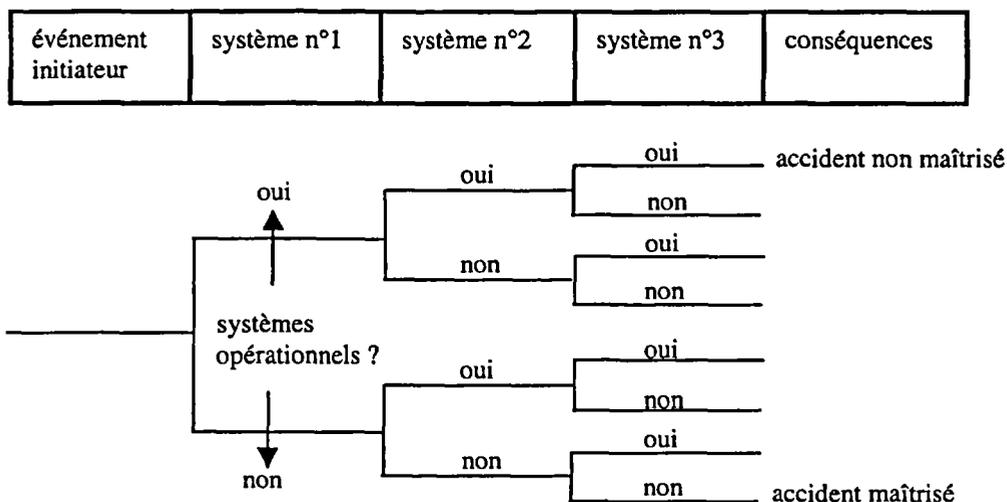


Figure 3.6 : Structure d'un arbre d'événements [ZWINGELSTEIN,96]

Pour construire les arbres d'événements, il convient tout d'abord de définir les fonctions de sûreté du système et les événements initiateurs. Deux approches sont alors possibles :

- une approche *déductive* basée sur la construction d'un arbre d'événements à partir de la fonction de sûreté considérée. Cette approche fait appel à la méthode MAC ;
- une approche *inductive* basée sur une analyse MCPR (ou AMDE), qui permet de déterminer les événements initiateurs et les événements de chaque séquence.

La MAE dans les études de sûreté de fonctionnement des barrages :

Dans les références analysées (partie 1 – III.2.2), nous constatons un manque de formalisme dans la description ou la mise en œuvre de la MAE :

- pas d'analyse MCPR ou AMDE préalable à la construction des arbres d'événements ;
- les arbres d'événements ne font pas apparaître des séquences de pannes résumés globales ou de modes de défaillance, mais des séquences d'événements chronologiques déterminées à dire d'experts (voir Figure 1.24) ;
- [ICOLD,01] en conclut que la construction des arbres d'événements relève du domaine de l'art et qu'il n'existe pas de règles de construction sur les barrages.

Ce manque de méthodologie dans l'élaboration des arbres d'événements peut conduire à des difficultés lors de l'analyse quantitative : est-on bien sûr de ne pas avoir oublié d'événements ? qu'ils sont tous bien consécutifs ? que les événements sont indépendants les uns des autres ?

La MAE n'est pas particulièrement bien adaptée au contexte du génie civil : les défaillances des ouvrages et de leurs composants sont rarement binaires ni chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes.

La MAE peut toutefois présenter un intérêt dans les études de sûreté de fonctionnement pour l'analyse quantitative de scénarios de défaillance pouvant conduire à la rupture. Dans ce contexte, l'approche inductive doit être privilégiée et précédée obligatoirement d'une AMDE.

1.2.2.2. La Méthode des Arbres des Causes (MAC)

La MAC (parfois appelée la *méthode de l'Arbre de Défaillances*) est une méthode déductive : on part de l'événement indésirable situé au sommet de l'arbre (*Top Event*) et on déduit les événements intermédiaires et de base. Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs logiques (et, ou, si...).

L'élaboration des arbres des causes a souvent été considérée comme un art pratiqué par l'analyste. [VILLEMEUR,88] propose des éléments méthodologiques pour conduire une analyse MAC mais souligne les difficultés à s'assurer de l'exhaustivité des modes de défaillance. A ce titre, il propose l'application préalable d'une AMDE pour éviter les oublis lors de la construction des arbres.

Dans les études de sûreté de fonctionnement des barrages, les arbres des causes sont utilisés pour l'analyse quantitative des défaillances des équipements électromécaniques : vannes de vidange, évacuateur de crues vanné et motorisé, dispositif d'auscultation ou de surveillance... Les études sont alors similaires à celles rencontrées dans l'industrie. La figure 3.7 issue de [CEA,00] représente un arbre des causes appliqué à la défaillance d'un générateur de secours commandant un évacuateur de crues vanné, en situation de coupure électrique.

En synthèse, la méthode MAC présente les mêmes inconvénients que la MAE dans le contexte du génie civil : logique binaire, défaillances chronologiques.

En outre, sa méthodologie de mise en œuvre apporte un formalisme insuffisant pour nos objectifs de structuration et de classement des phénomènes.

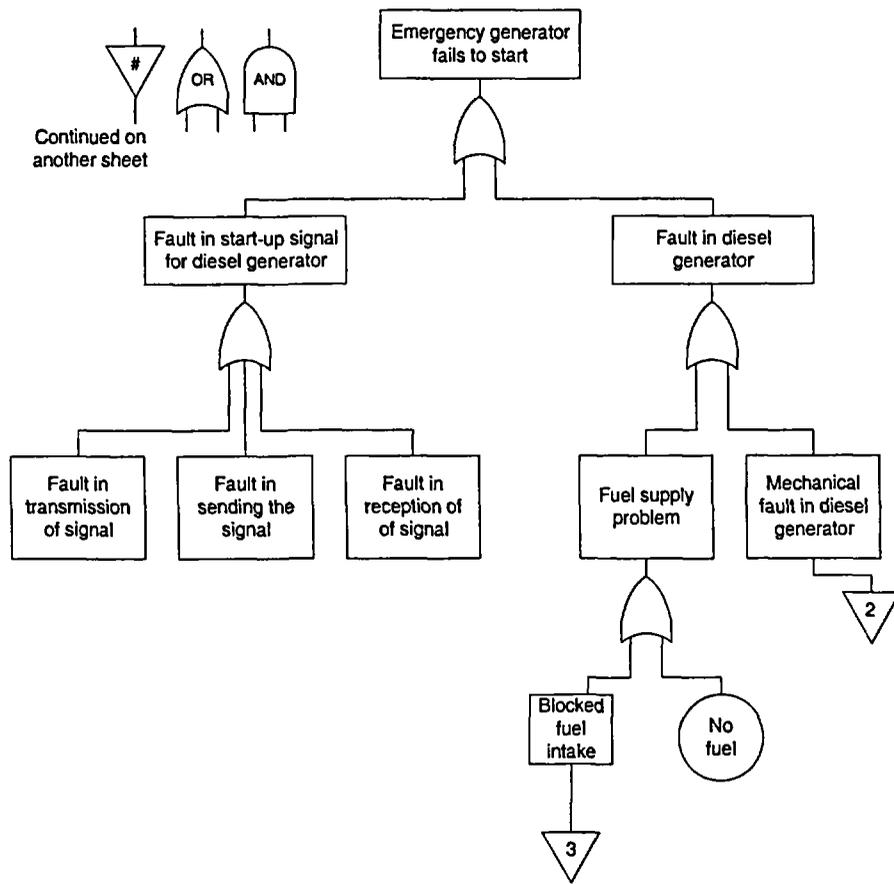


Figure 3.7 : Arbre des causes appliqué à un générateur de secours [CEA,00]

1.2.2.3. La Méthode de l'Espace des Etats (MEE)

La MEE ou la méthode *des processus de Markov* consiste à représenter le comportement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement. La combinaison de l'ensemble des états de fonctionnement des composants donne l'état du système à un instant donné (Figure 3.8).

On recherche ensuite toutes les transitions possibles et leurs origines entre les différents états que le système peut occuper au cours de son exploitation. L'analyse est effectuée à partir de *graphes d'états* permettant de représenter ces différents états et les transitions entre chacun d'eux.

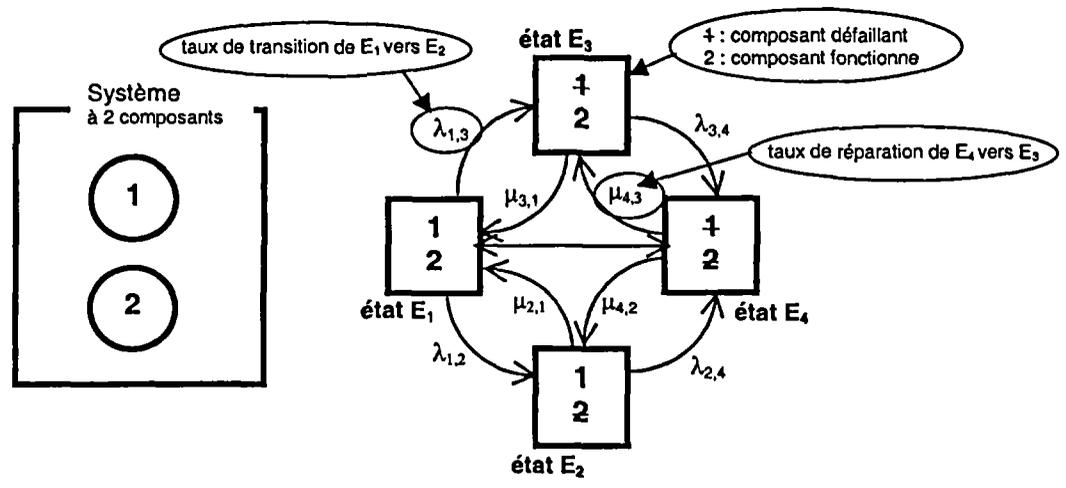


Figure 3.8 : Graphe d'état d'un système à deux composants et deux états possibles (marche ou défaillant) [LEROY,92]

Pour un ouvrage de génie civil constitué de nombreux composants (i) susceptibles de connaître plusieurs états de dégradation progressifs (n), les transitions à étudier deviennent rapidement très importantes (n^i), rendant la méthode inutilisable (données disponibles insuffisantes, complexité des mécanismes en jeu).

1.2.2.4. Les réseaux de Petri stochastiques

Ils utilisent une représentation sous forme de graphes orientés marqués, indiquant les états (ou les places) des composants du système et les transitions entre chaque place, associées à un délai régi par une loi (déterministe ou probabiliste).

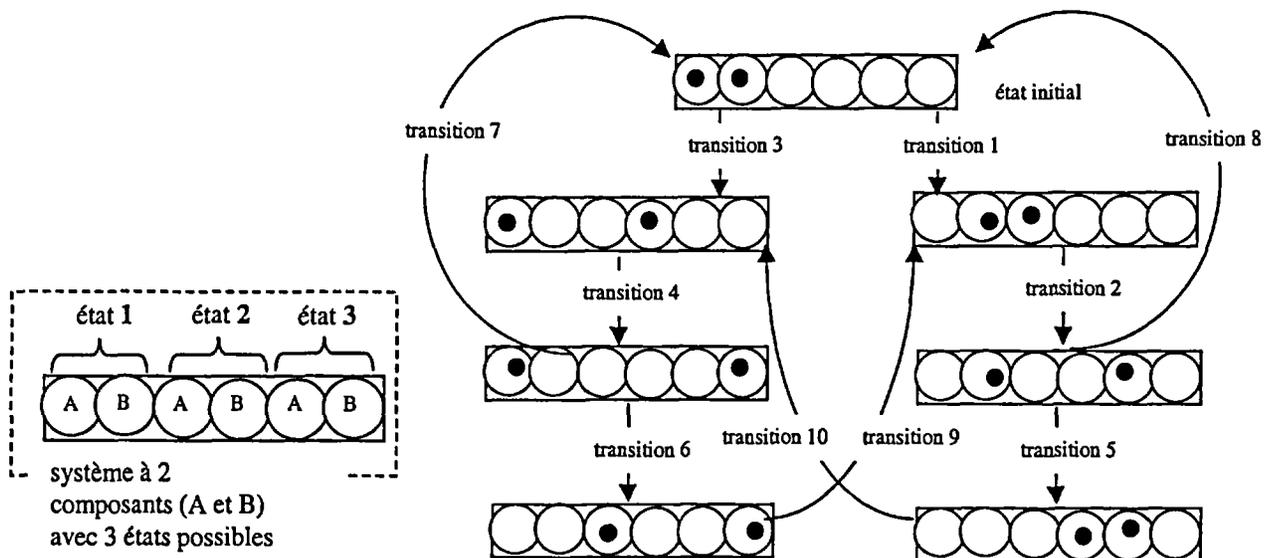


Figure 3.9 : Exemple de réseau de Petri pour un système à deux composants et trois états possibles [LEROY,92]

Même s'il est possible d'imaginer la conception d'un réseau de Petri stochastique pour un ouvrage du génie civil particulier, les limites de la méthode apparaissent dès lors que le système à étudier est complexe et qu'on envisage plusieurs états de dégradation : nombres de places et de transitions très importantes, lourdeur du graphe, etc.

1.2.2.5. La simulation de Monte Carlo

Lorsque le système à étudier est trop complexe, les méthodes du processus de Markov ou des réseaux de Petri stochastiques ne permettent pas un traitement correct sans approximations grossières ou mal maîtrisées. On préfère alors la *simulation de Monte Carlo*.

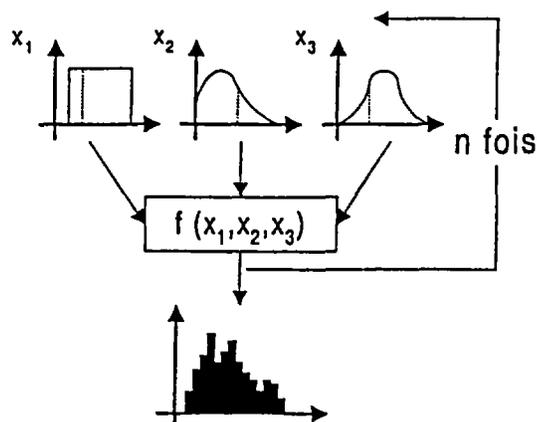


Figure 3.10 : Simulations de Monte-Carlo [LAIR,00]

Deux conditions sont nécessaires :

- un modèle de comportement du système étudié capable de reproduire de manière correcte son fonctionnement et son évolution au cours du temps lorsqu'il est soumis à différents aléas (défaillance, réparations, événements extérieurs...). La MEE ou les réseaux de Petri stochastiques peuvent constituer des supports intéressants ;
- un logiciel de simulation de Monte-Carlo pour effectuer des tirages aléatoires des variables d'entrée (état du système), pour réaliser des histoires du système à partir de son modèle de comportement et pour analyser statistiquement les variables de sortie.

Dans le contexte du génie civil, cette méthode nécessite des informations particulièrement difficiles à obtenir, voire impossible (lois de variables, modèle de comportement).

1.2.3. Synthèse

Les méthodes que nous venons d'examiner permettent l'identification des risques et l'analyse du comportement des systèmes complexes. Elles sont qualitatives (APD, AMDE, MCPR), quantitatives (AMDEC, MAC et MAE), basées sur la construction de graphes d'états (MEE, réseaux de Petri stochastiques) ou basées sur la simulation (simulation de Monte-Carlo).

La méthode AMDE semble la mieux adaptée à notre contexte. Elle permet, d'une part, de recenser de façon exhaustive les modes de défaillance et leurs effets dans les différentes phases de la vie du système (conception, réalisation et exploitation), d'autre part, de structurer les informations relatives au vieillissement.

Nous proposons donc d'adapter cette technique aux barrages.

1.3. Les modèles issus du raisonnement qualitatif

1.3.1. Principes du raisonnement qualitatif

Face à des systèmes complexes, il est difficile d'appréhender de façon exhaustive les relations internes par des variables et des équations. Il est donc nécessaire de se placer à un niveau d'abstraction élevé, pour intégrer toutes les connaissances hétérogènes relevant de différentes disciplines : c'est l'objet du *raisonnement qualitatif*.

Ainsi, le raisonnement qualitatif comprend tout ce qui concerne la description non numérique d'un système, en préservant ses propriétés comportementales majeures et en supprimant les détails. [MONET,98]

Il existe de nombreuses techniques pour représenter et manipuler les données qualitatives :

- l'algèbre des signes ;
- le raisonnement sur les ordres de grandeur ;
- le raisonnement sur les intervalles ;
- le raisonnement asymptotique par les ordres de croissance ;
- les ensembles flous.

Nous ne développons pas ces différents outils et nous renvoyons le lecteur à [TRAVE,97].

1.3.2. Les modèles du raisonnement qualitatif

Le raisonnement à base de modèles (*Model Based Reasoning*) est un processus déductif mettant en œuvre des modèles qualitatifs. Il est utilisé pour prévoir, simuler et expliquer le comportement d'un système complexe, à partir du comportement et du fonctionnement de ses composants. [MONET,99]

Deux situations peuvent conduire à préférer les *modèles qualitatifs* par rapport aux modèles traditionnels numériques :

- lorsqu'on peut se satisfaire de résultats approchés (par exemple, caractériser un processus physique sans en donner les paramètres exacts) ;
- lorsque les connaissances sur le système sont imprécises ou intrinsèquement qualitatives.

Les modèles qualitatifs trouvent donc naturellement leur utilité pour servir de support à des tâches ne requérant pas une forte précision, pour lesquelles les considérations quantitatives sont peu utiles. [TRAVE,97]

Les applications principales des modèles qualitatifs sont les suivantes : [FORBUS,96]

- *le diagnostic à base de modèle* des systèmes ;
- *la simulation qualitative* du comportement des systèmes ;
- des applications plus diverses comme la production, la recherche des défaillances, etc.

On distingue deux classifications pour les modèles qualitatifs : [TRAVE,97]

① les modèles statiques et dynamiques

Un modèle statique est une description d'un système limitée aux états d'équilibres ou aux régimes stationnaires. A contrario, un modèle dynamique décrit les états transitoires (évolution entre deux états transitoires) : dans ce cas, il produit une description du comportement du système au cours du temps.

② les modèles avec ou sans causalité explicite

Un *modèle sans causalité explicite* ne spécifie pas le sens des interactions. A contrario, les *modèles avec causalité explicite* déclarent le sens de propagation des influences ou des valeurs, au moyen d'un graphe orienté ; ils permettent donc de prendre en compte les liens de cause à effet.

Dressons un rapide panorama des modèles du raisonnement qualitatif susceptibles d'intéresser notre contexte : [TRAVE,97]

Modèles qualitatifs statiques :

Les **modèles causaux** (c'est-à-dire les modèles statiques avec causalité explicite) reposent sur l'élaboration d'un graphe causal, dont les nœuds sont des variables et dont les arcs traduisent les influences entre ces variables.

Parmi ces modèles, les plus simples se contentent d'identifier les relations entre les variables sans les qualifier.

Dans les **graphes orientés signés**, les nœuds et les variables sont affectés d'un signe (+, -, 0) et les arcs d'un signe (+, -). La figure 3.11 donne l'exemple d'un système simple comprenant un réacteur et une boucle de recyclage et son graphe orienté signé.

Les **graphes de propagation de valeurs symboliques** (type modèle de Simao) sont des graphes causaux plus sophistiqués, où les variables d'entrée prennent des valeurs qualitatives dans un espace fermé, et incluant des règles de transfert et d'opération des valeurs qualitatives.

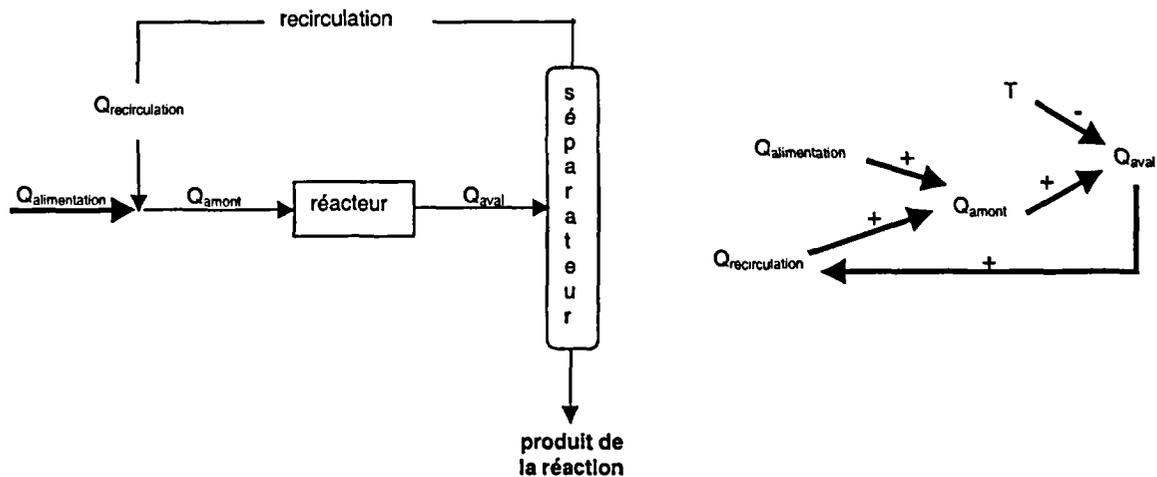


Figure 3.11 : Boucle de recyclage et son graphe orienté signé [TRAVE,97]

Modèle qualitatif dynamique :

L'objectif des modèles qualitatifs dynamiques est de représenter l'évolution du système entre deux états d'équilibre et la description globale du comportement dans le temps.

Leur principe est de reproduire le comportement des systèmes à partir des relations de cause à effet : tout événement affectant une variable est propagé sur les autres variables, qui lui sont causalement dépendantes, par l'intermédiaire de chemins causaux (arcs). La propagation peut être simulée par des fonctions de transfert qualitatives et dynamiques prenant le temps comme paramètre.

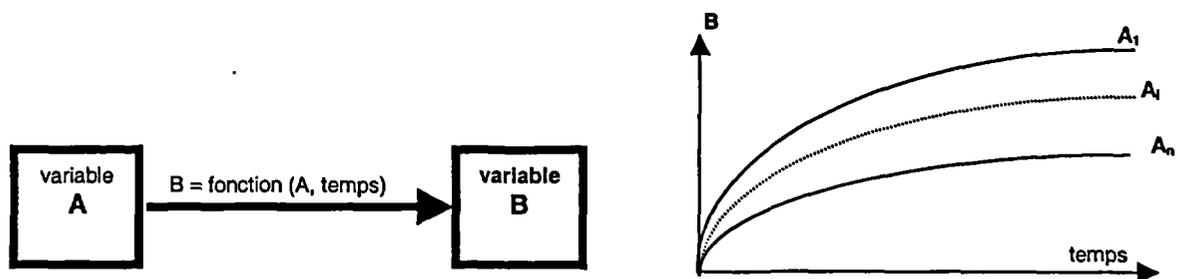


Figure 3.12 : Graphe causal dynamique

1.3.3. Synthèse

Les modèles qualitatifs semblent pouvoir offrir un excellent support pour la représentation des scénarios de vieillissement des barrages.

Nous préférons les graphes causaux compte tenu des forts liens de cause à effet existant dans les mécanismes. Une analyse qualitative à partir de quelques valeurs, du type de celle proposée dans le modèle de propagation de valeurs symboliques, semble particulièrement intéressante.

Enfin, la prise en compte de l'évolution des dégradations des fonctions et des composants au cours du temps est également possible au travers des graphes causaux dynamiques.

I.4. Principes et démarche d'analyse du vieillissement des barrages

Principes :

Nous proposons un modèle de vieillissement des barrages qui réponde aux principes suivants :

- contrairement aux études très détaillées de modélisation physique des phénomènes, mises en œuvre pour le diagnostic et l'analyse de risques, nous souhaitons pouvoir prendre en compte par une seule méthode tous les mécanismes de vieillissement ;
- le modèle développé doit pouvoir considérer, d'une part, les états intermédiaires de dégradation, d'autre part, les mécanismes de vieillissement non chronologiques ;
- enfin, la méthode doit autoriser l'analyse quantitative des dégradations et de leur évolution au cours du temps. Deux objectifs sont sous-jacents à ce principe : la capitalisation d'historiques de vieillissement et l'analyse de la criticité (partie 4).

Notre démarche est basée sur l'utilisation de deux outils :

- l'AMDE qui va nous permettre de structurer les données relatives au vieillissement des barrages et d'établir les liens de cause à effet et les séquences de dégradation ;
- le raisonnement qualitatif dont on utilise les modèles tels que les graphes causaux. Ils sont destinés à offrir une représentation naturelle des scénarios et à propager des valeurs pour l'analyse quantitative et de la criticité.

Démarche : (Figure 3.13)

Etape 1 - Analyse fonctionnelle du système (II.1)

Nous procédons en deux temps : l'analyse fonctionnelle externe, puis l'analyse fonctionnelle interne. Nous définissons l'échelle spatiale de description des barrages (la *granularité spatiale*) et nous déterminons la liste des fonctions accomplies par le système et ses composants.

Etape 2 - Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (II.2)

Nous recherchons, pour chaque fonction, les modes de défaillance susceptibles d'apparaître aux différents stades de la vie du système : au cours du processus de conception et de réalisation (AMDE Processus) et en phase d'exploitation (AMDE Produit).

Etape 3 - Modélisation des scénarios de vieillissement (II.3)

A partir des modes de défaillance, de leurs causes et de leurs effets, nous proposons un modèle qualitatif pour les scénarios de vieillissement. Ces derniers sont représentés sous forme de graphes causaux qui permettent un affichage synthétique des séquences de dégradation.

Etape 4 - Instanciation de la base de connaissances

Après l'analyse des recueils d'expertise (partie 2), nous construisons les scénarios à l'aide du modèle de vieillissement (chapitre III).

Etape 5 - Evaluation de la criticité (partie 4)

Nous exploitons les possibilités offertes par les modèles causaux pour procéder à l'analyse quantitative des scénarios et nous proposons un modèle d'évaluation de la criticité.

Etape ultérieure - Instanciation de la base d'historiques et outil d'aide à la décision

Ce travail rentre dans le cadre de la valorisation de nos travaux. En application (partie 5), nous développons quelques exemples d'historiques de vieillissement de barrages.

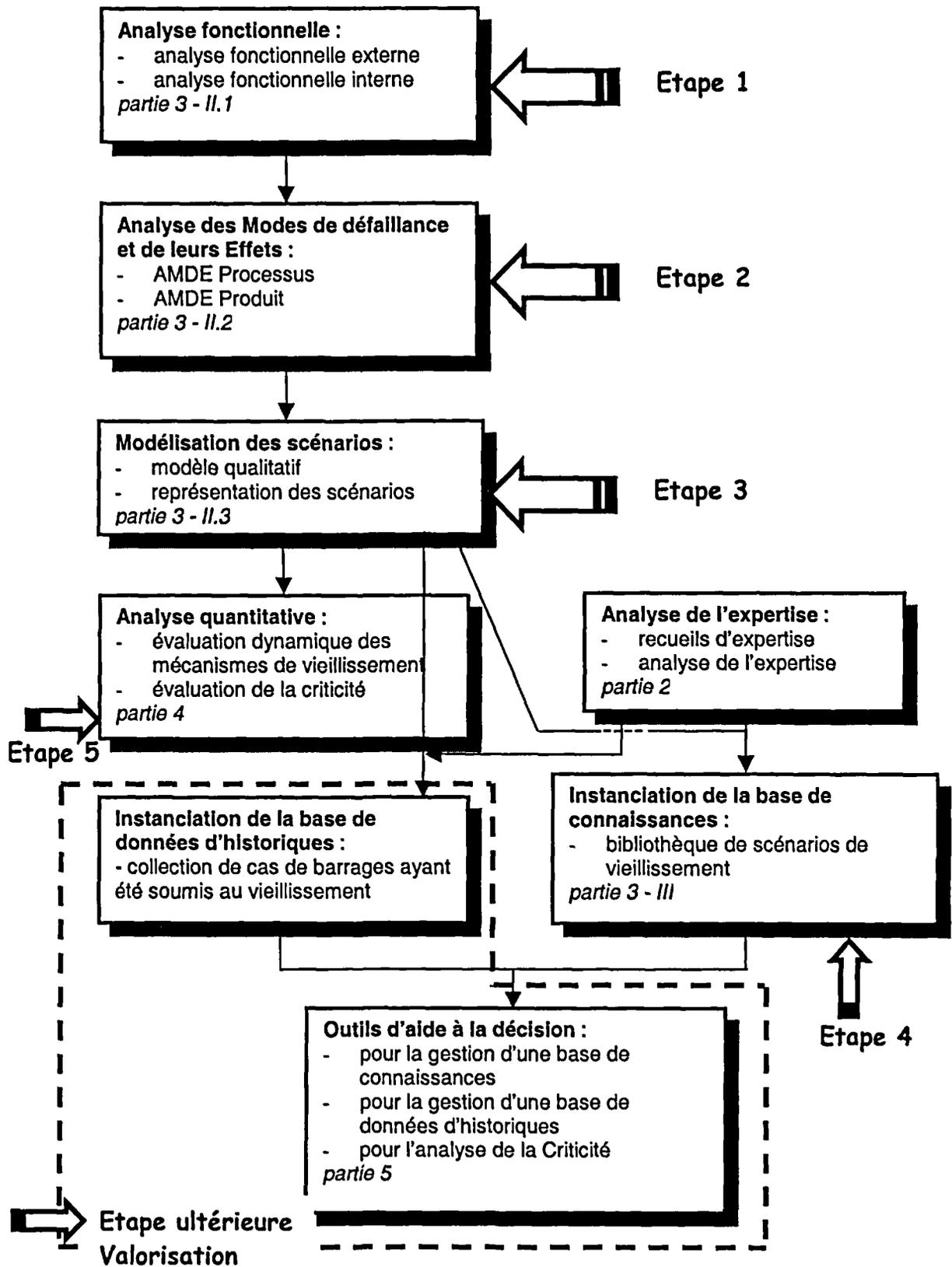


Figure 3.13 : Démarche d'analyse du vieillissement des barrages - organigramme de la méthode

II. Proposition d'un modèle pour les scénarios de vieillissement des barrages

Dans ce chapitre, nous traitons de façon générale la méthodologie définie précédemment pour la modélisation des scénarios de vieillissement, indépendamment de notre domaine d'application. Ensuite, le développement aux barrages (analyse fonctionnelle, AMDE et graphes causaux) est examiné en application de la méthodologie. Le caractère exhaustif des méthodes et le volume important des données obtenues nous conduit à reporter en annexes (1 à 5) une grande partie des résultats.

II.1. Analyse fonctionnelle des barrages

II.1.1. Démarche générale

Nous recherchons toutes les fonctions du système, pour ensuite identifier leurs modes de défaillance, leurs causes et effets.

Pour ce faire, nous procédons à l'analyse fonctionnelle basée sur la démarche de la méthode APTE et conduite selon les étapes indiquées à la figure 3.14 : l'analyse fonctionnelle externe et l'analyse fonctionnelle interne.

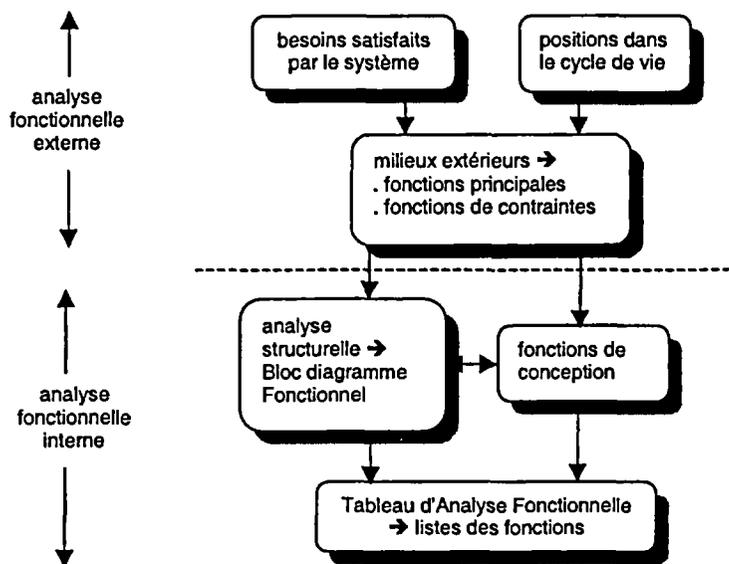


Figure 3.14 : Processus de l'analyse fonctionnelle

II.1.2. Analyse fonctionnelle externe

Le besoin satisfait par le système correspond à ce qu'on attend de lui. Par l'analyse fonctionnelle externe, nous allons traduire ces besoins sous forme de fonctions : les fonctions principales et les fonctions de contrainte.

II.1.2.1. Définition du système

En préliminaire à l'analyse fonctionnelle, il est nécessaire de *définir précisément le système du génie civil* qui va être étudié. Nous en définissons les limites, qui conduisent ensuite à considérer les milieux extérieurs en interaction (Figure 3.15).

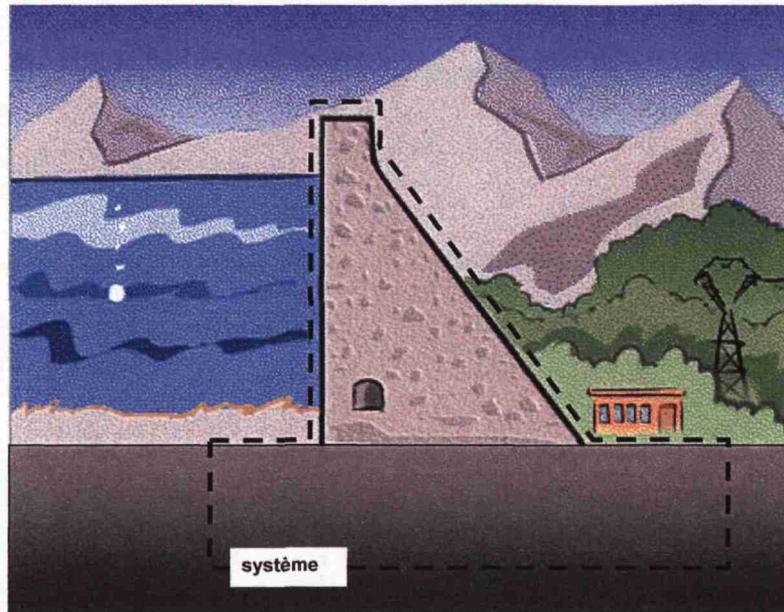


Figure 3.15 : Définition et limite du système (barrage poids)

Dans l'application aux barrages, le système que nous étudions est composé du barrage proprement dit (structure du génie civil hors du sol), de sa semelle de fondation, de ses ouvrages annexes (évacuateur de crue, prise d'eau...) et de ses fondations (sol d'assise ou rocher impliqué dans la tenue de la structure et portant la semelle du barrage).

II.1.2.2. L'expression du besoin satisfait par le système

Le besoin peut être formalisé par trois questions (Figure 3.16) : [ZWINGELSTEIN,96]

- ❶ A qui le système rend-il service ? (à quel autre plus grand système appartient-il ?)
→ à l'Homme.
- ❷ Sur quoi agit-il ?
→ sur l'eau de la retenue et sur l'environnement aval.
- ❸ Pourquoi cette action ? (dans quel but le système existe-t-il ?)
→ pour que la retenue joue son rôle (eau potable, électricité, loisir...). Si le barrage n'existait pas, il ne serait pas possible de remplir et de retenir la retenue.

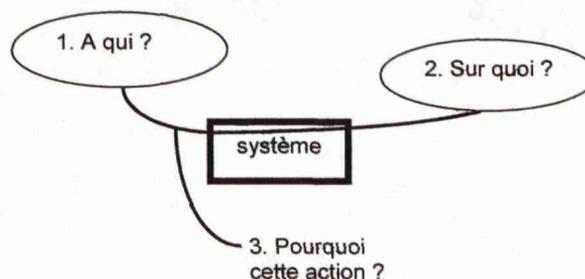


Figure 3.16 : Matérialisation du besoin [ZWINGELSTEIN,96]

II.1.2.3. Position dans le cycle de vie

Le système passe par différentes étapes chronologiques ou *positions du cycle de vie*, dont il est nécessaire de définir celles qui intéressent notre analyse. Dans notre démarche, nous nous intéressons aux phases d'exploitation, qui sont influencées par le processus de conception et de réalisation.

❶ Le processus de conception et de réalisation :

- la conception de l'ouvrage : *géologie du site, choix des matériaux, dimensionnement...*
- la réalisation de l'ouvrage : *condition de réalisation, choix techniques du chantier, contrôles...*

❷ L'exploitation où il faut considérer :

- l'exploitation dans les conditions normales : *niveau normal d'exploitation de la retenue*
- l'exploitation en conditions exceptionnelles : *en crue, lors d'un séisme...*

II.1.2.4. Détermination des milieux extérieurs en interaction avec le système

Les *milieux extérieurs* sont constitués des éléments matériels, naturels ou faisant partie d'autres systèmes, qui peuvent agir sur l'ouvrage ou subir ses actions. En examinant l'environnement du système, nous établissons leur recensement et nous examinons les interactions. Pour faciliter cette tâche, il est souvent utile de s'aider de schémas ou de plans (Figure 3.17).

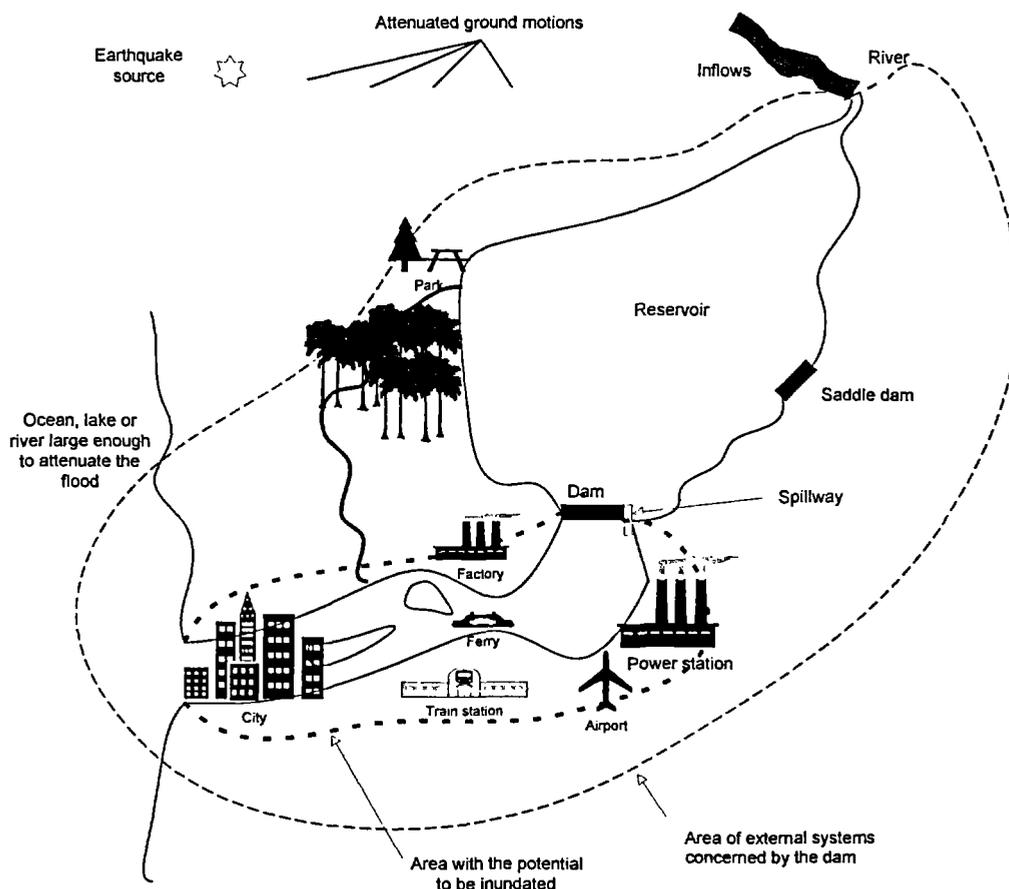


Figure 3.17 : Les milieux extérieurs et l'environnement [CEA,00]

Pour l'application aux barrages, nous distinguons les milieux extérieurs indiqués au tableau 3.5 :

Type	Milieux extérieurs
environnement lié à l'eau	- retenue ; environnement hydraulique amont - nappe de coteaux ; nappes de fondation - eau aval ; rivière ; environnement hydraulique aval
géologie du site	- fondations ; appuis latéraux ; versants de la retenue
milieux à proximité de l'ouvrage	- végétation - faune (animaux fouisseurs, ...) - embâcles - sédiments amont ; alluvions aval
météorologie	- soleil ; UV ; température ; vent - précipitations ; humidité - glace ; froid ; cycles gel-dégel
activités de l'homme	- ouvrages en amont ou aval : autres barrages, usine de production électrique, station de pompage, etc. - villes et habitations en aval ; voies de communication
événements extérieurs exceptionnels	- crues - séismes
autres systèmes divers	- l'homme : exploitant, usager, etc. - normes, recommandations liées à la sécurité et aux règles de l'art

Tableau 3.5 : Milieux extérieurs aux barrages

II.1.2.5. Les fonctions principales et de contrainte du système global

Par l'analyse fonctionnelle externe, nous obtenons les fonctions principales et de contrainte accomplies par le système considéré dans sa globalité. La qualité de la recherche des milieux extérieurs et de l'analyse des interactions conditionne l'exhaustivité des fonctions obtenues.

Nous matérialisons les interactions entre le système et son environnement au moyen d'un Bloc diagramme Fonctionnel (BdF) dans lequel nous distinguons les relations de contact (représentées par des segments droits) et de flux (représentées par des arcs).

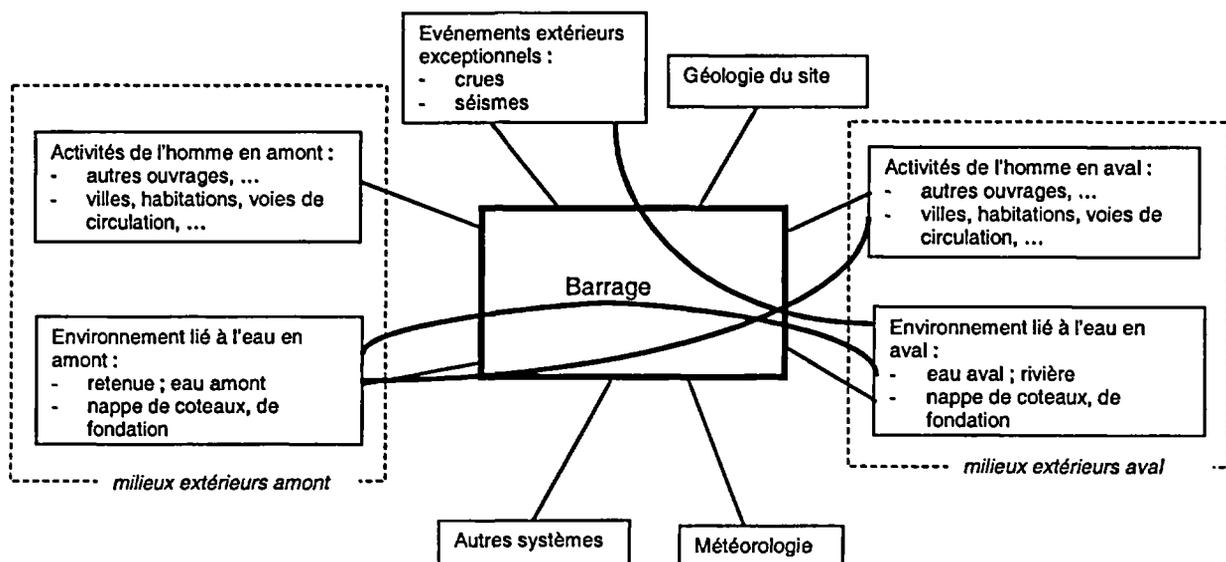


Figure 3.18 : Bloc diagramme Fonctionnel du système global (barrage)

Les **fonctions principales** traduisent l'objet de l'action d'un système. Pour l'application aux barrages, la retenue amont et l'environnement aval (rivière en aval, usine de production de production...) sont mis en relation à travers la structure de génie civil. Nous en déduisons les fonctions principales d'un barrage :

- ❶ LE BARRAGE STOCKE L'EAU DE LA RETENUE
- ❷ LE BARRAGE ASSURE LE TRANSIT DES CRUES
- ❸ LE BARRAGE FOURNIT DE L'EAU A L'USINE DE PRODUCTION

Parmi ces fonctions, les deux premières intéressent directement la sécurité du barrage. Du fait que la défaillance de la fonction ❷ entraîne (le plus souvent) la rupture, *la sécurité du barrage peut être ramenée à l'analyse d'une seule fonction principale* :

→ LE BARRAGE STOCKE L'EAU DE LA RETENUE

Les fonctions de contrainte sont obtenues en examinant les milieux extérieurs en interaction avec l'ouvrage. Dans l'application aux barrages et à partir des milieux extérieurs mis en évidence, nous obtenons environ 50 fonctions de contrainte reportées en annexe 1. Le tableau 3.6 donne celles liées à la *retenue* et aux événements extérieurs exceptionnels (*crues* et *séismes*).

Milieu extérieur	Fonction de contrainte
<i>retenue et environnement hydraulique amont</i>	<ul style="list-style-type: none"> - résister à la poussée hydrostatique - résister aux sollicitations hydromécaniques - être étanche - résister à l'action chimique de l'eau de la retenue - résister au battillage - évacuer les crues exceptionnelles
<i>crues et séismes</i>	<ul style="list-style-type: none"> - résister aux sollicitations exceptionnelles

Tableau 3.6 : Extrait des fonctions de contrainte des barrages

Parmi ces fonctions de contrainte, les fonctions de résistance vont permettre d'assurer directement la stabilité du barrage face aux sollicitations extérieures :

- LE BARRAGE RESISTE A LA POUSSEE HYDROSTATIQUE
- LE BARRAGE RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES
- LE BARRAGE RESISTE AUX ACTIONS EXCEPTIONNELLES : CRUES, SEISMES
- LE BARRAGE RESISTE A DIVERSES SOLLICITATIONS : CHIMIQUES, BATILLAGE...

Nous pouvons regrouper ces fonctions de résistance dans une seule syntaxe :

→ LE BARRAGE RESISTE AUX SOLLICITATIONS

II.1.3. Analyse fonctionnelle interne

Après l'analyse globale du système, nous recherchons maintenant le rôle et la participation de ses composants, chacun d'entre eux assurant des fonctions contribuant au fonctionnement global de l'ouvrage. Ce sont les fonctions de conception.

II.1.3.1. Choix de la granularité spatiale

En préliminaire à l'analyse structurelle du système, il est nécessaire de fixer la granularité (spatiale) adaptée aux besoins de l'étude :

→ à quelle précision souhaitons-nous produire notre analyse ?

Nous distinguons trois niveaux de granularité :

- la **granularité supérieure** correspondant au système dans sa globalité. Ce niveau de granularité considère les effets des défaillances sur la globalité de l'ouvrage ;
- la **granularité intermédiaire**, qui découpe le système en composants distincts ;
- la **granularité inférieure**, qui s'intéresse aux sous-composants et aux matériaux des composants de granularité intermédiaire.

Bien entendu, des analyses plus précises pourraient être réalisées selon les besoins à des granularités plus fines (au sein des matériaux) ou plus larges (à l'échelle d'un bassin hydro-géographique).

Dans l'application aux barrages, nous souhaitons une description précise des mécanismes physiques s'opérant dans les structures permettant de prendre en compte :

- les défaillances des différents composants constituant le barrage ;
- les mécanismes de vieillissement à l'échelle des composants ;
- les effets des défaillances des composants sur le système global.

Ainsi, pour obtenir une description fine des barrages et de leurs mécanismes de vieillissement, nous réalisons l'analyse fonctionnelle interne à la granularité intermédiaire, au niveau des composants.

II.1.3.2. Analyse structurelle

L'analyse structurelle permet de lister tous les composants constitutifs du système, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants.

Elle consiste à découper l'ouvrage, selon les limites données dans la définition, en composants ou sous-composants (ou matériaux), afin d'en construire une vision plus précise. Le découpage est effectué à la granularité adoptée pour l'étude.

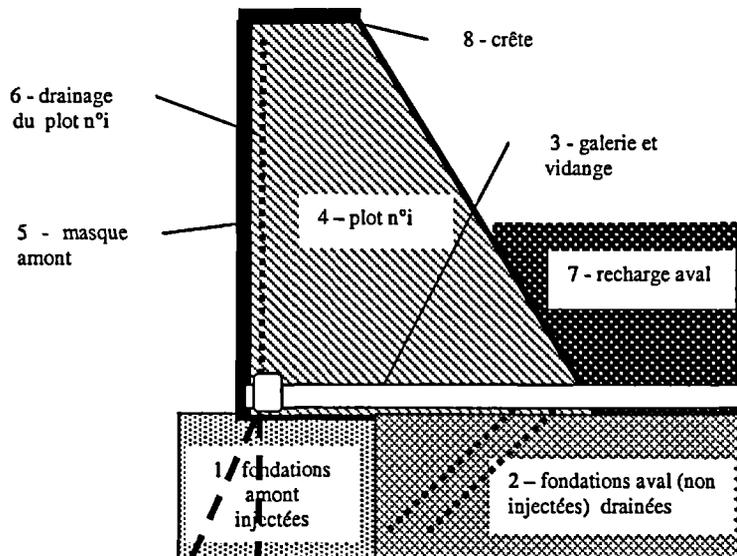


Figure 3.19 : Décomposition structurelle à la granularité intermédiaire (barrage poids)

Dans l'application aux barrages, nous avons procédé à l'analyse structurelle des barrages poids et en remblai. L'étude des ouvrages voûtes reste à faire, sachant qu'elle présente des similitudes avec celle des ouvrages poids.

Nous avons examiné des barrages types, décrits avec tous leurs équipements afin d'adapter la décomposition structurelle au maximum d'ouvrages existants. A titre d'exemple, nous indiquons à la figure 3.19 l'analyse d'un barrage poids standard, réalisée sur un profil transversal. La décomposition structurelle en plan est reportée en annexe 2, ainsi que celles relatives aux différents types de barrages en remblai.

A partir de l'analyse structurelle, nous établissons la liste des composants de l'ouvrage. Pour un profil type de barrage, nous obtenons huit composants de granularité intermédiaire (Tableau 3.7).

n° de nomenclature	nom du composant de granularité intermédiaire
1	fondations amont (injectées)
2	fondations aval (non injectées) et drainées (éventuellement)
3	galerie incluant la vidange
4	plot correspondant au profil transversal
5	masque amont
6	système de drainage
7	recharge aval
8	crête

Tableau 3.7 : Liste des composants d'un profil transversal d'un barrage poids

II.1.3.3. Les fonctions de conception

Les fonctions de conception que réalisent les composants du système sous-entendent des fonctions de contact et de flux. Elles expriment les interactions des composants entre eux, mais aussi entre les composants et les milieux extérieurs.

Elles sont matérialisées à travers les Blocs diagrammes Fonctionnels établis à la granularité intermédiaire. Nous distinguons trois principales catégories d'interactions :

- les **contacts** entre les éléments et/ou les milieux extérieurs ;
- les transferts de **flux hydraulique** des éléments entre eux et avec les milieux extérieurs ;
- les transferts de **flux de charges** des éléments entre eux et avec les milieux extérieurs.

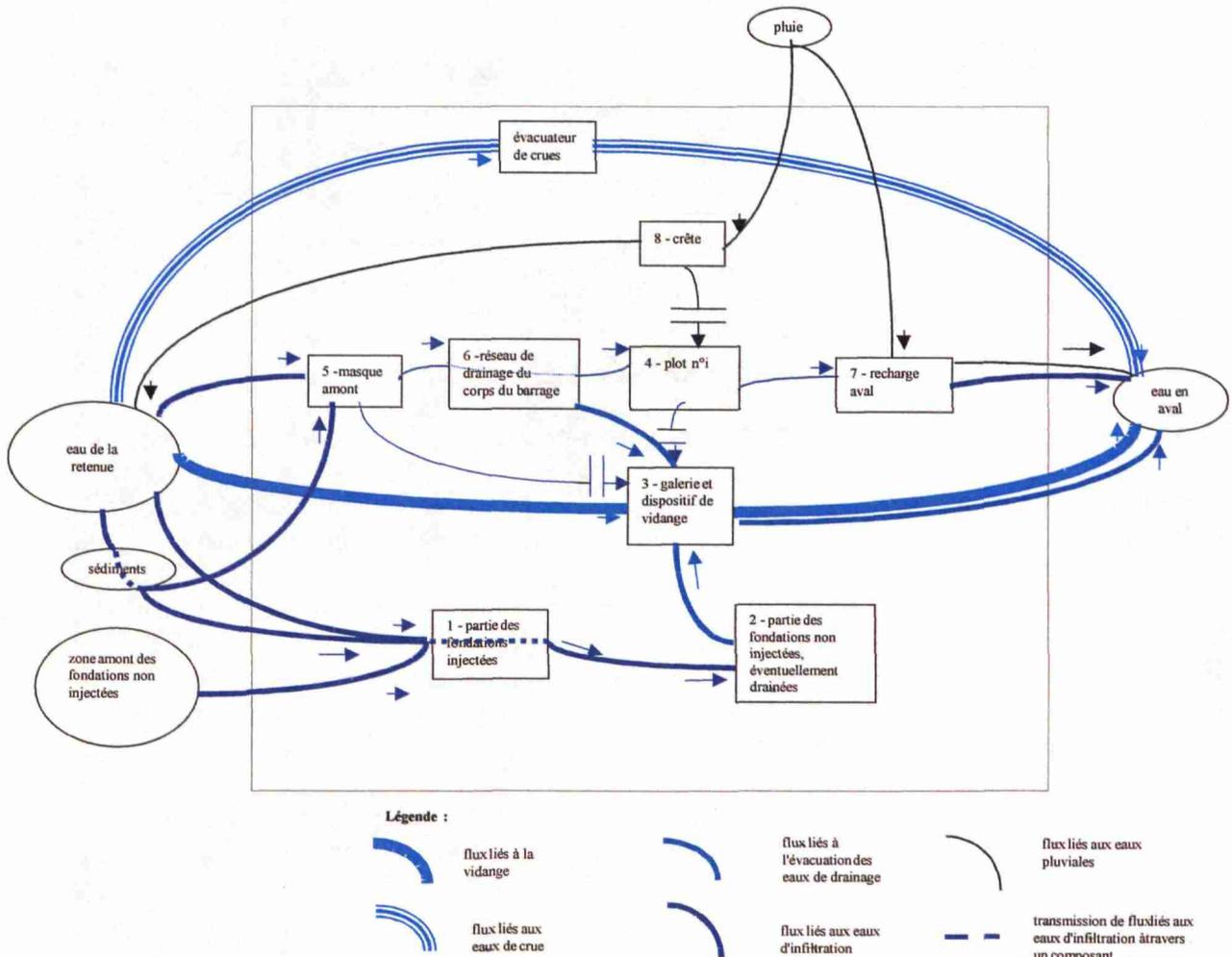


Figure 3.20 : Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux flux hydrauliques (barrage poids)

Nous avons construit les BdF relatifs aux barrages poids pour chacune des interactions. Le BdF cité en exemple (Figure 3.20) correspond aux flux hydrauliques, les autres blocs diagrammes sont renvoyés en annexe 3.

A partir des BdF, nous déterminons les fonctions de conception : les interactions de contact déterminent *les fonctions de contact* (action de préparation d'assise ou de support) et les interactions de flux déterminent *les fonctions de flux* (transfert de charges ou de fluide entre deux composants ou milieux extérieurs). Les listes des fonctions de conception des composants sont rassemblées dans les Tableaux d'Analyse Fonctionnelle.

Composant examiné : n°4 - plot	Fonction de conception	
	Fonction de contact	Fonction de flux hydraulique ou de charges
Composants / milieux extérieurs ↓		
1 : fondations amont injectées		- résister aux sous-pressions des fondations amont
2 : fondations aval non injectées		- résister sous-pressions des fondations aval
3 : galerie de drainage et dispositif de vidange	- préparer la surface de contact (servir d'appui) de la galerie	
5 : masque amont	- préparer la surface de contact (servir d'appui) du masque amont	- résister aux sollicitations mécaniques transmises par le masque amont : poussée hydrostatique amont, poussée des sédiments et des glaces ; etc. - résister aux sollicitations chimiques (action chimique des eaux de fuite provenant du masque amont)
6 : réseau de drainage du plot	- préparer la surface de contact (servir d'appui) du réseau de drainage	
7 : recharge aval	- préparer la surface de contact de la recharge aval	- résister aux poids de la recharge

Tableau 3.8 : Tableau d'Analyse Fonctionnelle (barrage poids)

Dans l'application aux barrages, nous avons construit les tableaux d'analyse fonctionnelle des ouvrages poids. Nous obtenons au final quelques 80 fonctions de conception, qui sont reportées en annexe 4. Nous donnons au tableau 3.8 un extrait concernant le *plot* : pour chaque composant et milieu extérieur en interaction, nous faisons apparaître la fonction de conception correspondante.

Parmi les fonctions de conception des composants, certaines vont contribuer directement à assurer la stabilité du barrage. En effet, la fonction de résistance aux sollicitations mécaniques du barrage est assurée au sein du système par les composants les plus massifs et les plus lourds, qui vont supporter les efforts des poussées hydrostatiques, les actions exceptionnelles (séismes, crues) et, plus largement, l'ensemble des sollicitations mécaniques. Il s'agit du *plot* pour les ouvrages poids et du *remblai* pour les barrages en terre et. Ces derniers composants contribuent à la stabilité du système à partir de leur fonction RESISTER AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES.

Par ailleurs, la fonction de résistance aux actions d'érosion du barrage est assurée au sein du système par les *fondations* ou le *remblai* (pour les barrages en terre). Ces composants contribuent également à la stabilité du système à partir de leur fonction RESISTER AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES.

Ainsi, les fonctions de conception contribuant directement à la stabilité du barrage sont :

Pour les barrages poids

- LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES

- LA FONDATION RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES

Pour les barrages en remblai

- LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES

- LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES

- LA FONDATION RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES

II.1.4. Synthèse de l'analyse fonctionnelle

Au final de l'analyse fonctionnelle, nous disposons :

- d'une description précise de l'ouvrage, de ses composants et des liens entre composants et environnement ;
- d'une liste des fonctions globales du système et des fonctions de conception de chaque composant.

Les informations obtenues par l'analyse fonctionnelle servent de base à l'application de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets. Il est donc indispensable de les rechercher avec soin pour s'assurer de l'exhaustivité des fonctions obtenues.

II.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets pour les barrages

II.2.1. Démarche générale

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets va déterminer, pour chaque fonction accomplie par les composants du barrage, tous les modes de défaillance (c'est-à-dire les non réalisations de fonctions) susceptibles d'apparaître aux différents cycles de la vie de l'ouvrage, leurs causes et leurs effets. Outre la connaissance précise des séquences de défaillance, l'AMDE va alors nous permettre de structurer les informations relatives au vieillissement des barrages.

Pour obtenir ces résultats, nous devons adapter la démarche et les techniques d'analyse de la méthode AMDE à notre contexte particulier.

En premier lieu, nos préoccupations étant éloignées de la production industrielle ou de série (chaque barrage constituant un ouvrage unique), nous inversons la démarche générale conduite dans l'industrie (Figure 3.21) :

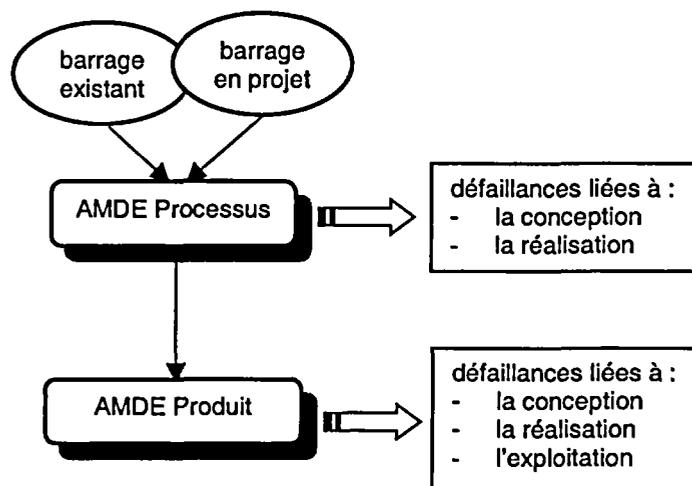


Figure 3.21 : Démarche d'analyse des défaillances pour les barrages

En première phase, nous procédons à l'AMDE **Processus** et nous obtenons ainsi une description de l'ouvrage à la fin de sa construction, en particulier ses modes de défaillance potentiels liés aux défauts de conception et de réalisation.

Ensuite, nous réalisons une AMDE **Produit** sur un ouvrage qui sera de qualité variable en fonction de sa fabrication. Outre les défaillances liées à l'exploitation de l'ouvrage, l'AMDE

Produit met alors en évidence l'influence du processus de conception et réalisation sur son comportement futur. Notons que cette démarche est analogue à celle adoptée par [LAIR,00] pour les produits du bâtiment.

II.2.2.AMDE Processus

Avec l'AMDE Processus, nous recherchons les modes de défaillance introduits lors des étapes du processus de conception et réalisation du système.

L'AMDE Processus se présente classiquement sous forme d'un tableau : [LAIR,00]

Opérations	Modes	Causes
①	②	③

Tableau 3.9 : Structure d'une AMDE Processus classique

Nous adaptons cette analyse à notre contexte. Tout d'abord, nous simplifions l'analyse des opérations en ne retenant, pour chaque composant, que les principales opérations du processus de conception et réalisation :

- pour la conception : les reconnaissances, les études préliminaires, d'avant-projet et de projet ;
- pour la réalisation : l'exécution du projet et les travaux.

Cette simplification ne permet pas de garantir l'exhaustivité des défaillances de la conception et de la réalisation, mais est suffisante pour apprécier les lacunes du processus susceptibles d'avoir des conséquences en phase d'exploitation du barrage.

Ensuite, nous focalisons notre analyse, non pas sur les causes des modes de défaillance, mais plutôt sur leurs effets, car ils traduisent les répercussions futures dans la vie de l'ouvrage (Tableau 3.10).

n°	composant	opération du processus	mode de défaillance	effets possibles de la défaillance du processus
1	fondation amont injectées	CONCEPTION : . reconnaissances géologiques et géotechniques . études géologiques et géotechniques . études de renforcement des fondations	. reconnaissances insuffisantes . études géologiques insuffisantes . étude du renforcement des fondations insuffisante	. erreurs possibles du projet : - fondations amont diaclasées ou fissurées - résistance mécanique faible - capacité portante faible - présence de poches d'argile - présence de plans de glissement horizontal
		REALISATION : . réalisation des excavations	. excavations non conformes aux études . contrôle géotechnique insuffisant après excavations	. résistance mécanique superficielle faible . partie superficielle des fondations fissurée
		. réalisation des forages	. forages non conformes aux études	. mauvais traitement des fondations amont
		. réalisation des injections	. injections non conformes aux études	. résistance au cisaillement faible . capacité portante faible . fenêtre dans le voile d'injection

Tableau 3.10 : AMDE Processus adaptée aux barrages (extrait : barrage poids)

Dans l'application aux barrages, nous avons réalisé l'AMDE Processus pour les ouvrages poids, qui est reportée de façon complète en annexe 5. Au final, ce sont quelques 80 effets (aux granularités intermédiaire et inférieure) de la défaillance du processus de conception et réalisation qui sont ainsi mis en évidence et qui sont susceptibles de produire ensuite de nouvelles défaillances en phase d'exploitation.

II.2.3.AMDE Produit

A partir de l'AMDE Processus, nous avons une description précise des défauts et des erreurs possibles de l'ouvrage à la fin de sa construction. Nous recherchons avec l'AMDE Produit ses différents modes de défaillance en service, liés au processus de conception et réalisation mais aussi aux aléas pouvant apparaître lors de son exploitation.

L'AMDE Produit doit être adaptée notre contexte et à nos objectifs de structuration des informations et de modélisation des scénarios. Pour cela et afin de bien rendre compte des liens de causalité entre les phénomènes et les modes de défaillance dans les mécanismes, nous définissons rigoureusement chaque paramètre du tableau AMDE Produit et la façon dont il est formellement obtenu : cause, mode de défaillance, effet, symptôme et moyen de détection (Tableau 3.11).

n°	composant	fonction	mode de défaillance	cause possible de la défaillance	effet possible de la défaillance	symptôme de la défaillance	moyen de détection
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧

Tableau 3.11 : Structure de l'AMDE Produit adaptée aux barrages

① et ② Les composants et leur numéro

Les *composants* et leur *numéro* de nomenclature correspondent à la décomposition structurelle à la granularité intermédiaire.

③ Les fonctions

Il s'agit des *fonctions de conception* des composants obtenues à partir de l'analyse fonctionnelle.

④ Les modes de défaillance

Nous distinguons deux types de mode de défaillance :

- la *défaillance (totale) d'une fonction*, pouvant correspondre, d'une part à une fonction qui était réalisée et qui ne l'est plus, d'autre part à une fonction qui n'a jamais été réalisée ;
- la *dégradation d'une fonction*, qui correspond à une fonction partiellement ou mal réalisée.

⑤ Les causes possibles de la défaillance

Nous obtenons les *causes* d'une défaillance d'un composant à partir des Blocs diagrammes Fonctionnels. Elles peuvent avoir quatre origines possibles :

- les différents flux (de charges, hydraulique, hydrodynamique et thermique) sollicitant le composant ;
- les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants ;
- l'état intrinsèque du composant (caractéristiques propres ou dégradation à la granularité intermédiaire du composant) ;
- le processus de conception ou de réalisation du composant.

⑥ Les effets possibles de la défaillance

De façon analogue aux causes, les BdF donnent les *effets* possibles d'une défaillance. Nous distinguons trois catégories de conséquences, selon qu'elles portent sur :

- les flux émis par le composant ;
- les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants ;
- l'état intrinsèque du composant.

⑦ Les symptômes et ⑧ leurs moyens de détection

Les effets des défaillances se manifestent par des *symptômes*, qui sont détectés par différents *moyens de détection* associés aux symptômes.

Remarquons les principales adaptations par rapport aux pratiques rencontrées ([LAIR,00], [ISDF], [ZWINGELSTEIN,95], [VILLEMEUR,88]) :

- ❶ nous avons pris soin de ne jamais mélanger les granulométries d'analyse des défaillances. Nous focalisons notre recherche à une granularité unique, à l'échelle du composant, et nous verrons par la suite comment examiner les répercussions sur le système global. Nous obtenons ainsi une analyse homogène des paramètres ;
- ❷ nous recherchons les *causes* des défaillances avec la même rigueur que leurs *effets* : cela nous permettra d'enchaîner par la suite des séquences consécutives de modes de défaillance ;
- ❸ nous groupons tous les *effets* dans une seule catégorie, tous étant susceptibles de produire de nouveaux modes de défaillance. Cela évite de distinguer les effets *directs* ou *indirects*, *locaux* ou *globaux*... ou d'autres nuances que l'on trouve dans la littérature, mais qui sont en pratique difficiles à mettre en œuvre ;
- ❹ nous introduisons une recherche nouvelle, les *symptômes*, qui n'existent pas dans les AMDE traditionnelles.

Nous présentons au tableau 3.12 un extrait d'AMDE Produit réalisée pour les barrages poids et concernant les *fondations amont*. Les tableaux complets, reportés en annexe 5, analysent successivement les 8 composants d'un profil transversal type et fournissent quelque 30 *modes de défaillance*, 80 *causes*, 60 *effets* et 90 *symptômes*.

Il faut mentionner ici la difficulté, voire l'impossibilité de recenser exhaustivement tous les *causes* et *effets* possibles des modes de défaillance. En effet, une démarche systématique et itérative donne des causes et effets très nombreux et divers. Il est donc nécessaire d'intégrer une part d'expertise et d'établir un tri des informations obtenues. Notre constat rejoint l'opinion émise dans [VILLEMEUR,88] sur l'exhaustivité des causes des modes de défaillance.

Ainsi, si nous pouvons considérer que l'ensemble des modes de défaillance a été envisagé (dans les limites de la précision de l'analyse fonctionnelle préalable), nous n'avons retenu que les causes et effets pertinents et susceptibles d'apparaître dans les mécanismes de vieillissement.

II.2.4. Synthèse de l'AMDE

En synthèse de l'AMDE (Processus et Produit), nous disposons d'une liste exhaustive des modes de défaillance des composants des barrages et de l'essentiel de leurs causes, effets et symptômes associés.

Les adaptations méthodologiques de l'AMDE que nous proposons pour atteindre nos objectifs ont été développées indépendamment du domaine d'application du génie civil, même si nous ne les avons mises en œuvre que sur les seuls barrages. Leurs transpositions vers d'autres ouvrages pourraient être alors envisagées a priori sans trop de difficultés.

Sur la base de ce travail, nous pouvons proposer une première classification formelle des informations relatives aux défaillances des barrages dans quatre catégories :

- ❶ les modes de défaillance (d'un composant) : → les *fonctions non réalisées* et *dégradées*.
- ❷ les causes (des modes de défaillance) :
→ à rechercher dans les différents *flux reçus* par le composant, les *contacts* avec les milieux extérieurs ou les composants environnants, l'*état intrinsèque* du composant et le *processus de conception ou de réalisation*.
- ❸ les effets (des modes de défaillance) :
→ à rechercher sur les *flux émis* par le composant, les *contacts* avec les milieux extérieurs ou les composants environnants et l'*état intrinsèque* du composant.
- ❹ les symptômes : → les manifestations des effets des défaillances.

n°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
1	Fondations amont injectées						
	1 - limiter les flux hydrauliques .1 limiter les eaux d'infiltration provenant de la retenue et/ou des sédiments .2 limiter les eaux d'infiltration vers les fondations aval non injectées .3 limiter les eaux d'infiltration provenant de la zone amont	la fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . fissuration . dissolution . érosion	- Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans les fondations amont . eaux d'infiltration dans les fondations aval - Flux de charges . sous-pressions dans les fondations amont injectées . sous-pressions dans les fondations aval drainées	- Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans les fondations amont . eaux d'infiltration dans les fondations aval - Flux de charges . sous-pressions dans les fondations amont injectées . sous-pressions dans les fondations aval drainées	. écoulement d'eau . mesures des débits de drainage . piézométrie . piézométrie	. géo-radar . empotement - déversoir - débitmètre . piézomètres . cellules de pressions interstitielles . piézomètres . cellules de pressions interstitielles
	2 - résister aux sollicitations mécaniques 1 résister au poids propre du plot n°1 .2 résister au poids propre des sédiments .3 résister au poids propre du masque amont	la fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . dissolution . érosion . fissuration	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	. déplacement des joints de roche . mesures de la perméabilité . fissures	-observation visuelle . essais in situ de perméabilité -observation visuelle
	3 - préparer les surfaces de contact .1 préparer la surface de contact du plot n°1 .2 préparer la surface de contact du masque amont	la fonction "préparer les surfaces de contact" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	- Contacts . déformation du plot n°1 . déformation du masque amont	- Contacts . déformation du plot n°1 . déformation du masque amont	. mesures des déplacements du plot . mesures des déplacements du masque amont	-observation visuelle - mesures topographiques . planimétrie . nivellement . mesures d'alignement - pondulics directs ou inversés
	4 - résister aux sollicitations hydromécaniques .1 résister à l'érosion due aux infiltrations provenant de la retenue	la fonction "résister aux sollicitations hydromécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans les fondations amont injectées	- Etat intrinsèque du composant . érosion - Flux de charges . sous-pressions dans les fondations amont injectées . sous-pressions dans les fondations aval drainées	- Etat intrinsèque du composant . érosion - Flux de charges . sous-pressions dans les fondations amont injectées . sous-pressions dans les fondations aval drainées	. dépôts de particules fines à la sortie des drains . mesures de la perméabilité . piézométrie . piézométrie	. observation visuelle . filtration des eaux de fuite . analyses minéralogiques et chimiques . essais in situ de perméabilité . piézomètres . cellules de pressions interstitielles . piézomètres . cellules de pressions interstitielles
	5 - résister aux sollicitations chimiques .1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration du sol en amont, de la retenue ou des sédiments	la fonction "résister aux sollicitations chimiques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation . qualité de l'eau . composition	- Etat intrinsèque du composant . dissolution	- Etat intrinsèque du composant . dissolution	. mesures de la teneur en sels minéraux des eaux de drainage . mesures de la perméabilité	. analyses chimiques . essais in situ de perméabilité

Tableau 3.12 : AMDE Produit (extrait : barrage poids)

II.2.5. Construction des scénarios de vieillissement

A ce stade, nous pouvons construire les scénarios de vieillissement s'opérant dans un barrage, en enchaînant les *causes* aux *modes de défaillance*, puis aux *effets*, ces derniers se traduisant par des *symptômes*. La démarche se résume dans la figure 3.22.

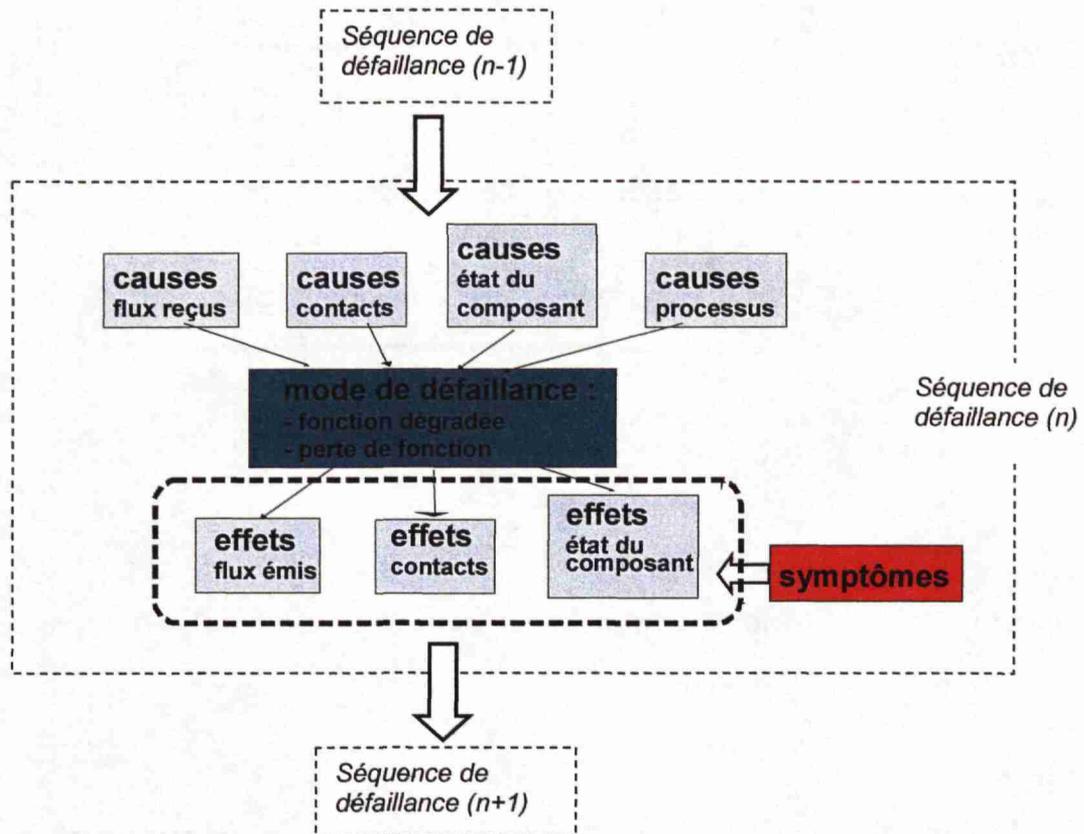


Figure 3.22 : Schéma conceptuel pour l'écriture des scénarios de vieillissement

Cette modélisation consiste à enchaîner des séquences chronologiques de défaillance, représentant les mécanismes physiques se produisant au sein du système et conduisant à des pertes ou dégradations de fonctions. Les séquences de défaillance sont déclenchées dès que les *effets* d'un mode de défaillance sont suffisamment importants pour devenir des *causes* d'un nouveau mode de défaillance. Il apparaît donc l'existence d'un seuil (*effet* suffisamment important ou pas) correspondant à la logique binaire de la méthode AMDE.

Nous appliquons cette représentation au mécanisme de dissolution du masque amont d'un barrage poids conduisant à la perte d'étanchéité et faisant apparaître deux séquences fonctionnelles de défaillance (Figure 3.23).

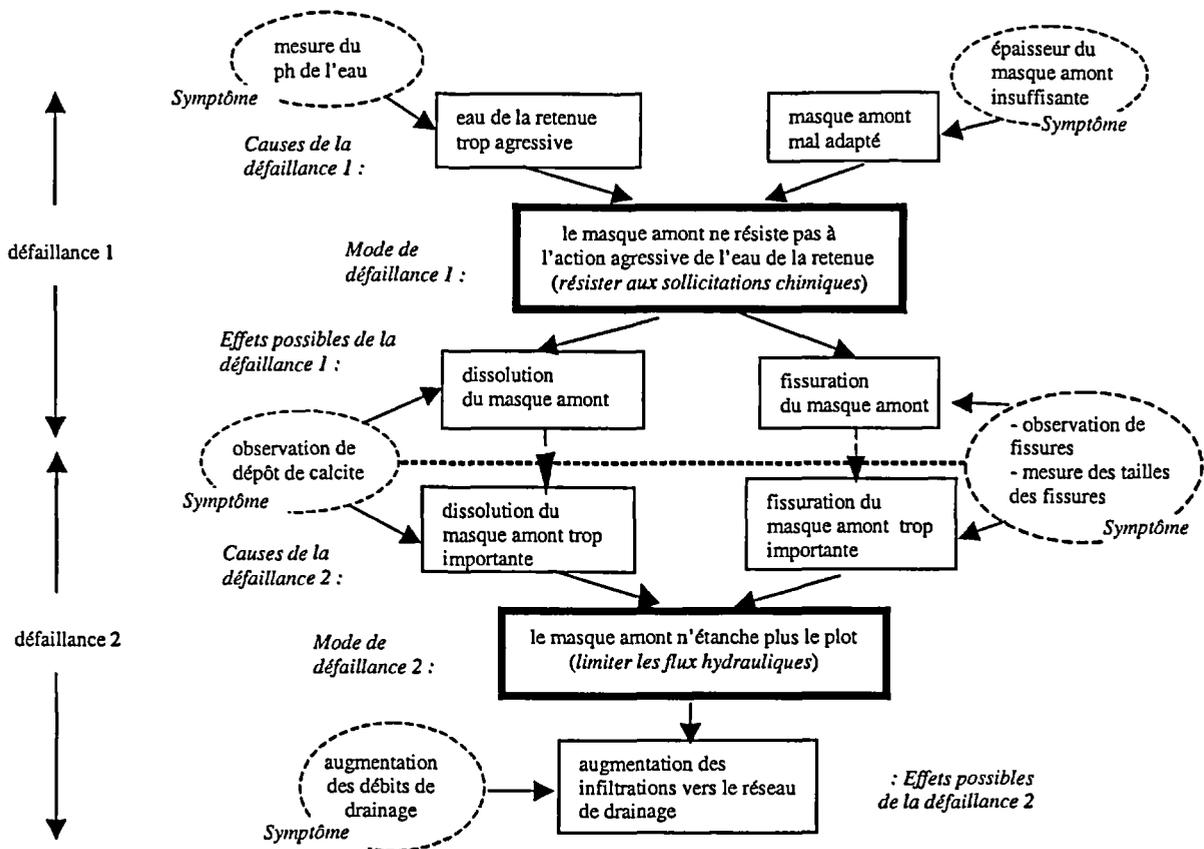


Figure 3.23 : Scénario de vieillissement du masque amont d'un barrage poids

II.3. Représentation des scénarios de vieillissement sous forme de graphe causal

II.3.1. Principe du modèle de vieillissement

A partir de l'analyse AMDE, nous avons structuré les informations relatives au vieillissement et nous avons construit un schéma conceptuel pour l'écriture des scénarios. Sur ces bases, les modèles issus du raisonnement qualitatif vont nous permettre de proposer :

- 1/ la représentation des scénarios de vieillissement (II.3) ;
- 2/ l'analyse de la criticité (partie 4).

Pour ce faire, nous utilisons les graphes causaux pour représenter les scénarios : chaque mécanisme est modélisé dans un graphe orienté décrivant les processus fonctionnels de dégradation et les enchaînements de variables correspondants.

Compte tenu de la structuration des informations obtenues avec l'AMDE, nous proposons trois catégories de variables :

- les variables *fonction*, correspondant aux *modes de défaillance* et notées F_i ;
- les variables *phénomène* regroupant les *causes* et *effets* des modes de défaillance, notées P_i ;
- les variables *symptôme*, correspondant aux manifestations des *phénomènes* et notées S_i .

Les scénarios sont alors modélisés sous forme d'un graphe orienté (Figure 3.24) :

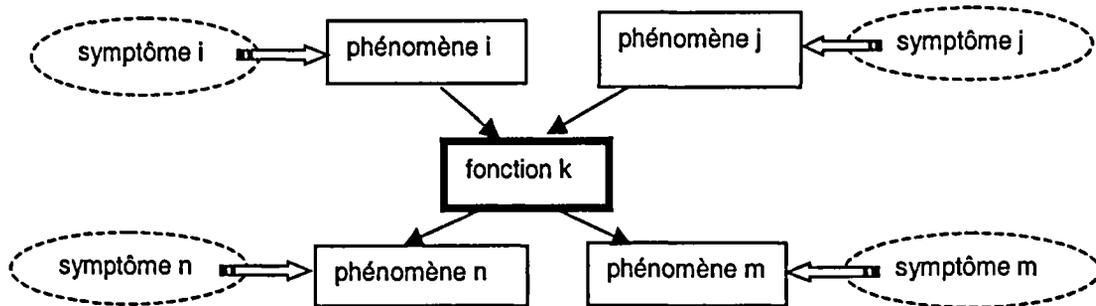


Figure 3.24 : Structure du graphe orienté pour la représentation des scénarios

Le principe du modèle de vieillissement est le suivant :

Les variables *phénomène* sont renseignées par les variables *symptôme*, qui traduisent la manifestation des mécanismes de vieillissement (*symptôme* \Rightarrow *phénomène*).

Dans chaque scénario modélisé sous forme d'un graphe orienté, certaines combinaisons de variables *phénomène* vont conduire à la dégradation d'une (ou des) variable(s) *fonction*, la perte de performance de cette dernière produisant à nouveau une nouvelle séquence de phénomènes (*phénomènes* \Rightarrow *fonction* \Rightarrow *phénomènes*).

L'enchaînement des défaillances sous forme « de *phénomènes* impliquant des dégradations de *fonctions*, impliquant de nouveaux *phénomènes* » constitue le processus fonctionnel de dégradation de l'ouvrage.

II.3.2. Prise en compte de l'état des variables et de leur dégradation au cours du temps

Cette modélisation permet d'utiliser les propriétés des modèles qualitatifs.

En particulier, nous pouvons décrire, au cours du temps, l'état des variables (fonction, phénomène et symptôme) et l'évolution de leur dégradation au moyen de deux attributs rattachés à chaque variable :

❶ un attribut du premier ordre renseignant sur l'état des variables : l'attribut d'état

A un instant (t) donné de la vie d'un ouvrage, les attributs d'état décrivent la performance des fonctions $F_i(t)$, l'ampleur des phénomènes $P_i(t)$ et la normalité des symptômes $S_i(t)$.

❷ un attribut du deuxième ordre renseignant sur l'évolution des variables :

A un instant (t) de la vie d'un ouvrage, les attributs du deuxième ordre décrivent la dynamique des dégradations des variables : la perte de performance des fonctions $(dF_i/dt)(t)$, l'amplification des phénomènes $(dP_i/dt)(t)$ et la déviation des symptômes $(dS_i/dt)(t)$.

A titre d'exemple, nous représentons le graphe orienté du mécanisme de tassement des fondations, appliqué aux barrages en remblai (Figure 3.25). Le scénario enchaîne quatre séquences de défaillance : déformation des fondations, déformation du remblai, dégradation de la résistance du remblai et dégradation de son étanchéité.

Dans une telle représentation, les attributs d'état et d'évolution rattachés à chaque variable indiquent son état et son évolution au cours du temps, permettant ainsi de rendre compte des défaillances partielles.

Par ailleurs, le graphe orienté fait apparaître une même variable en plusieurs points du scénario, comme c'est le cas du phénomène P_4 (SOUS-PRESSION DANS LE REMBLAI). Cela permet de rendre compte des mécanismes bouclés et s'auto-amplifiant : la dégradation de l'étanchéité du remblai (F_4) va produire des sous-pressions (P_4), qui vont à leur tour diminuer la résistance du remblai (F_3) et amplifier la dégradation de (F_4).

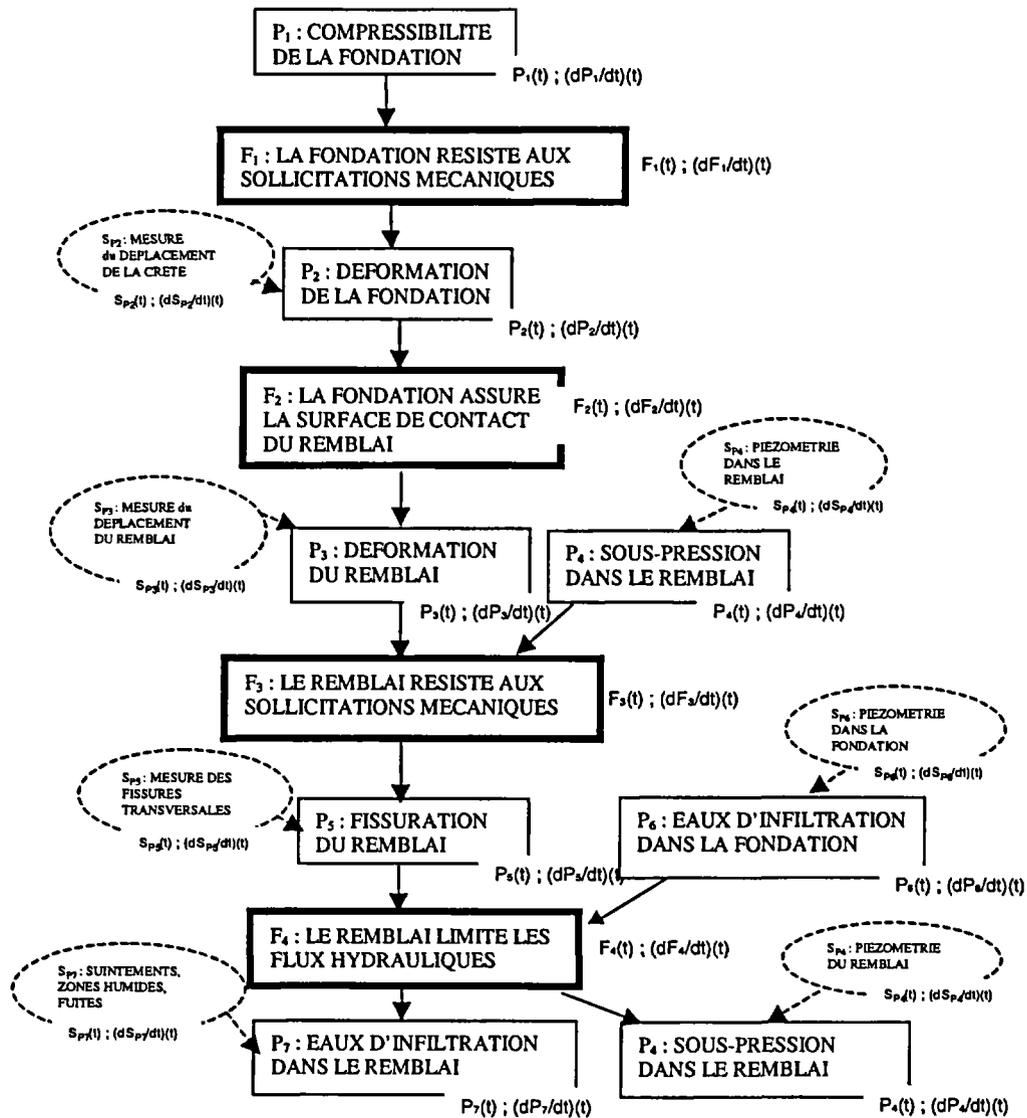


Figure 3.25 : Mécanisme de tassement des fondations sous forme de graphe orienté

II.3.3. Synthèse

Au final, le modèle fonctionnel de vieillissement présente les avantages suivants :

- ① il autorise la prise en compte des états intermédiaires des différentes variables : performance des fonctions, ampleur des phénomènes et normalité des symptômes. Ainsi, nous pouvons nous affranchir de la logique binaire de l'AMDE et de la plupart des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement ;
- ② il intègre l'évolution des dégradations (ou des variables) au cours du temps et leur dynamique ;
- ③ les scénarios peuvent être bouclés sur eux-mêmes et il est alors possible de modéliser les mécanismes de vieillissement non chronologiques, ce qui est également difficile avec les techniques classiques de construction de scénarios (MAE et MAC) ;
- ④ nous pouvons envisager l'étude des évolutions des dégradations au cours du temps, au moyen de fonctions de transfert entre les différentes variables : symptôme vers phénomène, phénomène vers fonction et fonction vers phénomène.

Le modèle de vieillissement que nous proposons a été développé indépendamment du domaine d'application du génie civil. Nous pensons donc que son utilisation sur d'autres ouvrages d'art pourrait être envisagée a priori sans trop de difficultés, en particulier pour les ouvrages non linéaires : ponts, réservoirs....

III. Modélisation des mécanismes de vieillissement des barrages

Dans ce chapitre, nous appliquons le modèle de vieillissement, bâti autour de la méthodologie développée au chapitre II, au contexte particulier des barrages. Tout d'abord, nous revenons sur la structuration des informations relatives aux dégradations et nous proposons une classification formelle des fonctions (III.1), phénomènes (III.2) et symptômes (III.3). Ensuite, nous développons la modélisation des mécanismes de vieillissement à partir du recueil d'expertise (III.4).

III.1. Classification des fonctions

III.1.1. Les fonctions génériques

A partir de l'analyse fonctionnelle appliquées à des barrages types, nous disposons de l'ensemble des fonctions de conception de granularité intermédiaire. En vue d'une utilisation dans le modèle de vieillissement, nous proposons leur classification dans des familles que nous appelons « fonctions génériques ».

L'analyse fonctionnelle a été réalisée de façon complète sur les barrages poids et partiellement sur les ouvrages en remblai. Elle permet d'obtenir l'ensemble des fonctions de conception, réparties selon leur origine apparaissant sur les Blocs diagrammes Fonctionnels : les flux hydrauliques, les flux de charges et les contacts. Il est alors possible de distinguer :

- ❶ **les fonctions de résistance** (solllicitations mécaniques, érosion interne, thermique, chimique), dont l'origine est liée à un flux hydraulique ou de charges reçu par un composant ;
- ❷ **les fonctions liées aux contacts** entre composants : préparation des interfaces et des appuis ;
- ❸ **les fonctions liées aux écoulements** dans les structures : collecter ou drainer, étancher ou limiter les infiltrations, évacuer.

Sur ces bases, nous regroupons les fonctions de conception dans des familles de *fonctions génériques*, liées à l'interaction en jeu. Leur sémantique est du type :

VERBE (désignation de l'action remplie par le composant) + COMPLEMENT (description du type d'interaction : flux hydraulique, sollcitation mécanique ou contact)

Nous proposons la liste des fonctions génériques suivante (Figure 3.26) :

- résister aux sollcitations mécaniques (*resist mechanic strengths*)
- résister aux sollcitations hydromécaniques (*resist hydromechanic strengths*)
- résister aux sollcitations thermiques (*resist thermic strengths*)
- résister aux sollcitations chimiques (*resist chemical strengths*)
- préparer les surfaces de contact (*prepare contact surfaces*)
- collecter les flux hydrauliques (*collect flood*)
- limiter les flux hydrauliques (*reduce flood*)
- évacuer les flux hydrauliques (*drain off flood*)

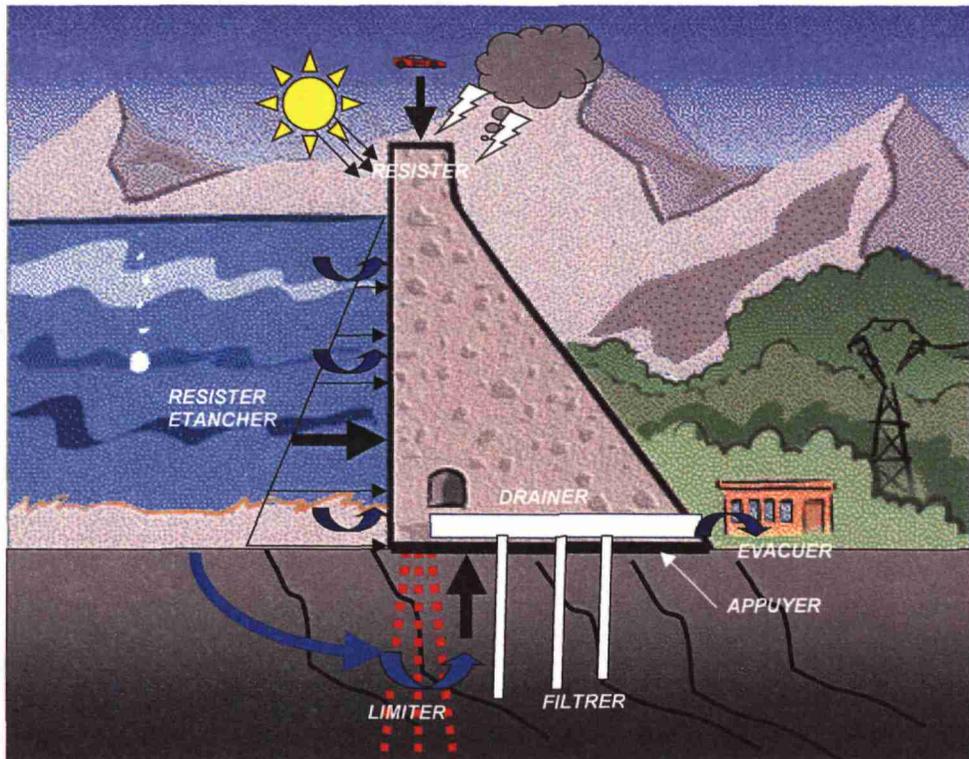


Figure 3.26 : Les fonctions génériques (barrage poids)

Nous reportons en annexe 6 la description physique des fonctions génériques.

III.1.2. Les fonctions de précision

Nous regroupons, dans chaque famille de fonction générique, les fonctions de conception accomplies par les composants. Dans la suite, nous appelons **fonctions de précision** les fonctions de conception d'un composant indiquant avec détails l'action accomplie par ce composant.

La sémantique des *fonctions de précision* est du type :

VERBE (action) + **COMPLEMENT** (description du flux ou du contact)
+ **LIEU** (lieu d'application ou sens des interactions)

Nous indiquons au tableau 3.13 les fonctions génériques et de précision accomplies par le *plot* d'un barrage poids type. La liste complète des fonctions de conception des ouvrages poids, classées par composant, est reportée en annexe 6. Au final, nous obtenons 8 fonctions génériques, regroupant quelque 80 fonctions de précision.

III.1.3. Synthèse

A partir de la liste exhaustive des fonctions de conception des composants obtenue par l'analyse fonctionnelle, nous proposons leur classification au sein de familles de fonctions génériques, rassemblant les 80 fonctions de précision (pour les barrages poids).

Ces fonctions génériques et de précision sont particulièrement intéressantes dans la suite de notre travail : les premières synthétisent les informations en uniquement 8 fonctions (pour les ouvrages poids) et seront mises en œuvre dans les graphes orientés pour modéliser les scénarios ; les secondes permettent d'accéder au détail des fonctionnalités de chaque composant. En outre, elles se prêtent bien à une gestion ultérieure dans des bases de données.

plot	<p>1 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>.1 résister à la poussée hydrostatique amont transmise par le masque amont</p> <p>.2 résister aux sous-pressions des fondations amont injectées</p> <p>.3 résister aux sous-pressions des fondations aval non injectées</p> <p>.4 résister au poids de la recharge aval</p> <p>.5 résister à la poussée hydrostatique aval</p> <p>.6 résister à la poussée des sédiments transmise par le masque amont</p> <p>.7 résister à la poussée des glaces transmise par le masque amont</p> <p>.8 résister au poids propre de l'évacuateur</p> <p>.9 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête</p> <p>2 - préparer les surfaces de contact</p> <p>.1 servir d'appui au masque amont</p> <p>.2 servir d'appui au réseau de drainage</p> <p>.3 préparer la surface de contact de la recharge aval</p> <p>.4 préparer la surface de contact de la crête</p> <p>.5 préparer la surface de contact de l'évacuateur de crues</p> <p>.6 servir d'appui à la galerie de drainage</p> <p>3 - résister aux sollicitations thermiques</p> <p>.1 résister aux cycles de gel-dégel</p> <p>.2 résister aux gradients thermiques élevés</p> <p>4 - résister aux sollicitations chimiques</p> <p>.1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration</p> <p>5 - limiter les flux hydrauliques</p> <p>.1 limiter les infiltrations provenant de la retenue</p> <p>.2 limiter les infiltrations d'eaux pluviales</p>
-------------	--

Tableau 3.13 : Fonctions génériques et de précision du plot (barrage poids)

III.2. Classification des phénomènes

III.2.1. Familles de phénomènes

A partir de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets, nous connaissons les phénomènes (c'est-à-dire les causes et les effets des modes de défaillance) intervenant dans les mécanismes de vieillissement des barrages. De façon analogue aux fonctions, nous proposons une classification des phénomènes en vue d'une utilisation dans le modèle de vieillissement.

Selon leur origine, nous distinguons les familles suivantes :

❶ « état intrinsèque du composant »

Cette famille regroupe les phénomènes se produisant au sein du composant étudié.

❷ les différents « flux hydraulique, de charges et thermique »

Cette famille contient les phénomènes liés aux flux mis en évidence dans les BdF.

❸ « processus de conception et de réalisation »

Cette famille est destinée à prendre en compte les phénomènes liés au processus de conception et de réalisation des barrages.

III.2.2. Recensement des phénomènes

Nous avons réalisé de façon complète l'AMDE sur les barrages poids, le travail étant partiellement réalisé pour les remblais et restant à produire pour les autres types (voûtes et profils divers). A partir de cette analyse, nous recensons les phénomènes intervenant dans les mécanismes des ouvrages poids, puis nous établissons les choix terminologiques pour leur dénomination et les regroupements des phénomènes synonymes. Ces choix sont établis en fonction des termes les plus utilisés par les experts, mais restent néanmoins ouverts à discussion. Le détail de ce travail, réalisé pour chaque mécanisme de vieillissement, est reporté en annexe 10. Dans cette dernière, nous indiquons, pour chaque terme que nous retenons pour un phénomène donné, les termes synonymes ou apportant une précision supplémentaire (à la granularité inférieure par exemple), utilisés par les experts.

La sémantique des phénomènes est du type :

NOM (du phénomène) + *COMPOSANT* (lieu où le phénomène se produit ou se rattache)

Au final, nous regroupons l'ensemble des causes et effets des modes de défaillance relatifs aux barrages poids dans une liste d'environ 20 phénomènes de granularité intermédiaire. Nous proposons une terminologie (bilingue) des phénomènes et une classification selon leur famille :

→ « état intrinsèque du composant »

DEFORMATION (*DEFORMATION*) ; FISSURATION (*CRACKING*) ; DISSOLUTION (*DISSOLUTION*) ; EROSION (*EROSION*) ; COLMATAGE (*CLOGGING*)

→ « flux hydraulique »

EAUX D'INFILTRATION (*WATER SEEPAGE*) ; MARNAGE DE LA RETENUE (*RESERVOIR LEVEL FLUCTUATION*) ; QUALITE DE L'EAU (*WATER COMPOSITION*) ; HUMIDITE DU MILIEU (*ENVIRONMENT MOISTURE*) ; STAGNATION DE L'EAU (*WATER STAGNATION*)

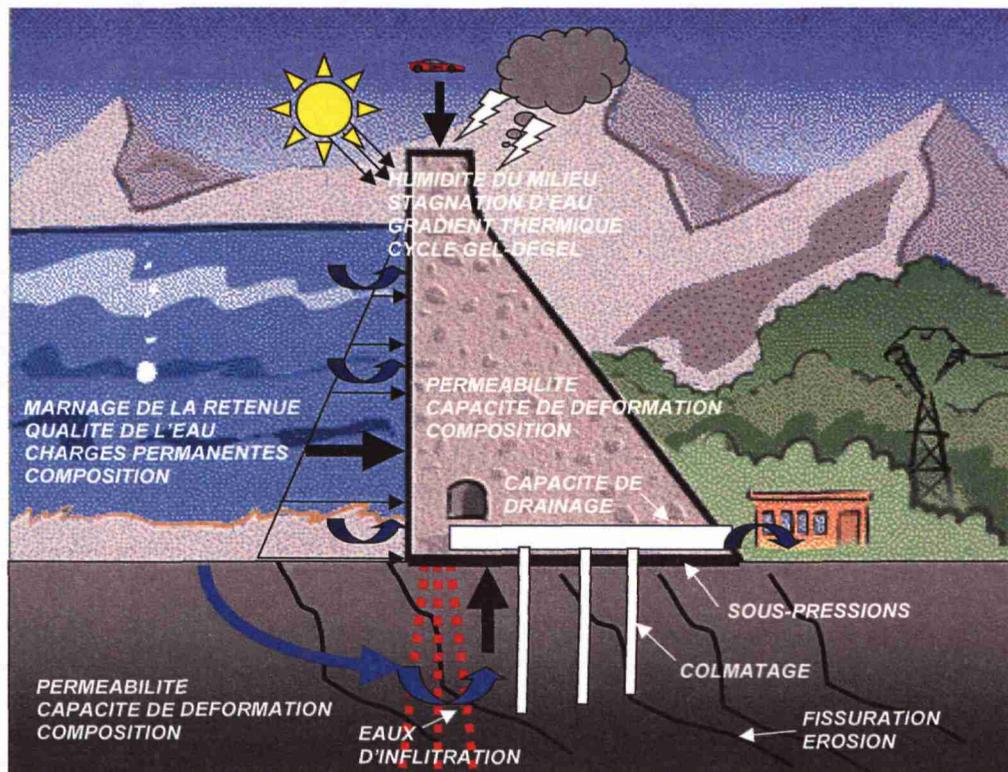


Figure 3.27 : Les phénomènes (barrage poids)

→ « flux de charges »

CHARGES PERMANENTES (*PERMANENT LOADS*); SOUS-PRESSIONS (*UPLIFT PRESSURE*)

→ « flux thermique »

GRADIENT THERMIQUE (*THERMIC GRADIENT*) ; CYCLE GEL-DEGEL (*FREEZING and THAWING*)

→ « processus de conception et de réalisation »

CAPACITE DE DRAINAGE (*DRAINAGE ABILITY*); CAPACITE DE DEFORMATION (*DEFORMATION ABILITY*) ; PERMEABILITE (*PERMEABILITY*) ; COMPOSITION (*INTERNAL COMPOSITION*)

III.2.3. Description physique des phénomènes

A partir de l'analyse des recueils d'expertise (partie 2), nous établissons un glossaire des phénomènes recensés dans lequel nous indiquons :

- la définition retenue pour le phénomène ;
- la description du processus physique en jeu ;
- les composants du barrage concernés par le phénomène ;
- les scénarios de vieillissement dans lesquels il intervient.

Cette synthèse d'environ 20 phénomènes relatifs aux barrages poids est reportée en annexe 7. Nous indiquons au tableau 3.14 une fiche type concernant la *dissolution*.

DISSOLUTION DISSOLUTION	- fondation amont - plot - masque amont	<p>La DISSOLUTION représente le phénomène physico-chimique d'attaque des matériaux des fondations (roche et coulis d'injection), du corps du barrage (béton ou maçonnerie) ou du masque amont par l'eau et les gaz chargés d'agents chimiques agressifs. Le phénomène physico-chimique est commandé par l'aptitude de l'eau et des gaz chargés d'agents agressifs à diffuser dans les matériaux.</p> <p>La DISSOLUTION des plots des barrages en béton est due, dans environ 80% des cas, à l'action des eaux pures. Ces dernières, très faiblement minéralisées, sont typiquement des eaux de fonte des neiges. Bien que possédant un pH voisin de 7, elles sont capables de dissoudre des constituants de la pâte de ciment, en particulier la chaux libre qui est le plus soluble d'entre eux. Une partie de cette chaux, dissoute et entraînée par l'eau, peut réagir avec l'anhydride carbonique atmosphérique ou dissous, pour former du carbonate de calcium. Les dépôts blancs de carbonate de calcium dans les galeries, les dispositifs de drainage et les parements aval des plots sont des symptômes du phénomène de DISSOLUTION.</p> <p>La capacité de l'eau à dissoudre les composés calcites (chaux, carbonate, silicate et aluminates) dépend essentiellement de la concentration chimique en ions calcium et magnésium, mais aussi de la présence d'anhydride carbonique et des paramètres physiques tels que la vitesse de circulation des eaux d'infiltration au contact du matériau et la température.</p> <p>Dans 20% des cas, la DISSOLUTION des plots des barrages en béton est produite par des eaux acides ou par les sulfates. Ces derniers sont le fait le plus souvent de sulfates de magnésium (eaux de mer), de sodium, de calcium ou de sulfates provenant de l'oxydation du sulfure de fer (pyrite) contenu dans certains granulats. L'action des sulfates peut revêtir des formes différentes selon leur concentration : soit une cristallisation de sels complexes s'accompagnant d'une très forte augmentation de volume avec perte de cohésion du liant, soit une décomposition des silicates de calcium avec une perte de résistance importante.</p> <p>La DISSOLUTION des fondations rocheuses des barrages en béton fait intervenir les mêmes types de mécanismes. Les matériaux susceptibles d'être attaqués par les eaux d'infiltrations dans les fondations sont les roches elles-mêmes, les matériaux de remplissage des joints et les coulis d'injection de traitement des fondations.</p>	<p>1.1 – <i>dissolution et érosion dans les fondations</i> composant concerné : fondation amont</p> <p>1.2 – <i>vieillessement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage</i> composant concerné : fondation amont</p> <p>2.3 – <i>dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu</i> composant concerné : plot</p>
----------------------------	---	--	---

Tableau 3.14 : Description physique des phénomènes (extrait : barrage poids)

III.2.4. Synthèse

A partir de l'AMDE et du recueil d'expertise, nous avons recensé, classé et nommé les phénomènes de granularité intermédiaire intervenant dans les mécanismes de vieillissement des barrages poids. Pour chacun d'eux, nous proposons une description physique et nous indiquons dans quel scénario il intervient.

Cette synthèse des phénomènes sert de base, avec les fonctions génériques, à la construction des graphes orientés modélisant les scénarios de vieillissement. Ils pourront être gérés ultérieurement dans une base de données informatique.

III.3. Classification des symptômes

III.3.1. Généralités

Les *symptômes* jouent un rôle primordial dans l'analyse des défaillances et le diagnostic des ouvrages en service, car ils vont permettre de déterminer les éventuels mécanismes en jeu.

Les symptômes traduisent donc la manifestation des phénomènes.

Dans le modèle de vieillissement que nous proposons, les variables « symptôme » permettent de renseigner les variables « phénomène ». Ainsi, un symptôme constitue un indicateur, plus ou moins direct, d'un (ou des) phénomène(s) auquel il est associé. Nous proposons une classification des symptômes des barrages et nous examinons leurs liens avec les phénomènes.

III.3.2. Les différents types de symptômes

A partir de l'AMDE appliquée aux barrages poids, nous obtenons les symptômes correspondant à chaque phénomène. Au total, ce sont quelques 90 symptômes, liés aux observations visuelles ou aux mesures d'auscultation, qui sont répertoriés. Nous reportons cette synthèse en annexe 8.

Selon la façon dont ils sont obtenus, nous distinguons trois catégories de symptômes :

- ❶ les symptômes visuels
- ❷ les symptômes mesurés
- ❸ les symptômes calculés

III.3.2.1. Les symptômes visuels

Le moyen de détection associé aux symptômes visuels est l'observation visuelle de l'expert ou de l'exploitant. Les symptômes visuels correspondent donc à des anomalies perceptibles à l'œil.

L'observation visuelle est à l'origine de la détection de 90 % des anomalies des barrages et l'inspection visuelle tient donc une place prioritaire dans le dispositif de surveillance (partie 1 – II.2) [EDF-Cemagref,98]. Un symptôme visuel possède un caractère nécessairement subjectif, lié à l'observation de l'exploitant ou de l'ingénieur spécialisé. Le constat de tels symptômes conduit généralement à des investigations plus poussées, permettant d'obtenir alors de nouveaux symptômes (mesurés ou calculés) plus précis et d'interprétation plus aisée.

Nous proposons une terminologie (bilingue) des principaux symptômes visuels des barrages poids et une classification selon leur origine :

❶ « état intrinsèque d'un composant » :

FISSURES (CRACKS): STRUCTURALE (STRUCTURAL), PLONGEANTE (PLUNGING), VERTICALE (VERTICAL), HORIZONTALE (HORIZONTAL), OBLIQUE (OBLIQUE), FAIENCAGE (HAIRLINE), ECAILLAGE (SCALING) ;

OUVERTURE (OPENING): DE JOINTS (JOINTS), D'INTERFACE (ROCK-CONCRETE CONTACT), DE REPRISE DE BETONNAGE (CONSTRUCTION JOINT).

OBSERVATION DE DEPLACEMENTS (DISPLACEMENT OBSERVATION); OBSERVATION DE DEFORMATIONS LOCALES (OBSERVATION OF LOCAL DEFORMATIONS)

GRANULATS APPARENTS (VISIBLE AGGREGATES)

❷ « flux hydraulique » (à travers un composant) :

FUITES (LEAKAGE); SUINTEMENTS (SEEPAGE); ZONES HUMIDES (MOISTNESS AREA); DEPOT DE CALCITE (CALCIUM CARBONATE DEPOSIT); DEPOT DE PARTICULES SOLIDES (SOLID MATTER DEPOSIT)

III.3.2.2. Les symptômes mesurés

Nous distinguons deux catégories de symptômes mesurés en fonction du type de mesure :

- ceux issus d'une mesure d'auscultation du barrage ;
- ceux issus d'une mesure d'un essai in situ ou au laboratoire.

Les symptômes mesurés issus de l'auscultation du barrage ou symptômes auscultés sont obtenus à partir d'un instrument d'auscultation et correspondent donc à des mesures.

Nous indiquons au tableau 3.15 les principaux symptômes auscultés et les instruments de mesure associés et nous présentons en annexe 9 une synthèse des dispositifs d'auscultation des barrages.

Symptôme ausculté	Instrument de mesure
DEPLACEMENT ; TASSEMENT <i>DISPLACEMENT ; SETTLEMENT</i>	- pendule direct ou inversé - mesures topographiques : - planimétrie - nivellement - mesures d'alignement
DEFORMATION MECANIQUE <i>STRAIN</i>	- extensomètre "à corde vibrante" - extensomètre multipoint (distofo)
MESURE DES FISSURES <i>CRACK MEASURE</i>	- fissuromètres : - avec mesure au vernier - mesure au comparateur - avec capteur inductif - fissuromètre triaxial (vinchon)
PIEZOMETRIE <i>PIEZOMETRY</i>	- cellules à contre-pression ou à corde vibrante - piézomètre
DEBIT <i>FLOW</i>	- empolement - déversoir - débitmètre
CHARGE AMONT <i>UPSTREAM LOAD</i>	- limnimètre ; échelle de niveau

Tableau 3.15 : Symptômes auscultés des barrages

Les symptômes mesurés issus d'essais sont obtenus après des essais in situ ou en laboratoire et correspondent également à des mesures.

A titre d'exemple, nous indiquons au tableau 3.16 les principaux symptômes géotechniques mesurés et les essais associés. Cette liste n'est pas exhaustive et ne prend pas certains essais spécifiques, par exemple les essais de composition des roches, etc.

Symptôme mesuré issu d'un essai	Type d'essai (moyens de détection)
PERMEABILITE <i>PERMEABILITY</i>	- essai au perméamètre pour les sols (remblai et fondation) - essai Lefranc pour les sols (fondations)
GRANULOMETRIE <i>GRANULOMETRY</i>	- essai d'identification des sols (remblai et fondation)
MESURE DES FISSURES <i>CRACK MEASURE</i>	- carottage - diagraphie ou tomographie - géo-radar, émission acoustique
COMPACTE <i>COMPACITY</i>	- mesure du poids volumique en laboratoire (remblai et fondation) - essai au gammadensimètre ou densitomètre (remblai)

Tableau 3.16 : Les symptômes mesurés issus d'essais

III.3.2.3. Les symptômes calculés

Les symptômes calculés sont obtenus à partir d'un calcul faisant intervenir des symptômes auscultés. Les plus intéressants d'entre eux correspondent aux critères de stabilité intervenant dans les conditions d'états-limites des ouvrages.

Ces symptômes calculés constituent des indicateurs privilégiés utilisés par les experts en diagnostic. Ils prennent en compte :

- les mesures d'auscultation ;
- les caractéristiques intrinsèques de l'ouvrage : géométrie, résistances des matériaux... ;
- les caractéristiques des milieux extérieurs : niveau de la retenue, intensités des actions (séismes, sous-pressions...).

Nous donnons au tableau 3.17 la synthèse des critères de stabilité des barrages poids et en remblai. [ROLLEY,89], [ROYET,02a]

Etat-limite	symptôme calculé	phénomène associé
barrages poids : Résistance à l'effort tranchant dans le plot	CRITERE DE STABILITE AU CISAILLEMENT (<i>SHEAR FRICTION FACTOR</i>) : • $SFF = [(N - U) \cdot \tan \phi' + c' \cdot L] / T$	- FISSURATION DU PLOT - DEFORMATION DU PLOT
Résistance à l'effort tranchant à l'interface plot-fondation	CRITERE DE STABILITE AU CISAILLEMENT (<i>SHEAR FRICTION FACTOR</i>) : • $F = (N - U) \cdot \tan \phi' / T$ • $SFF = [(N - U) \cdot \tan \phi' + c' \cdot L] / T$	- FISSURATION DU PLOT ou de LA FONDATION - DEFORMATION DU PLOT
Ouverture de fissure	• LONGUEUR DE LA FISSURE (<i>CRACK LENGHT</i>) • CONTRAINTE NORMALE EFFECTIVE sur le parement amont (<i>TENSILE STRESS</i>)	- FISSURATION DU PLOT
Résistance à la compression (pour mémoire)	• CONTRAINTE NORMALE EFFECTIVE sur le parement aval (<i>COMPRESSIVE STRESS</i>)	- DEFORMATION DU PLOT
barrages en remblai : Résistance au glissement	• CRITERE DE STABILITE AU GLISSEMENT (Bishop ou Fellenius) (<i>SLIDING FACTOR</i>)	- GLISSEMENT DU REMBLAI
Résistance à l'érosion interne	• GRADIENT HYDRAULIQUE (<i>HYDRAULIC GRADIENT</i>)	- EROSION INTERNE DU REMBLAI

Tableau 3.17 : Synthèse des symptômes calculés

Développons l'exemple du symptôme calculé CRITERE DE STABILITE AU CISAILLEMENT relatif aux barrages poids, qui intervient dans la condition d'état-limite de résistance à l'effort tranchant : on cherche à vérifier la résistance au cisaillement de sections horizontales du plot ou de l'interface barrage-fondation soumis à différentes actions permanentes (poids propre, etc.), variables (poussée hydrostatique) et exceptionnelles (crue, séisme). [ROYET,02a]

Le symptôme calculé est obtenu en considérant (Figure 3.28) :

- les paramètres intrinsèques de l'ouvrage et son environnement : intensité des actions extérieures (N et T), paramètres de résistance au cisaillement des matériaux (c' , $\tan \phi'$) ;
- le symptôme ausculté PIEZOMETRIE qui permet d'obtenir l'intensité des sous-pressions (U).

Ce symptôme CRITERE DE STABILITE AU CISAILLEMENT correspond au coefficient SFF :

$$SFF = [(N - U) \cdot \tan \phi' + c' \cdot L] / T$$

avec :

N et T : les composantes normale et tangentielle de la résultante des actions

U : la résultante de l'action des sous-pressions

ϕ' et c' : l'angle de frottement interne et la cohésion des matériaux

L : la longueur non fissurée de la section étudiée

SFF indique le niveau de sécurité du barrage vis-à-vis de cet état limite, les conditions de stabilité étant satisfaites si le symptôme calculé SFF présente les valeurs suivantes : [USBR,87]

- SFF ≥ 3 pour les combinaisons de charges usuelles (niveau normal d'exploitation) ;
- SFF ≥ 2 pour les combinaisons de charges exceptionnelles (situation de crues) ;
- SFF ≥ 1 pour les combinaisons de charges extrêmes (situation de séisme).

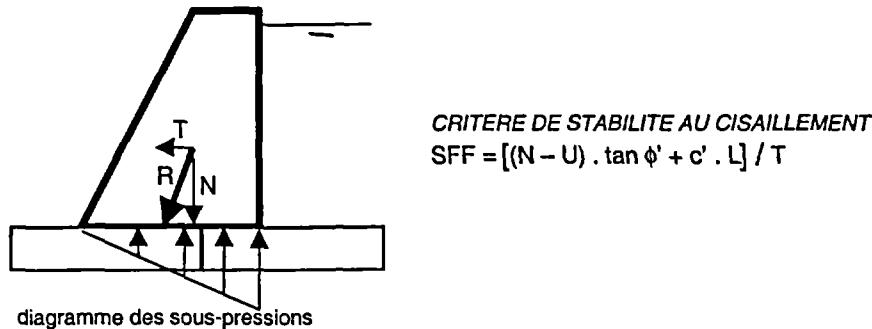


Figure 3.28 : Symptôme calculé (barrage poids)

III.3.3. Liens entre symptômes et phénomènes

Nous avons vu que les symptômes permettent de renseigner les phénomènes. Dans cette section, nous cherchons à identifier les liens orientés entre ces deux variables (Figure 3.29) :

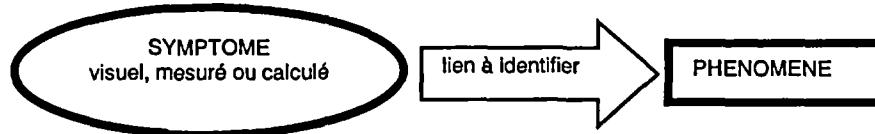


Figure 3.29 : Lien orienté des symptômes vers les phénomènes

Tout d'abord, les symptômes s'inscrivent aux granularités spatiales intermédiaire mais aussi inférieure. En effet, un symptôme est le plus souvent la manifestation localisée (donc de granularité inférieure) d'un phénomène sur un composant. A titre d'exemple, la PIEZOMETRIE (symptôme ausculté) est une mesure ponctuelle (et donc à la granularité inférieure) de la pression interstitielle au sein d'un composant, mais renseigne le phénomène de SOUS-PRESSION qui lui correspond à l'échelle du composant (granularité intermédiaire).

Ensuite, un symptôme relatif à un composant peut être également le symptôme d'un autre composant. A titre d'exemple, le TASSEMENT DE LA CRETE (symptôme mesuré) peut être à la fois le symptôme des phénomènes DEFORMATION DU PLOT et DEFORMATION DE LA FONDATION.

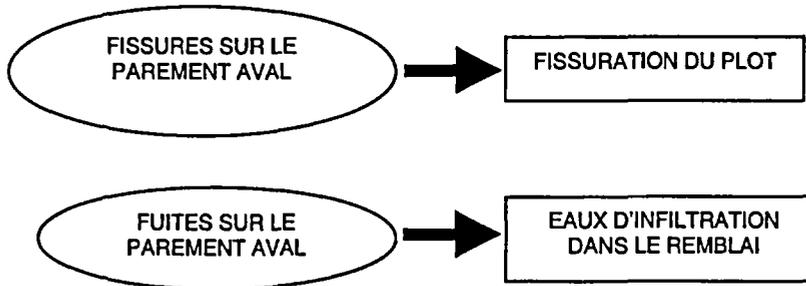
Il apparaît donc que les liens orientés entre *symptôme* et *phénomène* peuvent être plus ou moins directs, ce qui nous conduit à proposer deux catégories :

- les symptômes *toujours liés aux phénomènes* (lien direct) ;
- les symptômes *pouvant être liés aux phénomènes* (lien indirect).

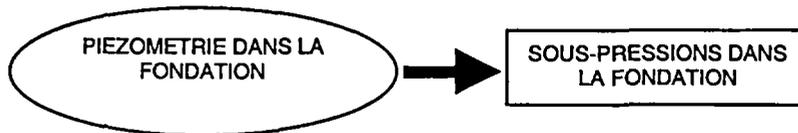
III.3.3.1. Symptômes toujours liés aux phénomènes

Nous parlons de *lien direct* entre symptômes et phénomènes lorsque la relation entre les variables symptôme et phénomène est une implication (au sens mathématique) : le symptôme implique (presque) toujours le phénomène. Nous représentons ce lien avec une flèche pleine. Parmi les symptômes et phénomènes relevant de cette catégorie, nous trouvons :

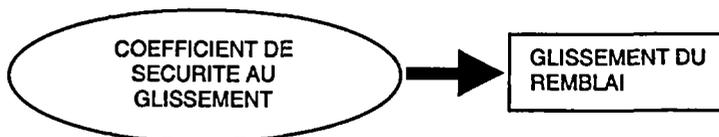
❶ les symptômes visuels renseignant sur un composant ou un flux



❷ les symptômes auscultés correspondant à la mesure du phénomène



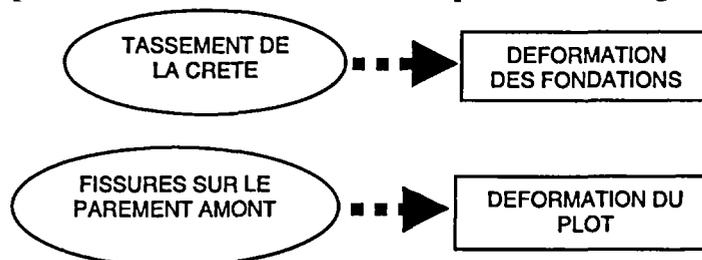
❸ les symptômes calculés correspondant à un phénomène de rupture (état-limite) :



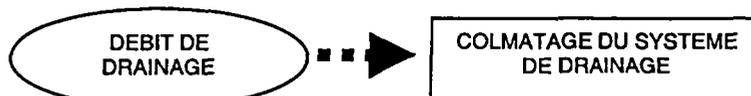
III.3.3.2. Symptômes pouvant être liés aux phénomènes

Nous parlons de *lien indirect* entre symptômes et phénomènes lorsque la relation entre les variables symptôme et phénomène ne constitue pas une implication directe, mais simplement une indication (parfois, souvent). Nous représentons ce lien avec une flèche en pointillé. Parmi les symptômes et phénomènes relevant de cette catégorie, nous trouvons :

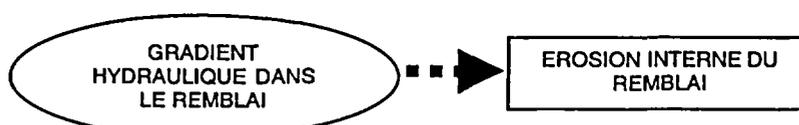
❶ les symptômes visuels concernant un composant et renseignant sur un autre composant



❷ les symptômes auscultés correspondant à la mesure d'un autre phénomène :



❸ les symptômes calculés donnant des indications sur un phénomène :



III.3.4. Synthèse

Les symptômes jouent un rôle primordial dans le diagnostic car ils renseignent les phénomènes se produisant dans les composants. Nous proposons leur classification dans trois catégories :

- *les symptômes visuels issus d'une observation à l'œil à l'occasion d'une inspection ;*
- *les symptômes mesurés issus de l'auscultation ou d'essais ;*
- *les symptômes calculés correspondant à un critère de stabilité.*

Par ailleurs, nous distinguons deux types de liens entre symptôme et phénomène :

- *les symptômes toujours liés aux phénomènes, pour lesquels une relation d'implication existe (lien direct) ;*
- *les symptômes pouvant être liés aux phénomènes, constituant une simple indication (lien indirect).*

III.4. Constitution de la collection de scénarios de vieillissement

III.4.1. Modélisation des scénarios de vieillissement

III.4.1.1. Analyse des recueils d'expertise

Pour modéliser les scénarios de vieillissement, nous disposons de recueils d'expertise ou de monographies décrivant les détériorations des barrages (partie 2 – I.1). Ces références servent de support à notre travail de modélisation et contiennent toutes informations nécessaires à la compréhension des mécanismes. Pour illustrer la rédaction caractéristique de l'expertise, nous citons un court extrait, issu de [ICOLD,93a], relatif au mécanisme de dissolution et d'érosion des fondations d'un barrage poids (scénario 1.1) :

« Le scénario de dissolution et d'érosion des fondations se présente principalement sous la forme de dissolution et d'entraînements de matériaux, provenant soit de la roche elle-même, soit du remplissage des discontinuités, soit des fondations meubles, soit des rideaux d'injection. Ces phénomènes sont souvent associés à une faiblesse de la fondation. [...]

La circulation de l'eau dans une fondation rocheuse fissurée peut provoquer des dissolutions et des érosions de la masse rocheuse elle-même, des matériaux de remplissage des joints, et des coulis d'injection de traitement de terrain. Ces phénomènes entraînent des mouvements dans la fondation et peuvent provoquer dans le barrage des contraintes indésirables. La perméabilité, la déformabilité et la résistance de la fondation peuvent être affectées. L'érosion interne des fondations meubles peut aboutir au renard.

Le processus de dissolution peut être détecté et suivi par l'observation de l'évolution de la teneur de l'eau des fuites en sels dissous, et par la comparaison de cette teneur avec celle des eaux de la retenue. La dissolution des roches solubles peut provoquer une subsidence de la fondation, des fuites et une fissuration du barrage, qui peuvent être observés par inspection visuelle et à l'aide d'un nivellement.

L'érosion interne et la dissolution des matériaux de remplissage des discontinuités, des fondations meubles et des matériaux injectés sont principalement détectées par la variation des débits de fuites. Une fois les problèmes détectés, des dispositifs de décantation doivent être installés pour retenir les matériaux entraînés. La présence des particules solides dans les fuites doit toujours requérir l'intervention immédiate d'un spécialiste ; l'analyse minéralogique et chimique des dépôts recueillis et l'analyse chimique de l'eau des fuites sont des éléments d'appréciation importants de la situation. »

Cet extrait illustre typiquement le format de l'écriture des experts, que nous retrouvons dans les publications techniques. Ce style se caractérise par :

- **une terminologie très riche**, avec l'emploi de nombreux synonymes pour décrire un même phénomène ou mécanisme ; nous remarquons que cette terminologie n'est pas forcément homogène entre les monographies et les experts ;
- **une sémantique variée des termes**, avec des mélanges et redites entre les causes, les effets, les conséquences et les symptômes ;
- **une granularité spatiale à différentes échelles**, avec des descriptions simultanées d'un mécanisme à plusieurs niveaux de détail ;
- **une granularité temporelle à différentes échelles**, avec des intervalles de temps variables entre phénomènes successifs et des descriptions non nécessairement chronologiques.

III.4.1.2. Modélisation des séquences fonctionnelles de dégradation

Notre travail a donc consisté à analyser les recueils d'expertise, afin de déterminer les successions de défaillances fonctionnelles dans un mécanisme. Dans l'ordre, nous recherchons :

- ❶ *les modes de défaillance se produisant successivement dans le scénario ;*
- ❷ *les phénomènes à l'origine des modes de défaillance et ceux en découlant ;*
- ❸ *les symptômes liés à ces phénomènes.*

Ces trois variables sont ensuite assemblées dans un graphe orienté, selon le principe énoncé à la figure 3.22. Nous utilisons la terminologie et la classification proposées pour les fonctions (III.1), les phénomènes (III.2) et symptômes (III.3) afin d'obtenir par la suite une sémantique commune dans l'ensemble des scénarios modélisés. Cela permet en outre une description homogène, au niveau du composant (granularité intermédiaire), des pertes de fonctionnalité et des phénomènes.

Nous présentons à la figure 3.30 le graphe orienté modélisant le mécanisme de dissolution et d'érosion et des fondations d'un barrage poids (scénario 1.1). Cette représentation synthétique fait apparaître trois niveaux fonctionnels consécutifs de défaillance :

- 1^{er} niveau : la dissolution des fondations ;
- 2^{ème} niveau : la dégradation de l'étanchéité des fondations, avec en parallèle la dégradation de leur résistance mécanique ;
- 3^{ème} niveau : l'érosion interne des fondations et leur déformation.

III.4.2. Constitution de la base de connaissances

A partir des recueils d'expertise, nous avons modélisé les scénarios de vieillissement des barrages poids (Tableau 2.1) et nous reportons en annexe 10 la collection complète des graphes orientés.

Le travail restant à produire concerne la modélisation des mécanismes des barrages en remblai (Tableau 2.2) et quelques mécanismes spécifiques aux barrages voûtes.

A partir du modèle de vieillissement et des recueils d'expertise, nous pouvons représenter les mécanismes sous forme de graphes orientés. Cette modélisation des scénarios enchaîne des séquences de défaillance composées de phénomènes entraînant des pertes de performance de fonctions et produisant de nouveaux phénomènes, se traduisant par des symptômes.

La modélisation fonctionnelle des scénarios permet une compréhension des mécanismes et une accessibilité aux informations plus aisées que dans les recueils d'expertises. Elle présente donc un caractère pédagogique intéressant. En outre, cette représentation synthétique permet une gestion ultérieure au moyen d'outils informatiques : bases de données de phénomènes, fonctions et symptômes ; gestion des graphes dans une base de connaissances.

A partir du recueil d'expertise, nous avons modélisé les mécanismes de vieillissement des ouvrages poids. Ce travail synthétique de capitalisation de la connaissance experte constitue la première partie d'une base de connaissances sur la pathologie des barrages.

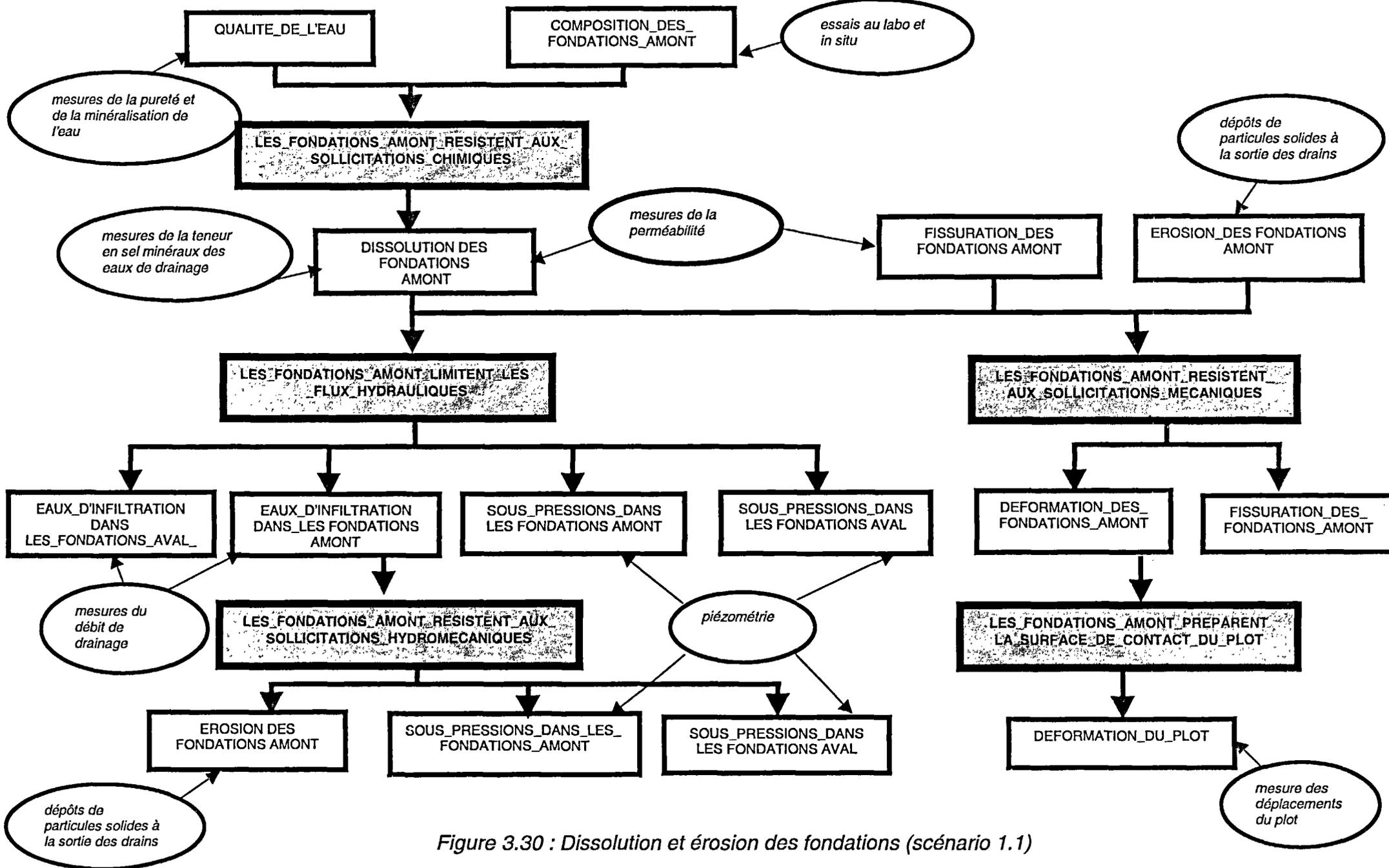


Figure 3.30 : Dissolution et érosion des fondations (scénario 1.1)

IV. Synthèse

Démarche :

En résumé, la démarche de construction de la base de connaissances des scénarios de vieillissement est la suivante (Figure 3.31) :

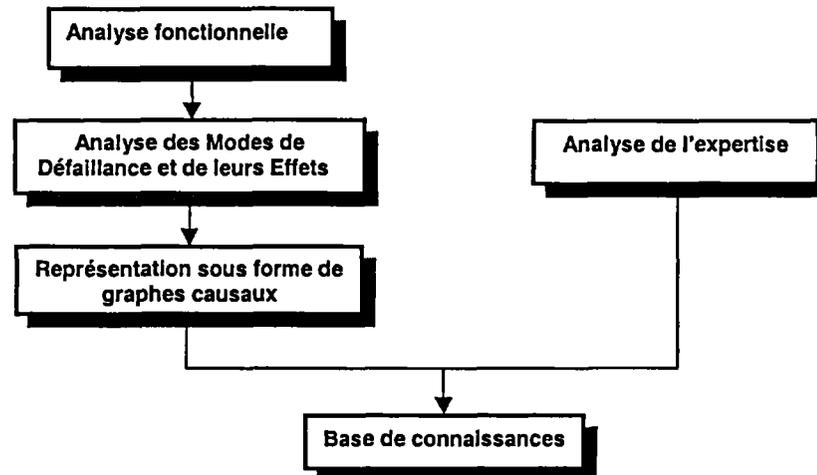


Figure 3.31 : Méthodologie pour la modélisation des scénarios de vieillissement

La première étape s'intéresse à l'analyse du système et de son environnement. Nous déterminons les modes de fonctionnement des barrages, de leurs composants et les interactions entre les composants et les milieux extérieurs. Le déroulement de l'**analyse fonctionnelle** consiste en :

- l'**analyse fonctionnelle externe** pour identifier les fonctions globales des barrages ;
- l'**analyse fonctionnelle interne** pour identifier les fonctions de conception des composants.

La deuxième étape recherche des modes de défaillance potentiels du système. Nous avons choisi la **méthode AMDE**, que nous adaptons au contexte des barrages :

- l'**AMDE Processus** nous donne une description précise des défaillances liées à la conception et réalisation des ouvrages ;
- l'**AMDE Produit** recherche les modes de défaillance des barrages en exploitation.

Les analyses AMDE nous donnent au final tous les modes de défaillance potentiels. Nous pouvons alors structurer rigoureusement les informations relatives au vieillissement en modes de défaillance, leurs causes, leurs effets et symptômes.

La troisième étape consiste en la modélisation des scénarios. Nous utilisons une représentation sous forme de **graphe orienté** enchaînant trois catégories de variables : fonction, phénomène, symptôme. Le modèle enchaîne des séquences de défaillances successives, indiquant les mécanismes physiques au sein des ouvrages et conduisant à des pertes de fonctions.

En parallèle à ces trois précédentes étapes, nous avons analysé les **recueils d'expertise**. Sur ces bases, nous avons recensé et classé les fonctions, phénomènes et symptômes, et établi des choix terminologiques. A partir de la synthèse des mécanismes de vieillissement (partie 2), nous pouvons alors constituer une collection de scénarios représentés dans le modèle fonctionnel.

Conclusion :

Les avantages d'un tel modèle d'écriture et de représentation des scénarios sont multiples :

- ❶ **Nous analysons et structurons rationnellement les informations** relatives au vieillissement en trois catégories de variables : phénomène, fonction et symptôme.
- ❷ **Nous modélisons les scénarios de vieillissement sous forme de graphes orientés et la connaissance experte peut alors être capitalisée de façon synthétique.** Ainsi, le modèle fonctionnel constitue un outil méthodologique pour écrire et représenter les mécanismes de vieillissement des ouvrages.
- ❸ **La représentation synthétique des scénarios présente des qualités pédagogiques :** compréhension des mécanismes, accessibilité aux informations et normalisation de la représentation. Ce point constitue un avantage fort par rapport aux recueils d'expertises.
- ❹ **Nous pouvons gérer les informations obtenues dans des bases de données informatiques :** bases de données de phénomènes, fonctions, symptômes ; base de connaissances de scénarios.
- ❺ **Le modèle fonctionnel de vieillissement que nous proposons présente des avantages par rapport aux représentations offertes par les techniques de la Sûreté de Fonctionnement :**
 - nous prenons en compte **des états de dégradation partielle** des fonctions et des phénomènes (logique non binaire) ;
 - le modèle autorise la **description des mécanismes non chronologiques** (bouclage des scénarios eux-mêmes).

Le modèle de vieillissement et la méthodologie de classification des fonctions, phénomènes et symptômes, ont été développés indépendamment du domaine d'application. Par conséquent, ce travail pourrait servir de base pour d'autres ouvrages d'art du génie civil, tels que les ponts, les réservoirs....

Au final, nous disposons de tous les outils pour modéliser la connaissance experte. Ainsi, nous avons construit les scénarios de vieillissement des barrages poids, **cette modélisation des mécanismes constituant la première partie d'une base de connaissances relative à la pathologie des barrages.**

La modélisation de la connaissance sous forme de scénarios constitue le support **d'un système d'aide au diagnostic** destiné à l'expert pour l'assister dans le diagnostic des barrages en service. S'appuyant sur une base de connaissances complète relative à la pathologie des barrages, l'ingénieur spécialisé est à même de déterminer, par raisonnement par analogie (partie 1 - III.3.2), le mécanisme auquel le barrage étudié est soumis (Figure 3.32). Ce travail répond donc aux premiers objectifs que nous nous sommes fixés.

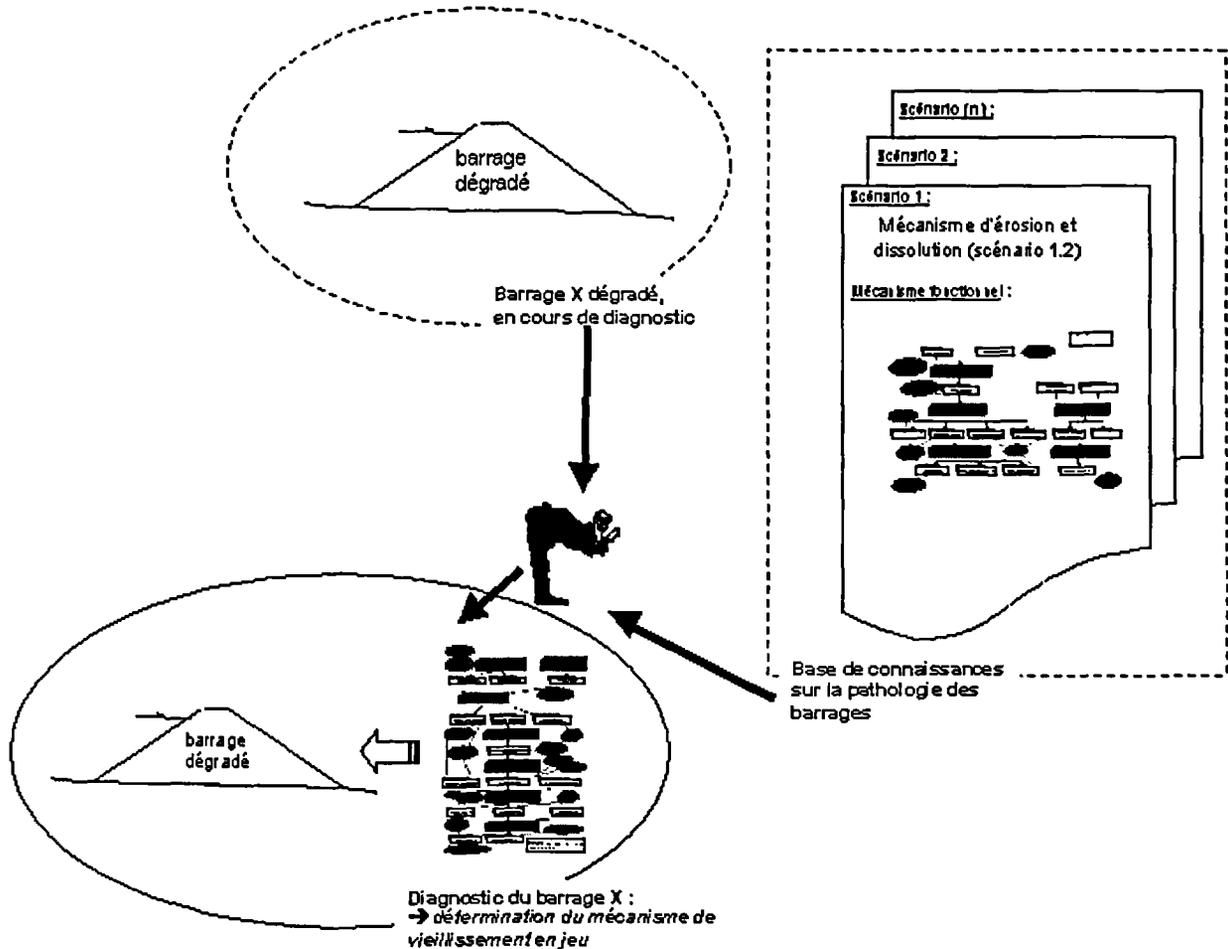


Figure 3.32 : Processus d'aide au diagnostic destiné à l'expert

Après avoir défini des méthodes pour l'aide au diagnostic, il nous reste maintenant à produire des méthodes pour l'analyse de risques liés au vieillissement des barrages. Pour cela, nous allons proposer des outils d'analyse de l'évolution des dégradations au cours du temps et du risque associé. C'est l'objet de la partie 4 consacrée à la criticité.

Partie 4

Analyse de la criticité

I. Généralités et principes

II. Analyse qualitative des dégradations

III. Modélisation des historiques de vieillissement

IV. Analyse qualitative de la criticité

V. Synthèse

I. Généralités et principes

Dans ce chapitre, nous examinons les concepts généraux de la criticité (I.1) et nous esquissons un panorama des différentes approches d'évaluation (I.2). Nous examinons ensuite les caractéristiques des données des détériorations des barrages (I.3), ce qui nous permet d'établir des propositions pour l'analyse de la criticité (I.4).

I.1. Concept de criticité

I.1.1. Définition

L'origine du terme *criticité* provient de l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*). A ce titre, nous trouvons dans la littérature un consensus sur la démarche d'*analyse de la criticité* qui est mise en œuvre dans les AMDEC ([MODARRES,93], [VILLEMEUR,88], [ZWINGELSTEIN,96]), résumée par la norme MIL-STD-1269A [MIL,80] (*Procedures for Performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) : « l'analyse de la criticité consiste à classer chaque mode de défaillance en prenant en compte simultanément l'influence de la classification de sévérité et sa probabilité d'apparition ».

Il apparaît donc que la criticité s'applique à un mode de défaillance d'un composant, c'est-à-dire à la dégradation ou à la défaillance d'une fonction accomplie par ce composant. La définition de [VILLEMEUR,88] nous semble représentative du concept généralement admis : « la criticité d'un mode de défaillance d'un composant est appréciée à l'aide du couple probabilité-gravité ». Plus la probabilité est grande et plus les effets sont jugés graves, plus la criticité d'un mode de défaillance est alors importante et plus il devient nécessaire de prendre des mesures correctives.

I.1.2. Criticité et risque

Il apparaît donc que les notions de *criticité* et de *risque* (partie 1 - III.1.1) sont au final analogues, toutes les deux associant les entités *probabilité* et *conséquence*. Plus précisément, la criticité est une catégorie particulière de risque, lié à la dégradation ou à la défaillance d'une fonction d'un composant. Leurs différences résultent donc dans la granulométrie d'application (Figure 4.1) : le risque correspond à une mesure du danger que représente le système pour son environnement, alors que la criticité s'applique à l'échelle du composant.

En résumé, nous définissons la criticité comme le risque de dégradation (ou de défaillance) d'une fonction d'un composant. Elle correspond donc à une mesure d'un danger pour le système ou les composants environnants, associant une mesure de l'occurrence de la perte de performance d'une fonction d'un composant et une mesure de ses conséquences.

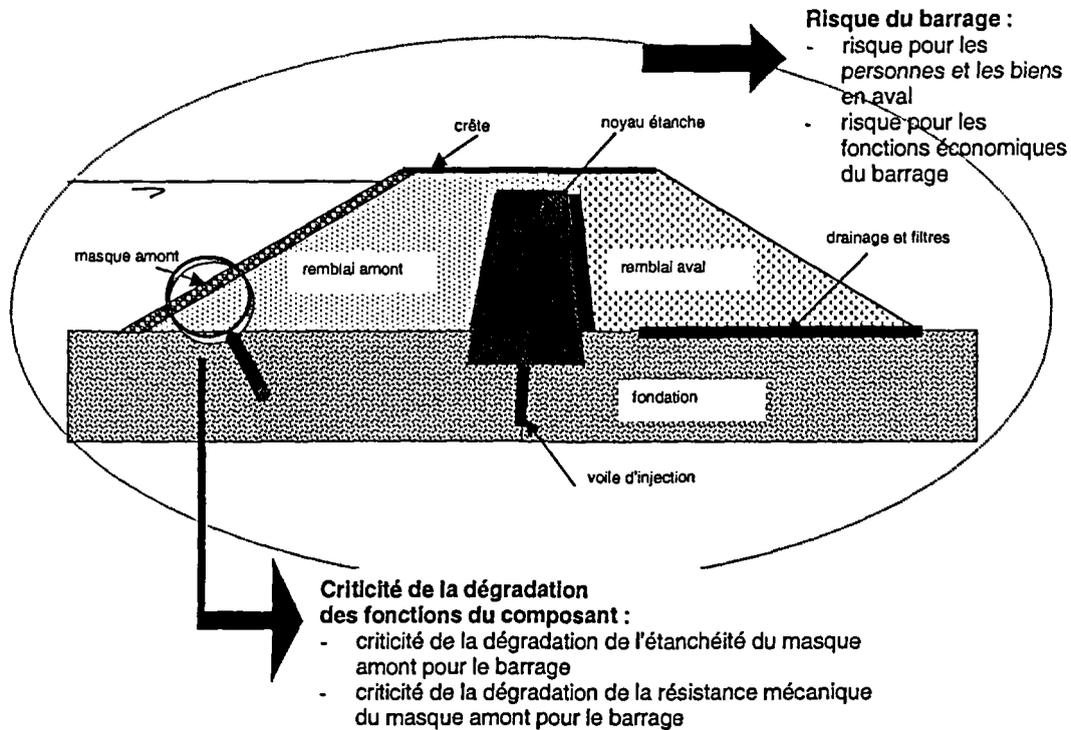


Figure 4.1 : Concepts de risque et de criticité

1.2. Les différentes approches pour l'évaluation de la criticité

Nous rencontrons deux approches pour l'analyse de la criticité, résumées à la figure 4.2. Leur choix est établi en fonction de la disponibilité des données sur le système et ses composants : la démarche qualitative est la plus appropriée quand les données sur les taux de défaillance sont mal connues ; a contrario, en présence de données abondantes, on applique la démarche quantitative (MIL-STD-1269A).

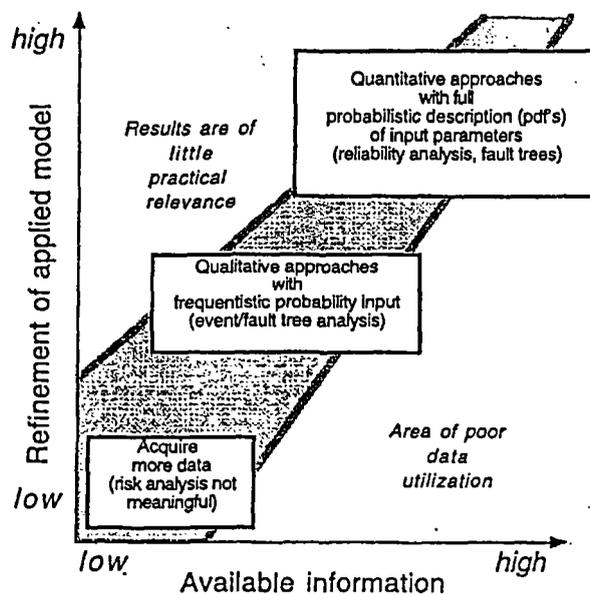


Figure 4.2 : Hiérarchie des démarches d'analyse de risques [KREUSER,01]

1.2.1. Démarche quantitative d'analyse de la criticité

La démarche quantitative d'analyse de la criticité consiste à étudier :

- ❶ la fiabilité des composants du système. Pour cela, le paramètre généralement recherché est le taux de défaillance (ou la probabilité de défaillance si l'approche est probabiliste).
- ❷ les probabilités d'occurrence des effets des défaillances potentielles sur le fonctionnement du système et leurs coûts associés.

Pour illustrer cette démarche, nous indiquons en annexe 11 l'analyse quantitative de la criticité proposée par [MODARRES,93] et basée sur la norme MIL-STD 1623-A.

L'évaluation quantitative de la criticité n'est possible que pour les systèmes disposant d'un retour d'expérience important ou de données abondantes sur les défaillances (électronique...). En outre, elle est d'application plus aisée sur les systèmes à défaillance binaire (marche ou panne), la prise en compte des dégradations progressives nécessitant la définition de classes de dégradation rendant l'analyse quantitative encore plus délicate. En toutes hypothèses, un calcul fiabiliste à l'échelle d'un ouvrage de génie civil, prenant en compte les divers mécanismes de vieillissement et intégrant tous les agents extérieurs et les méconnaissances du système, n'est pas réalisable.

1.2.2. Démarche qualitative d'analyse de la criticité

1.2.2.1. Principe de la démarche qualitative

A défaut de données suffisantes pour déterminer les fréquences des défaillances, il est alors nécessaire de faire appel au jugement de l'expert pour estimer leurs niveaux de probabilité. Dans un tel contexte, on s'oriente vers un traitement qualitatif des estimations, au moyen de grilles de classement des niveaux de défaillance.

Par la suite, au fur et à mesure de l'acquisition de données et du retour d'expérience, les niveaux de probabilité sont réévalués et éventuellement corrigés. [ZWINGELSTEIN,96]

1.2.2.2. Différentes grilles qualitatives d'analyse

La définition des classes de probabilités d'apparition de la défaillance et de sévérité dépend du système étudié et nous rencontrons de nombreux exemples de grilles qualitatives.

Dans le domaine de la conception, nous trouvons des grilles purement qualitatives qui permettent des analyses préliminaires de la criticité. Le tableau 4.1, extrait de [ISDF], donne l'exemple d'une analyse basée sur le jugement de l'expert, pour la conception d'une installation chimique.

Classe	Niveau de Probabilité	Description	Classe	Niveau de Gravité	Description
1	extrêmement rare	Probabilité de défaillance extrêmement faible	1	Négligeable	Ni accident de personne, ni dommage au système
2	très rare	Probabilité de défaillance très faible	2	Marginal	Admet des palliatifs ou des correctifs tels qu'il n'y ait ni accident de personne, ni dommage important
3	rare	Faible probabilité de défaillance	3	Sérieux	Nécessite la prise de mesures immédiates pour que la vie du personnel ne soit pas en danger et pour que le système ne subisse pas de dommage important
4	possible	Possibilité de défaillance	4	Majeur	Accident grave dont les effets sont limités à l'atelier
5	fréquent	Grande possibilité de défaillance	5	Majeur	Accident grave dont les effets sont limités à l'établissement
6	très fréquent	Très grande probabilité de défaillance	6	Majeur	Accident grave dont les effets dépassent les limites de l'établissement

Criticité : (↓ Probabilité ; → Gravité)					
16	25	36	46	56	66
15	25	35	45	55	65
14	24	34	44	54	64
13	23	33	43	53	63
12	22	32	42	52	62
11	21	31	41	51	61

défaillances critiques

Tableau 4.1 : Analyse de la criticité dans la conception d'une installation chimique

D'autres approches qualitatives permettent une analyse plus fine des probabilités des défaillances. Dans ce cadre, la norme MIL-HDBK-217 relative aux équipements électroniques fournit des classes de probabilité d'apparition d'une défaillance (Tableau 4.2). [ZWINGELSTEIN,96]

Niveau	Classe de probabilité	Description
A – fréquent	$p > 20\%$	probabilité élevée d'apparition pendant la durée de fonctionnement du composant
B – raisonnablement probable	$10\% < p < 20\%$	probabilité moyenne d'apparition pendant la durée de fonctionnement du composant
niveau C - occasionnel	$1\% < p < 10\%$	probabilité occasionnelle d'apparition pendant la durée de fonctionnement du composant
niveau D – réduit	$0.1\% < p < 1\%$	probabilité réduite d'apparition pendant la durée de fonctionnement du composant
niveau E – extrêmement improbable	$p < 0.1\%$	probabilité extrêmement improbable d'apparition pendant la durée de fonctionnement du composant

Tableau 4.2 : Niveaux de probabilité d'apparition de la défaillance

Enfin, dans le domaine de la maintenance industrielle, la mesure de l'occurrence de la défaillance est parfois proposée à partir d'un indice de fréquence (Tableau 4.3 extrait de [ISDF]).

Niveau	Fréquence	Description
1 – Pratiquement inexistant	moins d'une défaillance par an	La possibilité qu'une défaillance se produise est très faible lorsque les composants choisis ont été utilisés dans des applications similaires, et que les défauts ont été inexistant
2 – Possible	une défaillance au moins sur trois mois	Une défaillance occasionnelle est apparue sur du matériel similaire existant en exploitation
3 – Fréquente	une à trois défaillances par mois	Composants qui ont traditionnellement causés quelques problèmes dans le passé
4 - Certaine	plus de trois défaillances par semaine	Composant dont il est certain que la défaillance se produit fréquemment

Tableau 4.3 : Indice de fréquence en maintenance

Les grilles d'analyse qualitative sont définies en fonction du système et de son contexte. Les données disponibles, le retour d'expérience, l'implication plus ou moins forte de l'expertise et le domaine d'utilisation (conception, réalisation ou maintenance) sont les principaux facteurs qui vont fixer le type de cotation des mesures de l'occurrence et de la sévérité des modes de défaillance.

1.3. Les données des détériorations des barrages

1.3.1. Les données statistiques mondiales

Au niveau mondial, les principales sources d'informations relatives aux détériorations des barrages sont dues à la CIGB (partie 2 – I.1) : [ICOLD,74-83-84a-84b-95]. Ces données statistiques sont particulièrement intéressantes pour l'ingénierie traditionnelle car elles permettent de tirer les enseignements des détériorations. En revanche, leur utilisation dans le domaine de l'analyse de risques présente certaines limites mises en évidence dans de récentes publications [KREUSER,00-01], [STEWART,00]. Nous en résumons les raisons principales :

❶ Statistiquement, le nombre de détériorations reste trop limité :

Même considéré au niveau mondial, les cas de barrages recensés relevant d'un mécanisme de vieillissement donné sont peu nombreux et les populations homogènes associées à chaque catégorie de détérioration sont finalement réduites.

Pour illustrer ce point, la figure 4.3 extraite de [ICOLD,95] indique les tailles des populations de barrages en remblai ayant connu des accidents ou ruptures selon un mécanisme donné.

❷ Les barrages relevant d'une catégorie de détérioration sont rarement représentatifs d'un ouvrage étudié soumis au même mécanisme :

Pour une catégorie de détérioration donnée, les statistiques mondiales rassemblent des barrages de taille, de conception, de réalisation, ..., de contexte différents. Finalement, les populations d'ouvrages ayant subi un mécanisme donné apparaissent comme hétérogènes.

Ainsi, l'utilisation de ces informations pour l'analyse de risques ne reflète pas assez bien les conditions auxquelles le barrage étudié est soumis. Elle lèse les ouvrages dont la qualité est supérieure à la moyenne, et, a contrario, surestime les capacités des ouvrages médiocres.

❸ Les données relatives aux détériorations restent très générales :

Les informations issues des statistiques mondiales ne donnent en particulier pas accès aux détails des caractéristiques des ouvrages, ni aux historiques de vieillissement. De ce fait, elles ne permettent pas une analyse précise et complète des ouvrages en jeu, ni des mécanismes de vieillissement.

En résumé, nous constatons que les données statistiques mondiales relatives aux détériorations de barrages restent limitées, pour un mécanisme donné, à des populations d'ouvrages réduites et hétérogènes. En outre, elles offrent peu de précision dans la description des ouvrages et des mécanismes qu'ils subissent.

Ainsi, ces informations peuvent être utilisées pour le diagnostic et l'analyse de risques préliminaires (décisions de premier ordre de grandeur), mais ne peuvent refléter avec suffisamment de finesse les conditions réelles d'un barrage particulier pour être mises en œuvre dans le cadre d'études de sûreté de fonctionnement approfondies ou pour une analyse de risques quantitative.

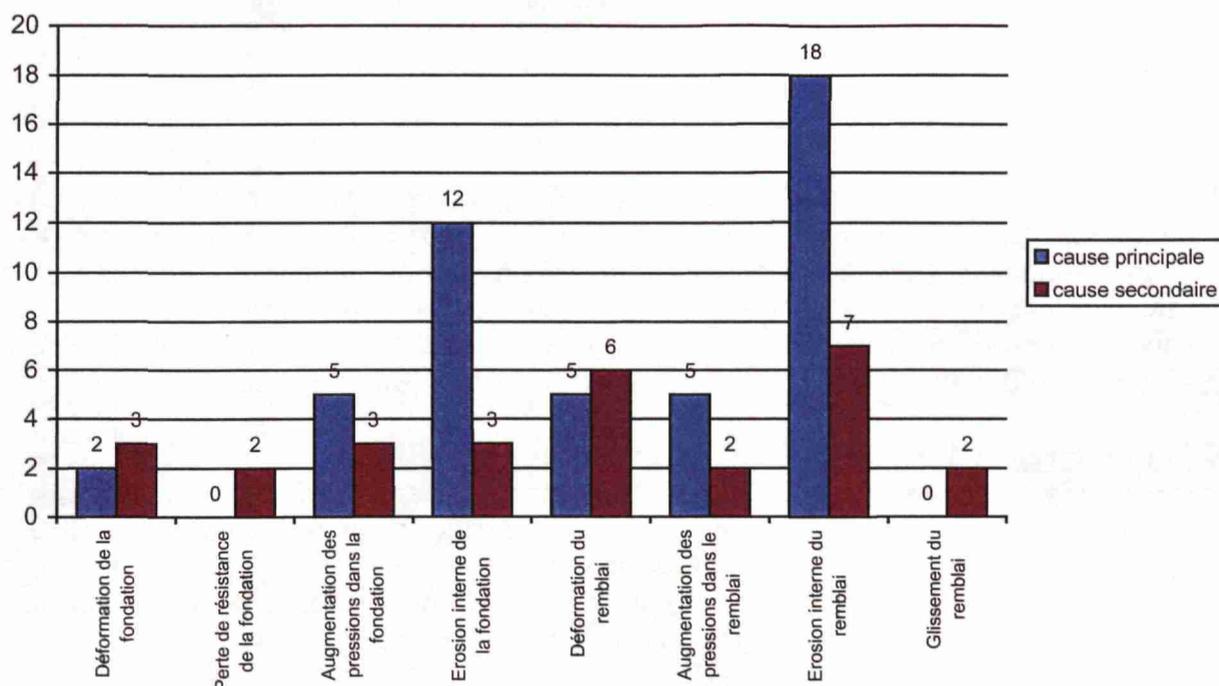


Figure 4.3 : Analyse statistique des ruptures des barrages en remblai [ICOLD,95]

1.3.2. Les données statistiques relatives à un parc de barrages isolé

A l'exception de quelques ouvrages bien connus, on constate de façon générale une réticence à communiquer les informations relatives aux détériorations de barrages, certains pays ou exploitants étant plus disposés à le faire que d'autres [KREUSER,01].

Ainsi, il s'avère difficile d'accéder aux informations relatives aux incidents de barrages relevant d'un gestionnaire particulier, en particulier à l'échelle du parc complet.

Quelques initiatives de constitution de bases de données à des échelles nationales ou internationales, permettant le recueil précis et complet des informations sur les ouvrages et leurs mécanismes de vieillissement, n'ont pas encore donné de résultats exploitables, notamment le programme NPDP (*National Performance of Dams Program* [McCANN,94-97]) aux Etats-Unis ou le projet européen SECURE (*Safety Evaluation of man-made water control Structures in Europe* [SECURE,99]) non abouti.

Au final, il apparaît que la principale source d'informations qui va nous servir à l'analyse de la criticité proviendra des données émanant du parc de barrages relevant du ministère de l'environnement.

Au sein de ce parc, les populations d'ouvrages concernés par un mécanisme donné sont réduites à quelques barrages (quelques unités), pour lesquels nous contrôlons la précision et la complétude des données disponibles.

1.4. Proposition pour l'analyse de la criticité

L'examen des données disponibles au niveau mondial ou au niveau d'un parc isolé a montré qu'il est illusoire de prétendre analyser quantitativement la criticité, et, par conséquent, notre démarche est qualitative.

Par ailleurs, les séries statistiques mondiales n'offrent qu'une précision limitée, insuffisante vis-à-vis de nos objectifs d'analyse des dégradations des composants des barrages. **Notre approche va donc reposer sur l'analyse des données historiques issues du retour d'expérience**, provenant prioritairement du parc du ministère de l'environnement, voire d'autres parcs en fonction des opportunités.

Nous recherchons à produire une méthodologie pour modéliser l'évolution dynamique des mécanismes et pour l'analyse de la criticité des pertes de performance des fonctions.

Dans ce cadre, notre démarche vise à constituer des bases d'historiques de vieillissement, permettant à l'expert de prévoir, par raisonnement par analogie, d'une part, les évolutions futures des pertes de performance d'un barrage (et de ses composants) en examinant les lois d'évolution d'un ouvrage du même type, d'autre part, les conséquences potentielles de ces dégradations (Figure 4.4).

Notons que cette approche est en accord avec de récentes publications telles que [KREUSER,00-01] et [STEWART,00]. Ainsi, [KREUZER,00] indique que « *compte tenu du caractère unique de chaque barrage et de son environnement, les données statistiques ne peuvent servir qu'à aider les experts dans leur estimation des évolutions des détériorations et des probabilités* ».

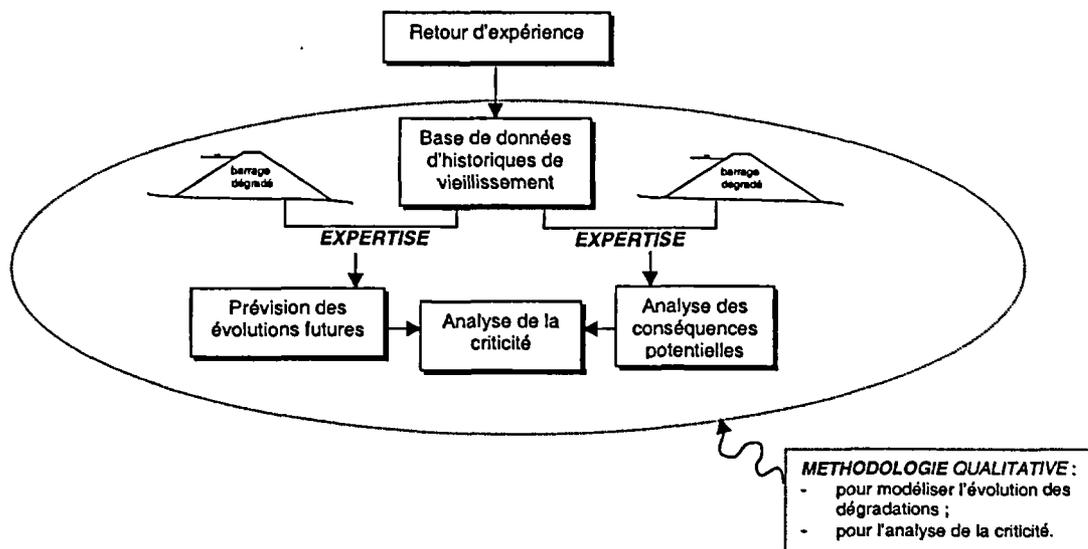


Figure 4.4 : Démarche d'analyse de la criticité

Pour cela, notre travail visant à obtenir la criticité est conduit en trois étapes successives :

Étape ① - Analyse qualitative des dégradations (partie 4 - II)

Nous proposons une méthode qualitative d'analyse de l'état des *symptômes*, *phénomènes* et *fonctions* et de l'évolution des performances des *fonctions* au cours du temps.

Étape ② - Modélisation des historiques de vieillissement (partie 4 - III)

Nous développons une méthodologie permettant de modéliser les historiques de vieillissement des barrages et de constituer à terme une base de données d'historiques.

Étape ③ - Analyse qualitative de la criticité (partie 4 - IV)

Nous proposons une méthode qualitative pour évaluer la criticité des pertes de performance des *fonctions*, à la granularité intermédiaire, mais aussi à au niveau global du barrage.

II. Analyse qualitative des dégradations

Dans ce chapitre, nous examinons successivement l'analyse qualitative de l'état des *symptômes*, *phénomènes* et *fonctions* (II.1), de l'évolution des pertes de performance des fonctions des composants (II.2) et de la perte de performance globale d'un barrage (II.3).

II.1. Analyse de l'état des dégradations à l'échelle du composant

Dans le modèle de vieillissement, nous faisons correspondre à chaque variable de granularité intermédiaire (*symptôme*, *phénomène*, *fonction*) un attribut du premier ordre renseignant sur son état : la normalité d'un symptôme, l'ampleur d'un phénomène ou la performance d'une fonction. Nous proposons ici une grille d'analyse qualitative de l'état de chacune de ces variables.

II.1.1. La pratique de l'analyse qualitative des dégradations des barrages

Nous trouvons dans la littérature quelques exemples d'analyse qualitative de l'état des dégradations, notamment dans les méthodes à base d'index (partie 1 - III.2.2.5). Ainsi EDF et le Cemagref ont développé des méthodes analogues pour l'évaluation du patrimoine hydraulique, qui introduisent des notes techniques (Tableau 4.4) pour qualifier respectivement l'état structural et l'importance des dégradations d'une partie d'ouvrage. [LALEU,01], [ROYET,00]

EDF		Cemagref	
Note d'état élémentaire	Qualificatif de l'état structural	Importance Intrinsèque des défauts	Qualificatif de l'importance des dégradations
1	aucune dégradation	0	pas de défaut
2	dégradations ne mettant pas en jeu la fonction de l'ouvrage, nécessitant le suivi régulier de leur évolution	1	défaut faible ou pas de données disponibles
3	dégradations mettant en jeu partiellement la fonction de l'ouvrage, dont la réparation doit être programmée	2	importance moyenne
4	dégradations irréversibles dont la réparation est nécessaire dans les meilleurs délais	4	importance forte

Tableau 4.4 : Analyse qualitative des dégradations (EDF & Cemagref)

Nous trouvons également une analyse qualitative sur quatre valeurs pour décrire les symptômes dans le guide Vigie Barrages [EDF-Cemagref,98]. Ce dernier a été développé pour les exploitants des ouvrages et les ingénieurs spécialistes afin d'uniformiser la description et la qualification des symptômes et propose des listes de symptômes estampillés d'un degré de gravité. La figure 4.6 indique le principe de la grille qualitative (le degré 0 signifie implicitement l'absence d'anomalie).

Le choix du nombre de modalités à retenir pour l'analyse qualitative va déterminer deux caractéristiques qui s'opposent :

- la précision de l'analyse ;
 - l'acceptation unanime de l'analyse par ceux qui la réalisent et donc la qualité de l'information.
- Ainsi, une analyse sur un nombre important de valeurs pose des difficultés de recoupement des classes qualitatives et de choix de la catégorie, susceptibles d'entraîner des biais. A contrario, une

analyse sur peu de valeurs peut apparaître trop simpliste. Un compromis doit donc être trouvé, dont le choix dépend de la qualité initiale de l'information et de ceux qui vont la traiter.

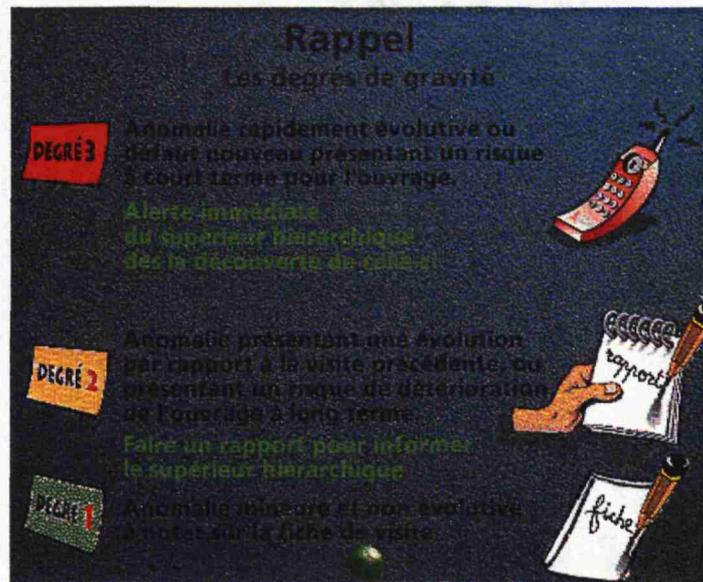


Figure 4.5 : Analyse qualitative des symptômes dans Vigie Barrages

Dans notre contexte, il s'agit pour les experts d'apporter une analyse qualitative des symptômes, phénomènes et fonctions, à partir des observations de terrain, des données d'auscultation et des symptômes calculés. Nous avons donc à faire à des informations généralement de bonne qualité, interprétées par les spécialistes du domaine. A ce titre, la pratique des méthodes d'évaluation d'EDF et du Cemagref a montré que l'analyse qualitative sur quatre valeurs est bien adaptée au diagnostic rapide et à l'interprétation des symptômes.

A l'instar des choix réalisés par EDF et le Cemagref pour le classement des symptômes et le diagnostic des ouvrages, nous adoptons une analyse qualitative des états sur quatre valeurs pour les symptômes, les phénomènes et les fonctions. Elle permet de hiérarchiser l'état des variables au moyen de niveaux qualitatifs simples et distincts, qui assurent la continuité avec la pratique actuelle et présentent l'avantage de limiter les difficultés de classement par les experts.

II.1.2. Analyse qualitative des symptômes

II.1.2.1. Proposition de grille qualitative d'analyse

Nous proposons l'analyse qualitative de l'état des symptômes sur quatre valeurs prises dans l'espace quantité $\{0 ; 1 ; 2 ; 3\}$ et ordonnées : $0 < 1 < 2 < 3$.

L'attribut d'état d'un symptôme S_i indique l'état du symptôme (c'est-à-dire sa normalité) selon la grille d'analyse suivante :

Attributs d'état du symptôme S_i	Qualification
0	symptôme normal
1	symptôme légèrement en écart par rapport à l'état normal
2	symptôme en écart sensible par rapport à la normalité
3	symptôme alarmant

Tableau 4.5 : Grille d'analyse qualitative des symptômes

exemple : $S_i = 2 \Leftrightarrow$ l'attribut d'état du symptôme S_i (ou encore l'attribut d'état S_i) vaut 2
 \Leftrightarrow le symptôme S_i est « en écart sensible par rapport à la normalité »

II.1.2.2. Détermination de l'attribut d'état d'un symptôme visuel

Les attributs d'état des symptômes visuels sont déterminés directement par analyse des observations réalisées, en prenant en compte leur caractère normal ou anormal.

Ce travail d'analyse peut être fait, soit par l'opérateur de terrain s'appuyant éventuellement sur des guides tels que Vigie-barrages, soit par les ingénieurs spécialisés.



Figure 4.6 : Analyse qualitative d'un symptôme visuel

A titre d'exemple, les symptômes SUINEMENT ou FUITES relatifs aux barrages en remblai peuvent prendre les attributs qualitatifs suivants (Figure 4.6) :

- un attribut 0 lorsqu'aucune observation particulière n'est constatée ;
- un attribut 1 lorsqu'une zone humide ou des suintements sont observés ;
- un attribut 2 lorsqu'un écoulement direct d'eau claire est constaté ;
- un attribut 3 lorsqu'un écoulement est observé, avec entraînement de particules de sol (amorce de « renard hydraulique »).

II.1.2.3. Détermination de l'attribut d'état d'un symptôme ausculté

Les attributs d'état des symptômes auscultés sont déterminés par analyse des mesures d'auscultation ou d'essais, en prenant en compte leur caractère normal ou anormal.

Ce travail d'analyse relève de l'ingénieur spécialisé qui, à partir des différentes mesures d'instruments d'auscultation, va établir une analyse globale du symptôme.

A titre d'exemple, l'attribut d'état du symptôme PIEZOMETRIE DANS LE REMBLAI d'un barrage en terre est obtenu par l'analyse des mesures des différents piézomètres et cellules de pression interstitielle placés dans le remblai. De façon tout à fait semblable aux analyses d'auscultation, la normalité du symptôme est déterminée en fonction des niveaux de pressions, de l'influence de divers facteurs explicatifs (saison, niveau de la retenue...), de la position spatiale des instruments.

Nous indiquons en exemple l'analyse qualitative du symptôme PIEZOMETRIE du barrage de Cublize, à partir des mesures de trois cellules de pression interstitielle (Figure 4.7). Cet ouvrage en terre homogène a vu ses sous-pressions augmenter rapidement sous l'effet du colmatage du drain vertical par suffusion du remblai amont [DEGOUTTE,93]. Nous détaillons plus largement cet exemple dans la partie 5.

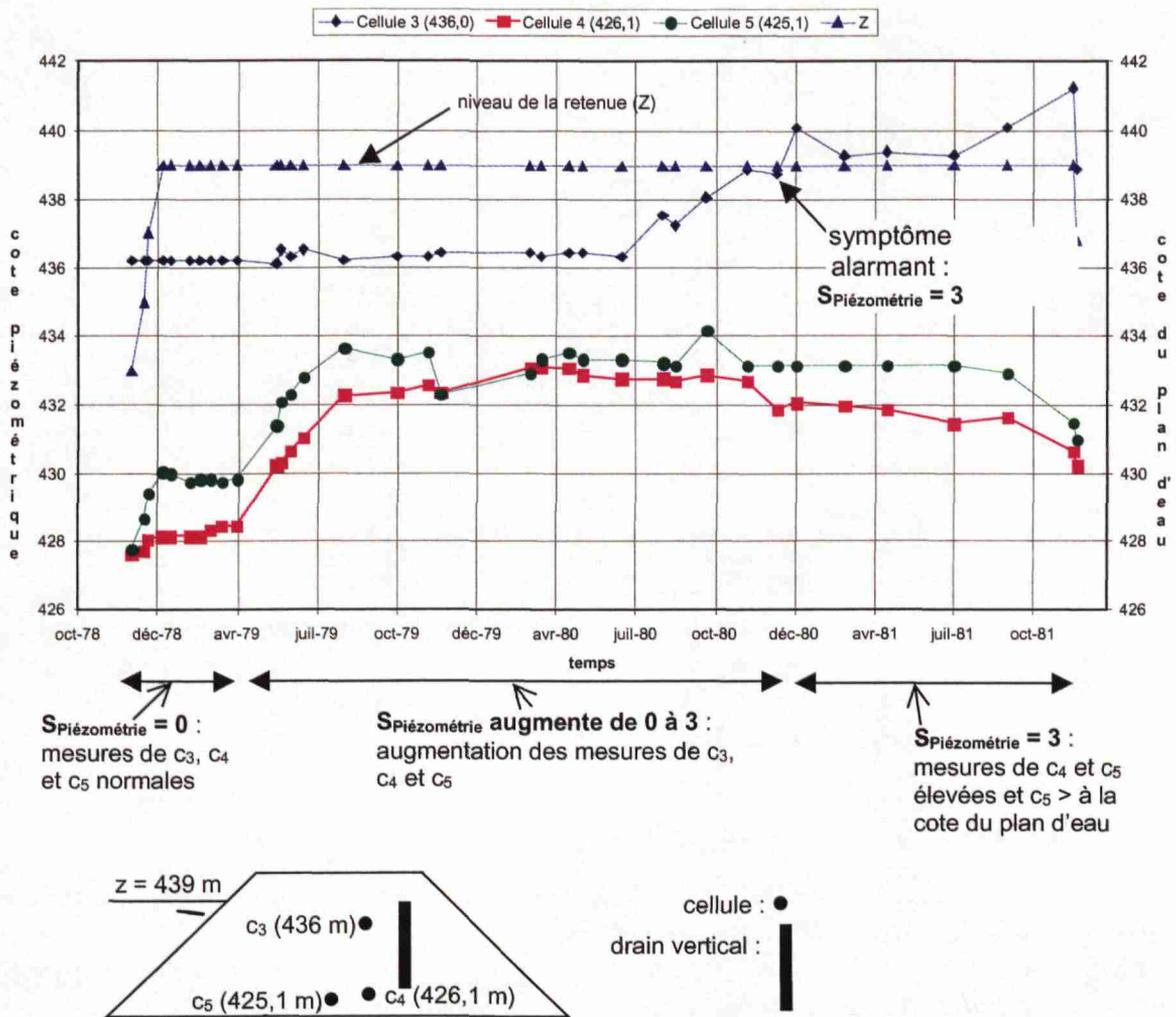


Figure 4.7 : Exemple d'analyse qualitative d'un symptôme ausculté

II.1.2.4. Détermination de l'attribut d'état d'un symptôme calculé

L'analyse qualitative des symptômes calculés va consister à comparer leurs valeurs aux critères de sécurité fixés dans les conditions d'états-limites.

Ce travail d'analyse relève de l'ingénieur spécialisé qui, à partir du calcul des différents critères de stabilité, va établir une analyse globale du symptôme. Ainsi, l'attribut d'état vaut 0 (*symptôme normal*) lorsque le symptôme calculé a une valeur supérieure ou égale au critère de sécurité fixé dans les recommandations. A contrario, les valeurs des symptômes correspondant à l'attribut 3 (*symptôme alarmant*) indiquent un équilibre statique précaire et correspondent à un critère de stabilité proche ou inférieur à l'unité.

Les attributs 1, 2 et 3 correspondent à des valeurs intermédiaires, pour lesquelles on ne trouve pas d'indications dans la littérature. Nous donnons au tableau 4.6 des propositions de critères de sécurité à adopter pour ces attributs intermédiaires.

symptôme calculé	valeur du symptôme pour l'attribut 0 (symptôme normal)	valeur du symptôme pour l'attribut 1 (symptôme en léger écart)	valeur du symptôme pour l'attribut 2 (symptôme en écart sensible)	valeur du symptôme pour l'attribut 3 (symptôme alarmant)
	<i>Valeurs issues des recommandations</i>			
	<i>Propositions de valeurs</i>			
barrages poids : . $SFF = [(N - U) \cdot \tan \phi' + c' \cdot L] / T$. $F = (N - U) \cdot \tan \phi' / T$. longueur théorique fissurée	. $SFF \geq 3$. $F \geq 1,5$. aucune fissure admise	. $2,5 \leq SFF < 3$. $1,3 \leq F < 1,5$. rapport (longueur fissurée sur longueur de la section) restant inférieur à 5%	. $1,8 \leq SFF < 2,5$. $1,1 \leq F < 1,3$. rapport (longueur fissurée sur longueur de la section) supérieur à 5% et inférieur à 25%	. $SFF < 1,8$. $F < 1,1$. rapport (longueur fissurée sur longueur de la section) > 25% ou la fissure atteint le voile de drainage
barrages en remblai : . F critère de sécurité au glissement . gradient hydraulique	. $F \geq 1,5$. à dire d'expert selon le matériau du remblai	. $1,3 \leq F < 1,5$. à dire d'expert selon le matériau du remblai	. $1,1 \leq F < 1,3$. à dire d'expert selon le matériau du remblai	. $F < 1,1$. à dire d'expert selon le matériau du remblai

Tableau 4.6 : Analyse qualitative des symptômes calculés

II.1.3. Analyse qualitative des phénomènes

II.1.3.1. Proposition de grille qualitative d'analyse

Nous proposons l'analyse qualitative de l'état des phénomènes sur quatre valeurs prises dans l'espace quantité {0 ; 1 ; 2 ; 3}, ordonnées : $0 < 1 < 2 < 3$.

L'attribut d'état d'un phénomène P_i indique l'état du phénomène (c'est-à-dire son ampleur), selon les deux grilles d'analyse suivantes liées à la nature du phénomène :

Phénomènes appartenant aux familles « état intrinsèque du composant » et « flux hydraulique, de charges, ... »	
Attributs d'état du phénomène P_i	Qualification
0	<i>phénomène absent ou normal</i>
1	<i>phénomène faible ou légèrement en écart par rapport à l'état normal</i>
2	<i>phénomène important</i>
3	<i>phénomène très important</i>

Phénomènes appartenant à la famille « processus de conception et de réalisation »	
Attributs d'état du phénomène P_i	Qualification
0	<i>optimal</i>
1	<i>correct</i>
2	<i>médiocre</i>
3	<i>totalemment insuffisant ou inadapté</i>

Tableau 4.7 : Grilles d'analyse qualitative des phénomènes

exemple : $P_i = 3 \Leftrightarrow$ l'attribut d'état du phénomène P_i (ou encore l'attribut d'état P_i) vaut 3
 \Leftrightarrow le phénomène P_i lié à un flux hydraulique est « très important »

II.1.3.2. Détermination de l'attribut d'état d'un phénomène

L'analyse qualitative d'un phénomène est établie à partir de l'analyse préalable des symptômes qui lui sont liés.

Tout d'abord, nous recherchons les symptômes susceptibles de renseigner le phénomène étudié et nous examinons ensuite leurs liens (directs ou indirects : partie 3 - III.3.3).

Lorsqu'on dispose de symptômes *toujours liés* au phénomène (lien direct), l'analyse qualitative est immédiate puisque l'attribut d'état du phénomène est alors identique à celui de ces symptômes (lien d'implication entre les deux variables).

Dans ce cadre, nous trouvons l'exemple du phénomène SOUS-PRESSION, dont le symptôme direct est la PIEZOMETRIE. En reprenant l'analyse du barrage de Cublize, nous déterminons la loi d'évolution du phénomène SOUS-PRESSION DANS LE REMBLAI à partir des mesures des cellules de pressions interstitielles (Figure 4.8).

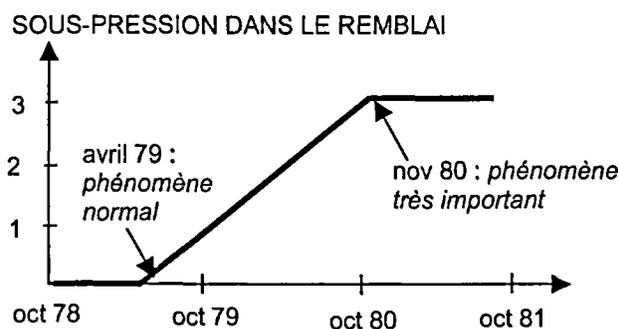


Figure 4.8 : Analyse qualitative du phénomène SOUS-PRESSION (barrage de Cublize)

Lorsqu'on ne dispose que de symptômes *liés indirectement* au phénomène ou en l'absence de symptôme, il est alors nécessaire d'établir une analyse experte pour évaluer l'attribut d'état du phénomène, qui pourra éventuellement s'appuyer sur des simulations de différents niveaux qualitatifs. Dans ce cas, l'analyse qualitative présente une robustesse moindre, et, parfois même, ne pourra être établie.

A titre d'exemple, nous trouvons les barrages non équipés de dispositifs de mesure des pressions et pour lesquels on recherche l'analyse du phénomène SOUS-PRESSION. Ce dernier ne pourra être évalué qu'à partir de symptômes indirects, tels que l'observation de FUIITE ou les mesures du DEBIT DE DRAINAGE, qui vont renseigner indirectement sur la présence ou pas de sous-pressions. Toutefois, l'évaluation réalisée présentera une précision limitée.

II.1.4. Analyse qualitative des fonctions

II.1.4.1. Proposition de grille qualitative d'analyse

Nous proposons l'analyse qualitative de l'état des fonctions sur quatre valeurs prises dans l'espace quantité {0 ; 1 ; 2 ; 3} et ordonnées : $0 < 1 < 2 < 3$.

L'attribut d'état (ou l'attribut de performance) d'une fonction F_i indique l'état de la fonction (c'est-à-dire sa performance), selon la grille d'analyse suivante :

Attributs d'état de la fonction F_i	Qualification
0	fonction optimale
1	fonction correcte
2	fonction partielle
3	fonction défailante

Tableau 4.8 : Grille d'analyse qualitative des fonctions

exemple : $F_i = 0 \Leftrightarrow$ l'attribut d'état de la fonction F_i (ou encore l'attribut d'état F_i) vaut 0
 \Leftrightarrow l'attribut de performance de la fonction F_i (ou encore l'attribut de performance F_i) vaut 0
 \Leftrightarrow la fonction F_i est accomplie de façon « optimale » (sa performance est « optimale »)

Cette proposition d'analyse de la performance d'une fonction revient à évaluer son niveau de dégradation, la performance étant maximale (fonction optimale) ou nulle (fonction défailante) lorsque l'attribut d'état vaut respectivement 0 et 3. Ainsi, la loi d'évolution de l'attribut d'état d'une fonction (F_i) revient à une loi d'évolution de la performance.

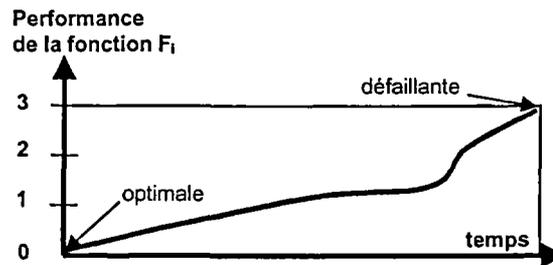


Figure 4.9 : Loi d'évolution de la performance d'une fonction F_i au cours du temps

Remarquons que, compte tenu de l'ordre des niveaux qualitatifs adoptés pour assurer la continuité avec la pratique dans le domaine des barrages, les lois d'évolution de la performance d'une fonction (idem pour les symptômes et les phénomènes) sont inversées par rapport aux représentations classiques des paramètres de fonctionnement [ZWINGELSTEIN,96]. Ainsi, la courbe « monte » lorsque la performance décroît et vice versa (Figure 4.9).

II.1.4.2. Détermination de l'attribut d'état d'une fonction

L'attribut d'état d'une fonction F ne peut pas être obtenu directement par des symptômes, ces derniers renseignant les phénomènes (et non pas les fonctions). Il est alors nécessaire de revenir aux causes des pertes de performance de F , c'est-à-dire aux phénomènes à l'origine de la perte de performance, placés « en amont » dans le scénario de vieillissement.

A un instant d'observation T , l'attribut de performance $F(T)$ dépend de l'état des phénomènes au même instant, mais aussi de l'historique de ces phénomènes entre l'instant initial t_0 (fin du premier remplissage ou première observation du phénomène) et T .

L'analyse qualitative d'une fonction F , à un instant donné T , est établie en considérant :

- *l'historique des n phénomènes P_i à l'origine de la dégradation de la fonction, c'est-à-dire les lois d'évolution des attributs d'états $P_i(t)$ entre l'instant t_0 des conditions initiales et T ;*
- *l'attribut de performance $F(t_0)$ aux conditions initiales.*

Nous pouvons résumer ce raisonnement dans la relation suivante :

$$F(T) = \text{fonction} \left[\sum_{i=1}^n P_i(t) \forall t \in [t_0; T], F(t_0) \right]$$

Pour illustrer ce point, nous prenons l'exemple de la dégradation de la fonction LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLECITATIONS MECANQUES dans le mécanisme de tassement de la fondation (Figure 3.25). La performance de cette fonction à un instant donné T est obtenue en considérant les lois d'évolutions des phénomènes DEFORMATION DU REMBLAI et SOUS-PRESSION DANS LE REMBLAI, entre l'instant t_0 des conditions initiales et l'instant T . Nous résumons schématiquement cette démarche à la figure 4.10.

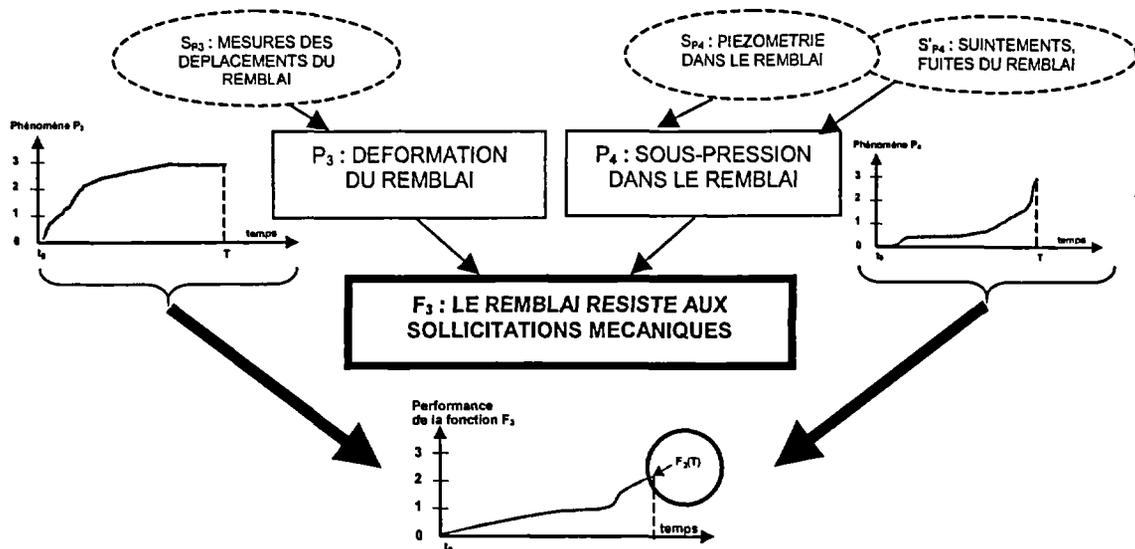


Figure 4.10 : Détermination de la performance d'une fonction à un instant T

II.2. Analyse de l'évolution de la performance à l'échelle du composant

Dans le modèle de vieillissement, nous faisons correspondre à chaque variable un attribut du deuxième ordre renseignant sur l'évolution des dégradations. Notre attention se porte ici sur la dynamique de la dégradation d'une fonction. Notre objectif est de proposer une méthodologie d'analyse qualitative de l'évolution de la performance d'une fonction d'un composant.

II.2.1. Pratique de l'analyse qualitative des évolutions des dégradations des barrages

Les méthodes à base d'index développées par EDF et le Cemagref proposent une analyse qualitative des évolutions des dégradations, que nous résumons dans le tableau 4.9.

EDF		Cemagref	
Note d'évolution	Qualificatif	Caractère évolutif des défauts	Qualificatif
1	dégradations stables (évolution très faible dans le temps)	0	amortissement ou non évolutif
3	évolution linéaire des dégradations	1	pas de données disponibles
4	évolution exponentielle des dégradations	2	évolution linéaire
		4	phénomène en voie d'accélération

Tableau 4.9 : Analyse qualitative des évolutions (EDF & Cemagref)

Nous constatons que ces méthodes, relativement proches, consistent à décrire qualitativement l'allure de la loi d'évolution des dégradations (loi non évolutive ; loi linéaire ; loi s'accélération) et permettent au final d'apprécier la cinétique du mécanisme en jeu. En revanche, elles n'apportent pas d'informations sur la vitesse de vieillissement (accélération ou amortissement), ni sur les délais qui vont produire des dégradations supplémentaires.

II.2.2. Démarche de l'analyse de l'évolution de la performance

La façon la plus immédiate de décrire l'évolution de la performance d'une fonction F est de considérer une variable du deuxième ordre rattachée à l'état de F : $(dF/dt)(t)$. Nous résumons ce raisonnement dans la figure 4.11, où la cinétique de la loi d'évolution est indiquée à partir de trois classes qualitatives (lente ; intermédiaire ; rapide).

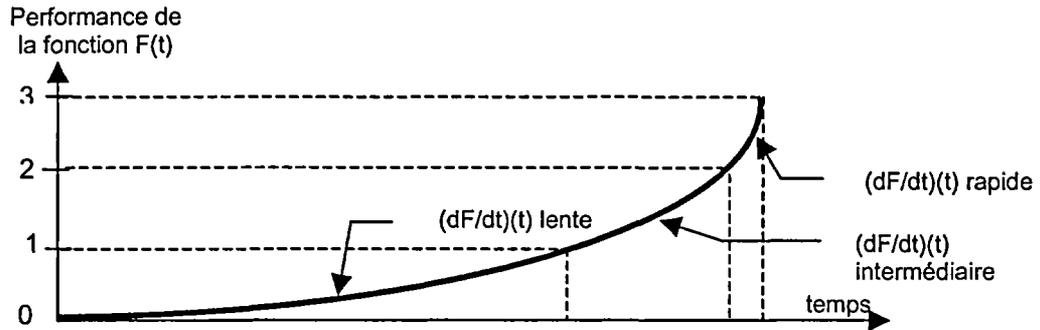


Figure 4.11 : Analyse de l'évolution d'une fonction à partir de $(dF/dt)(t)$

Cette approche comporte toutefois des inconvénients liés à la difficulté d'apprécier les attributs de second ordre $(dF/dt)(t)$. Nous proposons une alternative à ce raisonnement qui consiste à rechercher, non pas les dérivées temporelles de l'état de la fonction, mais les intervalles de temps qui vont séparer les niveaux successifs de dégradation.

Ainsi, nous définissons les distances temporelles entre deux classes qualitatives de performance (Figure 4.12) :

❶ l'intervalle de temps séparant un état de F pour lequel l'attribut de performance vaut (i) et un état de dégradation supérieure pour lequel l'attribut de performance vaut $(i+1)$:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 \quad \text{avec } t_0 \text{ et } t_1 \text{ tels que } F(t_0) = i \text{ et } F(t_1) = i+1 \text{ (pour } i=0, 1 \text{ ou } 2)$$

❷ l'intervalle de temps séparant un état de F pour lequel l'attribut de performance vaut (i) et l'état correspondant à la défaillance :

$$\Delta t_2 = t_2 - t_0 \quad \text{avec } t_0 \text{ et } t_2 \text{ tels que } F(t_0) = i \text{ et } F(t_2) = 3 \text{ (pour } i=0, 1 \text{ ou } 2)$$

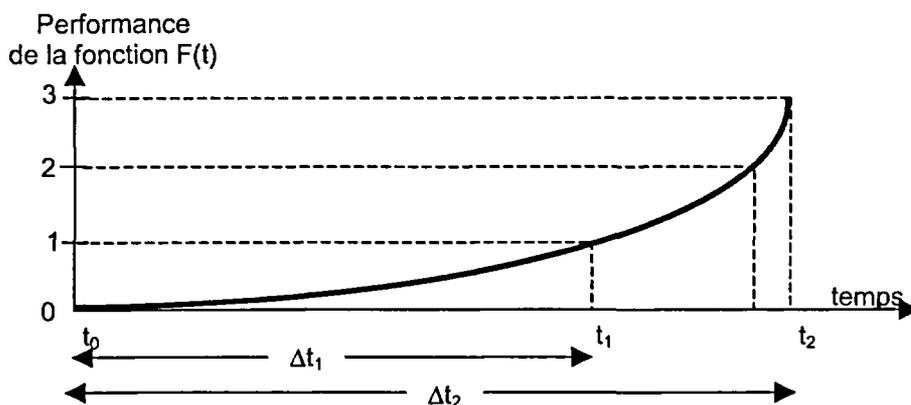


Figure 4.12 : Analyse de l'évolution d'une fonction à partir des intervalles Δt_1 et Δt_2

Cette démarche basée sur l'analyse des intervalles de temps entre deux niveaux de performance est plus intéressante pour l'expert. En effet, au lieu de rechercher à identifier la cinétique d'évolution d'un mécanisme (ce qui est toujours délicat), il va examiner les délais entre les différents niveaux de performance, ce qui est d'utilisation plus naturelle, en particulier pour déterminer ensuite les priorités et les échéanciers d'intervention.

Remarquons que cette démarche basée sur l'analyse des intervalles de temps est, sur le plan mathématique, équivalente à l'étude de la dérivée : avec t_1 proche de t_0 ou F approximativement linéaire sur $[t_0; t_1]$, $(dF/dt)(t) \approx [F(t_1) - F(t_0)] / (t_1 - t_0) \approx 1 / \Delta t_1$, pour $t \in [t_0; t_1]$,

Nous retenons, pour l'analyse de l'évolution des dégradations des fonctions, l'approche basée sur l'évaluation des intervalles de temps Δt_1 et Δt_2 entre les différents niveaux de performance.

II.2.3. Proposition d'analyse qualitative de l'évolution de la performance

A ce stade, nous devons définir les grilles temporelles permettant l'analyse qualitative des évolutions. Elles doivent être choisies en cohérence avec les échelles de temps qui marquent les opérations d'IMR des barrages, dont nous rappelons les principales fréquences (partie 1 - II.2.4) :

- le jour / la semaine : surveillance courante ;
- le mois : auscultation et maintenance courante ;
- l'année : auscultation complexe, réparations courantes et inspection annuelle ;
- les dix ans : revue de la sécurité, grosse maintenance et inspection décennale.

Sur ces bases, nous pouvons définir une première ébauche d'intervalles qualitatifs basée sur les opérations d'IMR : $\{\Delta t \leq 1 \text{ mois} ; 1 \text{ mois} < \Delta t \leq 1 \text{ an} ; 1 \text{ an} < \Delta t \leq 10 \text{ ans} ; \Delta t > 10 \text{ ans}\}$.

Par la suite (III.3), nous verrons qu'il est important d'apporter une information plus précise dans l'intervalle $\{\Delta t > 10 \text{ ans}\}$ pour prendre en compte des événements extérieurs exceptionnels (crues, séismes) de période de retour importante. Nous proposons donc une analyse plus fine en deux intervalles : $\{10 \text{ ans} < \Delta t \leq 100 \text{ ans}\}$ et $\{\Delta t > 100 \text{ ans}\}$.

Nous proposons l'analyse qualitative de l'évolution de la performance d'une fonction sur cinq intervalles de temps pris dans l'espace quantité $\{1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5\}$ et ordonnées $1 < 2 < 3 < 4 < 5$.

Pour chaque intervalle de temps Δt_1 ou Δt_2 séparant les niveaux de performance, nous faisons correspondre un attribut qualitatif, selon la grille définie de façon à prendre en compte les fréquences des opérations d'IMR et les événements exceptionnels :

Intervalle de temps $\Delta t_{1 \text{ ou } 2}$	Attribut qualitatif
$\Delta t > 100 \text{ ans}$	1
$10 \text{ ans} < \Delta t \leq 100 \text{ ans}$	2
$1 \text{ an} < \Delta t \leq 10 \text{ ans}$	3
$1 \text{ mois} < \Delta t \leq 1 \text{ an}$	4
$\Delta t \leq 1 \text{ mois}$	5

Tableau 4.10 : Grille d'analyse qualitative de l'évolution de la performance

II.2.4. Aperçu des différentes loi d'évolution de la performance

Pour un mécanisme de vieillissement donné, la cinétique globale de dégradation est généralement identique quel que soit l'ouvrage affecté et l'on retrouve les mêmes allures de lois d'évolution, connues des experts. Nous dressons dans cette section un panorama des principaux types de lois d'évolution, susceptibles d'intéresser les mécanismes de vieillissement des barrages.

Après avoir défini une méthode pour évaluer l'évolution des pertes de performance, nous complétons cette analyse en examinant l'allure des lois d'évolution d'une fonction, l'objectif étant de déterminer comment les dégradations évoluent entre deux niveaux qualitatifs de performance.

Loi linéaire

Il s'agit de la loi d'évolution la plus simple. Elle est utilisée par exemple pour décrire la corrosion [CREMONA,02], et est choisie le plus souvent par défaut lorsqu'on ne connaît pas la cinétique du mécanisme.

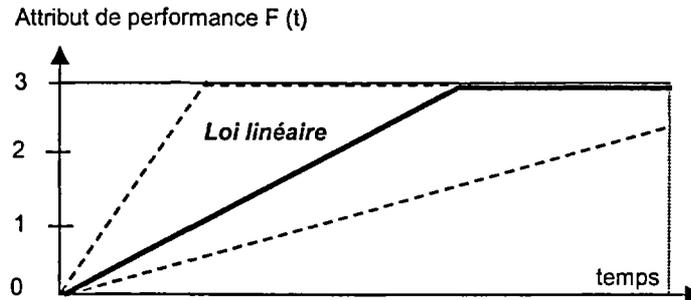


Figure 4.13 : Loi linéaire

Loi amortie

La loi amortie correspond à une évolution initialement rapide et qui ralentit au fil du temps. A titre d'exemple, elle intervient dans le processus de carbonatation ou encore dans le mécanisme de tassement d'un remblai (performance de la fonction LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES).

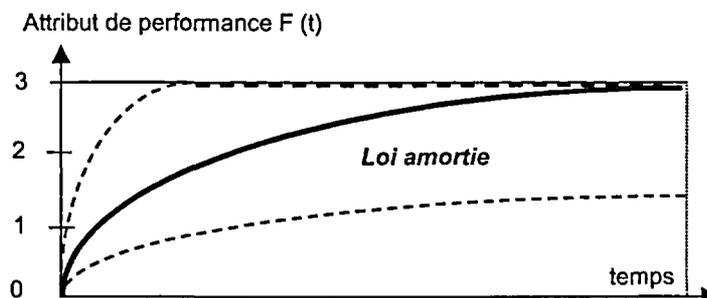


Figure 4.14 : Loi amortie

Loi exponentielle ou s'accélégrant dans le temps

La loi exponentielle concerne les mécanismes dont le déclenchement est long et qui s'accélère rapidement avant la défaillance. Nous la trouvons dans les mécanismes associés à la fatigue, la dégradation étant alors causée par les effets de chargements répétés. Elle est également représentative du mécanisme d'érosion interne (évolution de la performance de la fonction LE REMBLAI ou LA FONDATION RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES).

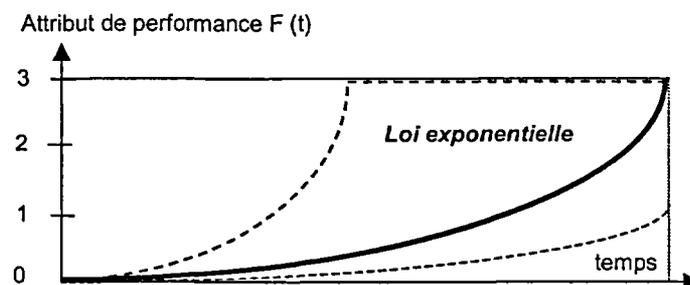


Figure 4.15 : Loi exponentielle

Loi en créneaux

La loi en créneaux concerne les mécanismes qui vont se produire soudainement ou brusquement. La loi d'évolution de la performance est alors discontinue. Dans des cas extrêmes, il n'y a pas de dégradation mais défaillance immédiate de la fonction, voire ruine de l'ouvrage.

Ce type d'évolution correspond typiquement aux chocs entraînant des ruptures de composants (dégradation du masque amont sous l'impact d'embâcles), ou encore aux ouvertures brusques de plan de cisaillement en fondation ou les ruptures progressives de blocs rocheux (évolution de la performance de la fonction LA FONDATION RESISTE AUX SOLLECITATIONS MECANIQUES).

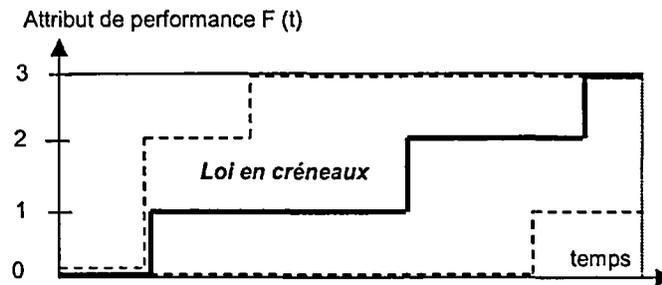


Figure 4.16 : Loi en créneaux

II.3. Analyse de la performance globale d'un barrage

Dans cette section, nous examinons comment évaluer la performance d'un barrage (à la granularité supérieure) à partir de celle de ses composants. Notre attention se porte plus particulièrement sur la performance des fonctions de résistance, qui intéressent directement la sécurité de l'ouvrage. Notre objectif est de proposer une méthodologie qualitative d'évaluation de la performance globale vis-à-vis de la sécurité.

II.3.1. Fiabilité des systèmes en série

Afin d'apprécier la performance globale d'un système à travers ses composants, il est nécessaire de préciser quelques notions théoriques sur la fiabilité des systèmes en série. La référence [CREMONA,02] sert de base à cette introduction.

Précisons tout d'abord quelques définitions propres à cette section (II.3.1) :

- un *système* est un ensemble de modes de défaillance, c'est-à-dire un ensemble de fonctions défaillantes ;
- au sein d'un tel *système*, un *mécanisme de ruine* est un sous-ensemble de modes de défaillance qui, s'étant tous produits, entraînent la défaillance du système. La défaillance du *système* (ou sa ruine) se produit donc lorsque tous les modes de défaillance d'un même mécanisme se sont produits ;
- un *système* où chaque mécanisme de ruine n'est composé que d'un seul mode de défaillance, est un *système en série* (a contrario, un système n'admettant qu'un seul mécanisme de ruine est un système parallèle).

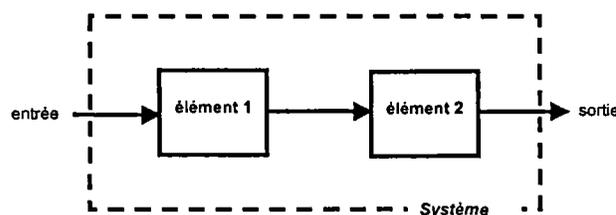


Figure 4.17 : Système en série à deux modes de défaillance

On va donc chercher à apprécier un système à partir de ses modes de défaillance. Ainsi, la $i^{\text{ème}}$ fonction d'un *système* (S) peut être décrite par une variable booléenne F_i qui prend la valeur 1 si le mode de défaillance ne s'est pas produit (F_i accomplie) et 0 s'il s'est produit (F_i défaillante). De façon analogue, le *système* (S) est décrit par une variable booléenne F_s , valant 1 ou 0.

Le fonctionnement de (S) à un instant donné dépend donc de l'état de ces m modes de défaillance le constituant. Dans un *système* en série, (S) est défaillant dès lors qu'un de ces m modes de défaillance se produit. On peut alors exprimer la variable F_s à partir des variables booléennes F_i par la relation suivante qui caractérise les *systèmes* en série :

$$F_s = \prod_{i=1}^m (F_i)$$

ou encore

$$F_s = \min_{i \in \{0, 1, \dots, m\}} (F_i)$$

avec

$$F_s = 1 - F_s \quad \text{et} \quad F_i = 1 - F_i,$$

on obtient

$$F_s = \max_{i \in \{0, 1, \dots, m\}} (F_i)$$

On essaie maintenant d'encadrer la probabilité de défaillance du *système* $P(F_s=0)$ à partir des probabilités d'occurrence de ces modes de défaillance $P(F_i=0)$.

A partir de la relation

$$F_s = \prod_{i=1}^m (F_i)$$

et avec

$$F_s = 1 - F_s \quad \text{et} \quad F_i = 1 - F_i$$

il vient :

$$F_s = F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_{m-1} \cdot F_m = 1 - F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_{m-1} \cdot F_m$$

Répété m fois, on obtient :

$$F_s = 1 - (F_1 + F_1 \cdot F_2 + F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 + \dots + F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_{m-1} \cdot F_m)$$

ou encore

$$F_s = F_1 + F_1 \cdot F_2 + F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 + \dots + F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_{m-1} \cdot F_m$$

Les variables étant booléennes :

$$\max_{i \in \{0, 1, \dots, m\}} \{F_i\} \leq F_s \leq \sum_{i=1}^m \{F_i\}$$

finalement

$$\max_{i \in \{0, 1, \dots, m\}} \{P(F_i=0)\} \leq P(F_s=0) \leq \sum_{i=1}^m \{P(F_i=0)\}$$

Le terme à gauche de l'inégalité correspond à une dépendance totale entre les modes de défaillance. A contrario, on obtient le terme de droite lorsque les modes de défaillances sont indépendants.

Très clairement, cela montre que la probabilité de défaillance d'un système en série est fortement conditionnée par son mode de défaillance (ou sa fonction) le plus faible.

II.3.2. Evaluation de la performance globale à partir de celle des composants

II.3.2.1. Les fonctions impliquées dans la stabilité d'un barrage

A partir de l'analyse fonctionnelle interne (partie 3 - II.1.2), nous avons vu que l'analyse de la performance vis-à-vis de la sécurité peut être ramenée à l'étude d'une seule fonction principale :

→ LE BARRAGE STOCKE L'EAU DE LA RETENUE

La performance de cette fonction est binaire : soit elle est accomplie et le barrage reste intègre, soit elle ne l'est pas et le barrage est rompu. Nous retrouvons cette logique booléenne dans la définition de la rupture: « *rupture ou mouvement d'une partie d'un barrage ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau. En général, le résultat sera une "lâchure" d'un volume d'eau important* » [ICOLD,95].

Pour accomplir cette fonction, l'ouvrage doit assurer des *fonctions de contrainte* en réaction que nous avons regroupé en une unique fonction de résistance (partie 3 – II.1.2) :

→ F_s : LE BARRAGE RESISTE AUX SOLLICITATIONS

A l'instar des fonctions des composants, nous considérons différents états qualitatifs de performance de la fonction F_s , pris dans l'espace $\{0 ; 1 ; 2 ; 3\}$.

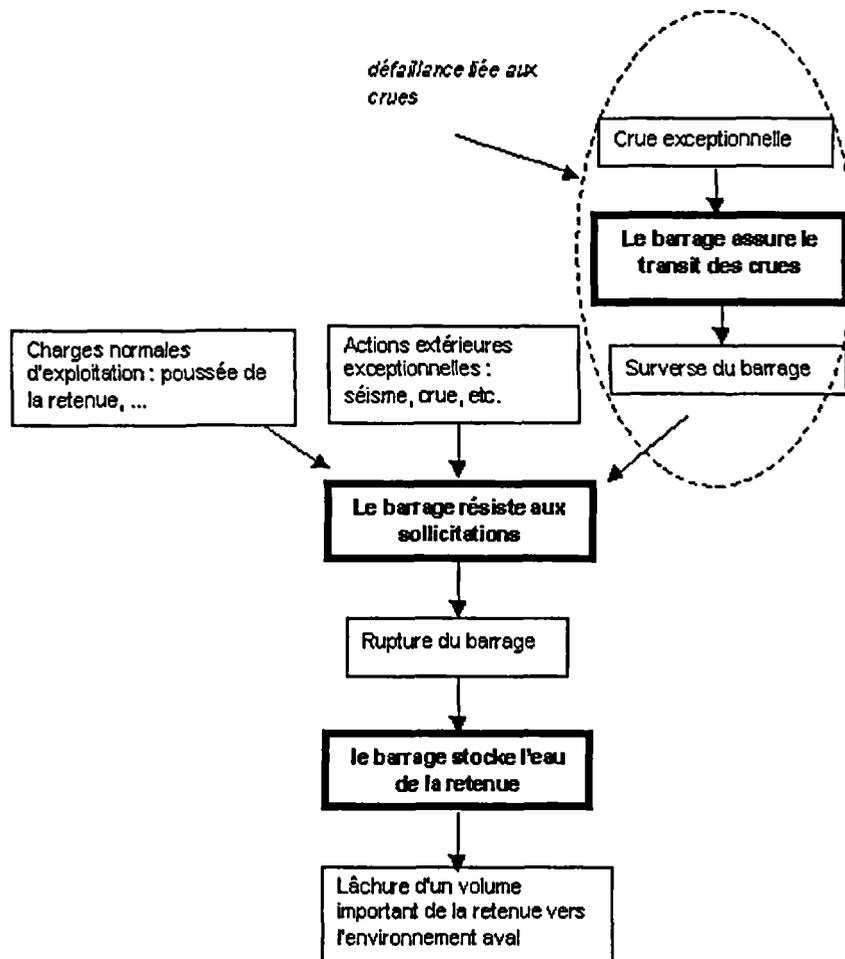


Figure 4.18 : Scénario de rupture d'un barrage à la granularité supérieure

Le graphe causal correspondant au scénario de la rupture d'un barrage (Figure 4.18) met en évidence les liens de cause à effet entre les différentes fonctions de granularité supérieure. Il apparaît logiquement que la fonction de contrainte F_s (LE BARRAGE RESISTE AUX SOLLICITATIONS) soit impliquée dans la performance de la fonction principale LE BARRAGE STOCKE L'EAU DE LA RETENUE : sa dégradation va « rapprocher » le barrage de son état physique correspondant à la défaillance de la fonction principale et sa défaillance entraîne (de façon imminente) la rupture.

Dans la suite, nous obtenons la performance globale d'un barrage vis-à-vis de la sécurité à partir de la performance de fonction de résistance aux sollicitations (F_s). Cette dernière est évaluée à partir de la performance des fonctions de granularité intermédiaire contribuant directement à la stabilité du barrage (partie 3 – II.1.3) :

(pour les barrages poids)

- F_1 : LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES
- F_2 : LA FONDATION RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES

(pour les barrages en remblai)

- F'_1 : LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES
- F'_2 : LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES
- F'_3 : LA FONDATION RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES

II.3.2.2. Proposition d'analyse qualitative de la performance globale

La difficulté de l'évaluation de la performance globale à partir de celle des fonctions de résistance des composants (F_1 et F_2 ou F'_1 , F'_2 et F'_3) réside dans le fait que les variables adoptées indiquant la performance ne sont pas booléennes. Nous déterminons alors la performance globale (F_s) en confrontant les variables entre elles à leurs différents niveaux qualitatifs (Tableau 4.11) :

		F ₁			
		0	1	2	3
F ₂	0	0	1	2	3
	1	1	1	2	3
	2	2	2	2	3
	3	3	3	3	3

Barrage poids

		F' ₁			
		0	1	2	3
F' ₂ ou F' ₃	0	0	1	2	3
	1	1	1 ou 2	2	3
	2	2	2	2 ou 3	3
	3	3	3	3	3

Barrage en remblai

Tableau 4.11 : Tables de vérité d'analyse de la performance globale à partir des fonctions de résistance des composants (barrages poids et en remblai)

Les éléments principaux permettant de construire ces tables de vérité sont les suivants :

❶ la défaillance d'une des fonctions de résistance (F₁ ou F₂) ou (F'₁, F'₂ ou F'₃) des composants entraîne la défaillance de la résistance globale du barrage et donc sa rupture. Dans cette situation, nous sommes donc ramenés à l'étude d'un *système en série* (II.3.1), chaque *mécanisme de ruine* étant constitué d'un seul mode de défaillance correspondant à une des fonctions de résistance :

- *barrages poids* : $\{F_1 = 3 \text{ ou } F_2 = 3\} \Rightarrow F_s = 3$

- *barrages en remblai* : $\{F'_1 = 3 \text{ ou } F'_2 = 3 \text{ ou } F'_3 = 3\} \Rightarrow F_s = 3$

❷ pour les barrages poids, les fonctions de résistance F₁ et F₂ sont totalement indépendantes : le mécanisme d'érosion interne des fondations n'a pas de lien avec le cisaillement ou le glissement du corps de l'ouvrage. Nous évaluons alors la performance globale du barrage (F_s) en considérant le maximum des attributs d'état des fonctions de résistance des composants : $F_s = \max(F_1, F_2)$

❸ pour les barrages en remblai, F'₁ n'est pas indépendante de F'₂ ou de F'₃. En effet, même si la situation reste exceptionnelle, nous pouvons imaginer un barrage en remblai qui serait à la fois le siège d'un mécanisme d'érosion interne dans sa fondation et d'une diminution de la résistance au glissement du remblai, le premier mécanisme étant alors susceptible d'influencer le second. A partir des résultats de la section II.3.1, nous avons nécessairement : $F_s \geq \max(F'_1, F'_2, F'_3)$

En première analyse, nous proposons les relations suivantes qui restent à approfondir :

- lorsque les variables (F'₁, F'₂ et F'₃) n'ont pas le même attribut, nous considérons que la valeur la plus défavorable détermine la performance globale : $F_s = \max(F'_1, F'_2, F'_3)$

- lorsque les variables (F'₁, F'₂ et F'₃) ont le même attribut, nous pouvons considérer une influence d'un mécanisme sur l'autre : $F_s = \max(F'_1, F'_2, F'_3) \text{ ou } \max(F'_1, F'_2, F'_3) + 1$

En résumé, nous évaluons la performance globale d'un barrage vis-à-vis de la sécurité à partir de la performance des fonctions de résistance (F₁ et F₂) ou (F'₁, F'₂ et F'₃) assurées par les composants massifs.

A l'exception de situations exceptionnelles qui concernent les seuls barrages en remblai, la performance la plus faible de ces précédentes fonctions détermine la performance globale du barrage vis-à-vis de la sécurité. Nous proposons une analyse qualitative sur quatre valeurs prises dans l'espace quantité {0 ; 1 ; 2 ; 3} et ordonnées : 0 < 1 < 2 < 3, selon la grille suivante :

Attribut de performance globale du barrage	Qualification
0	<i>performance optimale</i>
1	<i>performance correcte</i>
2	<i>performance faible - fonction globale de résistance partielle</i>
3	<i>fonction de résistance globale défaillante - état proche de la rupture</i>

Tableau 4.12 : Grille d'analyse de la performance globale d'un barrage

III. Modélisation des historiques de vieillissement

Nous disposons dorénavant d'un modèle fonctionnel pour représenter les scénarios de vieillissement (partie 3) et d'une méthodologie qualitative pour analyser l'état des symptômes, phénomènes et fonctions (II.1) et l'évolution de la performance des fonctions (II.2 et II.3). Nous possédons donc tous les outils pour modéliser les historiques de vieillissement des barrages.

III.1. Démarche de la modélisation des historiques

Confronté à un barrage qui a été soumis (ou qui est soumis) au cours de sa vie à un mécanisme de vieillissement, nous disposons d'informations historiques sur les observations visuelles, les données d'auscultation et éventuellement des essais ou études complémentaires. A partir de ces données, nous cherchons à modéliser l'évolution des dégradations. Notre démarche comprend deux étapes (Figure 4.19).

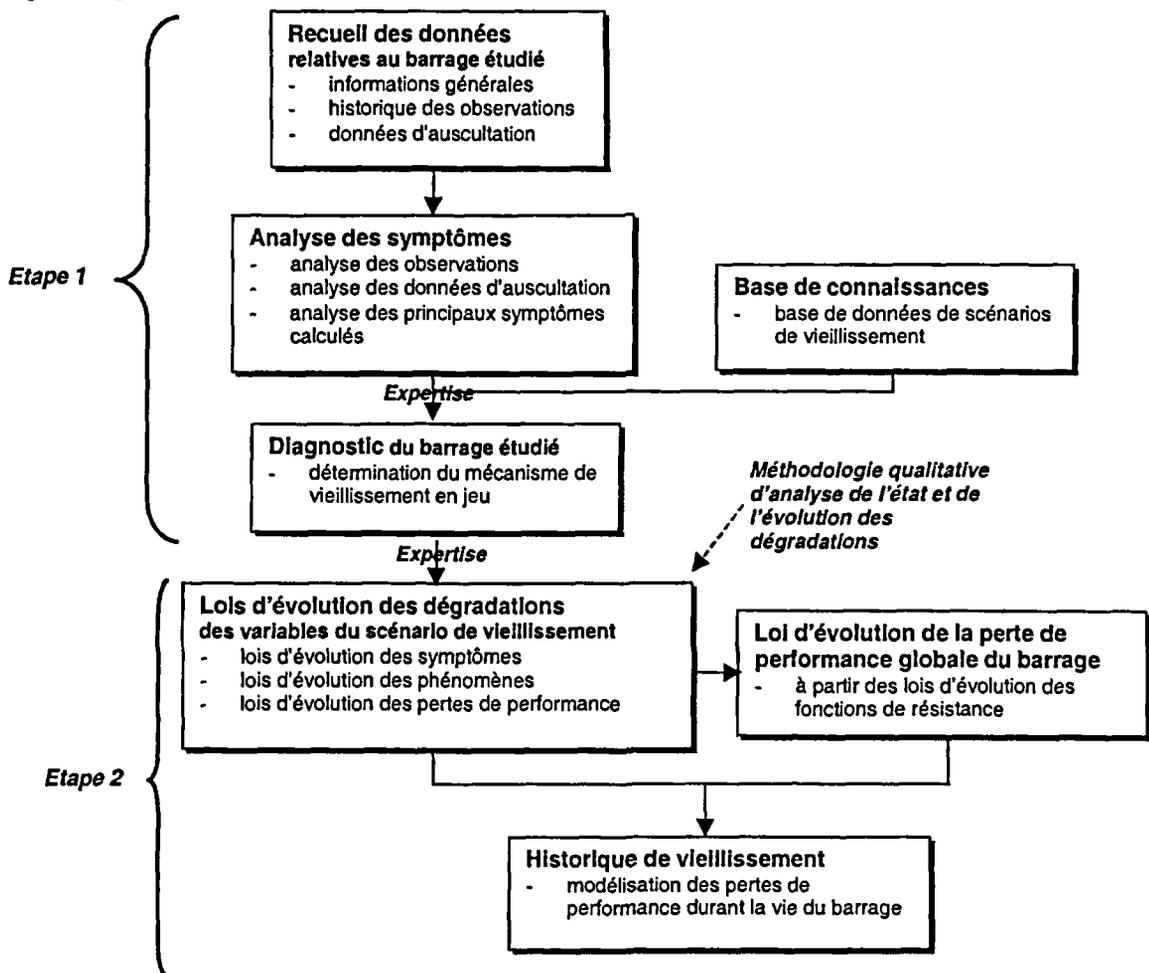


Figure 4.19 : Démarche générale de modélisation

Tout d'abord, *l'étape de diagnostic* étudie le mécanisme de vieillissement en jeu. A partir des informations disponibles, de l'analyse des symptômes et en s'aidant de la base de connaissances des mécanismes, nous déterminons par analogie le scénario fonctionnel de vieillissement.

Ensuite, *l'étape de modélisation de l'historique de vieillissement* va examiner les différentes lois de dégradation. Successivement, nous déterminons (Figure 4.20) :

- les lois d'évolution des symptômes observés, auscultés et calculés (II.1.2) ;

- ② les lois d'évolutions des phénomènes, obtenus à partir des symptômes directs et à défaut des symptômes indirects (II.1.3) ;
- ③ les lois d'évolution de la performance des fonctions des composants, par analyse des lois des phénomènes situés en amont dans le scénario de vieillissement (II.1.4) ;
- ④ la loi d'évolution de la performance globale du barrage (II.3).

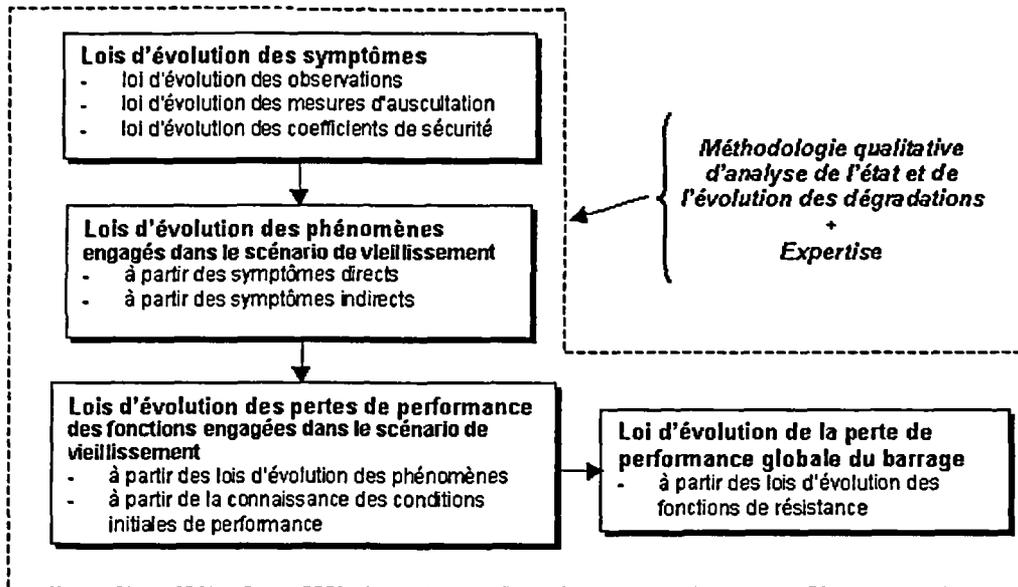


Figure 4.20 : Détermination des lois d'évolution des dégradations

Nous présentons à la figure 4.21 le format d'un historique de vieillissement appliqué à l'exemple du barrage de Carcès, présenté en partie 2 (III.2.1), affecté par un mécanisme de tassement d'un remblai dû à des fondations compressives (scénario 1.1).

Au final, la modélisation de l'historique de vieillissement d'un barrage indique :

- *le scénario fonctionnel de vieillissement ;*
- *les lois d'évolution des dégradations des composants, en particulier les lois d'évolution des performances des fonctions ;*
- *la loi d'évolution de la performance globale du barrage.*

III.2. Constitution de la base de données d'historiques de vieillissement

La base de données des historiques est renseignée à partir du retour d'expérience des experts : au fil des missions réalisées par ces derniers, des exemples de mécanismes de vieillissement sont rencontrés et les historiques peuvent être progressivement constitués. Il est également possible de mettre à profit certains recueils d'expertise bien documentés, tels que [LAUTRAIN,97-02].

Nous disposons dorénavant d'une méthode pour capitaliser le retour d'expérience des experts sous forme d'historique de vieillissement et pour constituer progressivement une base de données. A terme, l'objectif est de disposer d'une collection d'historiques de barrages soumis au vieillissement, avec pour chacun d'eux une description fonctionnelle et dynamique des dégradations au cours du temps. Compte tenu du retour d'expérience dont nous disposons au sein du parc du ministère de l'environnement, nous visons à recueillir, pour un scénario de vieillissement donné, quelques cas d'ouvrages ayant subi ce mécanisme. En toutes hypothèses, il apparaît clairement qu'il est impossible d'engager à terme une démarche quantitative d'analyse des dégradations.

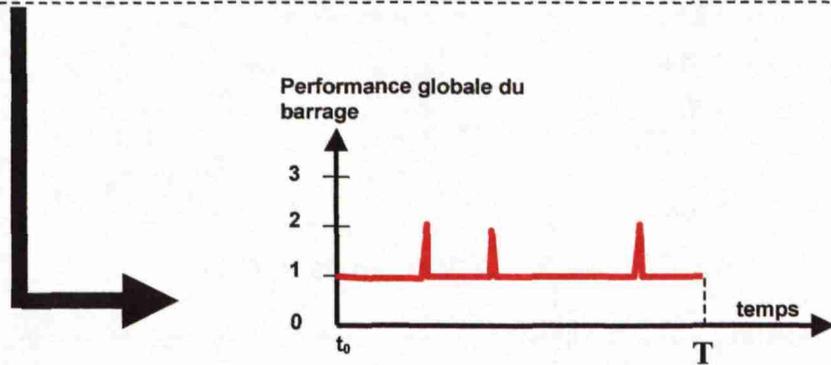
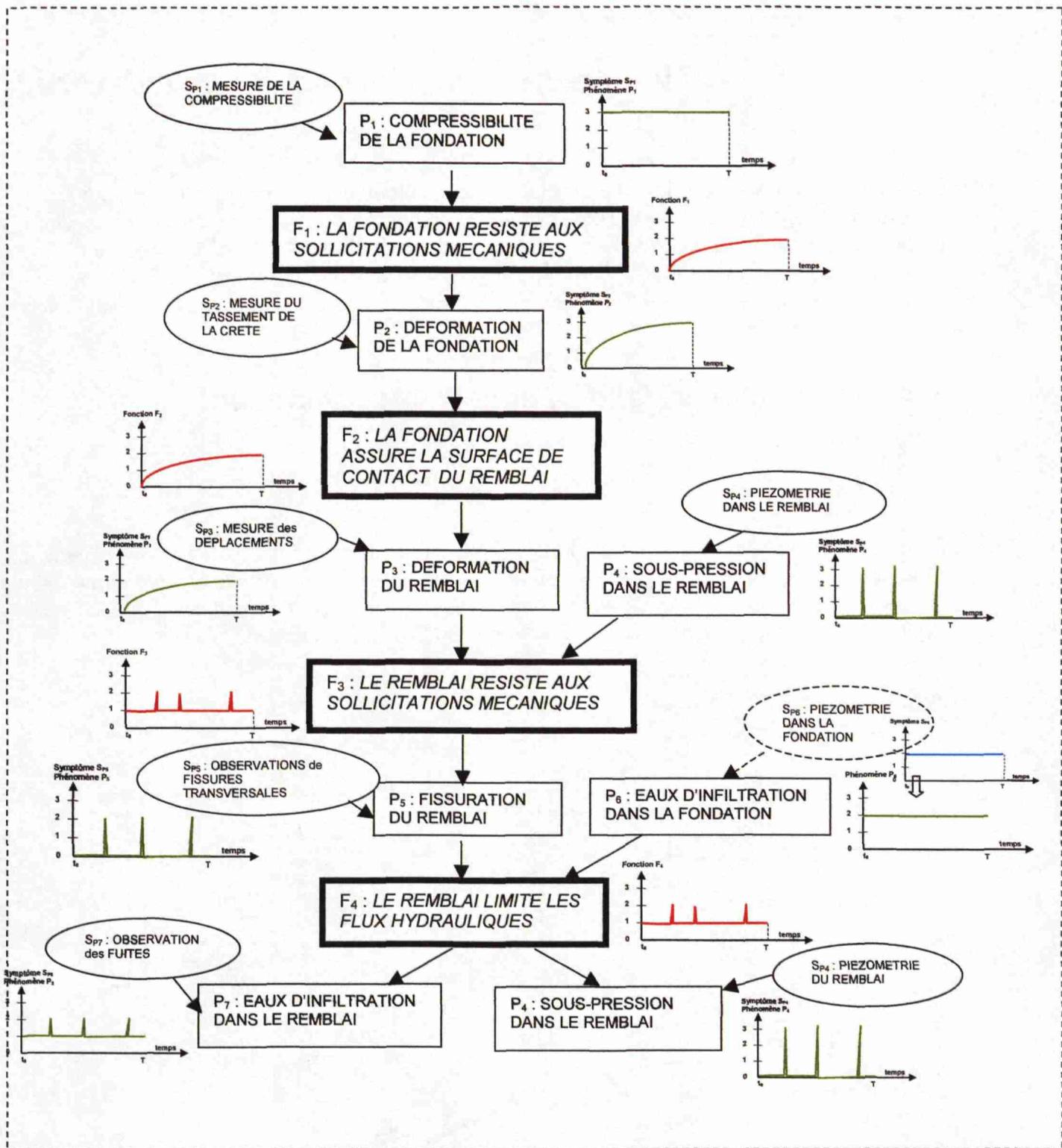


Figure 4.21 : Exemple d'un historique de barrage (CARCES-83)

IV. Analyse qualitative de la criticité

Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie qualitative pour analyser la criticité des pertes de performance des barrages. Tout d'abord, nous développons la criticité au niveau des composants à la granularité intermédiaire (III.1), puis nous traitons la criticité de la perte de performance globale d'un barrage (III.2). Enfin, nous examinons comment les événements extérieurs exceptionnels (crues, séismes) peuvent être pris en compte pour obtenir une évaluation complète des risques (III.3).

IV.1. Analyse de la criticité à l'échelle du composant

IV.1.1. Démarche générale

Notre démarche d'analyse de la criticité consiste à tirer profit du retour d'expérience des experts capitalisé sous forme d'historiques, pour évaluer les défaillances futures d'un barrage en cours d'étude soumis à un mécanisme de vieillissement. Le principe du raisonnement, énoncé de manière générale dans les propositions (I.4), est le suivant (Figure 4.22) :

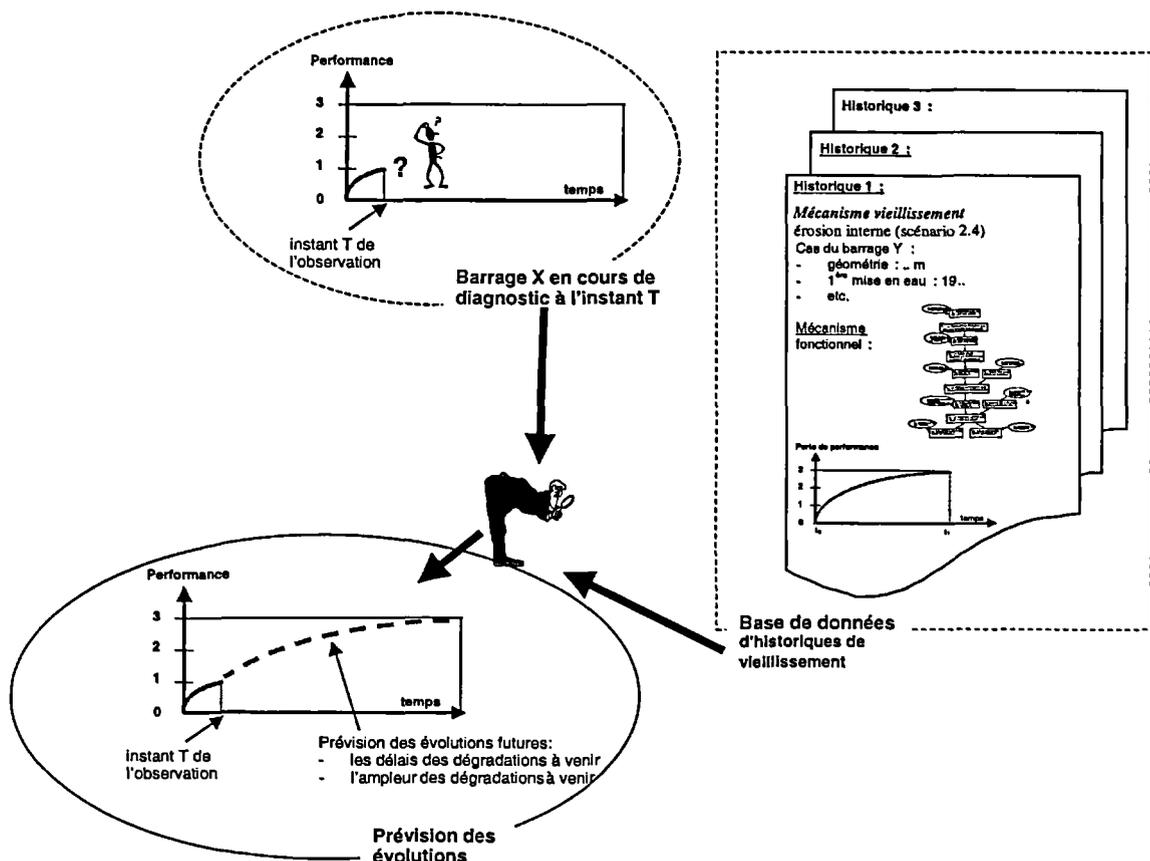


Figure 4.22 : Prévision de l'évolution des dégradations

L'expert, face à un barrage soumis à un mécanisme de vieillissement, établit préalablement le diagnostic et détermine alors les états de dégradation au moment de l'observation et leurs historiques jusqu'à cet instant. Il cherche ensuite à connaître les évolutions des dégradations et leurs conséquences. Pour cela, il examine, dans la collection des historiques, les barrages du

même type et ayant subi le même mécanisme. Pour ces derniers ouvrages, il dispose des lois d'évolution des dégradations aux granularités intermédiaire et supérieure. Par un raisonnement par analogie, il détermine où se positionne le barrage étudié dans la dynamique du mécanisme et peut alors extrapoler les évolutions et conséquences futures.

Dans cette démarche, notre objectif n'est pas de développer des outils visant à se soustraire à l'expertise, mais s'inscrit clairement dans une approche d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques, destinée à l'ingénieur spécialisé.

La démarche de prévision des évolutions étant énoncée, il nous reste à proposer une méthodologie pour l'analyse de la criticité. Dans cette section, nous nous intéressons à la criticité de granularité intermédiaire correspondant à la dégradation d'une fonction d'un composant, pour laquelle nous recherchons deux paramètres (I.1.1) : **une mesure de l'occurrence de la perte de performance de la fonction et une mesure des conséquences au niveau du composant.**

IV.1.2. Mesure de l'occurrence de la perte de performance d'une fonction

IV.1.2.1. Proposition d'analyse qualitative de la mesure de l'occurrence

A partir du retour d'expérience et d'une collection d'historiques de vieillissement, l'expert est à même de prévoir, par analogie, l'évolution future de la performance d'une fonction (F) étudiée. Pour cela, il évalue les distances temporelles séparant l'état de la fonction correspondant à l'instant initial d'observation du barrage, aux états de dégradation supérieure, selon la méthodologie définie précédemment (II.2). Cette prévision experte des délais de dégradation correspond à des mesures de l'occurrence des pertes de performance.

Notre démarche va donc consister à évaluer, à un instant initial t_0 , les mesures de l'occurrence Δt_1 et Δt_2 des pertes de performance nécessaires respectivement à la dégradation d'une unité qualitative et à la défaillance de la fonction (Figure 4.23) :

- la mesure de l'occurrence de la dégradation d'une unité qualitative de la performance :
 Δt_1 tel que $F(t_0) = i$ et $F(t_0 + \Delta t_1) = i+1$
- la mesure de l'occurrence de la défaillance de la fonction :
 Δt_2 tel que $F(t_0) = i$ et $F(t_0 + \Delta t_2) = 3$

Deux attributs qualitatifs, appelés désormais attributs d'occurrence, sont associés à ces mesures (Tableau 4.13) :

- l'attribut d'occurrence de dégradation d'une unité qualitative, correspondant à Δt_1 ;
- l'attribut d'occurrence de défaillance, correspondant à Δt_2 .

Mesure de l'occurrence $\Delta t_{1 \text{ ou } 2}$	Attribut d'occurrence
$\Delta t_{1 \text{ ou } 2} > 100 \text{ ans}$	1
$10 \text{ ans} < \Delta t_{1 \text{ ou } 2} \leq 100 \text{ ans}$	2
$1 \text{ an} < \Delta t_{1 \text{ ou } 2} \leq 10 \text{ ans}$	3
$1 \text{ mois} < \Delta t_{1 \text{ ou } 2} \leq 1 \text{ an}$	4
$\Delta t_{1 \text{ ou } 2} \leq 1 \text{ mois}$	5

Tableau 4.13 : Grille d'analyse qualitative d'analyse de la mesure de l'occurrence

Les mesures de l'occurrence (et leur attribut) sont des prévisions expertes de la rapidité d'évolution de la perte de performance. S'appuyant sur le retour d'expérience, elles correspondent, selon l'ingénieur spécialisé, à la prévision la plus juste et la plus vraisemblable, celle « qui a les plus grandes chances de se produire » ou une forte probabilité d'occurrence.

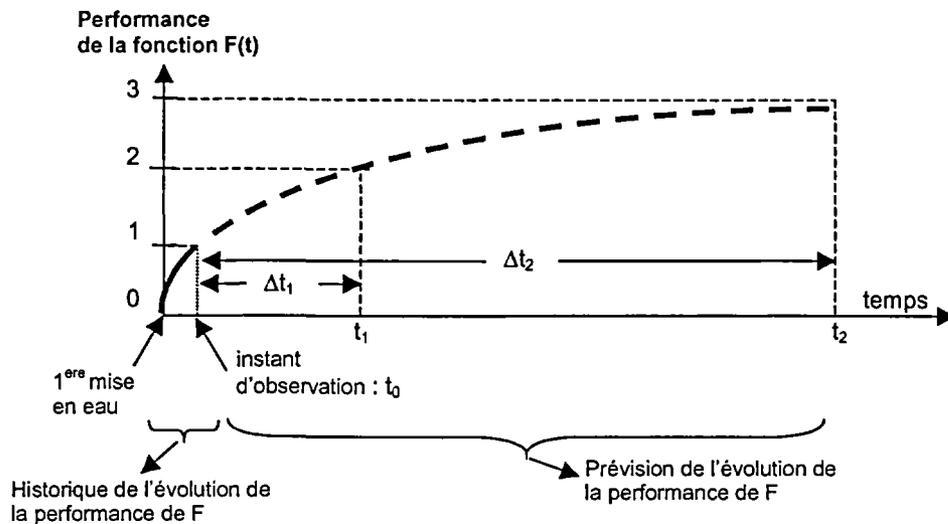


Figure 4.23 : Mesures de l'occurrence Δt_1 et Δt_2 de la perte de performance d'une fonction

exemple : soit une fonction F observée par un expert à un instant donné t_0 , avec une performance initiale $F(t_0) = i$, avec $i \neq 3$ (la fonction n'est pas défaillante à t_0)

- l'attribut d'occurrence de dégradation d'une unité qualitative vaut 3

$\Leftrightarrow 1 \text{ an} < \Delta t_1 \leq 10 \text{ ans}$

$\Leftrightarrow F(t_0 + \Delta t_1) = i+1$

\Leftrightarrow l'expert prévoit que F aura perdu une unité qualitative de performance à l'instant $t_0 + \Delta t_1$

- l'attribut d'occurrence de défaillance vaut 2

$\Leftrightarrow 10 \text{ ans} < \Delta t_2 \leq 100 \text{ ans}$

$\Leftrightarrow F(t_0 + \Delta t_2) = 3$

\Leftrightarrow l'expert prévoit que F sera défaillante à l'instant $t_0 + \Delta t_2$

IV.1.2.2. Probabilité rattachée à la mesure de l'occurrence

A ce stade, il est intéressant de rattacher à la prévision des experts une probabilité d'occurrence de perte de performance. Pour cela, nous avons réalisé une interview d'un panel de six experts du Cemagref et d'EDF, impliqués dans notre recherche. La technique d'interview [SCOTT,91] a consisté à un bref questionnaire écrit, accompagné d'un exposé oral du contexte et d'une mise en situation par des exemples :

« Vous êtes en situation d'expertise sur un barrage en service, présentant des désordres susceptibles d'être évolutifs. Dans la conclusion de votre rapport, vous indiquez que ces évolutions sont susceptibles d'aboutir à telle dégradation (ou événement) dans tel délai, avec une probabilité que vous qualifiez de *très forte*, *forte*, *moyenne* ou *faible*. Dans votre esprit, quelles valeurs quantitatives de probabilité faites-vous correspondre à :

- une probabilité très forte d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) ?
- une probabilité forte d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) ?
- une probabilité moyenne d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) ?
- une probabilité faible d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) ? »

Les résultats (Tableau 4.15) ont été agrégés par moyenne arithmétique des estimations, pondérées par auteurs (selon deux critères de pondération : compétences en expertise traditionnelle et en analyse de risques) :

	expert 1	expert 2	expert 3	expert 4	expert 5	expert 6	agrégation
probabilité « très forte »	$p > 0,75$ $p_{cible} = 0,9$	$p > 0,75$	$p > 0,33$	$p > 0,8$ $p_{cible} = 0,9$	$p > 0,75$ $p_{cible} = 0,82$	$p > 0,5$	$p > 0,61$
probabilité « forte »	$0,35 < p < 0,75$ $p_{cible} = 0,4$	$0,35 < p < 0,75$ $p_{cible} = 0,55$	$0,1 < p < 0,33$ $p_{cible} = 0,21$	$p_{cible} = 0,7$	$p_{cible} = 0,5$	$0,1 < p < 0,5$ $p_{cible} = 0,3$	$p_{cible} = 0,41$
probabilité « moyenne »	$0,1 < p < 0,35$ $p_{cible} = 0,2$	$0,15 < p < 0,35$ $p_{cible} = 0,25$	$10^{-3} < p < 10^{-2}$ $p_{cible} = 5,5 \cdot 10^{-3}$	$p_{cible} = 0,4$	$p_{cible} = 0,25$	$10^{-2} < p < 10^{-1}$ $p_{cible} = 0,055$	$p_{cible} = 0,16$
probabilité « faible »	$p < 0,35$ $p_{cible} = 0,1$	$p < 0,15$	$10^{-4} < p < 10^{-3}$ $p_{cible} = 5,5 \cdot 10^{-4}$	$p_{cible} = 0,1$	$p_{cible} = 0,1$	$10^{-3} < p < 10^{-2}$ $p_{cible} = 5,5 \cdot 10^{-3}$	$p_{cible} = 0,07$
pondération	1,25	2	2	1	1	2	

Tableau 4.14 : Probabilités d'occurrence rattachées aux dires d'experts

Ces résultats sont comparables aux probabilités d'occurrence associées aux dires d'experts (de domaines a priori quelconques) que l'on trouve dans la littérature [LICHTENSTEIN,77]. Ces probabilités ont en outre été utilisées dans certaines références relatives à l'analyse de risques des barrages [CEA,00], [VICK,97] :

Verbal Description	Probability Equivalent	Low	High
virtually impossible	0.01	0.00	0.05
very unlikely	0.10	0.02	0.15
unlikely	0.15	0.04	0.45
fairly unlikely, rather unlikely	0.25	0.02	0.75
fair chance, toss-up	0.50	0.25	0.85
usually, good chance, probable, likely	0.75	0.25	0.95
quite likely	0.80	0.30	0.99
very likely, very probably	0.90	0.75	0.99
virtually certain	0.99	0.90	1.00

Tableau 4.15 : Transcription de descriptions expertes de l'incertain [CEA,00]

Il est possible de rattacher une valeur quantitative cible à l'estimation des délais de dégradation Δt_1 et Δt_2 . Nous retenons la valeur de 0,40, issue de nos interviews, pour traduire une forte probabilité d'occurrence de la perte de performance envisagée par les experts dans les intervalles de temps Δt_1 et Δt_2 .

IV.1.3. Mesure des conséquences de la perte de performance d'une fonction

Nous recherchons les conséquences à la granularité intermédiaire de la perte de performance d'une fonction d'un composant. Pour cela, les effets locaux sont étudiés en se concentrant spécifiquement sur les conséquences sur la fonction en cours d'étude. Il s'agit donc de prévoir l'ampleur de la perte de performance d'une fonction correspondant à une mesure de l'occurrence envisagée (Figure 4.26).

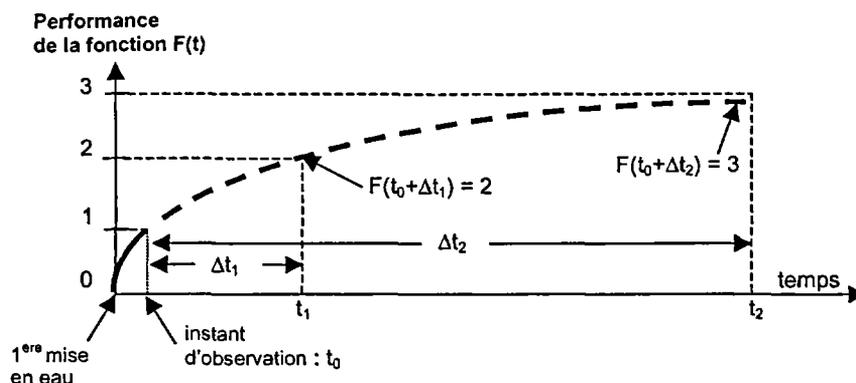


Figure 4.24 : Mesures des conséquences de la perte de performance d'une fonction

Nous proposons d'analyser les conséquences de la dégradation d'une fonction (F) d'un composant en estimant directement la performance de (F) à échéance des mesures de l'occurrence Δt_1 et Δt_2 . Ainsi, à un instant initial t_0 d'observation, les conséquences de la perte de performance de la fonction (F) sont estimées à partir de deux attributs (Figure 4.26) :

- *l'attribut de conséquence $F(t_0+\Delta t_1)$: il correspond à la prévision de l'état de la fonction à l'instant $t_0+\Delta t_1$;*
- *l'attribut de conséquence $F(t_0+\Delta t_2)$: il correspond à la prévision de l'état de la fonction à l'instant $t_0+\Delta t_2$;*

Nous proposons alors la grille d'analyse qualitative des conséquences suivante :

Attributs de conséquence $F(t_0+\Delta t_1)$ et $F(t_0+\Delta t_2)$	Performance aux instants $(t_0+\Delta t_1)$ et $(t_0+\Delta t_2)$
1	fonction correcte
2	fonction partielle
3	fonction défailante

Tableau 4.16 : Grille d'analyse qualitative des conséquences

IV.1.4. Analyse qualitative de la criticité

IV.1.4.1. Proposition de grille qualitative d'analyse

Après avoir défini les mesures de l'occurrence et les attributs de conséquence de la perte de performance d'une fonction, il nous reste à croiser ces deux paramètres pour définir une mesure de la criticité à la granularité intermédiaire.

Dans les méthodes simplifiées d'analyse de risques proposées par EDF et le Cemagref, l'index de criticité est obtenu en additionnant les notes d'état et d'évolution, puis en pondérant le résultat de l'addition par un coefficient d'importance fonctionnelle p propre au composant : *Criticité = (Note d'état + Note d'évolution) . p*

Dans notre démarche, nous cherchons à exprimer la criticité de la dégradation de la fonction du composant (à la granularité intermédiaire), indépendamment de son importance ou de son rôle dans le système. Cela implique de considérer uniquement les effets locaux de la perte de performance (IV.1.3) et de ne pas appliquer de pondération en fonction du composant.

Par ailleurs, nous souhaitons exprimer la criticité de façon analogue à la mesure classiquement proposée pour le risque, à savoir la multiplication des mesures de l'occurrence et des effets. Notons que la norme MIL-STD 1629-A relative à l'AMDEC propose la même approche.

Nous proposons d'analyser qualitativement la criticité de la perte de performance d'une fonction en multipliant les attributs d'occurrence et de conséquence. La criticité obtenue correspond alors au risque pour le composant de la seule dégradation de la fonction étudiée :

Soit une fonction (F) considérée à un instant t_0 initial, pour laquelle nous avons estimé :

- *les mesures de l'occurrence et leurs attributs : Δt_1 et Δt_2 ; attribut (Δt_1) et attribut (Δt_2) ;*
- *les performances de (F) à échéance de ces délais : $F(t_0+\Delta t_1)$ et $F(t_0+\Delta t_2)$.*

Nous définissons alors deux mesures de criticité $C_{\Delta t_1}$ et $C_{\Delta t_2}$ pour la fonction (F) :

- la criticité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction : $C_{\Delta t_1}$

$$C_{\Delta t_1} = \text{attribut}(\Delta t_1) \times F(t_0 + \Delta t_1)$$

- la criticité de défaillance de la fonction : $C_{\Delta t_2}$

$$C_{\Delta t_2} = \text{attribut}(\Delta t_2) \times F(t_0 + \Delta t_2) = \text{attribut}(\Delta t_2) \times 3$$

Par multiplication des attributs d'occurrence et de conséquence, nous proposons l'analyse qualitative de la criticité sur 11 valeurs prises dans l'espace quantité {1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 8 ; 9 ; 10 ; 12 ; 15}, selon la grille à deux entrées suivante :

attribut de conséquence ↓	attribut d'occurrence →	1	2	3	4	5
1		1	2	3	4	5
2		2	4	6	8	10
3		3	6	9	12	15

Tableau 4.17 : Grille qualitative d'analyse de la criticité

La figure 4.25 donne un exemple d'évaluation des mesures de criticité d'une fonction (F), correspondant, d'une part à la dégradation d'une unité (criticité $C_{\Delta t_1}$), et d'autre part à la défaillance de la fonction (criticité $C_{\Delta t_2}$).

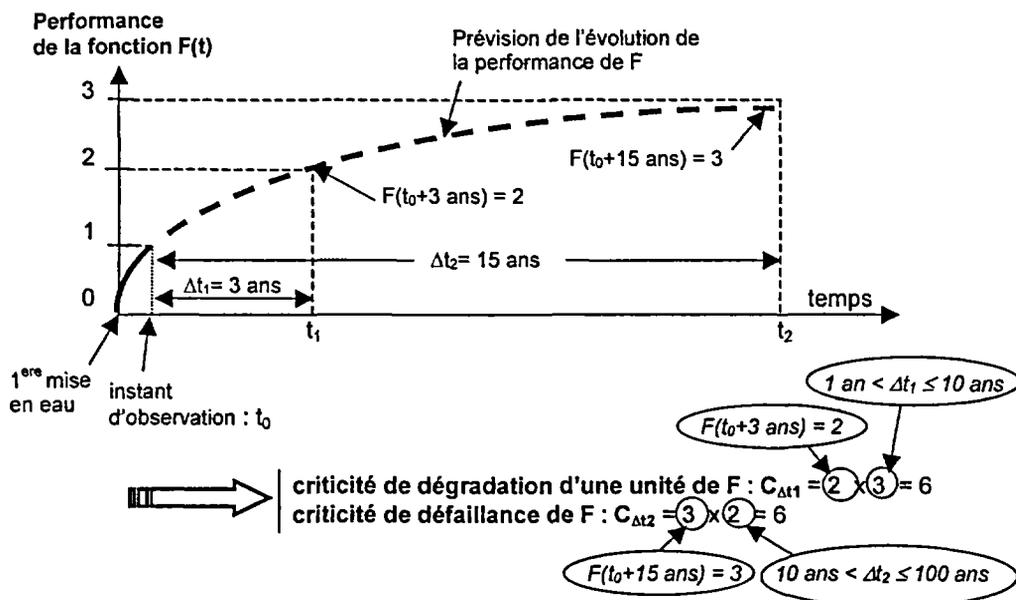


Figure 4.25 : Mesures de criticité d'une fonction

IV.1.4.2. Définition de classes de criticité

Nous avons vu que la criticité correspond au risque local de perte de performance d'une fonction d'un composant. Son analyse doit être réalisée, à ce stade, en fonction du délai d'intervention dont dispose l'exploitant pour remettre en état le composant dégradé, compte tenu de son état et de la prévision des mesures de l'occurrence des dégradations ultérieures.

En fonction des fréquences qui marquent les opérations d'IMR des barrages (partie 1 - II.2.4), nous pouvons définir cinq niveaux de délais d'intervention, du moins urgent au plus urgent :

- ❶ aucune intervention à prévoir sur le composant jusqu'à la prochaine évaluation de la sécurité, c'est-à-dire dans les 10 ans à venir ;
- ❷ travaux à prévoir d'ici la prochaine évaluation de la sécurité (c'est-à-dire dans les dix ans à venir) ou à l'occasion de la prochaine vidange décennale ;

- ③ travaux à prévoir d'ici la prochaine visite annuelle de contrôle, c'est-à-dire dans l'année à venir ;
- ④ travaux ou mesures urgents à réaliser dans les semaines ou les jours qui suivent le diagnostic ;
- ⑤ mesures à engager dans les heures qui suivent le diagnostic.

Nous proposons de retenir cinq classes pour la criticité (C), définies en fonction des délais d'intervention fixés par la pratique des opérations d'IMR :

- $0 < C < 4$: *criticité faible de dégradation de la fonction*
- $4 \leq C < 8$: *criticité moyenne de dégradation de la fonction*
- $8 \leq C < 12$: *criticité importante de dégradation de la fonction*
- $12 \leq C < 15$: *criticité alarmante de dégradation de la fonction*
- $C = 15$: *criticité extrême - défaillance de la fonction imminente*

Criticité	$0 < C < 4$	$4 \leq C < 8$	$8 \leq C < 12$	$12 \leq C < 15$	$C = 15$
Qualification	<i>faible</i>	<i>moyenne</i>	<i>importante</i>	<i>alarmante</i>	<i>extrême</i>
Délai d'intervention lié à la classe de criticité	Rien à prévoir d'ici la prochaine évaluation de la sécurité	Travaux avant ou à l'occasion de la prochaine visite décennale	Travaux à prévoir dans l'année à venir	Mesures et interventions dans les jours après le diagnostic	Mesures et interventions dans les heures qui suivent le diagnostic

Tableau 4.18 : Classe de criticité en fonction des délais d'interventions

IV.1.4.3. Sensibilité des classes de criticité

Soit une fonction (F) étudiée à un instant initial t_0 , la performance de la fonction à cet instant étant $F(t_0)$. Nous évaluons les mesures de l'occurrence des dégradations futures (Δt_1 et Δt_2) et les attributs de conséquence à ces échéances $F(t_0 + \Delta t_1)$ et $F(t_0 + \Delta t_2)$.

Nous pouvons recenser les différentes situations correspondant à chaque classe de criticité :

criticité faible :

- $F(t_0)=0$ et $\Delta t_1 > 1$ an : *la fonction étant initialement nominale, on n'envisage pas de dégradations supplémentaires dans un délai d'un an*
- $F(t_0)=1$ et $\Delta t_1 > 100$ ans : *la fonction étant initialement correcte, on n'envisage pas de dégradations supplémentaires avant 100 ans*
- $\Delta t_2 > 100$ ans : *on n'envisage pas la défaillance de la fonction avant 100 ans*

criticité moyenne :

- $F(t_0)=0$ et $\Delta t_1 \leq 1$ an : *la fonction étant initialement nominale, on prévoit la dégradation d'une unité qualitative de la fonction dans un délai d'un an*
- $F(t_0)=1$ et 1 an $< \Delta t_1 \leq 100$ ans : *la fonction étant initialement correcte, on prévoit la dégradation d'une unité qualitative de la fonction dans un délai compris entre 1 an et 100 ans*
- 10 ans $< \Delta t_2 \leq 100$ ans : *on envisage la défaillance de la fonction dans un délai compris entre 10 ans et 100 ans*

criticité importante :

- $F(t_0)=1$ et $\Delta t_1 \leq 1$ an : *la fonction étant initialement correcte, on prévoit la dégradation d'une unité qualitative de la fonction dans un délai d'un an*
- 1 an $< \Delta t_2 \leq 10$ ans : *on envisage la défaillance de la fonction dans un délai compris entre 1 an et 10 ans*

criticité alarmante :

- 1 mois $< \Delta t_2 \leq 1$ an : *on envisage la défaillance de la fonction dans un délai compris entre 1 mois et 1 an*

criticité extrême :

- $\Delta t_2 \leq 1$ mois : *on envisage la défaillance de la fonction dans un délai inférieur à 1 mois*

IV.2. Analyse de la criticité globale d'un barrage

Nous déterminons la performance globale d'un barrage vis-à-vis de la sécurité à partir des fonctions de résistance assurées par certains composants massifs (II.3.2) :

- LE PLOT ou LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLECITATIONS MECANIQUES
- LA FONDATION ou LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANIQUES

Pour évaluer, à un instant initial t_0 , la criticité globale d'un barrage vis-à-vis de la sécurité, nous estimons les mesures de l'occurrence Δt_1 et Δt_2 de la dégradation (d'une unité et totale) de la performance globale du barrage.

Nous obtenons ainsi deux mesures de criticité globale vis-à-vis de la sécurité :

- la criticité de perte de performance globale d'une unité qualitative :
attribut (Δt_1) \times Performance globale à ($t_0 + \Delta t_1$)
- la criticité globale du barrage vis-à-vis de la rupture :
attribut (Δt_2) \times Performance globale à ($t_0 + \Delta t_2$) = attribut (Δt_2) \times 3

La criticité globale vis-à-vis de la rupture correspond donc à la dernière ligne de la grille d'analyse de la criticité (Tableau 4.19).

Attribut d'occurrence correspondant à Δt_2	1	2	3	4	5
Mesure de l'occurrence Δt_2	$\Delta t_2 > 100$ ans	10 ans $< \Delta t_2 \leq 100$ ans	1 an $< \Delta t_2 \leq 10$ ans	1 mois $< \Delta t_2 \leq 1$ an	$\Delta t_2 \leq 1$ mois
Criticité globale vis-à-vis de la rupture	3	6	9	12	15
Qualification	faible	moyenne	importante	alarmante	extrême

Tableau 4.19 : Criticité globale d'un barrage vis-à-vis de la rupture

De façon analogue à l'analyse de la criticité à la granularité intermédiaire, nous définissons les classes de criticité globale en fonction des délais d'intervention fixés par la pratique des opérations d'IMR.

Ici, les mesures et travaux en jeu, visant à réduire la criticité globale, engagent directement la sécurité du barrage (et pas uniquement la remise en état d'un composant).

Criticité globale	3	6	9	12	15
Qualification	faible	moyenne	importante	alarmante	extrême
Délai d'intervention	rien à prévoir d'ici la prochaine évaluation de la sécurité	Travaux avant ou à l'occasion de la prochaine visite décennale	Travaux à prévoir dans l'année à venir	Mesures et interventions dans les jours suivants le diagnostic	Mesures dans les heures : décision de baisse de la retenue, mesures d'urgence

Tableau 4.20 : Délai d'intervention en fonction de la criticité globale

IV.3. Prise en compte des événements exceptionnels

IV.3.1. Cadre général

Dans cette section, nous examinons comment prendre en compte l'impact d'un événement extérieur sur un mécanisme de vieillissement affectant un barrage.

Notre objectif est d'évaluer la criticité, en considérant non seulement les dégradations des fonctions liées au vieillissement, mais également l'accélération éventuelle du mécanisme produite par un phénomène extérieur :

- quelle est la criticité d'un barrage en remblai soumis au mécanisme de suffusion (scénario 2.4), sachant qu'il est susceptible de surverser en période de crue ?
- quelle est la criticité d'un barrage poids gonflant sous l'effet d'un mécanisme d'alcali-réaction (scénario 2.1), en prenant en compte l'aléa sismique ?

Les événements extérieurs que nous étudions sont les crues et les séismes, qui sont les plus déterminants pour les barrages. Toutefois, la démarche proposée reste analogue pour d'autres phénomènes, tels que les intempéries (vent, neige, glace), les charges routières, etc.

L'intensité des événements extérieurs est généralement évaluée à partir de modèles probabilistes, associant l'intensité d'une action à une fréquence sur une période de référence donnée (à l'instar de la méthode du Gradex pour la détermination des intensités de crues [DUBAND,88]).

En général, les événements extérieurs susceptibles d'avoir un impact significatif sur un mécanisme de vieillissement sont exceptionnels et correspondent à des périodes de retour élevées (pour les crues, on s'intéresse aux périodes de 100 ans à 10 000 ans). Toutefois, pour des ouvrages mal conçus, un événement extérieur non rare (de période de retour faible) ou une combinaison d'événements extérieurs d'intensité moyenne peut provoquer des sollicitations exceptionnelles.

IV.3.2. Démarche pour la prise en compte des événements exceptionnels

Pour prévoir l'impact d'un événement extérieur sur un mécanisme de vieillissement affectant un barrage donné, nous cherchons à évaluer, en nous projetant dans la situation où l'événement extérieur se produirait, l'état des variables intervenant dans le scénario.

Notre démarche est alors analogue à celle utilisée pour la détermination des états des différentes variables dans un scénario (II.4.1) et nous estimons successivement les effets que produirait la sollicitation exceptionnelle sur :

- ❶ les symptômes (visuels, auscultés, calculés)
- ❷ les phénomènes
- ❸ les fonctions

Une fois l'état des symptômes évalué en période de crue ou de séisme, nous examinons l'ampleur des phénomènes et nous obtenons au final les performances des fonctions dans la situation de l'événement. Pour chacune des variables, il est également important de déterminer la réversibilité des états après le passage de la crue ou après le séisme.

Au tableau 4.21, nous résumons les symptômes dont l'état est susceptible d'être modifié directement par une crue ou un séisme :

	Crue	Séisme
symptôme observé	FUITE, SUINTEMENT, ZONE HUMIDE	FISSURES
symptôme ausculté	DEBIT, PIEZOMETRIE, CHARGE AMONT	DEPLACEMENT, DEFORMATION, MESURE DES FISSURES
symptôme calculé	<i>barrage poids</i> : COEFFICIENT DE SECURITE AU GLISSEMENT, AU CISAILLEMENT, LONGUEUR DE FISSURE, CONTRAINTE EFFECTIVE NORMALE AMONT ET AVAL <i>barrage en remblai</i> : COEFFICIENT DE SECURITE AU GLISSEMENT, GRADIENT HYDRAULIQUE	<i>barrage poids</i> : COEFFICIENT DE SECURITE AU GLISSEMENT, AU CISAILLEMENT, LONGUEUR DE FISSURE, CONTRAINTE EFFECTIVE NORMALE AMONT ET AVAL <i>barrage en remblai</i> : COEFFICIENT DE SECURITE AU GLISSEMENT

Tableau 4.21 : Symptômes directement influencés par les événements extérieurs

A titre d'exemple, nous indiquons, en situation d'une crue exceptionnelle provoquant la surverse du barrage, l'allure de la loi d'évolution du symptôme calculé GRADIENT HYDRAULIQUE DU REMBLAI, ainsi que les lois du phénomène direct EROSION INTERNE DU REMBLAI et de la fonction LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANIQUES (Figure 4.26).

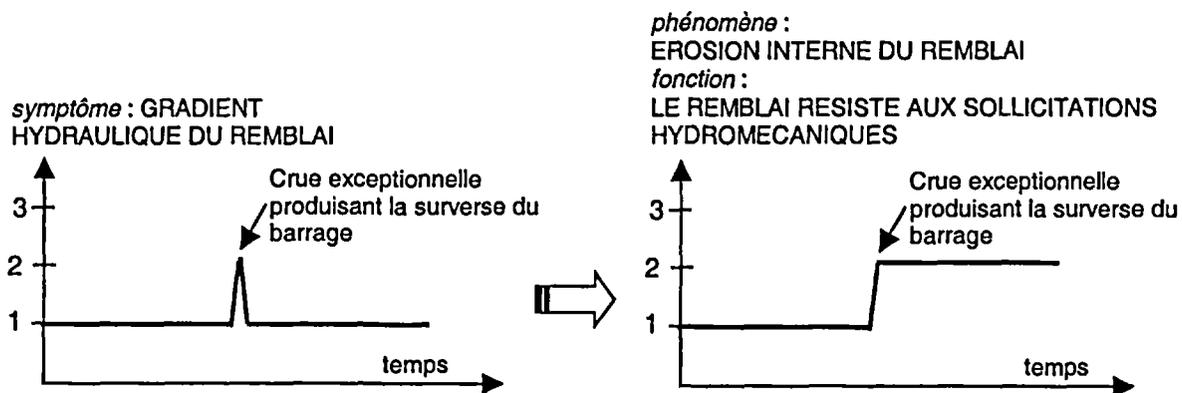


Figure 4.26 : Evolution des variables en situation de crue exceptionnelle

IV.3.3. Mesure de l'occurrence des événements exceptionnels

Considérons un barrage soumis à un mécanisme de vieillissement. Nous devons tout d'abord déterminer, par analyse inverse, les périodes de retour des événements extérieurs susceptibles de provoquer des sollicitations exceptionnelles sur l'ouvrage, et de ce fait, d'accélérer le mécanisme de vieillissement. Pour cela, nous examinons les crues et les séismes qui vont conduire à des modifications de l'état des variables (déviation d'un symptôme, aggravation d'un phénomène, perte de performance d'une fonction) et nous calculons ensuite les périodes de retour associées :

- quelle est la période de retour de la crue susceptible de modifier les performances des fonctions ?
- pour quelle accélération horizontale a-t-on une modification de l'état des mêmes fonctions et quelle est la période de retour associée à ce séisme ?

Pour intégrer les événements extérieurs dans l'analyse de la criticité, nous déterminons les périodes de retour de ceux qui conduisent à une modification des performances des fonctions engagées dans le scénario de vieillissement.

A ce stade, nous connaissons les événements extérieurs (et leur période de retour) qui dégraderaient la performance des fonctions. Pour chacun d'eux, nous cherchons alors à relier la période de retour à la mesure de l'occurrence (Tableau 4.13) : pour quelle période de référence Δt considère-t-on que la probabilité d'occurrence de l'événement extérieur, de période de retour T , est forte ?

Nous avons retenu une probabilité cible de 0,40 (IV.1.2.2) pour qualifier la qualification « probabilité forte d'occurrence » rattaché à la prévision experte des pertes de performance sur un intervalle donné. Il nous suffit alors de calculer les périodes de référence Δt pour lesquelles ces événements (de période de retour donné) présentent une probabilité d'occurrence de 0,40. Pour cela, nous utilisons la relation suivante [CALGARO,96] :

$$\rightarrow T = \tau / [1 - (1-p)^{1/n}] \text{ avec}$$

T : la période de retour

τ : intervalle de temps élémentaire

p : probabilité d'occurrence

n : nombres d'intervalles τ sur la période de référence Δt

En synthèse, pour chaque événement extérieur susceptible de dégrader les performances des fonctions, nous déterminons la période de référence Δt pour laquelle la probabilité d'occurrence de cet événement est forte. Nous associons alors à chacun de ces événements un attribut d'occurrence, selon la grille qualitative suivante :

Attribut d'occurrence	Période de référence Δt	Période de retour T de l'événement ayant une forte probabilité de se produire sur Δt
1	$\Delta t > 100 \text{ ans}$	$T > 200 \text{ ans}$
2	$10 \text{ ans} < \Delta t \leq 100 \text{ ans}$	$20 \text{ ans} < T \leq 200 \text{ ans}$
3	$1 \text{ an} < \Delta t \leq 10 \text{ ans}$	$2 \text{ ans} < T \leq 20 \text{ ans}$
4	$1 \text{ mois} < \Delta t \leq 1 \text{ an}$	$2 \text{ mois} < T \leq 2 \text{ ans}$
5	$\Delta t \leq 1 \text{ mois}$	$T \leq 2 \text{ mois}$

Tableau 4.22 : Période de retour des événements ayant une forte probabilité de se produire sur la période de référence Δt

IV.3.4. Prise en compte d'un événement exceptionnel dans l'évaluation de la criticité

Nous illustrons, à partir d'un exemple d'école, comment prendre en compte un événement extérieur dans l'évaluation de la criticité d'un ouvrage. Nous considérons un barrage poids dont la conception et l'état mécanique sont satisfaisants à l'instant initial t_0 et dont la performance globale vis-à-vis de la sécurité (déterminée par la fonction F : LE PLOT RESISTE AUX SOLLECATIONS MECANQUES) est par conséquent optimale (attribut de performance globale à t_0 égal à 0 : $F(t_0)=0$).

En revanche, nous supposons que le dispositif d'évacuation de crues de cet ouvrage est insuffisamment dimensionné pour les crues exceptionnelles (Figure 4. 27) :

- niveau normal d'exploitation (RN) : $SFF > 3$ (partie 3 – III.3.2.3)
- crue de période de retour $T=20$ ans : la retenue atteint la crête du barrage et $SFF = 2,5$
- crue de période de retour $T=100$ ans : le barrage surverse et $SFF \approx 1$

Pour simplifier l'analyse, nous considérons que le symptôme calculé SFF (CRITERE DE STABILITE AU CISAILLEMENT) indique directement la performance globale de l'ouvrage (ce qui revient à supposer que les sous-pressions et la fissuration ont une influence négligeable compte tenu du bon état de l'ouvrage).

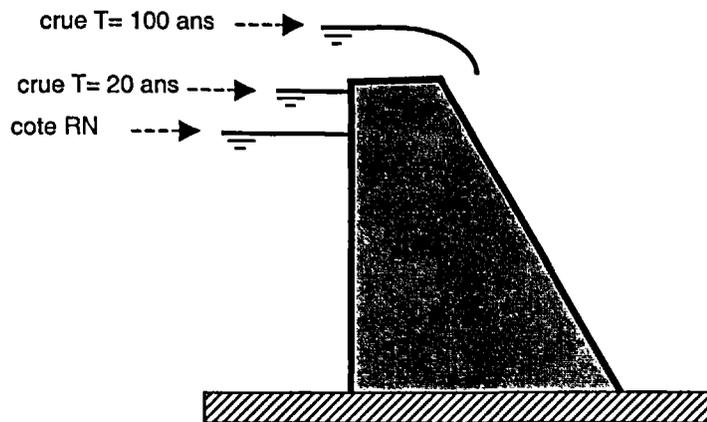


Figure 4.27 : Niveau de la retenue selon les périodes de retour des crues

Nous calculons la criticité globale du barrage dans les différentes situations :

Sans prendre en compte l'aléa hydrologique :

Compte tenu de la conception et de l'état tout à fait satisfaisant de l'ouvrage à t_0 , nous n'envisageons pas de détériorations significatives du barrage dans les dix ans à venir :

- dégradation d'une unité de la performance dans un l'intervalle : $10 \text{ ans} < \Delta t_1 \leq 100 \text{ ans}$
- défaillance dans un délai : $\Delta t_2 > 100 \text{ ans}$

Nous en déduisons les mesures de criticité globale :

- Criticité de perte de performance globale d'une unité : $\text{Attribut}(\Delta t_1) \times F(t_0 + \Delta t_1) = 2 \times 1 = 2$
- Criticité globale vis-à-vis de la rupture : $\text{Attribut}(\Delta t_2) \times F(t_0 + \Delta t_2) = 1 \times 3 = 3$

Sans prendre en compte l'aléa hydrologique, le barrage présente une *criticité faible* et aucune intervention n'est à envisager dans les dix années à venir.

En considérant la crue de période de retour 20 ans :

La crue de période de retour $T=20$ ans a un attribut d'occurrence de 3 (forte probabilité d'occurrence de l'événement dans l'intervalle $1 \text{ an} < \Delta t \leq 10 \text{ ans}$). En se plaçant en situation de cet événement, le critère de stabilité au cisaillement SFF serait de 2,5 (légèrement inférieur à la valeur 3 préconisée dans les recommandations – Tableau 4.6) et nous en déduisons la performance globale de l'ouvrage en crue vingtennale :

- $F(\text{crue } T=20\text{ans}) = 1$: dégradation d'une unité de la performance globale

Nous obtenons alors la criticité globale de perte de performance d'une unité :

- $\text{Attribut}(\text{crue } T=20\text{ans}) \times F(\text{crue } T=20\text{ans}) = 3 \times 1 = 3$

En prenant en compte la crue de période de retour $T=20$ ans, le barrage présente une *criticité faible* et aucune intervention n'est à prévoir dans les dix années à venir.

En considérant la crue de période de retour 100 ans :

La crue de période de retour $T=100$ ans a un attribut d'occurrence de 2 (forte probabilité d'occurrence de l'événement dans l'intervalle de temps $10 \text{ ans} < \Delta t \leq 100 \text{ ans}$). En se plaçant en situation de cet événement, le critère de stabilité SFF serait de l'ordre de 1 et la stabilité de l'ouvrage n'est plus garantie. Nous en déduisons la performance globale de l'ouvrage en crue centennale :

- $F(\text{crue } T=100\text{ans}) = 3$: F est défaillante ou quasiment défaillante

Nous obtenons alors la criticité globale vis-à-vis de la rupture :

→ Criticité globale vis-à-vis de la rupture : $\text{Attribut}(\text{crue } T=100\text{ans}) \times F(\text{crue } T=100\text{ans}) = 3 \times 2 = 6$

En prenant en compte la crue de période de retour $T=100$ ans, le barrage présente une criticité *moyenne* et il est nécessaire d'augmenter la capacité du dispositif d'évacuation des crues dans les dix ans à venir.

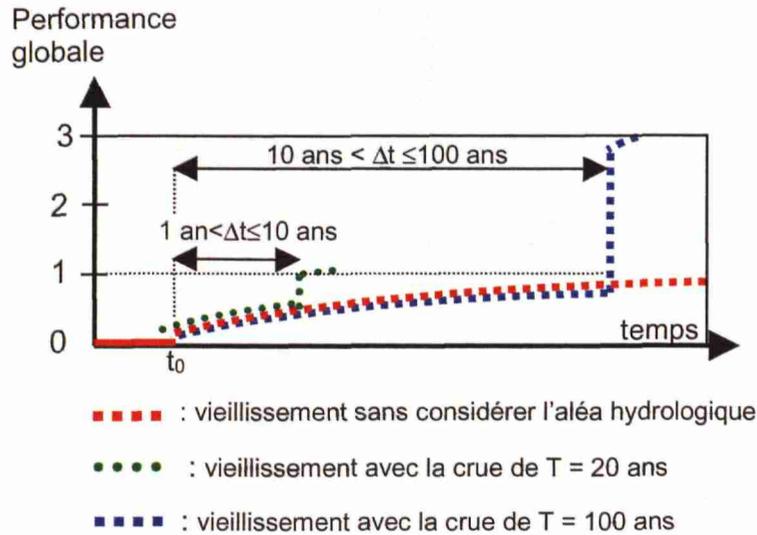


Figure 4.28 : Lois d'évolution de la performance selon la situation et la crue

En synthèse, la démarche à mettre en œuvre pour prendre en compte les événements extérieurs dans l'analyse de la criticité consiste en deux étapes successives :

- *l'analyse inverse des événements extérieurs susceptibles d'avoir un impact sur l'état du barrage et la détermination de leurs périodes de retour associées ;*
- *l'analyse de la criticité dans les différentes situations correspondant à ces événements, selon la méthodologie que nous proposons.*

Dans l'exemple développé, nous montrons que la prise en compte de l'aléa hydrologique est susceptible d'accélérer la dégradation de la performance globale du barrage (Figure 4.28), ce qui se traduit dans l'analyse de la criticité par une augmentation sensible du risque global présenté par le barrage et la nécessité d'entreprendre des travaux de remise à niveau dans les dix années à venir.

V. Synthèse

Nous avons proposé une méthode complète d'analyse de risques basée sur deux fondements :

- ❶ le retour d'expérience relatif aux dégradations des barrages ;
- ❷ l'expertise, en particulier le raisonnement par analogie de l'expert.

Notre méthode vise à apporter aux experts des outils pour évaluer le risque lié aux pertes de performance des fonctions des barrages. Le principe général développé peut se résumer de la façon suivante :

A partir d'un retour d'expérience sur la pathologie suffisamment fourni, l'expert est à même de prévoir les évolutions futures d'un barrage en cours d'étude et d'évaluer les risques.

Bien entendu, plus le retour d'expérience sera abondant, meilleure sera la prévision experte des évolutions.

Sur ce principe, nous développons des méthodologies pour capitaliser le retour d'expérience et pour analyser la criticité des pertes de performance :

❶ capitaliser le retour d'expérience

A partir du modèle fonctionnel de vieillissement développé en partie III, nous proposons l'analyse qualitative de l'état des variables *symptômes, phénomènes, fonctions* introduites dans les scénarios fonctionnels de vieillissement, sur quatre niveaux {0 ; 1 ; 2 ; 3}, décrivant la normalité d'un symptôme, l'ampleur d'un phénomène et la performance d'une fonction.

Par ailleurs, nous analysons qualitativement l'évolution des performances des fonctions à partir de deux intervalles Δt_1 et Δt_2 , mesurant respectivement le temps séparant deux niveaux (qualitatifs) successifs de dégradation et le temps jusqu'à la défaillance. Nous pouvons alors construire les lois d'évolution des différentes variables.

Après une analyse des fonctions à l'échelle des composants (à la granularité intermédiaire), nous évaluons la performance globale d'un barrage vis-à-vis de la sécurité en examinant les pertes de performance des fonctions de résistance assurées par les composants massifs.

Une fois ces outils qualitatifs définis, nous proposons une méthodologie pour la construction des historiques de vieillissement et nous pouvons alors modéliser la chronologie des dégradations fonctionnelles d'un barrage au cours de sa vie, sous l'effet d'un mécanisme donné.

❷ analyser la criticité des pertes de performance

Nous proposons une méthodologie pour évaluer la criticité de la perte de performance d'une fonction d'un composant :

- par le retour d'expérience, l'expert estime les délais qui vont conduire à de nouvelles dégradations. Nous évaluons alors les mesures de l'occurrence de la perte de performance d'une unité et de la défaillance à partir des intervalles Δt_1 et Δt_2 ;
- à échéance des délais Δt_1 et Δt_2 , nous évaluons les conséquences locales sur le composant en examinant directement les performances de la fonction.

Par cette démarche, nous déterminons une mesure du risque pour le composant de la seule dégradation de la fonction étudiée. Deux mesures de criticité sont définies :

- la criticité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction ($C_{\Delta 11}$) ;
- la criticité de défaillance de la fonction ($C_{\Delta 12}$).

A partir de la performance des fonctions de résistance des composants massifs, nous évaluons la criticité globale du barrage vis-à-vis de la sécurité (criticité de perte de performance globale d'une unité et la criticité globale vis-à-vis de la rupture).

Nous intégrons les événements extérieurs dans l'analyse de la criticité en examinant l'accélération des pertes de performance induite par les crues ou les séismes. Par analyse inverse, nous déterminons les périodes de retour des événements présentant une forte probabilité d'occurrence sur les intervalles de temps Δt et nous procédons alors à une analyse de la criticité dans les situations correspondants aux événements envisagés.

Au final, nous définissons cinq classes qualitatives de criticité (faible, moyenne, importante, alarmante, extrême) directement associées aux délais de programmation des opérations de maintenance ou de réparation.

Notre méthode d'analyse de la criticité des pertes de performance des barrages (et de leurs composants) repose sur le retour d'expérience des ingénieurs spécialisés. A terme, l'objectif visé est de constituer une base d'historiques de barrages ayant subi des dégradations et qui permette, pour chaque mécanisme de vieillissement, de disposer de quelques cas d'ouvrages.

En résumé, notre démarche s'inscrit clairement dans le cadre de l'approche de diagnostic et d'analyse de risques par expertise. Nous cherchons à valoriser le retour d'expérience des experts, pour aider les ingénieurs spécialisés dans leur mission de prévision des dégradations et pour la programmation de la maintenance des ouvrages.

Partie 5

Applications et Valorisation

I. Applications

II. Valorisation

I. Applications

Pour appliquer les méthodes développées aux parties 3 et 4, nous avons choisi des mécanismes de vieillissement et des ouvrages ayant subi ces mécanismes. Nous traitons successivement deux séries d'applications empruntées aux barrages poids puis aux remblais :

Barrages poids

- modélisation du mécanisme d'alcali-réaction (I.1) ;
- modélisation de l'historique de vieillissement du barrage du Chambon (I.2) ;
- analyse de la criticité appliquée au barrage du Chambon (I.3) ;

Barrages en remblai

- modélisation du mécanisme d'érosion interne (I.4) ;
- modélisation de l'historique de vieillissement du barrage de Cublize (I.5) ;
- analyse de la criticité appliquée au barrage de Cublize (I.6).

1.1. Modélisation d'un scénario de vieillissement de barrage poids : l'alcali-réaction

1.1.1. Analyse des étapes de défaillance

Nous renvoyons le lecteur à la partie 2 (II.3.1) dans laquelle nous avons décrit l'alcali-réaction (scénario 2.1). Nous décomposons le mécanisme en trois niveaux de défaillance et, pour chacun d'eux, nous identifions les phénomènes et les fonctions à la granularité intermédiaire :

1^{er} niveau de défaillance : réaction chimique d'alcali-granulats dans le béton

Cette réaction se produisant dans les plots d'un barrage poids est rendue possible du fait de trois phénomènes :

- les propriétés des matériaux, définissant la composition du plot ;
- l'humidité relative dans la structure, liée aux infiltrations dans la structure ;
- pour mémoire, la température intervient dans la cinétique de la réaction chimique.

→ COMPOSITION DU PLOT ; EAUX D'INFILTRATION DANS LE PLOT

Le *confinement du béton* dans certaines zones du plot à fortes contraintes de compression (secteurs confinés latéralement ou au contact du rocher) contribue à ralentir ou empêcher le gonflement. Il s'agit donc d'un phénomène à la granularité inférieure, non pris en compte dans le scénario fonctionnel.

La fonction concernée par cette première étape est la capacité de la structure à résister aux mécanismes chimiques :

→ LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS CHIMIQUES

L'effet de cette défaillance est le gonflement de la structure, qui conduit à la déformation du plot.

→ DEFORMATION DU PLOT

2^{ème} niveau de défaillance : gonflement et fissuration de la structure

Le gonflement du béton et la déformation de la structure conduisent à deux défaillances parallèles. D'une part, l'apparition de contraintes indésirables, pouvant dépasser la résistance en traction des matériaux. La fonction en jeu est la capacité de la structure à résister aux sollicitations mécaniques :

→ LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES

L'effet de cette défaillance est la fissuration de la structure et des matériaux :

→ FISSURATION DU PLOT

D'autre part, les ouvrages et composants en contact avec le plot vont subir les effets de ces déformations, en particulier l'évacuateur de crues dont les vannes risquent de se bloquer et la crête et le masque amont qui peuvent à leur tour se déformer et se fissurer. La fonction en jeu dans cette défaillance est la capacité de la structure à servir d'appui aux composants en contact :

→ LE PLOT PREPARE LES SURFACES DE CONTACT

L'effet de cette défaillance est la fissuration des ouvrages en contact (ou la déformation dans le cas d'ouvrages métalliques) :

→ FISSURATION DE L'EVACUATEUR DE CRUES, DU MASQUE AMONT, DE LA CRETE

3^{ème} niveau de défaillance : perte d'étanchéité et infiltration dans la structure

La fissuration des composants, tels que le masque amont, la crête et le plot, provoque des infiltrations d'eau dans le plot. La fonction en jeu est la capacité de la structure à être étanche :

→ LE PLOT LIMITE LES FLUX HYDRAULIQUES

Les conséquences de cette défaillance sont, d'une part, une augmentation des infiltrations d'eau dans le plot qui va alimenter le mécanisme d'alcali-réaction (bouclage sur le 1^{er} niveau de défaillance), d'autre part, une augmentation des sous-pressions dans la structure qui va contribuer à la diminution de la stabilité mécanique (bouclage sur le 2^{ème} niveau de défaillance) :

→ EAUX D'INFILTRATION et SOUS-PRESSIONS DANS LE PLOT

1.1.2. Modélisation du scénario fonctionnel

A chaque niveau de défaillance, nous recherchons les fonctions génériques de chaque composant, les phénomènes et leurs symptômes associés, ainsi que les moyens de détection (Tableau 5.1),.

Composant	Fonctions génériques
PLOT	<ul style="list-style-type: none"> . RESISTER AUX SOLLECITATIONS CHIMIQUES . RESISTER AUX SOLLECITATIONS MECANIQUES . LIMITER LES FLUX HYDRAULIQUES . PREPARER LA SURFACE DE CONTACT DE L'EVACUATEUR DE CRUES . PREPARER LA SURFACE DE CONTACT DE LA CRETE . PREPARER LA SURFACE DE CONTACT DU MASQUE AMONT
MASQUE AMONT	. LIMITER LES FLUX HYDRAULIQUES
CRETE	. LIMITER LES FLUX HYDRAULIQUES

Phénomènes	Symptômes associés	Type de symptôme	Moyen de détection
COMPOSITION DU PLOT	- nature du ciment et des granulats	- mesuré (issu d'essais)	- analyse chimique des matériaux
EAUX D'INFILTRATION DANS LE PLOT	- fuites ou suintement - mesure des débits de fuites	- visuel - ausculté	- débitmètre, déversoir
SOUS-PRESSIONS DANS LE PLOT	- piézométrie	- ausculté	- piézomètre, cellules de pression interstitielle
DEFORMATION DU PLOT	- mesure des déplacements	- ausculté	- topographie, pendule
FISSURATION DU PLOT	- fissures : écaillage, faïençage et structurale - mesure du développement des fissures	- visuel - ausculté	- fissuromètre
DEFORMATION DE L'EVACUATEUR DE CRUES	- mesure des déplacements - manœuvrabilité des vannes	- ausculté - visuel	- topographie
FISSURATION DU MASQUE AMONT	- fissures : écaillage et faïençage - mesure du développement des fissures	- visuel - ausculté	- fissuromètre
DEFORMATION DE LA CRETE	- mesure des déplacements de la crête	- ausculté	- topographie
EAUX D'INFILTRATION VERS LE RESEAU DE DRAINAGE	- mesure du débit de drainage	- ausculté	- débitmètre, déversoir

Tableau 5.1 : Fonctions, phénomènes et symptômes intervenant dans le scénario

A ce stade, nous disposons de toutes les informations pour construire le graphe causal correspondant au scénario d'alcali-réaction (Figure 5.1).

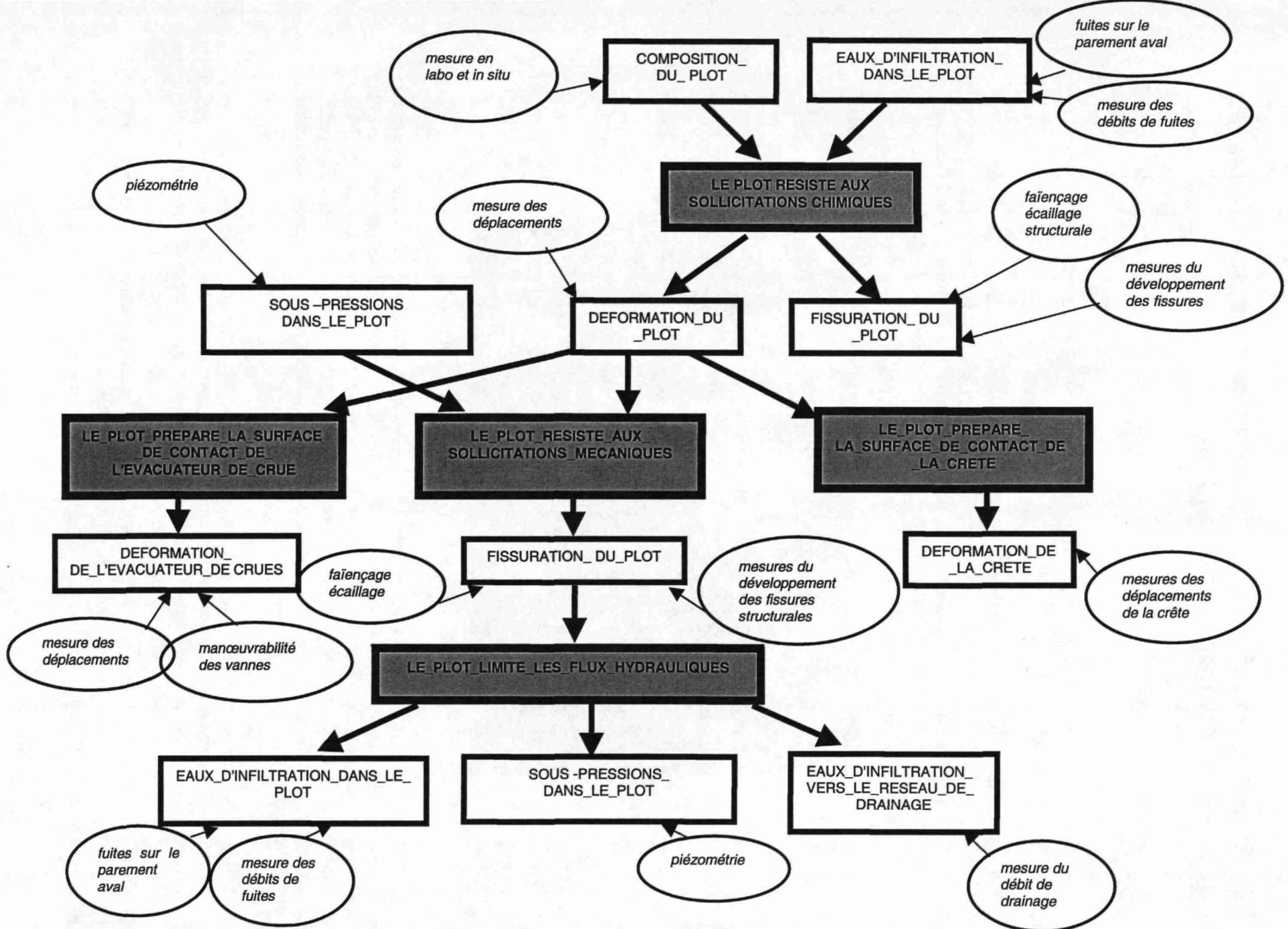


Figure 5.1 : Graphe causal du scénario d'alcali-réaction (scénario 2.1)

1.2. Modélisation d'un historique de vieillissement de barrage poids : le barrage du Chambon

Les informations indiquées dans cette section sont issues d'une publication Cemagref-EDF [PEYRAS,03].

1.2.1. Description générale du mécanisme d'alcali-réaction sur le barrage du Chambon

Le barrage du Chambon est un ouvrage poids de profil triangulaire, rectiligne dans ses parties rive droite et centrale, et courbe dans sa partie rive gauche comportant l'évacuateur de crue. Sa hauteur est de 88 m au-dessus du terrain naturel (hauteur maximale de 137 m au-dessus des fondations); sa longueur en crête est de 294 m. Son épaisseur est de 5 m en crête et de 70 m en pied. Construit entre 1929 et 1934, il a été mis en eau en 1935 (retenue de 50 hm³).

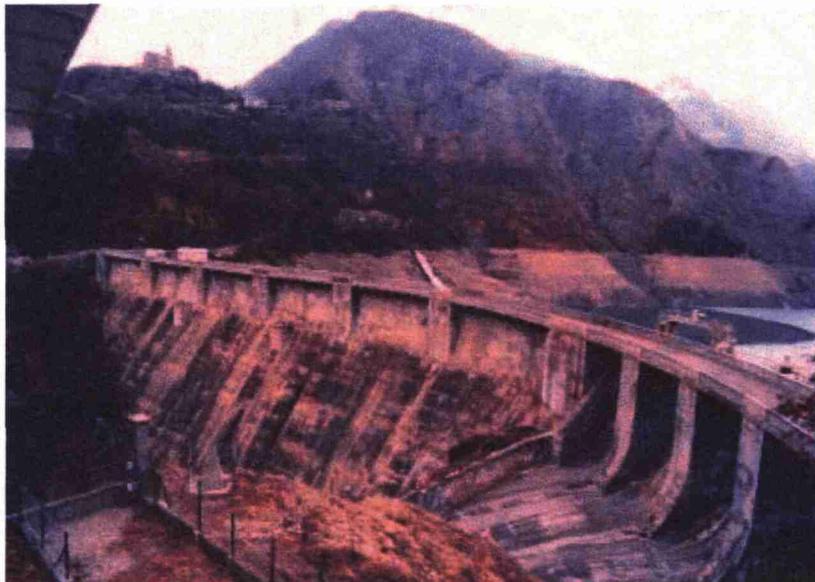


Figure 5.2 : Vue aval du barrage du Chambon

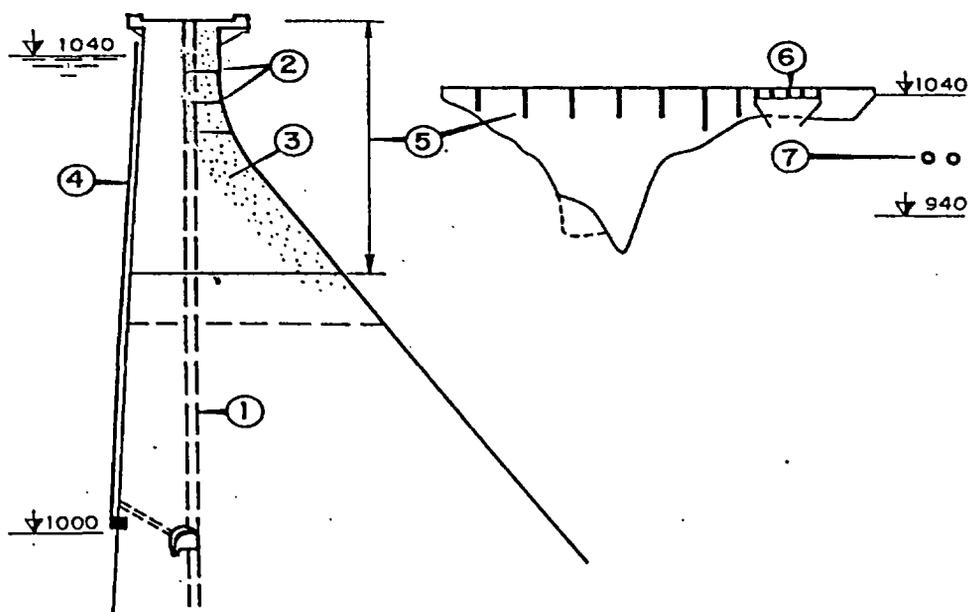
Les bétons du barrage sont affectés par une réaction alcali-granulats due essentiellement à la mauvaise qualité des agrégats manufacturés à partir d'un gneiss comportant de fréquentes intercalations de micaschiste noir du Lias. Cette réaction provoque un phénomène de gonflement des bétons qui se traduit par une fissuration évolutive et des déformations irréversibles apparues 25 ans après la construction. Le gonflement du barrage, pris en tenaille entre ses deux rives, entraîne les évolutions irréversibles suivantes :

- ❶ un déport important de la crête vers l'amont en partie courbe rive gauche à raison de 5 mm/an, accompagné d'un déplacement vers la rive gauche de 1 mm/an. Ce mouvement a conduit en particulier, depuis 1958, à l'ouverture d'une fissure évolutive et sub-horizontale, reliant la galerie de pied sous l'évacuateur de crues au parement aval.
- ❷ le déplacement de l'ouvrage en rive gauche conduit à un resserrement des bajoyers de l'évacuateur de crues et des risques importants de blocage des vannes.
- ❸ un déplacement de la partie rectiligne rive droite de 1 mm/an vers l'aval et de 0,3 mm/an vers la rive droite.

④ un exhaussement du couronnement à raison de 2,4 à 3,6 mm/an suivant les profils tandis que l'élévation relevée à mi-hauteur ne dépasse pas 0,65 mm/an. Ainsi 80% de l'expansion verticale est située dans la moitié supérieure de l'ouvrage.

1.2.2. Les travaux de confortement et de réhabilitation

Le gonflement du barrage varie dans la plage des 10 à $80 \cdot 10^{-6}$ /an. La synthèse des études techniques sur le confortement de ce barrage, menées de 1975 à 1984, avait conduit à décider la réalisation d'un nouvel ouvrage, plus élevé et situé immédiatement à l'aval. Toutefois, pour des raisons économiques, ce projet fut reporté. Afin de pouvoir poursuivre l'exploitation de ce barrage en toute sécurité pendant au moins une vingtaine d'années, les opérations suivantes furent décidées en 1991, suite à de nombreuses études et investigations complémentaires (investigations des fissures, mesures de contraintes, calculs aux éléments finis...) :



- ① Drains existants ② Fissures ouvertes ③ Injections de remplissage ④ Membrane étanche PVC
 ⑤ Sciages au fil diamanté ⑥ Ancien évacuateur de crues ⑦ Nouvel évacuateur de crues

Figure 5.3 : Confortement du barrage du Chambon

① réalisation d'un nouvel évacuateur de crues (1994). Ce dispositif, totalement indépendant du barrage, est composé de 2 galeries blindées de 500 m de longueur et 3,80 m de diamètre. Il permet d'éviter les risques de dysfonctionnement des vannes de l'ancien évacuateur de crues dus aux poussées transversales exercées sur les piles. Les anciennes structures ont été démolies et les pertuis ont été bétonnés, redonnant à cette rive une certaine rigidité.

② injections de remplissage des fissures dans la partie supérieure (1992-1993). Le haut du parement aval est affecté par une microfissuration multidirectionnelle typique de l'alcali-réaction, et par des ouvertures fréquentes (centimétriques en parement) des reprises de bétonnage, allant jusqu'à 2,5 m de profondeur sous la crête, épaisse de 5 m. Ces fissures pouvant être à l'origine d'une amorce de basculement vers l'aval en cas de séisme, avec ouverture de fissure à l'aval, leur traitement par injection sur les 20 m supérieurs fut jugé indispensable. Le monolithisme du haut des plots a ainsi été retrouvé.

③ **mise en place d'une géomembrane PVC sur le haut du parement amont (1992 à 1995).** La mise en place d'une membrane d'étanchéité sur les 40 m supérieurs du parement amont n'a pas pour vocation d'assécher le barrage, mais elle permet d'améliorer radicalement les conditions de stabilité de l'ouvrage tant en statique qu'en cas de séisme, en supprimant tout risque de sous-pression. Cette disposition a été retenue compte tenu de la fissuration importante et de son caractère évolutif. C'est une membrane souple en PVC de 2,5 mm d'épaisseur, drainée et de ce fait contrôlable. Elle couvre 7000 m² pour la partie barrage et 1700 m² pour l'ancien évacuateur de crues, obturé au béton.

④ **décompression par sciage (micro-saignées) (1995 à 1997).** Huit micro-saignées transversales furent réalisées, soit une tous les 30 m environ, au moyen d'un fil diamanté de 11 mm de diamètre et sur une hauteur variant de 20 à 30 m sous la crête. Il s'agit de réduire une compression longitudinale initiale évaluée à environ 5 MPa. Les sciages sont approfondis en rive gauche pour abaisser et réorienter vers le bas la poussée de gonflement sollicitant l'appui :

- deux premières micro-saignées ont été réalisées au printemps 1995. L'instrumentation mise en place montra que la zone d'influence de ces sciages était d'environ 50 m de part et d'autre. Ces sciages se sont rapidement refermés en partie haute sur 10 m environ ; le sciage dans la partie courbe a permis un retour vers l'aval de 10 mm ;
- trois saignées furent réalisées en 1996, confirmant le retour des plots rive gauche vers l'aval ;
- trois nouvelles saignées et deux reprises d'anciens sciages ont été effectuées en 1997. La zone d'influence s'est réduite et ces sciages ne se sont que partiellement refermés.

Ainsi après trois campagnes de sciages, les effets réversibles apparaissent plus faibles, ce qui pourrait traduire une diminution de l'effet « voûte » et un retour à un fonctionnement poids du barrage. La partie supérieure du barrage a atteint un état de décompression satisfaisant. La crête du barrage a retrouvé la position qu'elle avait en 1985.

⑤ **renforcement du dispositif d'auscultation (1994-1995).** Afin de suivre les effets de décompression progressive des bétons par les micro-saignées, 7 nouveaux pendules (total 24) ont été installés ainsi qu'une base extensométrique de 55 ml sur le parement aval, à 3 m sous la crête, destinée à suivre les mouvements longitudinaux de rive à rive.

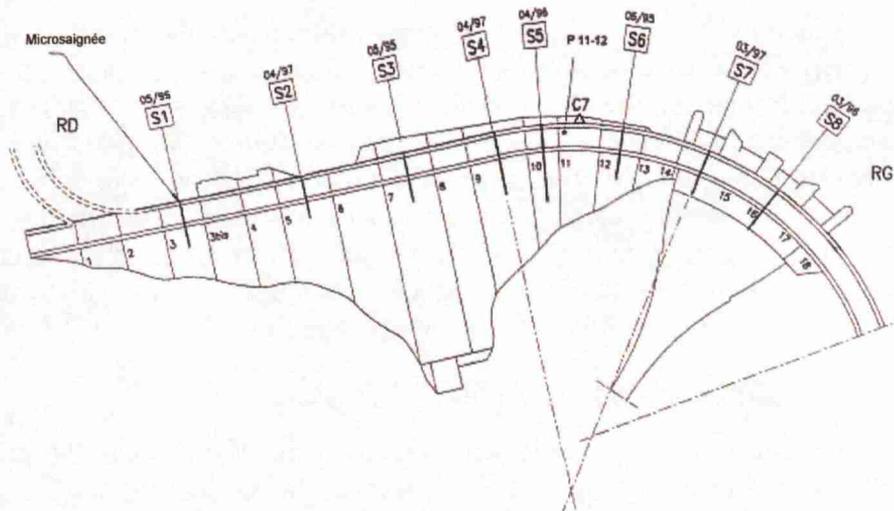
1.2.3. Analyse de l'historique de la performance du barrage du Chambon

1.2.3.1. Performance de la résistance du plot 11-12

Le plot 11-12, situé à la jonction entre la partie rectiligne et la partie incurvée du barrage, est celui sur lequel les effets du gonflement ont été les plus marqués et est donc particulièrement représentatif du mécanisme d'alcali-réaction sur le comportement du barrage. Nous focalisons donc l'analyse de l'historique de vieillissement sur cette section de l'ouvrage.

Le comportement de ce plot est particulièrement bien suivi et différents dispositifs d'auscultation vont permettre d'analyser les symptômes (Figure 5.4) :

- le **pendule direct P11-12**, qui indique les déplacements vers l'amont ou vers la rive gauche ;
- le **repère de nivellement C7** de crête, qui mesure le soulèvement de l'ouvrage ;
- la mesure « amont-aval » du **contrôleur de fissure (vinchon) V8** en galerie, qui représente l'évolution du rejet de la fissure sub-horizontale du parement aval.



C7 : repère de nivellement
P11-12 : pendule direct

Figure 5.4 : Vue en plan du barrage – Plot 11-12 et ses dispositifs d'auscultation

Nous analysons la performance de la fonction LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANQUES assurée par le plot 11-12 et son évolution au cours du temps. Ce plot constituant la partie du barrage la plus affectée, la fonction indique en outre directement la performance globale du barrage vis-à-vis de la sécurité.

A partir du graphe causal du mécanisme d'alcali-réaction (Figure 5.1), nous extrayons la séquence fonctionnelle correspondant à la dégradation de la fonction de résistance (Figure 5.5). Nous procédons ensuite à une analyse experte, à partir des différents symptômes, des trois phénomènes influençant ou résultant de la dégradation de la fonction :

- SOUS-PRESSION DANS LE PLOT ;
- FISSURATION DU PLOT ;
- DEFORMATION DU PLOT.

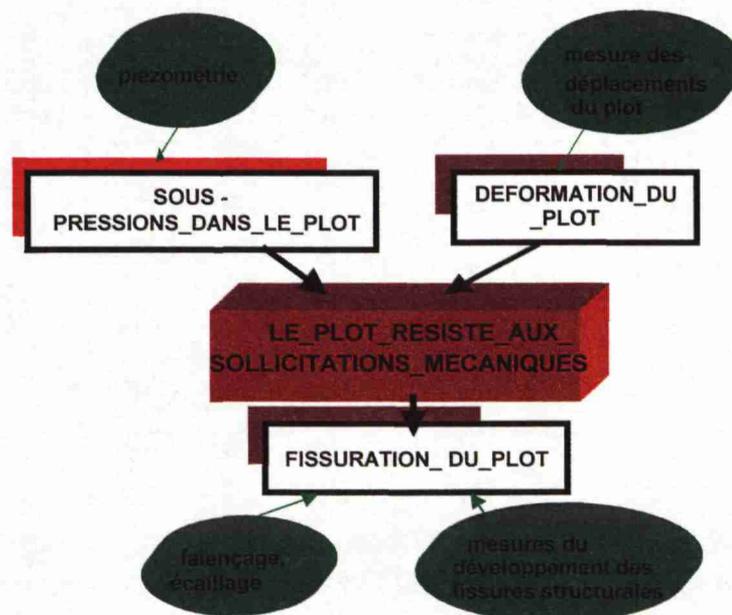


Figure 5.5 : Séquence fonctionnelle de dégradation de la résistance aux sollicitations mécaniques du plot 11-12

1.2.3.2. Phénomène SOUS-PRESSION DANS LE PLOT

Le barrage du Chambon n'est pas équipé de dispositifs d'auscultation dans le béton ni au contact béton-rocher, permettant de renseigner directement le symptôme PIEZOMETRIE. De ce fait, il n'est pas possible d'établir une analyse directe du phénomène SOUS-PRESSION DANS LE PLOT.

Toutefois, nous savons que ce phénomène n'a jamais influencé significativement la fonction de résistance mécanique du plot. En effet, avant réhabilitation de l'ouvrage, la fissuration importante du parement aval due au basculement du plot assurait son drainage naturel ; par la suite, les travaux d'injection et de pose de la géomembrane ont définitivement éliminé la présence de sous-pressions en toutes circonstances. Par conséquent, nous considérons que ce phénomène n'a pas d'influence sur la performance de la fonction de résistance.

1.2.3.3. Phénomène DEFORMATION DU PLOT

Deux symptômes directs renseignent le phénomène de DEFORMATION DU PLOT : les déplacements (amont-aval et rive droite-rive gauche) mesurés à l'aide du pendule direct P11-12 et les déplacements verticaux mesurés à l'aide du repère de nivellement C7.

Le pendule P11-12 a été installé en 1967 et les premiers déplacements vers l'amont (Figure 5.6) mesurés en 1972 donnaient des valeurs faibles de grandeur millimétrique (attribut d'état du symptôme égal à 1). Ensuite, la progression du déplacement a été quasiment linéaire pour atteindre des valeurs très importantes d'une dizaine de centimètres en 1994, induisant des risques forts de blocages des vannes. Les différentes campagnes de sciage des plots ont provoqué le basculement du plot vers l'aval, ramenant le déplacement amont aux valeurs atteintes en 1985, représentant encore 60 mm.

Quant au déplacement du plot 11-12 vers la rive gauche, sa progression fut aussi linéaire jusqu'en 1994 (17 mm) et les campagnes de sciages ont ramené sa valeur à 8 mm environ (retour également à la situation de 1985).

Nous faisons correspondre à ces symptômes (déplacements vers l'amont et vers la gauche) un attribut d'état de 3 en 1994, ramené ensuite à 2 après les travaux.

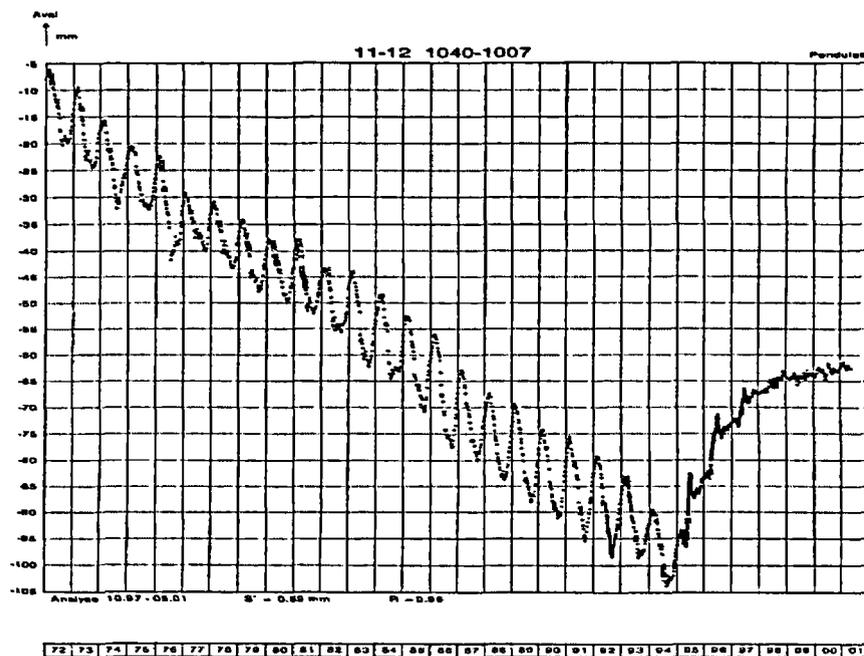


Figure 5.6 : Pendule direct P 11-12 - déplacements vers l'amont.

Les mesures des déplacements verticaux ont débuté également en 1967 (attribut 1) et la surrection du plot 11-12 a, depuis cette date, progressé linéairement pour atteindre 95 mm en 2001 (attribut 2). Bien entendu, les travaux de sciage n'ont pas eu d'incidence sur ce symptôme.

Par analyse experte des trois déplacements (vers l'amont, vers la gauche et vers le haut), nous pouvons déduire l'évolution qualitative du phénomène de DEFORMATION DU PLOT :

- en 1967, la déformation était bien entendu déjà amorcée compte tenu du gonflement global de l'ouvrage (attribut 1) ;
- en 1994 (avant les travaux), les valeurs de déformations sont très importantes, ainsi que le risque de blocage des vannes (attribut 3) ;
- depuis les travaux de sciage, la déformation bien qu'atténuée (elle correspond aux valeurs atteintes en 1985), demeure encore forte (attribut 2).

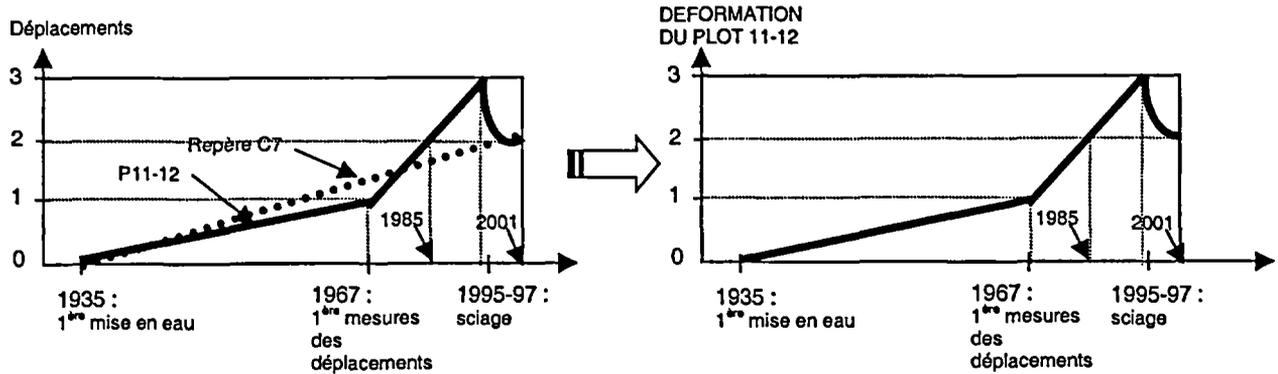


Figure 5.7 : Analyse qualitative du phénomène DEFORMATION DU PLOT

1.2.3.4. Phénomène FISSURATION DU PLOT

Le phénomène de FISSURATION DU PLOT peut être renseigné par son symptôme direct : la mesure au vinchon V8-2 correspondant au rejet de la fissure structurale en pied aval de plot (Figure 5.8). En outre, les observations des faïençages et autres fissures sur le parement aval constituent des symptômes visuels.

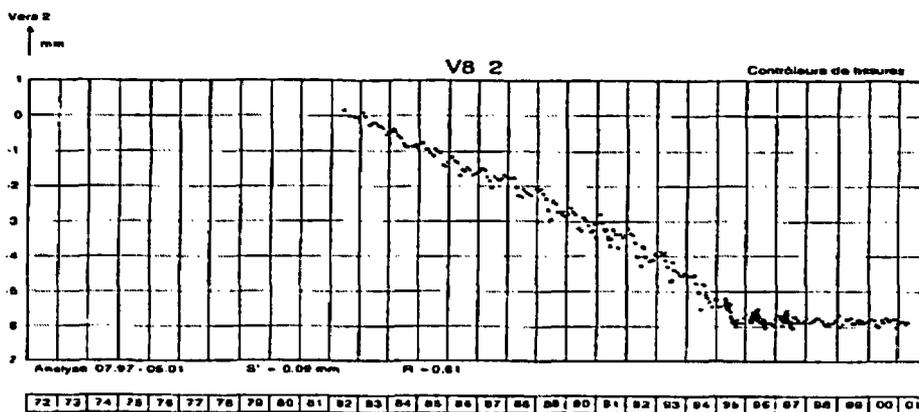


Figure 5.8 : Mesures du rejet de la fissure en galerie

Le premier constat de cette fissure remonte à 1958 (attribut 1) et les premières mesures au vinchon V8 datent de 1982. Depuis cette date, le rejet de la fissure a augmenté linéairement jusqu'à une valeur maximale de 6 mm avant les travaux d'injection (1993). La taille de cette fissure et sa profondeur (jusqu'à la galerie) sont alors très importantes et l'épaisseur du plot non fissuré devient très réduite (attribut 3). A partir de 1992, les travaux d'injection ont comblé cette fissure ainsi que celles visibles en haut du parement aval (retour à la situation initiale : attribut 0).

L'analyse qualitative du phénomène de FISSURATION DU PLOT (Figure 5.9) découle de l'historique des observations visuelles et de la mesure au vinchon V8-2 : attribut 0 lors de la mise en eau ;

attribut 1 en 1958 lors du premier constat de la fissure ; attribut 3 avant les travaux d'injection (en 1992) ; attribut 0 depuis les travaux, le vinchon n'enregistrant plus de mouvements.

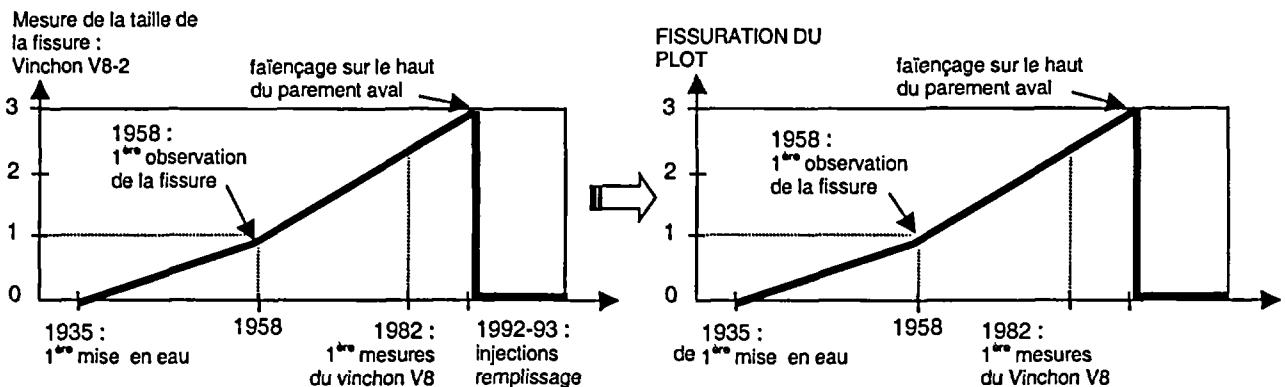


Figure 5.9 : Analyse qualitative du phénomène FISSURATION DU PLOT

1.2.3.5. Fonction LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANQUES

Par analyse experte, nous évaluons la loi d'évolution de la performance de la fonction LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANQUES à partir des lois d'évolution des trois phénomènes, à l'origine ou résultant de sa dégradation.

Nous considérons que cette fonction s'est dégradée progressivement depuis la première mise en eau où la résistance était alors nominale (attribut 0) et jusqu'à la campagne de travaux de 1992 à 1997 où l'importance des déformations et de la fissuration nous amène à considérer un état proche de la défaillance (attribut d'état compris entre 2 et 3). Après les travaux, la fissuration a disparu, les sous-pressions sont définitivement maîtrisées, mais en revanche la déformation du plot reste encore importante : nous considérons donc que l'attribut de performance de la fonction vaut 1 après 1997.

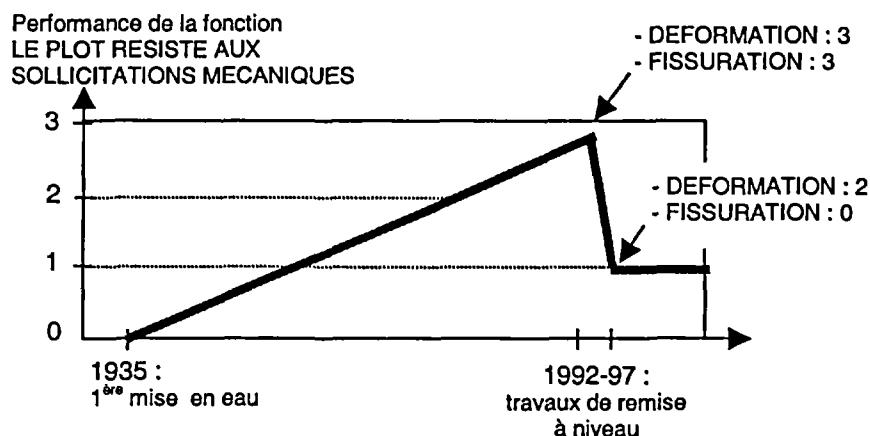


Figure 5.10 : Loi d'évolution de la performance de la fonction de résistance du plot 11-12

L'analyse réalisée fait apparaître une dégradation linéaire de la performance de la fonction de résistance du plot 11-12 depuis la première mise en eau, jusqu'à atteindre des valeurs proches de la défaillance. Ces résultats sont cohérents, l'abandon complet du barrage ayant été envisagé en 1991. Par la suite, les travaux de confortement ont permis de remettre l'ouvrage à niveau et l'analyse de la performance indique des valeurs correctes et stables.

En résumé de cette analyse, nous pouvons constituer l'historique de vieillissement du plot 11-12 (Figure 5.11), qui nous offre une vision synthétique des lois d'évolution des symptômes, des phénomènes et de la performance de la fonction de résistance.

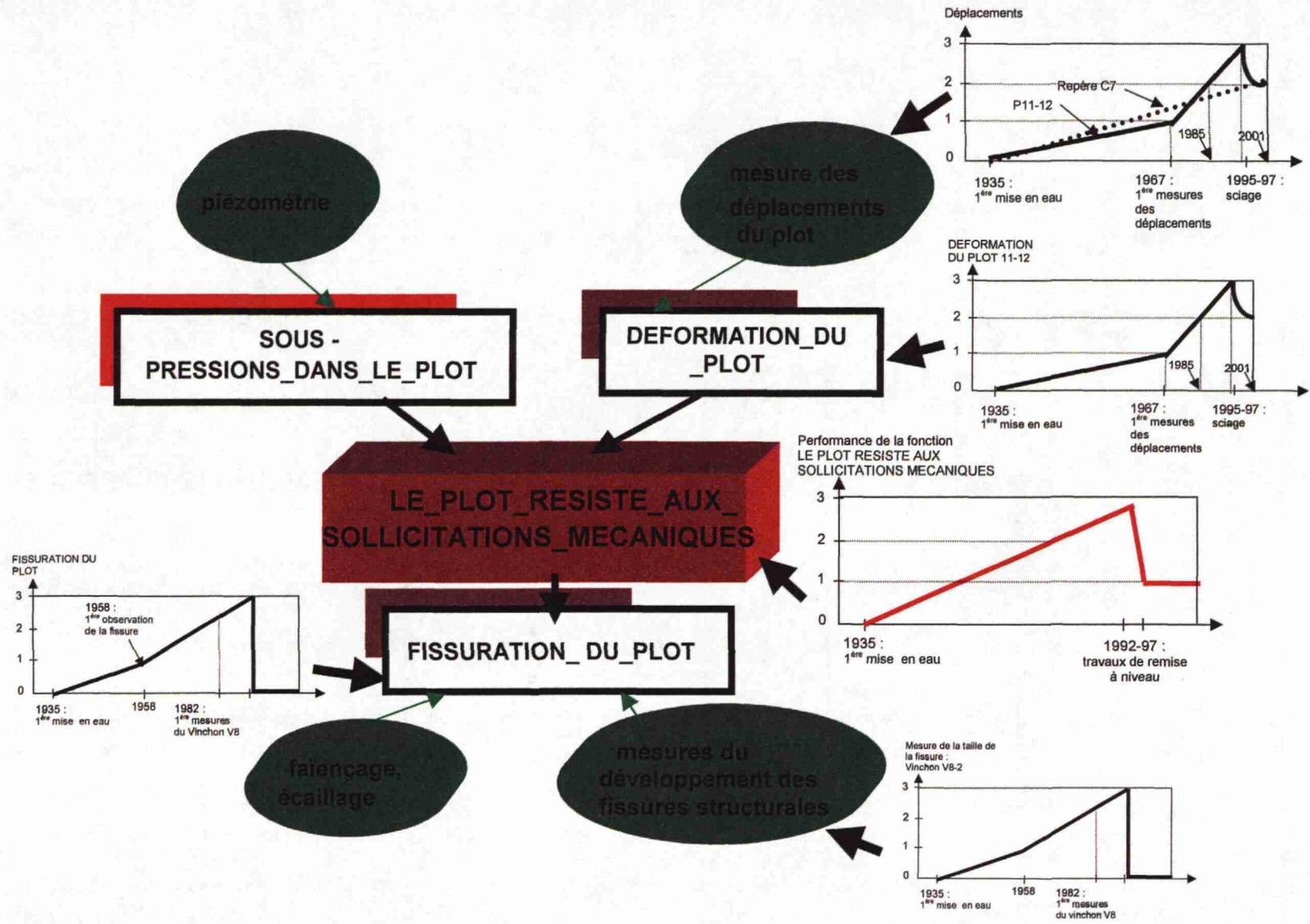


Figure 5.11 : Historique de vieillissement du plot 11-12 (barrage du Chambon)

1.3. Analyse de la criticité appliquée au barrage du Chambon

Après avoir déterminé l'évolution de la performance de la fonction F : LE PLOT RESISTE AUX SOLLICITATIONS MECANIQUES, nous allons procéder à l'analyse rétroactive de la criticité. A partir de la méthodologie proposée en partie 4, nous examinons l'évolution des paramètres de criticité de F (criticité de dégradation d'une unité qualitative et criticité de défaillance) au cours de la vie du barrage, jusqu'aux travaux de réhabilitation de 1992.

1.3.1. Criticité de dégradation d'une unité de la fonction de résistance

Nous recherchons au cours de la vie du barrage du Chambon les *attributs d'occurrence de dégradation d'une unité* associés à la mesure de l'occurrence Δt_1 et les attributs de performance correspondant. La loi d'évolution de performance de F est indiquée à la figure 5.12 :

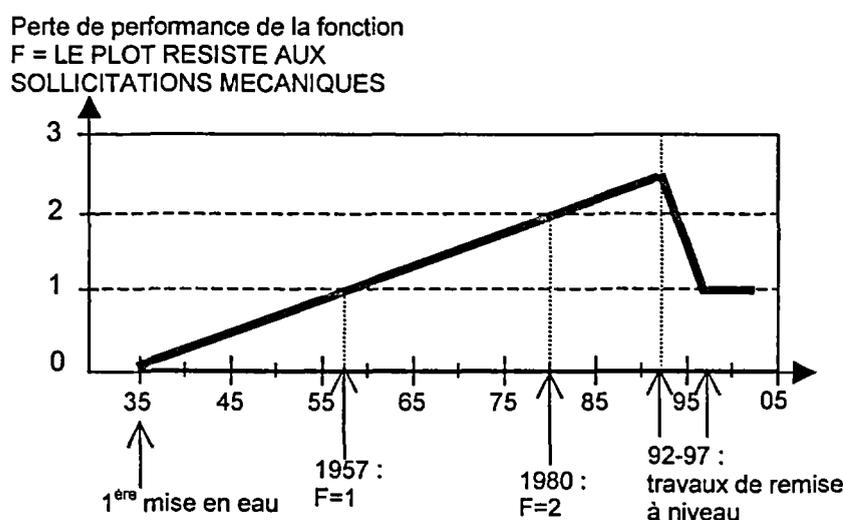


Figure 5.12 : Evolution de la performance de la fonction de résistance

La *criticité de dégradation d'une unité* de F est calculée en multipliant les attributs d'occurrence de dégradation d'une unité et les attributs de conséquence $F(t_0 + \Delta t_1)$ aux instants $t_0 + \Delta t_1$ (Tableau 5.2) :

intervalle $[t_0 ; t_1]$ ou date t_0	$F(t_0)$	$F(t_1)$	mesure de l'occurrence de dégradation d'une unité : Δt_1	attribut d'occurrence lié à Δt_1	attribut de conséquence $F(t_0 + \Delta t_1)$	criticité de dégradation d'une unité
de 1935 à 1947	0	< 1	10 ans < $\Delta t_1 \leq 100$ ans	2	1	2
de 1948 à 1956	< 1	< 1	1 an < $\Delta t_1 \leq 10$ ans	3	1	3
en 1957	1	/	10 ans < $\Delta t_1 \leq 100$ ans	2	2	4
de 1958 à 1970	1	< 2	10 ans < $\Delta t_1 \leq 100$ ans	2	2	4
de 1971 à 1979	< 2	< 2	1 an < $\Delta t_1 \leq 10$ ans	3	2	6
en 1980	2	/	10 ans < $\Delta t_1 \leq 100$ ans	2	3	6
de 1981 à 1989	2	< 3	10 ans < $\Delta t_1 \leq 100$ ans	2	3	6
en 1990	< 3	/	1 an < $\Delta t_1 \leq 10$ ans	3	3	9

Tableau 5.2 : Criticité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction de résistance

1.3.2. Criticité de défaillance de la fonction de résistance

Pour déterminer la *criticité de défaillance* de la fonction de résistance, nous recherchons au cours de la vie du barrage de Chambon les *attributs d'occurrence de défaillance* associés à la mesure de l'occurrence Δt_2 , correspondant à la défaillance de F (Tableau 5.3) :

intervalle	mesure de l'occurrence de la défaillance : Δt_2	attribut d'occurrence lié à Δt_2	criticité de défaillance
de 1935 à 1982	$10 \text{ ans} < \Delta t_2 \leq 100 \text{ ans}$	2	6
1982 à 1989	$10 \text{ ans} < \Delta t_2^* \leq 100 \text{ ans}$	2*	6
à partir 1990	$1 \text{ an} < \Delta t_2^* \leq 10 \text{ ans}$	3*	9

* valeur obtenue par estimation : en prolongeant la droite indiquant l'évolution de la performance de la fonction F (Figure 5.12), nous estimons que la défaillance de F (attribut d'état égal à 3) serait intervenue vers l'année 2000 si les travaux de remise à niveau n'avaient pas été menés.

Tableau 5.3 : Criticité de défaillance de la fonction de résistance

1.3.3. Synthèse

Nous représentons l'évolution des mesures de criticité de dégradation d'une unité et de défaillance de la fonction F (Figure 5.13) :

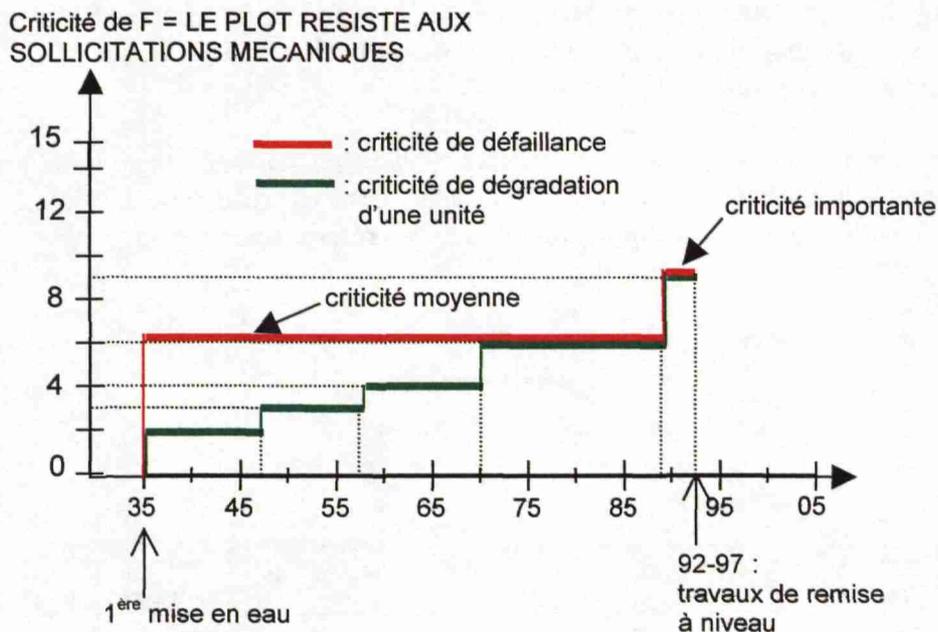


Figure 5.13 : Evolution de la criticité de la fonction de résistance

La criticité de dégradation d'une unité augmente progressivement tout le long de la vie du barrage, passant d'une qualification de *faible* pendant les premières années, à *moyenne* dès 1957 et jusqu'à *importante* à partir de 1990. Elle indique donc finement l'augmentation du risque au cours de la vie du barrage liée à la perte de performance progressive de la fonction de résistance.

La criticité de défaillance de F ne rend pas compte aussi finement de l'augmentation progressive du risque. Cela est dû à une précision insuffisante de l'analyse qualitative pour des valeurs de Δt_2 supérieures à 10 ans. En revanche, la criticité de défaillance va renseigner le risque global de défaillance de F et donc le risque global vis-à-vis de la sécurité encouru par le barrage.

En résumé, les criticités de dégradation d'une unité et de défaillance sont complémentaires : la première rend compte finement des risques faibles à moyens, la seconde indique les risques importants liés à la sécurité de l'ouvrage.

1.4. Modélisation d'un scénario de vieillissement de barrage en remblai : la suffusion interne

1.4.1. Description du mécanisme

Le mécanisme de suffusion est une catégorie d'érosion interne (voir scénario 2.4 en partie 2 – III.3.4). La suffusion interne est rendue possible par des gradients hydrauliques trop élevés par rapport aux caractéristiques des matériaux, qui vont provoquer l'entraînement des matériaux. Ce mécanisme est dû à l'influence simultanée de plusieurs paramètres :

❶ les propriétés des matériaux du remblai : partie 2 – III.3.4

❷ la circulation d'eau au sein du sol

Elle est due généralement à un mauvais fonctionnement de l'ouvrage : étanchéité des matériaux insuffisante, défaillance du dispositif d'étanchéité (masque amont, noyau interne), défaillance du dispositif de drainage (colmatage).

❸ L'absence ou la défaillance de dispositifs de filtration

Ces dispositifs ont pour objet de bloquer la migration des particules fines entraînées par les infiltrations. L'absence ou la défaillance d'une telle barrière va provoquer une auto-accélération du mécanisme d'érosion.

Nous étudions le mécanisme de suffusion interne dans les barrages en remblai homogène équipés d'un dispositif de drainage vertical. Ces ouvrages, dont le profil type est donné à la figure 5.14, sont de conception classique et apparaissent dans les références, telles que [ROLLEY,89].

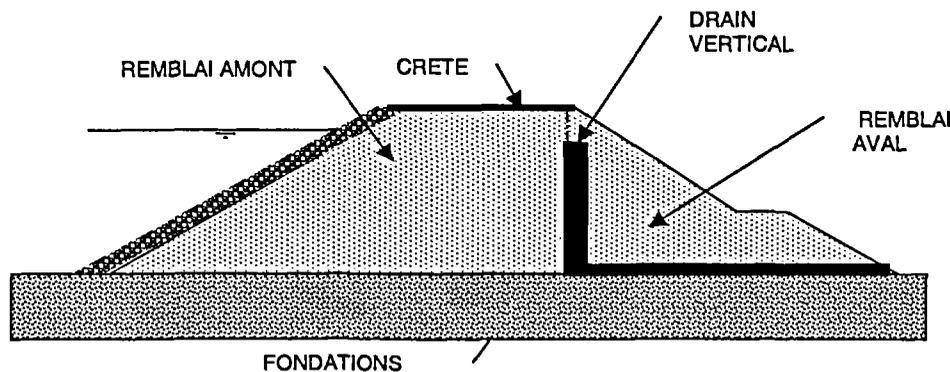


Figure 5.14 : Coupe type d'un barrage en remblai homogène avec drain vertical

Dans ce type d'ouvrage, le développement du mécanisme de suffusion du remblai amont est susceptible de produire à terme le colmatage du dispositif de drainage interne, rendant alors le rabattement de la nappe phréatique au sein de la zone amont insuffisant. Par suite, le risque principal est le contournement du drain par le haut (ou latéralement) et, par conséquent, la saturation puis la suffusion du remblai aval. A ce stade, deux modes de rupture sont à craindre :

- la formation à l'aval du barrage d'une zone dans laquelle la vitesse devient suffisante pour conduire à une érosion régressive puis à un « renard hydraulique » ;
- le glissement d'une zone instable à l'aval du barrage, par augmentation des pressions interstitielles et diminution de la résistance des matériaux.

1.4.2. Analyse des étapes de défaillance

Nous décomposons le mécanisme en cinq niveaux de défaillance et, pour chacun d'eux, nous identifions les phénomènes et les fonctions à la granularité intermédiaire :

1^{er} niveau de défaillance : étanchéité limitée du remblai amont

La plupart de ces ouvrages ne disposent pas de dispositifs d'étanchéité du remblai amont spécifique et la circulation d'eau dans la zone amont est contrôlée par la perméabilité des matériaux, qui peut s'avérer insuffisante selon la qualité des matériaux et de leur mise en place.

→ PERMEABILITE DU REMBLAI AMONT

La fonction concernée par cette première étape est la capacité du remblai à limiter les infiltrations :

→ LE REMBLAI AMONT LIMITE LES FLUX HYDRAULIQUES

Les effets de cette défaillance sont des circulations d'eau dans le remblai amont et des sous-pressions indésirables :

→ EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AMONT

→ SOUS-PRESSIONS DANS LE REMBLAI AMONT

2^{ème} niveau de défaillance : érosion interne du remblai amont

La suffusion interne du remblai amont est liée à la conjonction, d'une part, d'une circulation d'eau dans le remblai du fait d'une étanchéité insuffisante, d'autre part, des caractéristiques intrinsèques du matériau :

→ EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AMONT

→ COMPOSITION DU REMBLAI AMONT

La fonction concernée par cette défaillance est donc la capacité du remblai à résister aux sollicitations hydromécaniques :

→ LE REMBLAI AMONT RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES

L'effet de cette défaillance est l'érosion interne du remblai amont et une augmentation de la perméabilité des matériaux par suffusion (bouclage sur le 1^{er} niveau de défaillance) :

→ EROSION INTERNE DU REMBLAI AMONT

→ PERMEABILITE DU REMBLAI AMONT

3^{ème} et 4^{ème} niveau de défaillance : colmatage du drain vertical

Ces défaillances sont liées à la conjonction de deux phénomènes. Tout d'abord, la suffusion interne du remblai amont conduit à des entraînements de fines vers le drain. Ensuite le dispositif de filtration du drain peut s'avérer insuffisant ou inadapté (absence de géotextile protégeant le drain ou règles de filtre non respectées). Il s'en suit alors un colmatage progressif du drain vertical par les fines du remblai amont.

→ EROSION INTERNE DU REMBLAI AMONT

→ COMPOSITION DU DRAIN VERTICAL

Les fonctions successives concernées sont :

→ LE DRAIN RESISTE AUX SOLLICITATIONS HYDROMECHANIQUES

→ LE DRAIN DRAINE LES FLUX HYDRAULIQUES

Les conséquences de ces défaillances sont à terme l'apparition d'eaux d'infiltration dans le remblai aval, par contournement (par le haut ou les côtés) du drain vertical :

→ EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AVAL

→ SOUS-PRESSIONS DANS LE REMBLAI AVAL

5^{ème} niveau de défaillance : érosion interne et perte de résistance du remblai aval

Ce niveau de défaillance est lié aux circulations d'eau et à la saturation du remblai aval. D'une part le remblai aval peut être à son tour le siège d'un mécanisme de suffusion interne. D'autre part, la saturation progressive du remblai conduit à une perte de résistance du remblai aval, du fait de la diminution de la cohésion des matériaux et de l'augmentation des pressions interstitielles.

- EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AVAL & SOUS-PRESSIONS DANS LE REMBLAI AVAL
- COMPOSITION DU REMBLAI AVAL

Les fonctions concernées sont alors :

- LE REMBLAI AVAL RESISTE AUX SOLLECITATIONS MECANIQUES
- LE REMBLAI AVAL RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANIQUES

Les conséquences de ces défaillances se traduisent par les phénomènes suivants :

- EROSION INTERNE DU REMBLAI AVAL et PERMEABILITE DU REMBLAI AVAL
- GLISSEMENT DU REMBLAI AVAL

1.4.3. Modélisation du scénario fonctionnel

A chaque niveau de défaillance, nous recherchons les fonctions génériques de chaque composant, les phénomènes et leurs symptômes associés, ainsi que les moyens de détection (Tableau 5.4) :

Composant	Fonctions génériques
REMBLAI AMONT	<ul style="list-style-type: none"> · RESISTER AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANIQUES · LIMITER LES FLUX HYDRAULIQUES
DRAIN VERTICAL	<ul style="list-style-type: none"> · RESISTER AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANIQUES · DRAINER LES FLUX HYDRAULIQUES
REMBLAI AVAL	<ul style="list-style-type: none"> · RESISTER AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANIQUES · RESISTER AUX SOLLECITATIONS MECANIQUES

Phénomènes	Symptômes associés	Type de symptôme	Moyen de détection
PERMEABILITE DU REMBLAI AMONT (ou AVAL)	- mesure de la perméabilité du remblai amont (ou aval)	- mesuré (issu d'essais)	- essai de perméabilité, au laboratoire ou in situ
COMPOSITION DU REMBLAI AMONT (ou AVAL)	- granulométrie du remblai amont (ou aval)	- mesuré (issu d'essais)	- essai de caractérisation des matériaux
EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AMONT	- piézométrie (<i>symptôme indirect</i>)	- ausculté	- piézomètre, cellules de pression interstitielle
SOUS-PRESSIONS DANS LE REMBLAI AMONT	- piézométrie dans le remblai amont	- ausculté	- piézomètre, cellules de pression interstitielle
EROSION INTERNE DU REMBLAI AMONT	- gradient hydraulique (<i>symptôme indirect</i>)	- calculé	- à partir des mesures piézométriques
COMPOSITION DU DRAIN VERTICAL	- composition du dispositif filtrant du drain	- mesuré (issu d'essais)	- analyse du géotextile ou de la couche de filtre
COLMATAGE DU DRAIN VERTICAL	- mesure du débit de drainage	- ausculté	- débitmètre, déversoir
EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AVAL	<ul style="list-style-type: none"> - observation de zones humides ou fuites sur le remblai aval - piézométrie (<i>symptôme indirect</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - visuel - ausculté 	- piézomètre, cellules de pression interstitielle
SOUS-PRESSIONS DANS LE REMBLAI AVAL	<ul style="list-style-type: none"> - observation de zones humides ou fuites sur le remblai aval (<i>symptôme indirect</i>) - mesure de la piézométrie dans le remblai aval 	<ul style="list-style-type: none"> - visuel - ausculté 	- piézomètre, cellules de pression interstitielle
EROSION INTERNE DU REMBLAI AVAL	<ul style="list-style-type: none"> - observation de fines dans les eaux de fuites - gradient hydraulique (<i>symptôme indirect</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - visuel - calculé 	- à partir des mesures piézométriques
GLISSEMENT DU REMBLAI AVAL	<ul style="list-style-type: none"> - observation de fissures transversales ou de lentilles de glissement - coefficient de sécurité au glissement 	<ul style="list-style-type: none"> - visuel - calculé 	- à partir des mesures piézométriques

Tableau 5.4 : Fonctions, phénomènes et symptômes intervenant dans le scénario

A ce stade, nous disposons de toutes les informations pour construire le graphe causal correspondant au scénario de suffusion interne (Figure 5.15).

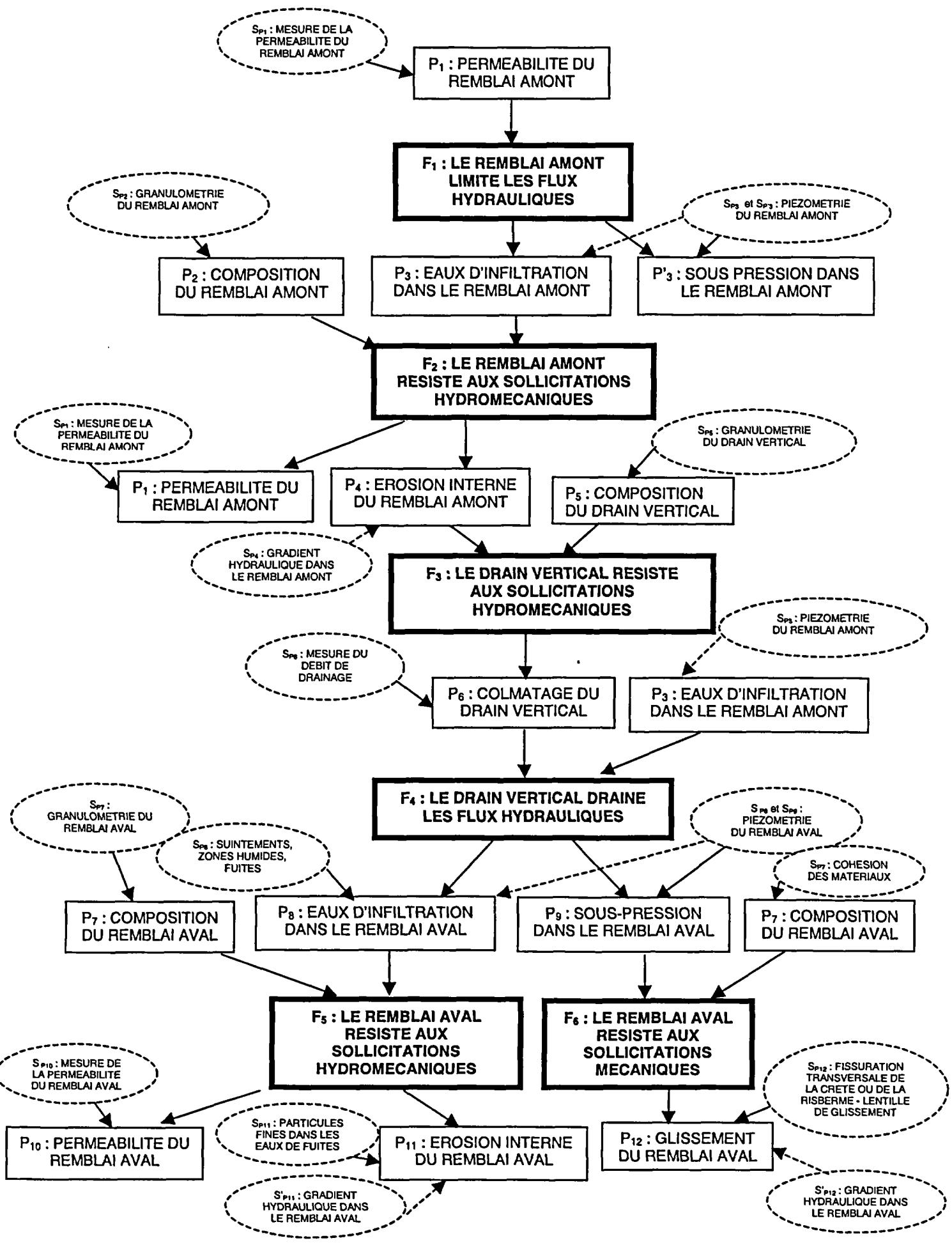


Figure 5.15 : Graphe causal du scénario de suffusion dans un barrage en remblai avec drain vertical central

1.5. Modélisation d'un historique de vieillissement de barrage en remblai : le barrage de Cublize

Les informations fournies dans cette section sont issues de la publication [DEGOUTTE,93], complétée par des rapports d'expertise internes au Cemagref.

1.5.1. Description générale de la suffusion sur le barrage de Cublize

Le barrage de Cublize (69) est constitué d'un remblai quasi homogène en arènes granitiques (environ 80% de sable), de 16 m de hauteur maximale, créant un plan d'eau à usage touristique de 35 ha pour une capacité de 2 hm³. L'ouvrage, fondé sur un massif granitique, est pourvu d'un drain vertical arasé deux mètres en-dessous du niveau normal des eaux (niveau RN) et d'un drain horizontal au contact fondation-remblai sur la moitié aval du remblai.

Construit en 1977 et 1978, le barrage a fait l'objet d'une première mise en eau en novembre-décembre 1978. Le niveau est ensuite resté très proche de la cote RN, sauf deux vidanges partielles de 2 mètres sous la cote RN en novembre 1981 et décembre 1985.

Nous analysons le mécanisme sur le profil indiqué à la figure 5.16 et correspondant à la section la mieux auscultée. Nous disposons des mesures suivantes : les pressions interstitielles du remblai amont (cellules C₃, C₄ et C₅) d'octobre 1978 à novembre 1981 et le débit du drain vertical (drain D₁) de juin 1980 à octobre 1988.

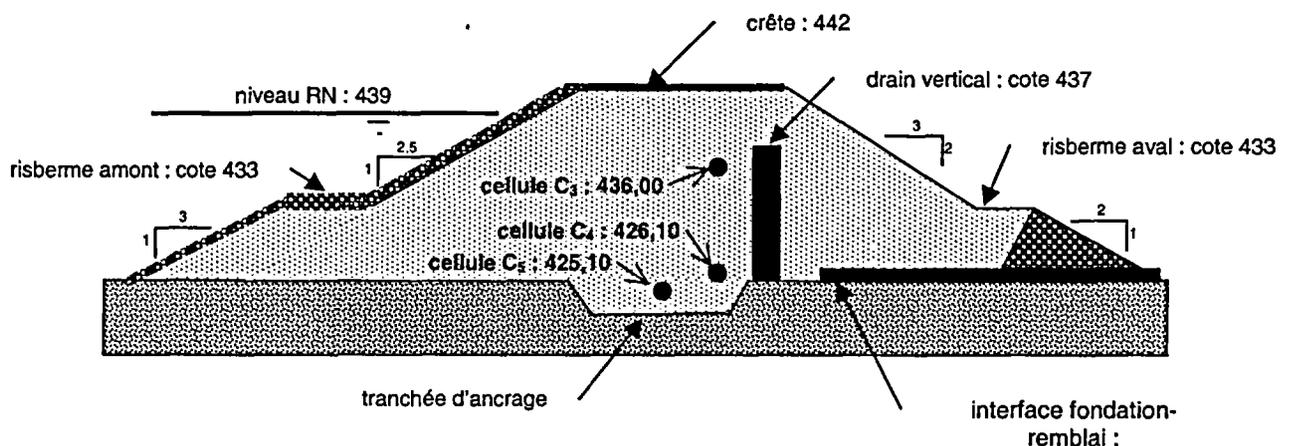


Figure 5.16 : Coupe du barrage de Cublize

En septembre 1988, à l'occasion d'une visite annuelle de contrôle, une zone particulièrement humide est repérée au pied aval du remblai. Cette constatation, jamais observée précédemment, donne lieu à des recommandations de surveillance rapprochée. En mi-octobre 1988, la zone humide s'est agrandie et des glissements localisés sont observables sur une dizaine de mètres de longueur sous la risberge aval (autour de la cote 429,50). Deux jours plus tard, des venues d'eau avec entraînement de matériaux sont alors visibles dans les mêmes secteurs et la décision de vidanger totalement le plan d'eau est alors prise en urgence.

L'analyse des mesures d'auscultation et des reconnaissances complémentaires ont mis en évidence :

❶ les pressions interstitielles (Figure 5.17)

Après une montée des pressions lors du premier remplissage (octobre 1978), les mesures se stabilisent rapidement à des cotes normales.

C'est à partir d'avril 1979 que les pressions mesurées indiquent des valeurs non conformes à un fonctionnement normal : tout d'abord, nous constatons une première montée des pressions sur les cellules inférieures (C_4 et C_5). Ensuite en juillet 1980, c'est au tour de C_3 de connaître une augmentation pour atteindre des valeurs correspondant à la cote RN dès novembre 1980.

Ces mesures montrent le colmatage effectif de la partie inférieure du drain dès avril 79. A compter juillet 80 et jusqu'à novembre 1980, la montée rapide de la ligne piézométrique dans le remblai en amont immédiat du drain indique clairement le colmatage du drain et une diminution sensible de sa capacité à évacuer les infiltrations.

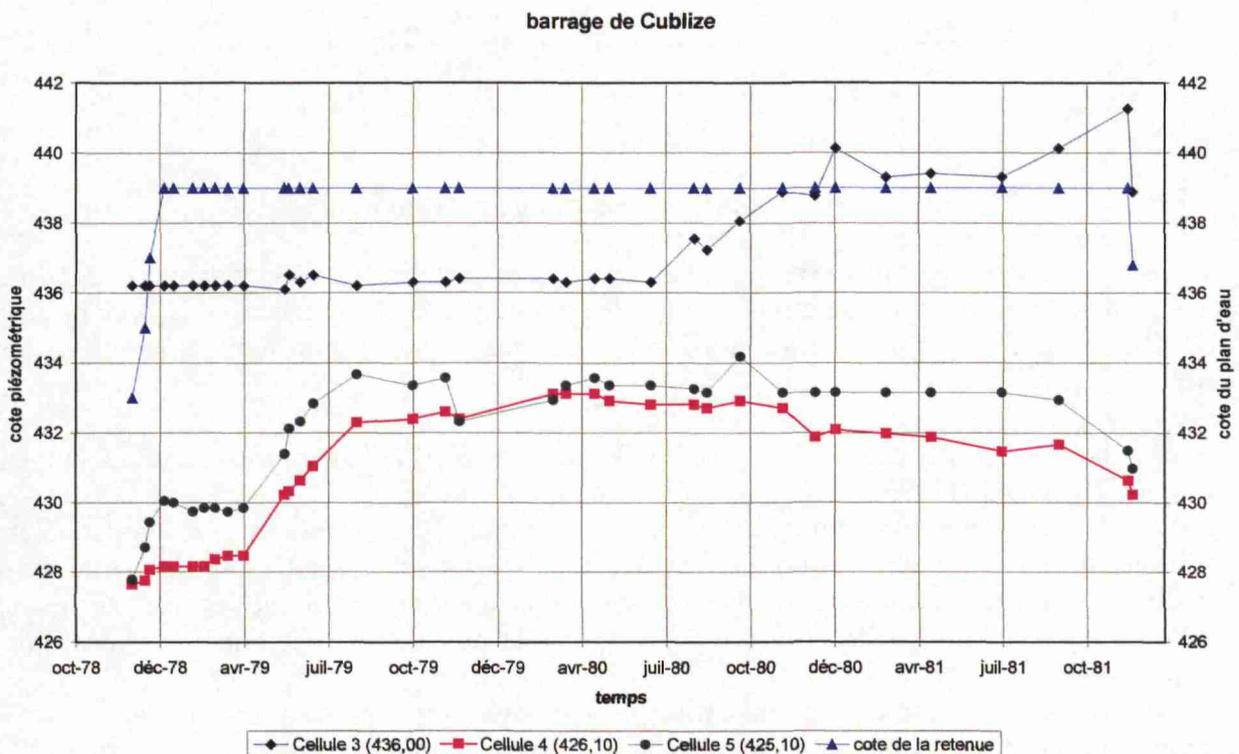


Figure 5.17 : Mesures des pressions interstitielles dans le remblai

❷ les débits des drains (Figure 5.18)

Après une montée progressive et normale des débits de drainage (drain D_1) jusqu'en novembre 1980, nous observons une première diminution de novembre 1980 à novembre 1981, indiquant le colmatage du drain vertical. Ces mesures concordent avec celles de la piézométrie, avec un léger effet retard classique sur les débits.

La vidange partielle de la retenue en novembre 1981 a certainement eu un effet de nettoyage partiel des drains et les débits sont alors remontés autour d'un maximum de 1,5 l/s environ. A partir d'octobre 1982, les débits décroissent progressivement jusqu'en octobre 1984 pour atteindre des valeurs très basses de l'ordre de 0,1-0,2 l/s. Ces dernières valeurs traduisent le colmatage quasi-intégral du dispositif de drainage.

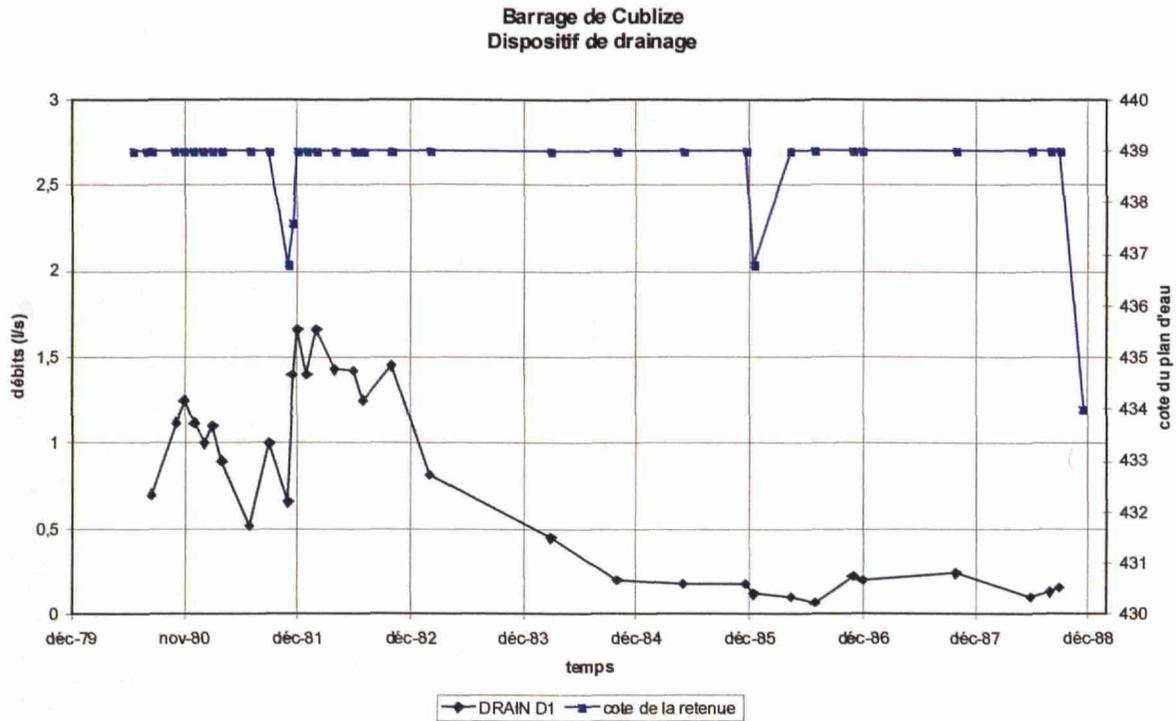


Figure 5.18 : Mesures des débits du drain vertical (D_1)

③ des tranchées de reconnaissance, réalisées quelques semaines après la vidange d'urgence, ont mis en évidence une zone de circulation préférentielle dans le remblai aval, autour de la cote 429,50. Ainsi, la zone du matériau saturé intéresse toute l'épaisseur du remblai sous la risberme aval.

L'ensemble des investigations menées sur le barrage de Cublize ont conduit au diagnostic suivant : [DEGOUTTE,93]

Compte tenu de leur granulométrie, les arènes granitiques des remblais sont particulièrement sensibles à l'érosion interne et ont été le siège d'un mécanisme de suffusion interne. Celui-ci a produit un colmatage progressif du dispositif de drainage vertical, expliqué par une granulométrie du drain inadaptée (granulométrie grossière) et par le non respect des conditions de filtre par rapport au remblai.

Le colmatage a entraîné une saturation progressive des remblais amont, puis aval par contournement par le haut (rendu possible par un sommet du drain inférieur à la cote RN). La saturation des matériaux du talus aval a abaissé ses caractéristiques mécaniques et provoqué les premiers glissement superficiels (les rapports d'expertise ont évalué le critère de stabilité au glissement du remblai aval à 1,10 en octobre 1988). Les écoulements ont commencé à entraîner les particules fines, créant l'amorce d'un « renard hydraulique » qui aurait rapidement évolué en quelques semaines, voire quelques jours, vers la ruine de l'ouvrage si la vidange n'avait rapidement été décidée. L'ensemble du processus s'est déroulé sur environ 10 ans.

Durant l'année 1989, des travaux de confortement de l'ouvrage ont été entrepris :

- ① une recharge aval en enrochements a été disposée en pied aval afin d'augmenter la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis du glissement.
- ② une paroi moulée dans l'axe du remblai, accompagnée en parallèle d'injections en fondations, a été réalisée afin de garantir une bonne étanchéité du remblai aval.
- ③ des dispositifs complémentaires d'auscultation et d'amélioration de la capacité de vidange.

1.5.2. Analyse de l'historique de la performance du barrage de Cublize

Nous proposons d'analyser l'historique des principales variables du scénario de suffusion. Parmi celles ci, notre attention se portera particulièrement sur les performances des fonctions LE REMLAI AVAL RESISTE AUX SOLLECITATIONS MECANIQUES et LE REMLAI AVAL RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECAIQUES, qui renseigneront directement la performance globale du barrage vis-à-vis de la sécurité.

1.5.2.1. 1^{er} niveau de défaillance « étanchéité limitée du remblai amont »

Nous ne disposons pas d'essai de perméabilité spécifique sur le remblai, mais nous estimons, compte tenu de la bonne qualité d'exécution du chantier et de la granulométrie des matériaux (environ 80% de sables, 15% de silts et 5% d'argiles), que la perméabilité du remblai est correcte au début de la vie du barrage (attribut d'état égal à 1), puis s'est dégradée du fait de l'érosion interne du remblai amont (attribut d'état proche de 2). Dès octobre 1980, le remblai amont est totalement saturé et les écoulements se produisent essentiellement au-dessus du drain vertical. Ce dernier joue alors le rôle d'un filtre vertical arasé à la cote 437 et l'érosion interne du remblai amont se trouve stoppée.

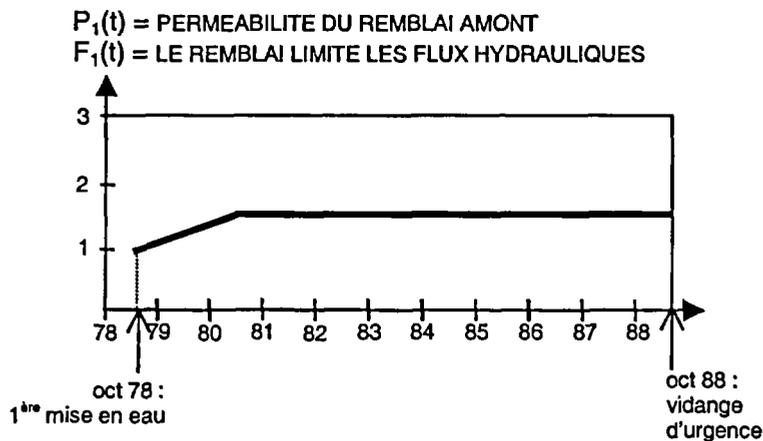


Figure 5.19 : LE REMLAI AMONT LIMITE LES FLUX HYDRAULIQUES (F_1) et PERMEABILITE DU REMLAI AMONT (P_1)

1.5.2.2. 2^{ème} niveau de défaillance « érosion interne du remblai amont »

Les phénomènes EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMLAI AMONT (P_3) et SOUS-PRESSION DANS LE REMLAI AMONT (P'_3) sont obtenus par l'analyse de la piézométrie dans le remblai amont (Figure 5.20)

Du premier remplissage à avril 1979, la piézométrie mesurée dans toutes les cellules est normale (attribut 0). A compter d'avril 1979 et jusqu'à novembre 1980, la piézométrie augmente rapidement jusqu'à indiquer la saturation complète du remblai amont (attribut 3 à partir de novembre 1980).

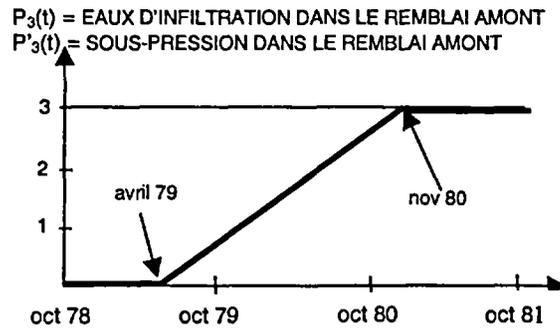


Figure 5.20 : EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AMONT (P_3) et SOUS-PRESSION DANS LE REMBLAI AMONT (P'_3)

La fonction LE REMBLAI AMONT RESISTE AUX SOLlicitATIONS HYDROMECHANIQUES (F_2) a amorcé sa dégradation dès le début des infiltrations (avril 1979). En octobre 1984, le drain est totalement colmaté et remplit alors un rôle de filtre : la fonction cesse de se dégrader à partir de cette dernière date. Compte tenu du volume important de fines nécessaires au colmatage du drain, nous considérons que la suffusion a été importante ($F_2=2$ en octobre 1984).

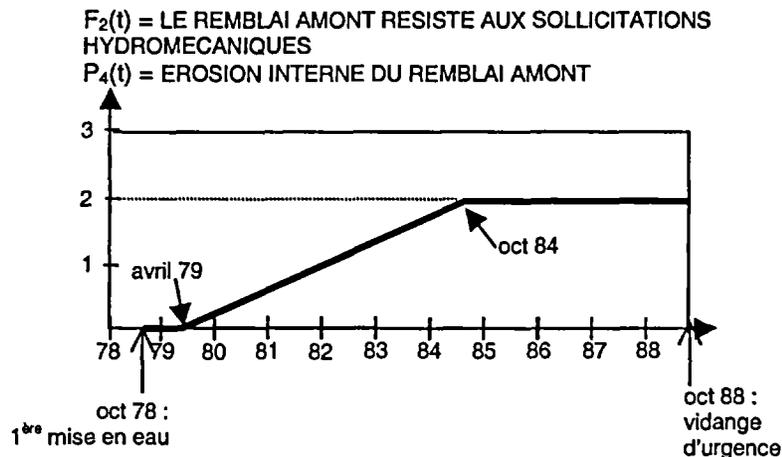


Figure 5.21 : LE REMBLAI AMONT RESISTE AUX SOLlicitATIONS HYDROMECHANIQUES (F_2) et EROSION INTERNE DU REMBLAI AMONT (P_4)

Le phénomène EROSION INTERNE DU REMBLAI AMONT (P_4) est déduit directement de la fonction F_2 (loi d'évolution identique).

1.5.2.3. 3^{ème} et 4^{ème} niveau de défaillance « colmatage du drain vertical »

Le colmatage du drain vertical (phénomène P_6 – Figure 5.22) est obtenu directement par l'analyse des débits du drain vertical (symptôme S_{P_6}). Du premier remplissage à novembre 80, les débits de drainage donnent des valeurs normales ($S_{P_6} = 0$). A partir de novembre 80, nous observons une première baisse traduisant l'amorce du colmatage du drain ($S_{P_6} = 1$). En octobre 1982, les débits diminuent à nouveau jusqu'à atteindre une valeur minimale très basse en octobre 1984 : nous en déduisons que le colmatage du drain vertical est maximal à partir de cette date ($S_{P_6} = 3$).

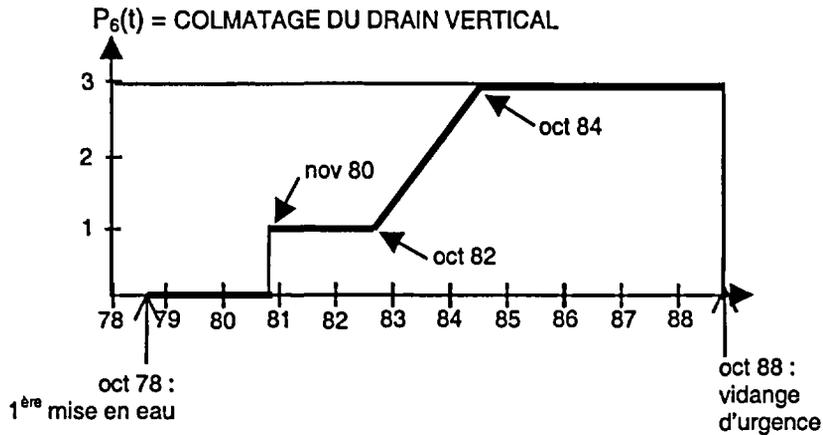


Figure 5.22 : COLMATAGE DU DRAIN VERTICAL (P_6)

Nous déduisons les lois d'évolution des fonctions LE DRAIN RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANQUES (F_3) et LE DRAIN DRAINE LES FLUX HYDRAULIQUES (F_4) directement de celle du phénomène P_6 . En effet, l'analyse des phénomènes susceptibles d'infléchir ces lois montre que LA COMPOSITION DU DRAIN (P_5) est inadaptée ($P_5 = 3$) et que LES EAUX D'INFILTRATION DANS LE REMBLAI AMONT (P_3) sont maximales dès novembre 1980 ($P_3 = 3$). Ainsi, les lois d'évolution de F_3 et F_4 sont identiques à celle de P_6 .

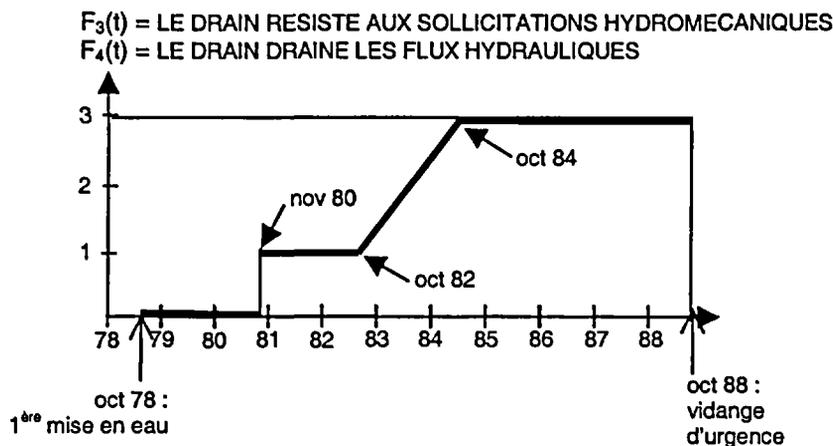


Figure 5.23 : LE DRAIN RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANQUES (F_3) et LE DRAIN DRAINE LES FLUX HYDRAULIQUES (F_4)

1.5.2.4. 5^{ème} niveau de défaillance « érosion interne et perte de résistance du remblai aval »

Le barrage de Cublize n'étant pas équipé de dispositifs de mesure de pression dans le remblai aval, la piézométrie du talus aval (S_{P8} et S_{P9}) doit être analysée par les observations visuelles des fuites ou suintements et indirectement par les phénomènes se produisant dans la zone amont. Ainsi, dès juillet 1980, la ligne piézométrique du talus amont dépasse le drain vertical et indique alors le passage d'infiltrations dans la zone aval (attribut d'état égal à 1 dès juillet 1980). En octobre 1988, des fuites directes sont observées sur le parement aval, indiquant la saturation complète du remblai sous la risberme (attribut d'état égal à 3 en octobre 1988).

A partir de S_{P8} et S_{P9} , nous déduisons les lois d'évolutions des phénomènes EAUX D'INFILTRATIONS DANS LE REMBLAI AVAL (P_8) et SOUS-PRESSIONS DANS LE REMBLAI AVAL (P_9) (Figure 5.25).

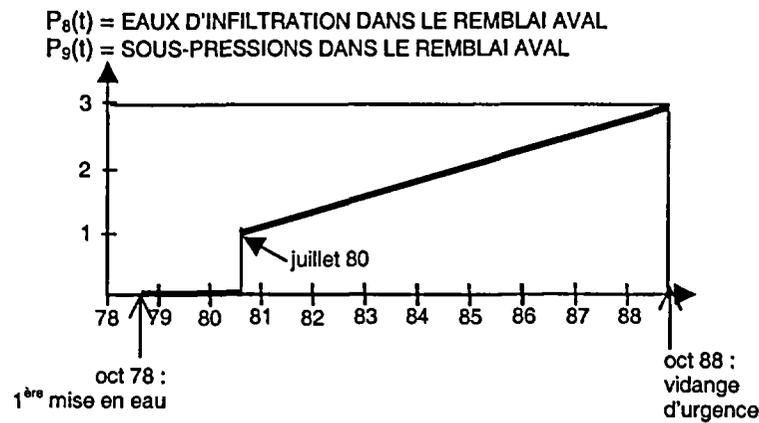


Figure 5.24 : EAUX D'INFILTRATIONS DANS LE REMBLAI AVAL (P_8) et SOUS-PRESSIONS DANS LE REMBLAI AVAL (P_9)

L'érosion interne du remblai aval débute en juillet 1980, dès le constat du contournement par le haut du drain vertical. En septembre 1988, des fuites claires sont observées sous la risberme aval et le gradient hydraulique à cette cote est de 0,20 : compte tenu de la sensibilité des matériaux à l'érosion interne, nous donnons au phénomène EROSION INTERNE DU REMBLAI AVAL (P_{11}) un attribut d'état de 2. En octobre 1988, les fuites du parement aval sont chargées en particules fines et nous nous trouvons au début d'un « renard hydraulique » : nous faisons correspondre à ce symptôme un attribut proche de 3. Nous constatons donc, lors du dernier mois, une évolution exponentielle du phénomène, correspondant à l'allure de la loi d'évolution de ce type de mécanisme (partie 4 – II.2.4).

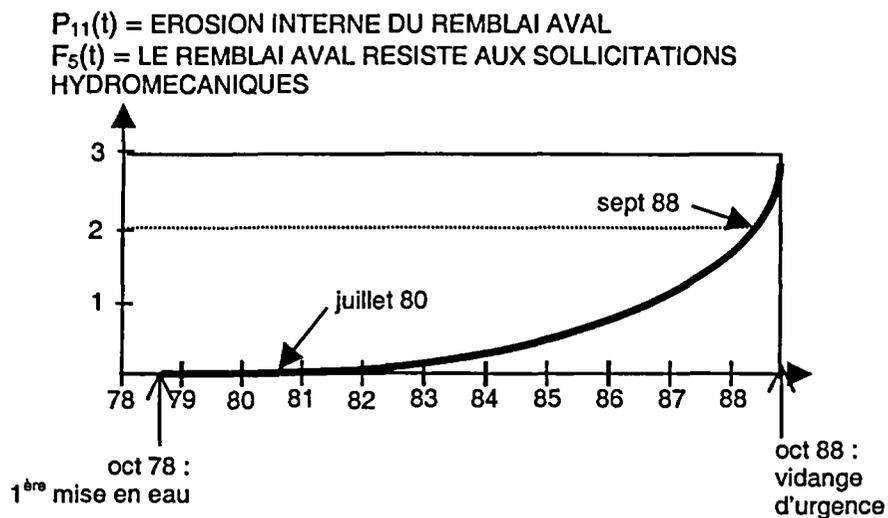


Figure 5.25 : EROSION INTERNE DU REMBLAI AVAL (P_{11}) et LE REMBLAI AVAL RESISTE AUX SOLLECATIONS HYDROMECHANIQUES (F_5)

Nous déduisons la fonction F_5 directement de l'analyse de P_{11} (loi d'évolution identique).

L'analyse du phénomène GLISSEMENT DU REMBLAI AVAL (P_{12}) est établie à partir des observations visuelles sur le parement aval et du critère de stabilité. Dès le contournement du drain par le haut à partir de juillet 1980, la résistance au cisaillement des matériaux diminue (perte de cohésion) et les sous-pressions augmentent (P_9) : P_{12} commence donc à se dégrader dès cette date. En octobre 1988, des glissements superficiels sont observés sur le talus aval et les rapports d'expertise montrent que le critère de stabilité au glissement est alors de 1,10 : nous donnons un attribut de 2 à P_{12} à cette date. L'allure de la loi d'évolution est également de type exponentiel et nous pouvons alors construire la loi d'évolution de P_{12} (Figure 5.26).

Nous déduisons la fonction F_6 directement de l'analyse de P_{12} (loi d'évolution identique).

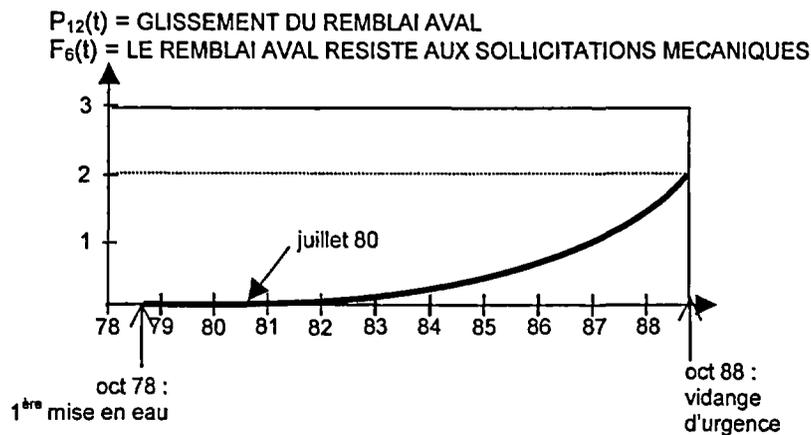


Figure 5.26 : GLISSEMENT DU REMBLAI AVAL (P_{12}) et LE REMBLAI AVAL RESISTE AUX SOLLECITATIONS MECANQUES (F_6)

1.5.2.5. Synthèse

L'historique du barrage de Cublize nous offre une vision synthétique de l'évolution de l'ensemble des paramètres de l'ouvrage (Figure 5.28). Il met en évidence la saturation très rapide du remblai amont (un an et demi après la mise en eau) liée à la légère diminution de la performance du drain vertical, le colmatage complet de ce dernier ne se produisant qu'au bout de 6 ans.

Par ailleurs, l'historique met en évidence l'accélération très rapide, en fin de processus, du mécanisme d'érosion interne du remblai aval, ayant failli conduire, à quelques semaines (voire quelques jours) près, à la rupture du barrage par « renard hydraulique ». Ce mécanisme de rupture est en concurrence avec celui du glissement généralisé du talus aval, qui apparaît néanmoins moins critique compte tenu des dimensions géométriques confortables du remblai aval. Ainsi, l'analyse de la fonction de F_5 (LE REMBLAI RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANQUES) nous donne la performance globale du barrage vis-à-vis de la sécurité (Figure 5.27).

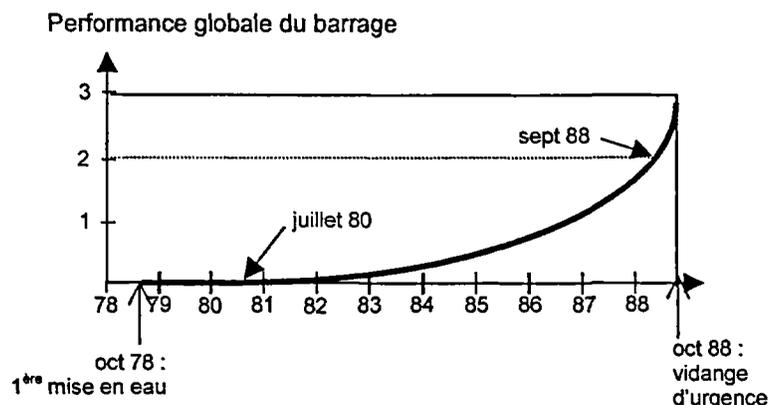


Figure 5.27 : Loi d'évolution de la performance globale du barrage de Cublize

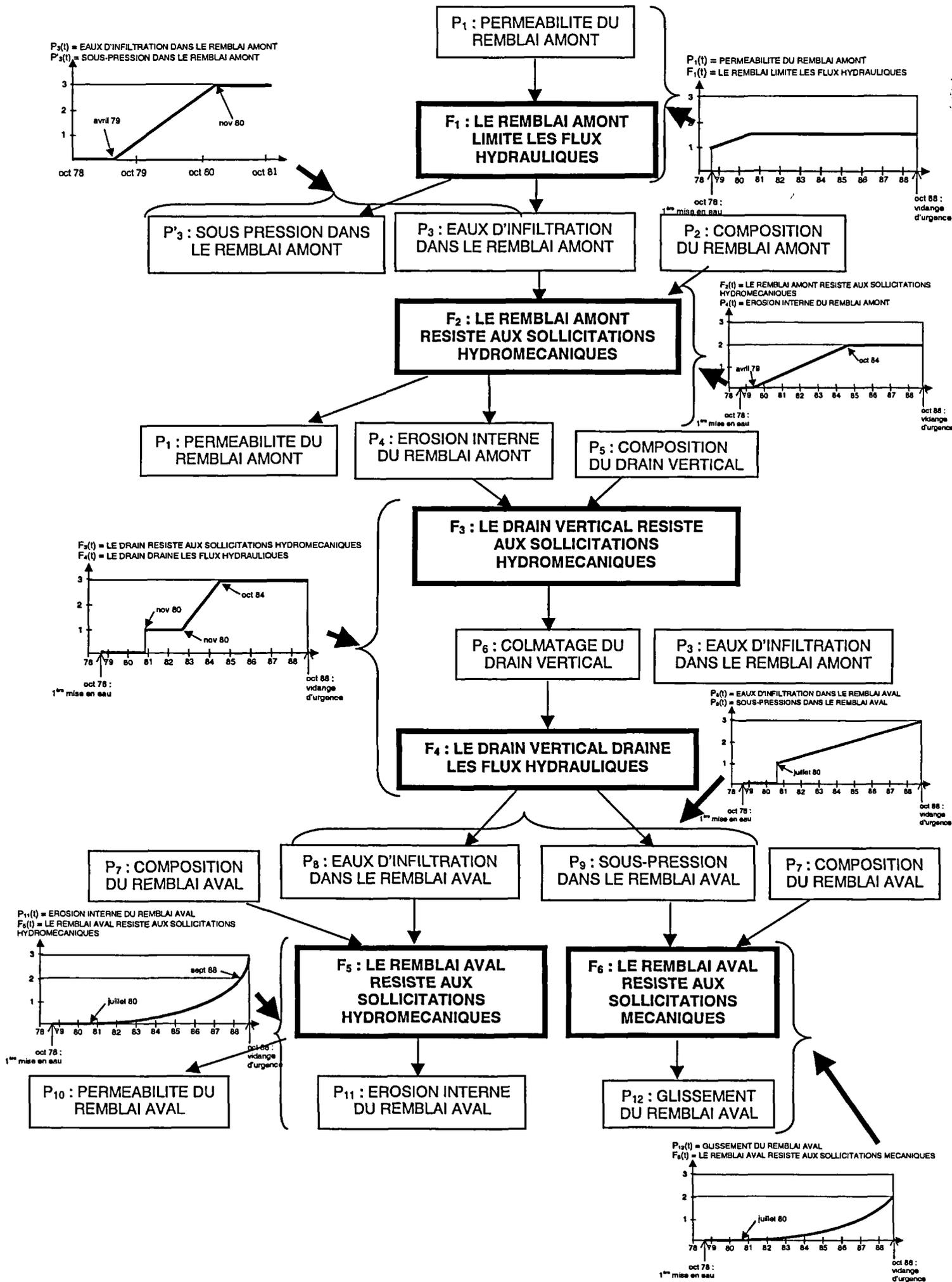


Figure 5.27 : Historique de vieillissement du barrage de Cublize

1.6. Analyse de la criticité appliquée au barrage de Cublize

Le barrage de Cublize est un exemple particulièrement intéressant d'un remblai ayant failli se rompre par érosion interne. Après avoir déterminé son historique, nous procédons à l'analyse rétroactive de la criticité globale de l'ouvrage vis-à-vis de la sécurité, par le biais de la fonction LE REMLAI AVAL RESISTE AUX SOLLECITATIONS HYDROMECHANIQUES (F_5).

1.6.1. Criticité de dégradation d'une unité de la fonction de résistance F_5

Nous recherchons, au cours de la période durant laquelle s'est développé le mécanisme d'érosion interne (octobre 1978 à octobre 1988), les *attributs d'occurrence de dégradation d'une unité* associés à la mesure de l'occurrence Δt_1 et les attributs de performance correspondant. La loi d'évolution de performance de F_5 est indiquée à la figure 5.29 :

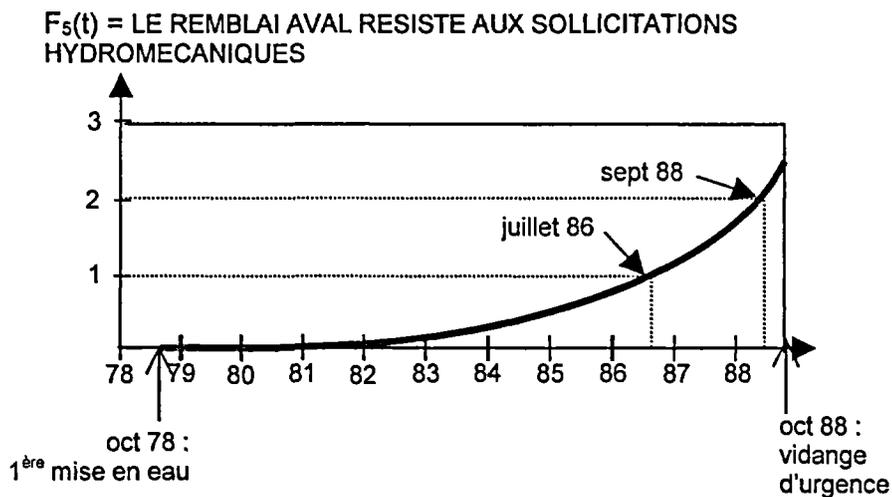


Figure 5.29 : Evolution de la performance de la fonction de résistance F_5

La *criticité de dégradation d'une unité* de F_5 est calculée en multipliant les attributs d'occurrence de dégradation d'une unité et les attributs de conséquence $F_5(t_0 + \Delta t_1)$ aux instants $t_0 + \Delta t_1$ (Tableau 5.5) :

intervalle $[t_0 ; t_1]$ ou date t_0	$F_5(t_0)$	$F_5(t_1)$	mesure de l'occurrence de dégradation d'une unité : Δt_1	attribut d'occurrence lié à Δt_1	attribut de conséquence $F_5(t_0 + \Delta t_1)$	criticité de dégradation d'une unité
d'octobre 1978 à juillet 1985	0	< 1	1 an < $\Delta t_1 \leq 10$ ans	3	1	3
de juillet 1985 à juillet 1986	< 1	1	1 mois < $\Delta t_1 \leq 1$ an	4	1	4
en juillet 1986	/	1	1 an < $\Delta t_1 \leq 10$ ans	3	2	6
de juillet 1986 à septembre 1987	1	< 2	1 an < $\Delta t_1 \leq 10$ ans	3	2	6
de septembre 1987 à septembre 1988	< 2	2	1 mois < $\Delta t_1 \leq 1$ an	4	2	8
en septembre 1988	2	/	1 mois < $\Delta t_1 \leq 1$ an	4	3	12
en octobre 1988	> 2	/	$\Delta t_1 \leq 1$ mois	5	3	15

Tableau 5.5 : Criticité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction de résistance F_5

1.6.2. Criticité de défaillance de la fonction de résistance F_5

Pour déterminer la *criticité de défaillance* de la fonction de résistance F_5 , nous recherchons au cours de la vie du barrage de Cublize les *attributs d'occurrence de défaillance* associés à la mesure de l'occurrence Δt_2 , correspondant à la défaillance de F_5 (Tableau 5.6) :

intervalle	mesure de l'occurrence de la défaillance : Δt_2	attribut d'occurrence lié à Δt_2	criticité de défaillance
d'octobre 1978 à septembre 1988	1 an < $\Delta t_2 \leq 10$ ans	3	9
en septembre 1988	1 mois < $\Delta t_2 \leq 1$ an	4	12
en octobre 1988	$\Delta t_2^* \leq 1$ mois	5*	15

* valeur obtenue par estimation : en prolongeant la courbe exponentielle indiquant l'évolution de la performance de la fonction F (Figure 5.28), nous estimons que la défaillance de F (attribut d'état égal à 3) se serait produite au plus tard en décembre 1988 si la vidange d'urgence de la retenue n'avait pas été ordonnée.

Tableau 5.6 : Criticité de défaillance de la fonction de résistance F_5

1.6.3. Synthèse

Nous représentons l'évolution des mesures de criticité de dégradation d'une unité et de défaillance de la fonction F_5 (Figure 5.30) :

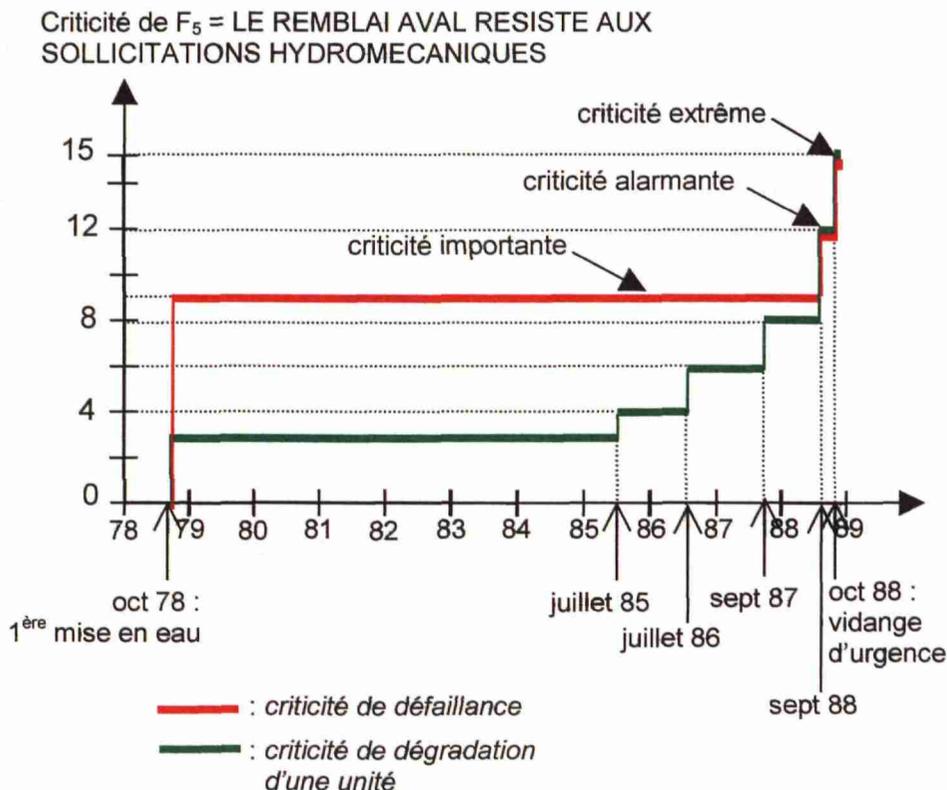


Figure 5.30 : Evolution de la criticité de la fonction de résistance F_5

L'analyse de la criticité de défaillance met clairement en évidence le risque global vis-à-vis de la sécurité de l'ouvrage (criticité de défaillance de F_5), qui est *important* dès la première mise en eau compte tenu des faiblesses du barrage.

En revanche, la criticité de dégradation d'une unité a l'allure de la loi d'évolution de la performance de F_5 et augmente de façon exponentielle à la fin de la période étudiée. Elle met néanmoins en évidence une criticité *importante* dès septembre 1987.

1.7. Synthèse des applications

1.7.1. Modélisation des scénarios de vieillissement

L'écriture des scénarios à partir du modèle fonctionnel de vieillissement ne pose pas de difficultés particulières. Sur la base des recueils d'expertise, une analyse approfondie du mécanisme doit être réalisée au préalable ; nous retrouvons ensuite par l'AMDE les séquences fonctionnelles de défaillance au sein des composants. Enfin, la classification des fonctions, phénomènes et symptômes et les propositions de terminologie établies pour chacune de ces variables permettent d'obtenir une écriture homogène des graphes causaux.

Au final, cette modélisation synthétique des scénarios de vieillissement autorise une compréhension aisée des mécanismes et se prête bien à une gestion ultérieure dans une base de connaissances.

1.7.2. Modélisation des historiques de vieillissement

La modélisation d'un historique de vieillissement nécessite également une bonne compréhension du mécanisme en jeu et relève de l'ingénieur spécialisé. Comme en ingénierie classique, elle repose sur l'analyse des symptômes qui permet de déterminer l'ampleur des phénomènes puis les pertes de performance. L'expertise est largement impliquée dans la détermination des liens entre chaque variable.

Les exemples d'historiques traités n'ont pas mis en évidence de difficultés entre les experts sur le choix des niveaux qualitatifs de dégradation, ce qui permet de conclure favorablement sur les propositions de grilles d'analyse.

Enfin, la qualité de la modélisation d'un historique dépend essentiellement de la qualité des informations disponibles : chroniques des observations et des données d'auscultation, rapports d'expertise complémentaires, etc. Ainsi, un historique ne peut être réalisé que sur un ouvrage correctement documenté.

1.7.3. Analyse de la criticité

Les applications traitées correspondent à des analyses rétroactives d'ouvrages ayant subi un mécanisme. Même s'il est trivial de prévoir « l'avenir » du barrage dont on connaît l'historique en se plaçant dans son passé, ces exemples nous permettent de conclure favorablement sur la pertinence de la méthodologie proposée pour l'analyse de la criticité : les risques, d'une part, de dégradation d'une unité qualitative de la performance des fonctions, d'autre part, de défaillance, sont clairement mis en évidence et sont cohérents au regard de l'historique des ouvrages.

A terme, le principe de notre démarche est d'estimer, par analyse experte, les dégradations futures des fonctions accomplies par un barrage et ses composants à partir d'une base de données d'historiques. Ainsi, notre méthodologie prendra tout son intérêt lorsque nous disposerons, pour chaque mécanisme de vieillissement, de quelques exemples de barrages ayant connu des mécanismes analogues.

II. Valorisation

II.1. Recherche et développement

Afin de valoriser les méthodes proposées, il est nécessaire de poursuivre certains travaux relevant de la recherche et développement. Dans ce cadre, deux axes doivent être engagés à court terme :

- ❶ achever la base de connaissances sur la pathologie des barrages ;
- ❷ constituer des historiques de vieillissement de barrages.

II.1.1. Base de connaissances sur la pathologie des barrages

Dans le cadre de notre recherche, nous avons constitué une première partie de la base de connaissances sur la pathologie des barrages, en modélisant les scénarios de vieillissement des ouvrages poids (partie 3 – III.4.2). Le travail restant à produire concerne essentiellement la pathologie des barrages en remblai et, à un moindre niveau, celle des barrages voûtes dont de nombreux mécanismes sont communs avec les ouvrages poids (Tableau 5.7).

Type d'ouvrage	Lieu	Scénario
barrage en remblai	fondations (sol ou rocher)	scénario 1.1 : Déformation de la fondation scénario 1.2 : Perte de résistance, augmentation des sous-pressions et modification de l'état de contraintes scénario 1.3 : Erosion interne scénario 1.4 : Dégradation de la fondation
	remblai (terre ou enrochements)	scénario 2.1 : Déformation du remblai scénario 2.2 : Perte de résistance scénario 2.3 : Augmentation des pressions interstitielles scénario 2.4 : Erosion interne scénario 2.5 : Glissement du remblai scénario 2.6 : Erosion superficielle scénario 2.7 : Dégradation des masques amont
barrage voûte	fondations (rocher)	scénario 1.1 : Faiblesse au regard des actions prolongées ou répétées
	voûte (béton)	scénario 2.1 : Retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau

Tableau 5.7 : Les scénarios à modéliser pour la base de connaissances

Les étapes de cette recherche relative aux remblais et aux voûtes sont identiques à celles mises en œuvre pour les ouvrages poids :

- ❶ l'analyse fonctionnelle des ouvrages (l'analyse structurelle des remblais a été réalisée)
- ❷ l'AMDE Processus et Produit
- ❸ la classification et la terminologie des fonctions, phénomènes et symptômes
- ❹ l'analyse des recueils d'expertise sur la pathologie de ces ouvrages
- ❺ la modélisation des mécanismes de vieillissement

Bien entendu, les résultats obtenus sur les barrages poids pourront être largement valorisés dans l'application aux autres types d'ouvrages, en particulier la classification et la terminologie des variables.

II.1.2. Base de données d'historiques de vieillissement

Il s'agit de valoriser le retour d'expérience accumulé depuis plusieurs années sur les barrages relevant du ministère de l'environnement. En effet, les nombreuses expertises réalisées sur ce parc ont permis de constituer des dossiers correctement documentés concernant des ouvrages ayant connus des mécanismes de vieillissement. Nous pouvons établir une première liste d'historiques à constituer (Tableau 5.8) :

Nom du barrage	Type d'ouvrage	Mécanisme de vieillissement
Bimont (13)	voûte	2.1 Alkali-réaction
Chazelles (69)	poids	2.3 Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu 2.6 Vieillissement des revêtements amont
Redevis (63)	poids	2.3 Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu 2.6 Vieillissement des revêtements amont
Pas des Bêtes (81)	poids	2.4 Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées
La Mouche (52)	poids	2.4 Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées
Lauch, Altenweiher, Alfeld (68)	poids	2.6 Dégradation du parement amont due à une réaction avec le milieu extérieur
Carcès (83)	remblai	1.1 Déformation de la fondation
Saint Pardoux (87)	remblai	2.4 Erosion interne
Ouches (63)	remblai	2.4 Erosion interne
Pirot	remblai	2.4 Erosion interne
Torcy Vieux	remblai	2.4 Erosion interne
Chamboux (21)	remblai	2.3 Augmentation des pressions interstitielles

Tableau 5.8 : *Historiques de barrages du parc du ministère de l'environnement à modéliser*

Cette liste n'est pas exhaustive mais indique les dossiers auxquels nous pouvons avoir accès rapidement. La modélisation de ces historiques constituerait une première base de données intéressante. Remarquons en particulier que certains mécanismes, comme l'érosion interne (scénario 2.4), sont bien illustrés (4 exemples d'ouvrages), permettant déjà d'établir par analogie des prévisions de bonne qualité.

II.2. Utilisation

Les méthodes proposées ne peuvent être utilisées en l'état par les spécialistes du domaine. Il convient de développer des outils informatiques permettant d'écrire les scénarios de vieillissement et de gérer des bases de connaissances et d'historiques.

Enfin, des procédures de contrôle qualité des informations introduites dans les bases de données doivent être élaborées.

II.2.1. Projet CASCAD 1996-2000

Entre 1996 et 2000, le Cemagref a engagé une première recherche en informatique, visant la modélisation de bases de données et l'extraction de connaissances à partir d'informations collectées. Dans ce cadre, un modèle informatique spécifique a été développé, prenant en compte les aspects statiques et dynamiques des informations manipulées et les techniques d'extraction de données (*data mining*). Nous ne détaillons pas ici les méthodes élaborées et nous renvoyons le lecteur intéressé vers [CATHALA,96-97-00].

Cette recherche a conduit au projet CASCAD (*Computer Aided SCenario for Ageing of Dam*) dont l'objectif était de construire une première ébauche d'un système d'aide à la décision. En proposant une approche par *scénario*, deux outils informatiques prototypes ont été développés : *Scenario Designer* et *Histoire*. [CATHALA,98a-98b]

Scenario Designer est un outil d'aide à la description des scénarios (de leur écriture au stockage dans une base de données), représentant dans un formalisme graphique spécifique différents types de *faits* et de *liens* constituant un scénario. Ainsi, *Scenario Designer* distingue les faits observables (à l'inspection visuelle), auscultables (mesurables avec des instruments d'auscultation) et déduits (ceux qui ne sont ni observables, ni auscultables), mais aussi les liens de causalité, pouvant être partiels ou totaux, et les liens de synchronisation exprimés à l'aide du constructeur « et » (Figure 5.31).

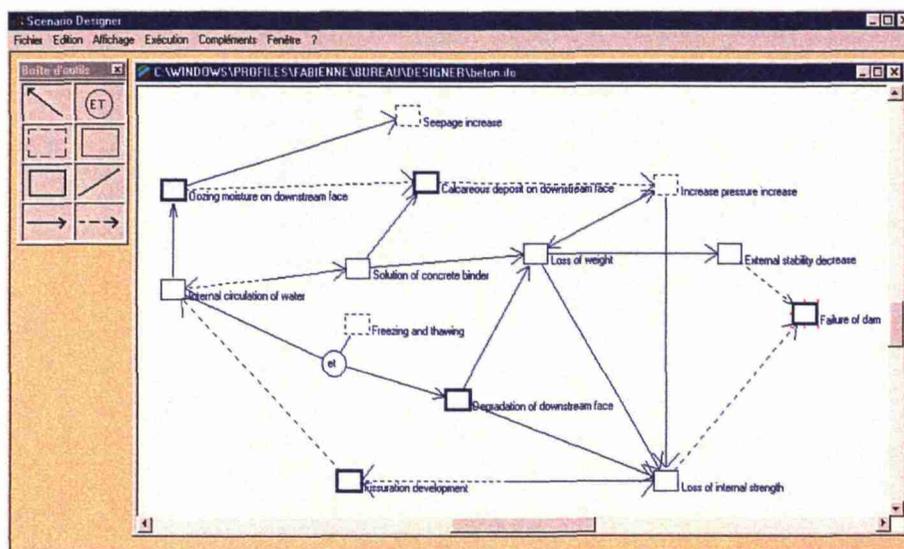


Figure 5.31 : Exemple de scénario de vieillissement d'un barrage poids en béton écrit à partir de Scenario Designer [LOUIS,99]

Dans ce cadre, les lignes principales des outils à développer sont les suivantes :

❶ Un outil pour la gestion d'une base de connaissances sur la pathologie des barrages

Il doit permettre l'écriture de graphes causaux, assistée par ordinateur (**module *scénario-AO***), et, pour cela, devra proposer un formalisme graphique proche de l'utilisateur spécialisé : construction automatique des séquences de défaillance, choix des différentes variables, etc.

Il mettra en œuvre les différentes variables au moyen de bases de données :

- *une base de données de fonctions* : pour chaque type de barrages et pour chaque composant, nous devons disposer des fonctions génériques et de leurs fonctions de précision ;
- *une base de données de phénomènes* : pour chaque phénomène, nous devons accéder aux termes synonymes et aux phénomènes de granularité inférieure ;
- *une base de données de symptômes* : les symptômes doivent être classés selon leur type (observé, ausculté, mesuré, calculé) et nous devons disposer des termes synonymes et de leurs moyens de détection.

Ce module doit également gérer la base de connaissances, c'est-à-dire la collection des scénarios de vieillissement. Pour cela, il devra présenter de bonnes qualités pédagogiques ; par exemple, pour chaque mécanisme modélisé, il pourra proposer différents champs indiquant les processus physiques en jeu, les symptômes, les phénomènes et les fonctions entrant dans le scénario.

Enfin, l'expert utilisateur doit pouvoir accéder aux informations relatives aux barrages ayant connus des mécanismes analogues et dont l'historique est stocké dans la base de données d'historiques.

❷ Un outil pour la gestion d'une base de données d'historiques de vieillissement

Il doit permettre la saisie et l'écriture d'historiques de vieillissement, assistées par ordinateur (**module *historique-AO***). Cet outil devra également proposer une ergonomie proche de l'utilisateur spécialisé : saisie des attributs d'état des différentes variables en fonction du temps, proposition d'allures de lois d'évolution, gestion des échelles de temps, tracé automatique des lois d'évolution, etc.

Par ailleurs, ce module doit assurer la consultation des historiques. Le formalisme graphique à développer devra autoriser la consultation des séquences de défaillance, les lois d'évolution des différentes variables, les agrandissements sur des fonctions particulières (performance globale du barrage par exemple), etc.

A côté de chaque historique modélisé, la base de données doit contenir différentes informations sur l'ouvrage en cours d'examen : une fiche synoptique sur les principales caractéristiques du barrage (données générales, profils géométriques, ...), un champ indiquant la bibliographie disponible et, le cas échéant, les références des archives, les données sur les principaux symptômes (synthèse des mesures d'auscultation les plus probantes, etc.). Cette liste n'est pas exhaustive, l'objectif étant d'apporter aux experts, à côté de l'historique modélisé, un résumé complet pour apprécier le contexte de l'ouvrage et le mécanisme en jeu.

❸ Un système d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques

Pour l'heure, aucune automatisation de la recherche de scénarios ou de la prévision des dégradations n'est demandée à l'outil informatique. L'objectif est simplement de fournir à l'ingénieur spécialisé des outils performants pour la consultation de la base de connaissances et de la base de données d'historiques (consultation simultanée de plusieurs historiques, scénarios, etc.).

Ainsi, dans le cadre de la valorisation de nos travaux, le système d'aide à la décision et à l'analyse de risques doit travailler essentiellement l'ergonomie d'accès et le formalisme de présentation des données, dans le but de fournir aux experts les informations nécessaires pour le diagnostic et l'analyse de risques par analogie.

11.2.3. Procédure de contrôle qualité

En parallèle au développement d'outils informatiques, des procédures de contrôle qualité doivent être mises en œuvre pour s'assurer de la qualité de l'information issue de l'expertise, puis de celles saisies dans les bases de données et de leur protection. Ces procédures de contrôle relèvent de deux domaines :

① Contrôle qualité des informations expertes

Le contrôle de la qualité des informations issues des experts relève du **contrôle de qualité en expertise** [Norme x50-110]. Il s'agit de s'assurer de la qualité des données à traiter (données sur les barrages, chroniques d'auscultation, etc.), puis de la qualité de l'expertise qui est développée (la modélisation d'un scénario fonctionnel ou d'un historique de vieillissement).

Les principes du contrôle qualité d'une expertise sont énoncés dans la norme :

- Obtention des données et informations disponibles et vérification de celles-ci ;
- Evaluation et interprétation des données existantes et autres informations disponibles ;
- Identification des données manquantes et définition des actions à réaliser ;
- Recherche des données manquantes et vérification de celles-ci ;
- Analyse et évaluation des données ; construction argumentée des démonstrations ;
- Rédaction du rapport d'expertise ;
- Formulation de l'interprétation, de l'avis et / ou des recommandations.

② Contrôle qualité des bases de données

Il s'agit maintenant de s'assurer de la qualité de la saisie des informations sous forme de bases de données, puis de leur protection, dans le respect des principes du contrôle de la qualité des données informatiques tels qu'ils sont énoncés dans [REDMAN,98].

Les objectifs sont, d'une part, de proposer une procédure de contrôle et de validation de la saisie des données dans les bases, d'autre part, de protéger les informations archivées avec des accès contrôlés (en écriture pour les personnes autorisées, à défaut en lecture).

Conclusion

Le diagnostic et l'analyse de risques sont les deux tâches essentielles de l'ingénieur spécialisé intervenant sur un barrage en service présentant des détériorations : d'une part, il recherche le mécanisme de vieillissement en jeu, d'autre part, il prévoit les évolutions futures et engage les mesures d'IMR adaptées.

Parce que les barrages présentent un caractère unique et que leurs comportements et les mécanismes de vieillissement en jeu sont nombreux et complexes, l'expertise est l'approche privilégiée, seule ou en complément d'autres d'approches (modélisations physiques, statistique, fonctionnelle), pour les études préliminaires et rapides ou pour la validation et la synthèse d'analyses approfondies.

Notre recherche a donc consisté à produire des méthodes pour aider les ingénieurs spécialisés dans leur travail, des méthodes pour capitaliser la connaissance experte et le retour d'expérience.

Nos premiers résultats concernent la modélisation des scénarios de vieillissement. Ils comportent, en développement, la réalisation de l'analyse fonctionnelle des barrages, et, en recherche, l'adaptation de la méthode AMDE à notre contexte et la proposition d'un modèle de représentation des scénarios au moyen de graphes orientés. Ce modèle enchaîne des séquences fonctionnelles de défaillance et structure l'information liée au vieillissement autour de trois variables (symptôme, phénomène et fonction).

Notre deuxième famille de résultats est liée, dans un cadre plus applicatif, à l'analyse des connaissances expertes. Nous avons établi la synthèse des mécanismes de vieillissement des barrages, puis organisé les données. Nous avons alors rempli une première base de connaissances relative à la pathologie des barrages.

L'analyse fonctionnelle, l'AMDE, la méthodologie de classification des variables et, de façon plus large, le modèle de vieillissement, ont été développés indépendamment du domaine d'application. Par conséquent, leur transposition vers d'autres ouvrages du génie civil pourraient être envisagées *a priori* sans trop de difficultés, ce travail pouvant alors servir de base en particulier pour les ouvrages d'art (ouvrages unitaires : pont, réservoir...).

Notre troisième famille de résultats concerne la capitalisation des informations relatives au retour d'expérience. Sur la base d'analyses qualitatives des variables et de leur évolution, nous avons proposé une méthode pour constituer des historiques de vieillissement.

Nous avons aussi développé des méthodes qualitatives pour évaluer la criticité des pertes de performance, celles des fonctions des composants, mais aussi la criticité de la perte de performance globale du barrage, ainsi qu'une méthode pour prendre en compte les événements extérieurs exceptionnels (crues, séismes).

Afin d'apprécier leurs intérêts et leurs limites, les méthodes d'écriture de scénarios et d'analyse de la criticité sont ensuite mises en œuvre sur deux mécanismes distincts : l'alcali-réaction dans les barrages poids et la suffusion interne dans les remblais, et sur deux barrages représentatifs de ces mécanismes. L'analyse critique de ces résultats montre que :

a) Sur la base d'une analyse AMDE rigoureuse, le modèle fonctionnel d'écriture des scénarios apparaît bien adapté à nos objectifs de représentation des mécanismes de vieillissement et de leurs dégradations fonctionnelles. Il permet de structurer la connaissance experte et offre l'avantage de prendre en compte les dégradations partielles et non chronologiques. Il présente en outre d'intéressantes qualités de synthèse et pédagogiques.

Compte tenu de nos objectifs initiaux, nous avons choisi de décrire les mécanismes à l'échelle du composant, mais des analyses plus précises (au sein des composants ou dans les matériaux) ou plus larges (à l'échelle d'un bassin versant) devraient pouvoir être conduites selon les besoins à partir des mêmes méthodologies.

b) Appliquée à des ouvrages correctement documentés, la modélisation des historiques de vieillissement apparaît également bien adaptée. Elle nécessite une analyse préalable des symptômes identique à celle réalisée en ingénierie traditionnelle. En revanche, à défaut de règles formelles ou de liens directs entre certains paramètres, il est parfois nécessaire de recourir à l'analyse de l'expert pour déterminer les lois d'évolution de certaines variables.

c) La méthodologie d'analyse de la criticité est apparue pertinente et appropriée. Elle prendra tout son intérêt lorsque la collection des historiques de vieillissement des barrages sera suffisamment étoffée.

Au final, on dispose de méthodes pour aider les experts dans leur travail de diagnostic et d'analyse de risques des barrages, des méthodes qui s'appliquent à tous les mécanismes de vieillissement. Elles trouvent leurs intérêts dans le cadre d'une approche par expertise, c'est-à-dire pour le diagnostic et l'analyse de risques de premier ordre de grandeur ou en synthèse d'études plus approfondies.

En revanche, ces méthodes ne produisent pas une analyse fine du comportement d'un barrage, de ses évolutions et de sa fiabilité. Ce ne sont pas leurs vocations initiales. En effet, l'analyse de la criticité met en évidence les ouvrages, leurs composants et les scénarios les plus critiques et les délais d'intervention et de programmation de travaux. Sur ces bases, il sera alors possible d'engager le cas échéant des investigations plus approfondies : modélisation physique, analyse statistique, étude de fiabilité...

Pour valoriser ces méthodes, des recherches complémentaires vont être conduites à court terme dans deux directions :

- un axe de recherche et développement visant, d'une part à compléter la base de connaissances sur la pathologie des barrages, avec les mécanismes de vieillissement des ouvrages en remblai, et d'autre part à renseigner la base de données d'historiques ;
- un axe d'utilisation, avec le développement d'outils informatiques d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques (projet *CASCAD*).

Ces travaux de valorisation offrent des possibilités d'ouverture de la base de données d'historiques à d'autres parcs de barrages en France et en Europe, à travers des collaborations spécifiques ou des projets européens.

A long terme, une première perspective de ce travail est d'automatiser les lois de transfert entre les différentes variables (symptômes vers phénomènes, phénomènes vers fonctions...). L'objectif serait de produire des formalismes afin de minimiser l'intervention de l'expert dans cette tâche.

Cette recherche relèvera d'une étude systématique de chaque mécanisme de vieillissement et de sa cinétique et pourra être réalisé à partir de la collection des scénarios.

Nous avons vu que les lois d'évolution des pertes de performance des fonctions sont paramétrées par celles des phénomènes à l'origine des dégradations. L'étude des processus physiques et des lois de comportement constitue une première approche de cette recherche.

Pour certains mécanismes pour lesquels on dispose de nombreuses données ou essais (l'alcali-réaction par exemple), une recherche plus fondamentale pourrait se baser sur la fiabilité : processus de Markov, réseaux de Petri stochastiques...

Une deuxième perspective à long terme concerne l'adaptation des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement pour le génie civil. En particulier, il serait intéressant d'adapter ces méthodes au domaine des barrages, notamment la MAE et la MAC, comme nous l'avons fait ici pour l'AMDE : analyse fonctionnelle préalable, prise en compte des dégradations progressives, des mécanismes non chronologiques...

Enfin, lors de l'évaluation quantitative des mesures de la sûreté de fonctionnement, des améliorations sensibles pourraient être apportées dans le traitement des probabilités subjectives : choix des experts et masse de confiance, recueil de la connaissance experte, traitement des opinions biaisées...

Bibliographie

ABDALLAOUI MAANE M. (1997). Etude des scénarios de vieillissement des barrages poids en béton ou en maçonnerie. Mémoire d'ingénieur : ESIM, septembre 1997. 60 p.

AMDAL T. (2001). New Norwegian guidelines for risk assessment. *Hydropower and Dams*, Issue 2, p.62-66.

ANCOLD (1998). Guidelines on Risk Assessment. ISBN 0 731 02754X, January 1994, reprint April 1998. 115 p.

ARDILLON E. (2002). Approches fiabilistes pour l'exploitation des centrales nucléaires d'EDF. In: Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. CREMONA C. : AFGC, version provisoire, février 2002. p.305-312.

BARTSCH M. (2001). FMECA of the Ajaure Dam – a methodology study. In: Database and Risk Analysis Task Group, Geiranger, Norway, 25 June 2001. 15 p.

BOIS C. (2002). La problématique de l'évaluation de la capacité portante de la suspension du pont d'Aquitaine. In: Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. CREMONA C. : AFGC, version provisoire, février 2002. p.41-55.

BOISSIER D. (2000). Décision et incomplétude. *Revue Française de Géotechnique*, 4^{ème} trimestre 2000, n°93, p.81-92.

BONELLI S., FELIX H., et al (1998). Interprétation des mesures d'auscultation des barrages par régression linéaire multiple « HST ». In: 2^{ème} conférence nationale Fiabilité des Matériaux des Structures JN-FIAB 98, Marne la Vallée, 23-24 novembre 1998. Paris : HERMES. p.189-198.

BONELLI S., ROYET P. (2001). Delayed response analysis of dam monitoring data. In: Dams in a European context, Geiranger, Norway, 25-27 June 2001. Lisse : Balkema. p.91-99.

BOUCHON-MEUNIER B. (1995). La logique floue et ses applications. Amsterdam : Ed. Addison-Wesley. p.84-92.

BOURDAROT E. (2001). Analysis of the irreversible deformations of arch dams. In: Dams in a European context, Geiranger, Norway, 25-27 June 2001. Lisse: Balkema. p.101-106.

BOWLES D.S. (1993). Risk assessment : a tool for dam rehabilitation decisions. In: ASCE, Proceeding of the speciality conference on geotechnical practice in dam rehabilitation, Geotechnical special publication n°35. p.116-129.

BREYSSE D. (2002). L'évaluation et la maintenance des réseaux d'assainissement. In: Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. CREMONA C. : AFGC, version provisoire, février 2002. p.147-178.

- CALGARO J.A. (1996).** Introduction aux Eurocodes – sécurité des constructions et bases de la théorie de la fiabilité. Paris : Presses de l'ENPC. 200 p.
- CARRERE A. (2001).** Conception des barrages voûtes. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 10-11 mai 2001. CFGB. 23 p.
- CARRERE A., COLSON M., et al. (2000).** La modélisation : outil d'aide à l'interprétation des mesures. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.78-R.63. p.1005-1024.
- CATHALA F. (1996).** Une approche de modélisation de scénarii - application à la pathologie des barrages. Mémoire de stage de DEA Informatique : université d'Aix-Marseille II, juin 1996.
- CATHALA F. (2000).** Modélisation de scénarios pour l'aide à la décision : application au vieillissement des barrages. Thèse de doctorat spécialité informatique : université d'Aix-Marseille II, 3 février 2000. 139 p.
- CATHALA F., MERIAUX P., et al. (1998a).** Développement d'une base de données sur les scénarios de vieillissement des barrages (projet CASCAD). Ingénieries EAT, 1998, n° spécial "risques naturels", p.69-76.
- CATHALA F., MERIAUX P., ROYET P. (1998b).** A database modelling Approach for Dam Ageing Scenarios. In: Proceedings of International Symposium on new trends and guidelines on dam safety, Spanish Committee on Large Dams, Barcelona, 17-19 June 1998. p.629-637.
- CATHALA F., PONCELET P. (1997).** Preserving Behaviour : Why an How. In: 9th Int. Conf. On CaiSE, Spain. p.333-346.
- CEA (2000).** A Guide to Dam Risk Management. Canadian Electricity Association – Dam Safety Interest Group, December 2000. Revision 8.0.
- Cemagref (1994).** Sécurité des barrages – Etat des lieux 1990 à 1994. Aix-en-Provence : Cemagref, décembre 1994. 13 p. Rapport final de mission.
- Cemagref (1999).** Sécurité des barrages autorisés – aspects réglementaires et administratifs. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, octobre 1999. 17 p.
- CFGB (1997).** Barrages et Réservoir n°6 - Erosion Interne : typologie, détection et réparation. Le Bourget du Lac : CFGB-EDF. 126 p.
- CFGB (1999).** Evaluation des risques. CFGB, mai 1999. 16 p. Rapport du groupe de travail « évaluation des risques ».
- COTTIN L., GOUBET A., et al. (1994).** Dispositions réglementaires en matière de sécurité des barrages en France. In: ICOLD – 18th International Congress On Large Dams, Durban, 1994, Q.68-R.4. p.637-644.
- COTTIN L., LAZZARINI P., POUPART M. (2002).** La réhabilitation du barrage du Chambon. In: Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. CREMONA C. : AFGC, version provisoire, février 2002. p.27-39.
- CREMONA C. Dir. (2002).** Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. AFGC, version provisoire, février 2002. 451 p.
- CYGANIEWICZ P.E., SMART J.D. (2000).** U.S. Bureau of Reclamation's use of risk analysis and risk assessment in dam safety decision making. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.76-R.23. p.351-369.
- DEGOUTTE G. Dir. (1992).** Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens. Paris : Cemagref Editions. 99 p.
- DEGOUTTE G. Dir. (1997).** Petits barrages - recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Paris : Cemagref Editions. 173 p.

- DEGOUTTE G., ROYET P., Dir. (1993).** Sécurité des barrages en service – session de formation continue de l'ENGREF – Montpellier – 25 au 28 mai 1993. Paris : Cemagref Editions. 241 p.
- DISE K.M., VICK S.G. (2000).** Dam safety risk analysis for Navajo dam. In: 20th ICOLD congress: Q.76-R.22, Beijing, 19-22 September 2000. p.337-350.
- DOUGLAS K.J., SPANNAGLE M., FELL R. (1998).** Analysis of concrete and masonry dam incidents. Univ report n° R-373: university of New South Wales, Sydney, August 1998. 136 p
- DUBAND D., MICHEL C., et al. (1988).** Evaluation des crues extrêmes et de la crue de projet par la méthode du Gradex. In: ICOLD – 16th International Congress On Large Dams, San Francisco, Vol IV, Q.63, R.65.
- EDF. (1970).** Etablissement des graphiques de surveillance des barrages à conditions constantes. EDF. rapport D.T.G. 32.
- EDF-Cemagref (1998).** Vigie Barrages. CD Rom 10-98 version 1, octobre 1998.
- FARMER F.R. (1967).** Reactor safety and siting : a proposed risk criterion. Nuclear Safety, 8 (6).
- FELIX H., PEYRAS L. (2000).** Barrage de Chamboux – Suivi des mesures – Rapport d'auscultation 1999. Aix-en-Provence : Cemagref, septembre 2000. 32 p.
- FELL R. (1997).** Essential components of risk assessment for dams. In: Workshop on risk – based dams safety evaluations, Trondheim. 9 p.
- FISCHHOFF B., LICHTENSTEIN S., et al. (1999).** Acceptable Risk. New York: Cambridge university press. 185 p.
- FORBUS K.D. (1996).** Qualitative reasoning. In: CRC Handbook of Computer Science - Draft. Qualitative reasoning group, the Institute for the Learning Sciences, North-western University, USA: June 1996. 29 p.
- FOSTER M.A., FELL R. (1998).** Analysis of embankment dam incidents. Univ report n° R-374: university of New South Wales, Sydney, September 1998. 169 p.
- FOSTER M.A., FELL R. (1999a).** A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods. Univ report draft: university of New South Wales, Sydney, April 1999. 176 p.
- FOSTER M.A., FELL R. (1999b).** Assessing embankment dam filters which do not satisfy design criteria. Univ report n° R-376: university of New South Wales, Sydney, may 1999. 74 p.
- FOSTER M.A., FELL R. (2000a).** Use of event trees to estimate the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.76-R.16. p.237-259.
- FOSTER M.A., FELL R. et al. (2000b).** A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. Can. Geotech. J., vol 37, p.1025-1061.
- FRY J.J., CARRERE A. (2001).** Modélisation des barrages en remblai. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 10-11 mai 2001. CFGB. 93 transparents.
- FRY J.J., PEYRAS L., et al. (2000).** Exemples de l'intérêt de bases de données relatives au vieillissement des ouvrages hydrauliques. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.76-R.35. p.527-536.
- FUNNEMARK E., ODGAARD E., et al (2001).** Risk analysis of the Valldalen dam. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.76-R.39. p.587-606.
- GOYET J. (2002).** Maintenance des structures Off-Shore. In: Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. CREMONA C. : AFGC, version provisoire, février 2002. p.179-200.

- GOYET J., STRAUB D., FABER M.H. (2001).** Planning d'inspection basé sur l'analyse de risque : méthodologie d'ensemble et application aux structures offshore. In: 3^{ème} conférence nationale Fiabilité des Matériaux et des Structures JN-FIAB 3, Bordeaux, 1-2 février 2001. 16 p.
- GRAHAM L.P. (1995).** Safety Analysis of Swedish Dams – Risk analysis for the assessment and management of dam safety. Stockholm: ISBN 91 7170 715 8. 95 p.
- HARTFORD D.N.D. (2000).** Risk assessment : principles, terminology, processes and challenges. In: ICOLD - 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, volume 5. p.60-67.
- ICOLD (1974).** Lessons from dams incidents. Paris : ICOLD. 1069 p.
- ICOLD (1983).** Deterioration of Dams and Reservoirs – examples and their analysis. Gap: Ed. Louis-Jean, décembre 1983. 367 p.
- ICOLD (1984a).** Deterioration of Dams and Reservoirs. Answer to Inquiry on Deteriorations. Paris: ICOLD.
- ICOLD (1984b).** Deterioration of Dams and Reservoirs. Answer to Inquiry on Failures an Accidents. Paris : ICOLD.
- ICOLD (1984c).** World Register of Dams, Committee on the Dictionary. Paris: ICOLD.
- ICOLD (1986a).** Bulletin 53: Static analysis of embankment dams. Paris: ICOLD. 147 p.
- ICOLD (1986b).** Bulletin 56: Quality control for fill dams. Paris: ICOLD. 79 p.
- ICOLD (1988a).** Bulletin 61: Dam design criteria – the philosophy of their selection. Paris: ICOLD. 83 p.
- ICOLD (1988b).** Bulletin 64: Dam heightenings - Register. Paris: ICOLD. 111 p.
- ICOLD (1989a).** Bulletin 71: Exposure of dam concrete to special aggressive waters – Guidelines. Paris: ICOLD. 177 p.
- ICOLD (1989b).** Bulletin 68: Monitoring of dams and their foundations – State of the art. Paris: ICOLD. 327 p.
- ICOLD (1990).** Bulletin 77: Dispersive soils in embankment dams - Review. Paris: ICOLD. 53 p.
- ICOLD (1991).** Bulletin 79: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Dams. Paris: ICOLD. 158 p.
- ICOLD (1993a).** Bulletin 93: Ageing of dams and appurtenant works – Review and recommendations. Paris: ICOLD. 235 p.
- ICOLD (1993b).** Bulletin 88: Rock Foundations for dams. Paris: ICOLD. 241 p.
- ICOLD (1993c).** Bulletin 91: Embankment dams upstream slope protection – review and recommendations. Paris: ICOLD. 121 p.
- ICOLD (1995).** Bulletin 99: Dam failures - Statistical Analysis. Paris: ICOLD. 73 p.
- ICOLD (1998).** Bulletin 109: Dam less than thirty meters high. Paris: ICOLD. 179 p.
- ICOLD (2001).** Bulletin on Risk Assessment - Risk assessment as an aid to dam safety management – A reconnaissance of Benefits, Methods and Current Applications - Draft version V2.1. ICOLD, august 2001. 88 p.
- ISDF (?).** AMDEC- Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité – guide pédagogique. Ed. ISDF – Institut de la Sûreté de Fonctionnement. 36 p.
- JOHANSEN P.M. (1996).** Risk analysis as basis for upgrading dam Draladalsatr, Norway. In: Repair and Upgrading of Dams, Stockholm, June 1996. p.588-598.
- JOHANSEN P.M., VICK S.G., RIKARTSEN C. (1997).** Risk analyses of three Norwegian rockfill dams. In: Hydropower'97. Rotterdam: Balkema, ISBN 90 5410 888 6. p.31-442.

- KAPLAN S. (1997).** The Words of Risk Analysis. Risk Analysis, vol 17, n°4.
- KREUZER H. (2000).** Risk analysis for existing dams : merits and limits of credibility. Hydropower and dams, issue one.
- KREUZER H. (2001).** Question 76 - The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Question 76. p.769-896.
- LAIR J. (2000).** Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. Thèse de doctorat spécialité génie civil : université Blaise Pascal – Clermont II, 12 septembre 2000. 213 p.
- LALEU V., REVERCHON B., et al. (2000).** La politique de maintenance des ouvrages et matériels de production hydroélectricité d'EDF. Une expérience d'analyse de risque simplifiée, appliquée à l'optimisation de la maintenance d'un grand canal. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.76-R.34. p.511-525.
- LAUTRIN D. (1997).** Vieillesse et pathologie des barrages en remblai dans le Gers. Bordeaux : Cemagref. 141 p.
- LAUTRIN D. (2002).** Vieillesse et réhabilitation des petits barrages en terre. Cemagref. *A paraître.*
- LE DELLIU P. Dir. (2000).** Evaluation des risques. CFGB groupe de travail « évaluation des risques ». 16 p. Rapport mai 1999.
- LEPETIT L. (2002).** Etude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction. Thèse de doctorat spécialité génie civil : université Blaise Pascal – Clermont II, 28 février 2002. 207 p.
- LEROY A., SIGNORET J.P. (1992).** Le risque technologique. Paris : Ed. Presses Universitaires de France - Que sais-je ?, n°2669. 128 p.
- LICHTENSTEIN S., FISCHHOFF B., PHILLIPS L.D. (1977).** Calibration of probabilities: The state of art. In: Decision making and change in human affairs. H. Jungermann & G. deZeeuw (Eds.), Amsterdam: D. Reidel.
- LINO M. (1993).** Confortement du barrage de Saint-Pardoux. In: Sécurité des barrages en service - session de Formation Continue Montpellier, 25-28 mai 1993 : Cemagref Editions. p.191-204.
- LINO M. (2000).** Les réseaux de neurones en auscultation des barrages. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.78 minutes of sessions, vol 5, p.365-373.
- LINO M. (2001).** Modélisation des barrages poids. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 10-11 mai 2001. CFGB. 14 p.
- LONDICHE H., MORIN F. (1990).** Séminaire sécurité industrielle à l'office Chérifien des phosphates. In: séminaire sécurité industrielle, Khouribga - Maroc, 28 mai - juin 1990. 277p.
- LOUIS X. (1999).** Base de données des scénarios de vieillissement des barrages. Aix-en-Provence : Cemagref, février 1999. 7 p. Rapport interne.
- MALANDAIN J. (1999).** Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance. Etude du patrimoine de l'agglomération de Lyon. Thèse de doctorat spécialité conception en bâtiment et techniques urbaines : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1999. 206 p.
- MARCHE C., LAVALLEE D., ROBERT B. (2000a).** La minimisation du risque de rupture, un outil pour décider de la réhabilitation des barrages. In: 2nd International Conference on Decision Making in Urban and Civil Engineering – DM in UCE 2000, Lyon, 20-22 November 2000. p.1225-1236.
- MARCHE C., LAVALLEE D. (2000b).** La définition du risque de rupture d'un barrage et son incidence sur l'évaluation de sa sécurité. In: 2nd International Conference on Decision Making in Urban and Civil Engineering – DM in UCE 2000, Lyon, 20-22 November 2000. p.1237-1246.

- Mc CANN M.W.Jr. (Dir.) (1994).** Guidelines for reporting the Performance of Dams. California: Stanford University, August 1994.
- Mc CANN M.W.Jr. et al. (1997).** National Performance of Dams Program Report. Hydropower and Dams, Issue 4.
- McDONALD L., COOPER B. et al. (2001).** Some lessons from use of risk assessment to aid dam safety evaluation. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.76-R.18. p.279-302.
- MERIAUX P. (2000).** Barrage de Carcès sur le Caramy (83) – Rapport Décennal 1999. Aix-en-Provence : Cemagref, juin 2000. 33 p. Document définitif.
- MIL-STD-1629A (1980).** Procedures for Performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis. Department of Defence, Washington, D.C.
- MODARRES M. (1993).** What every engineer should know about Reliability and Risk Analysis. New York: Marcel Dekker, Inc. 349 p.
- MONET (1998).** <http://monet.aber.ac.uk> The European network of excellence in Model Based Systems and Qualitative Reasoning. Centre for Intelligent Systems, Department of Computer Science, University of Wales, Aberystwyth, UK.
- NIELSEN N.N., VICK S.G., HARTFORD D.N.D. (1994).** Risk analysis in British Columbia. International Water Power and Dam Construction, March 1994. p.35-40.
- NIEUWHOF G.W.E. (1985).** Risk: a probabilistic concept. Reliability Engineering, vol 10, n°3.
- Norme x50-110 (2002).** Projet Norme x50-110, Qualité en expertise, version 7b. AFNOR, avril 2002. 19 p.
- PERRIER L. (1996).** Un outil de traitement et d'acquisition de règles de conception par analyse statistique du retour d'expérience – Application au domaine des barrages en remblai. Thèse de doctorat spécialité informatique : université de Savoie - Chambéry, 18 mars 1996. 253 p.
- PEYRAS L. (2001).** Barrage du Lac Vert – Rapport décennal 2001. Aix-en-Provence : Cemagref, juin 2001. 24 p.
- PEYRAS L. (2001).** Rupture du barrage des Ouches à Saint Gervais d'Auvergne (63). Aix-en-Provence : Cemagref, novembre 2001. 27 p. Rapport technique définitif.
- PEYRAS L., de LALEU V., ROYET P. (2003).** Modélisation fonctionnelle des pertes de performance des barrages : application au mécanisme de l'alcali-réaction – exemple du barrage du Chambon. In: ICOLD – 21st International Congress On Large Dams, Montreal, June 2003, Q.82. 16 p. *A paraître*.
- PEYRAS L., MANOJLOVIC J. (2000).** Barrage de la Touche Poupard – Rapport quinquennal 1999. Aix-en-Provence : Cemagref, juin 2000. 26 p.
- POULAIN D., ALONSO E., MERIAUX P. (2003).** Problèmes de stabilité liés aux sous-pressions en fondation des barrages poids en béton et en maçonnerie de moins de 30 mètres de hauteur. In: ICOLD – 21st International Congress On Large Dams, Montreal, June 2003, Q.82. 17 p. *A paraître*.
- POUPART M., ROYET P. (2001).** La surveillance des barrages. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 10-11 mai 2001. CFGB. 48 p.
- RAVENET N. (1995).** Conception d'une base de données sur les pathologies des barrages en service en France Métropolitaine : analyse et structuration des données. Mémoire d'ingénieur : ENGEES, juillet 1995. 93 p.
- REDMAN T. (1998).** La qualité des données à l'âge de l'information. Inter-Editions Masson.
- ROLLEY R. Dir. (1989).** Technique des barrages en aménagement rural. Gap : Ed. Louis-Jean, 1977 réédition 1989. 326 p.

- ROYET P. (1994).** La surveillance et l'entretien des petits barrages – guide pratique. Paris : Cemagref Editions, 1994. 87 p.
- ROYET P. (2001a).** Pathologie des barrages en service et orientations pour la recherche. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 10-11 mai 2001. CFGB. 22 p.
- ROYET P. (2001b).** La surveillance et le contrôle des barrages ; rôle du propriétaire et mission du service de contrôle. In: Session de Formation Continue - sécurité et contrôle des barrages en service, Aix-en-Provence, 16-19 octobre 2001. 13 p.
- ROYET P., PEYRAS L., Dir. (2002a).** Justification des barrages poids. Paris : CFGB groupe de travail « barrages poids ». 83 p. Rapport définitif janvier 2002.
- ROYET P. (2002b).** Barrage de Redevis - La Muratte sur la Credogne (63) – Rapport décennal 2001. Aix-en-Provence : Cemagref, mai 2002. 21 p.
- ROYET P. (2002c).** Barrage de Cenne-Monesties (11) – Diagnostic sommaire et recommandations. Aix-en-Provence : Cemagref, mai 2002. 17 p.
- ROYET P., LE TRIONNAIRE Y. (1993).** Comment s'assurer de la sécurité d'un parc de barrages, important et dispersé ?. In: Journées nationales d'études AFEID-CFGB « Petits barrages », Bordeaux, 2-3 février 1993. Paris : Cemagref Editions. 1994. p.183-192.
- ROYET P., MERIAUX P. (1998).** Sécurité des barrages et des digues. Ingénieries EAT, 1998, n° spécial "risques naturels", p.59-67.
- ROYET P., MERIAUX P., et al. (1995).** Evaluation de la sécurité des barrages autorisés. Ingénieries EAT, septembre 1995, n°3, p.33-44.
- ROYET P., NERARD M.P. (1999).** Sécurité et contrôle des barrages en service – aspects réglementaires et administratifs. In: Session de Formation Continue – sécurité et contrôle des barrages en service, ENGREF-PARIS, 4-7 mai 1999. 24 p.
- ROYET P., POULAIN D. (2000).** Evaluation du patrimoine de la concession d'Etat des Sociétés d'Aménagement Régional – Chapitre 1 : les barrages. Aix-en-Provence : Cemagref, août 2000. 56 p.
- SCHLOSSER F. (1989).** Eléments de mécanique des sols. Paris : Presses de l'ENPC. 280 p.
- SCOTT A.C. (1991).** A practical guide to knowledge acquisition. Assison-wesley.
- SECURE. (1999).** Safety evaluation of man-made water control Structures in Europe. Proposal for European Commission – Directorate General XII – Energy, Environment and Sustainable Development Programme, June 1999. 29 p.
- STEWART R.A. (2000a).** Risk Assessment – Why bother ?. In: Proceedings of Canadian Dam Association Annual Conference, Regina, September 2000. 7 p.
- STEWART R.A. (2000b).** Dam Risk Management. In: GeoEng2000, Melbourne, Australia, 19-24 November 2000. 28 p.
- THIAUDIERE P. (2002).** Problématique de la gestion des tunnels en briques. In: Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. CREMONA C. : AFGC, version provisoire, février 2002. p.95-121.
- TRAVE-MASSUYES L., DAGUE P., GUERRIN F. (1997).** Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur. Paris : Hermes. 505 p.
- TREPOS J.Y. (1996).** La sociologie de l'expertise. Paris : Ed. Presses Universitaires de France - Que sais-je ?, n°3119. 128 p.
- USBR (1987).** Design of small dams. Denver: US government printing office, 1960 third edition 1987. 860 p.
- VATTENFAL AB, HKD. (2000).** Ajaure Dam – Failure Modes, Effects and Criticality Analysis – Methodology Study. BC Hydro International Ltd and SwedPower, October 2000. Report n° 120 56 00 – 01, Final Draft.

- VICK S.G. (1997).** Dam Safety Risk Analysis: New directions. International Water Power and Dam Construction, may 1997, p.40-42
- VICK S.G. (2000).** Engineering application of dam safety risk analysis. In: ICOLD – 20th International Congress On Large Dams, Beijing, 19-22 September 2000, Q.76-R.21. p.325-335.
- VICK S.G., STEWART R.A. (1996).** Risk analysis in dam safety practice. In: ASCE, Uncertainty in the geologic environment from theory to practice. p.586-603.
- VILLEMEUR A. (1988).** Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels – fiabilité – facteurs humains – informatisation. Paris : Eyrolles. 798 p.
- VON THUN J.L. (1996).** Risk assessment of Nambe Falls dam. In: ASCE, Uncertainty in the geologic environment from theory to practice. p.604-635.
- VRIJLING J.K. (2001).** Probabilistic design of water defence systems in the Netherlands. In:– Bulletin on Risk Assessment - Draft version V2.1: ICOLD, August 2001. p.74-88.
- WILLM G., BEAUJOINT N. (1967).** Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricité de France – Problèmes anciens et solutions nouvelles. In: ICOLD – 9th International Congress On Large Dams, Istanbul, Q.34-R.30.
- ZWINGELSTEIN G. (1995).** Diagnostic des défaillances – Théorie et pratique pour les systèmes industriels. Paris : Hermes. 601 p.
- ZWINGELSTEIN G. (1996).** La maintenance basée sur la fiabilité – Guide pratique d'application de la RCM. Paris : Hermes. 666 p.

Index des tableaux

Tableau 1.1 :	Les opérations d'IMR et les échelles de temps associées _____	16
Tableau 1.2 :	Probabilités annuelles de rupture de trois barrages norvégiens _____	28
Tableau 2.1 :	Les principaux scénarios de vieillissement des barrages poids _____	40
Tableau 2.2 :	Les principaux scénarios de vieillissement des barrages en remblai _____	50
Tableau 3.3 :	Structure d'un Tableau d'Analyse Fonctionnelle _____	64
Tableau 3.4 :	Tableau de l'Analyse Préliminaire des Dangers _____	65
Tableau 3.5 :	Milieux extérieurs aux barrages _____	80
Tableau 3.6 :	Extrait des fonctions de contrainte des barrages _____	81
Tableau 3.7 :	Liste des composants d'un profil transversal d'un barrage poids _____	83
Tableau 3.8 :	Tableau d'Analyse Fonctionnelle (barrage poids) _____	84
Tableau 3.9 :	Structure d'une AMDE Processus classique _____	86
Tableau 3.10 :	AMDE Processus adaptée aux barrages (extrait : barrage poids) _____	86
Tableau 3.11 :	Structure de l'AMDE Produit adaptée aux barrages _____	87
Tableau 3.12 :	AMDE Produit (extrait : barrage poids) _____	89
Tableau 3.13 :	Fonctions génériques et de précision du plot (barrage poids) _____	96
Tableau 3.14 :	Description physique des phénomènes (extrait : barrage poids) _____	98
Tableau 3.15 :	Symptômes auscultés des barrages _____	100
Tableau 3.16 :	Les symptômes mesurés issus d'essais _____	100
Tableau 3.17 :	Synthèse des symptômes calculés _____	101
Tableau 4.1 :	Analyse de la criticité dans la conception d'une installation chimique _____	113
Tableau 4.2 :	Niveaux de probabilité d'apparition de la défaillance _____	113
Tableau 4.3 :	Indice de fréquence en maintenance _____	113
Tableau 4.4 :	Analyse qualitative des dégradations (EDF & Cemagref) _____	117
Tableau 4.5 :	Grille d'analyse qualitative des symptômes _____	118
Tableau 4.6 :	Analyse qualitative des symptômes calculés _____	121
Tableau 4.7 :	Grilles d'analyse qualitative des phénomènes _____	121
Tableau 4.8 :	Grille d'analyse qualitative des fonctions _____	122
Tableau 4.9 :	Analyse qualitative des évolutions (EDF & Cemagref) _____	124
Tableau 4.10 :	Grille d'analyse qualitative de l'évolution de la performance _____	126
Tableau 4.11 :	Tables de vérité d'analyse de la performance globale à partir des fonctions de résistance des composants (barrages poids et en remblai) _____	131
Tableau 4.12 :	Grille d'analyse de la performance globale d'un barrage _____	131
Tableau 4.13 :	Grille d'analyse qualitative d'analyse de la mesure de l'occurrence _____	136
Tableau 4.14 :	Probabilités d'occurrence rattachées aux dires d'experts _____	138
Tableau 4.15 :	Transcription de descriptions expertes de l'incertain [CEA,00] _____	138
Tableau 4.16 :	Grille d'analyse qualitative des conséquences _____	139
Tableau 4.17 :	Grille qualitative d'analyse de la criticité _____	140
Tableau 4.18 :	Classe de criticité en fonction des délais d'interventions _____	141
Tableau 4.19 :	Criticité globale d'un barrage vis-à-vis de la rupture _____	142
Tableau 4.20 :	Délai d'intervention en fonction de la criticité globale _____	142
Tableau 4.21 :	Symptômes directement influencés par les événements extérieurs _____	144
Tableau 4.22 :	Période de retour des événements ayant une forte probabilité de se produire sur la période de référence Δt _____	145
Tableau 5.1 :	Fonctions, phénomènes et symptômes intervenant dans le scénario _____	151
Tableau 5.2 :	Criticité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction de résistance _____	161
Tableau 5.3 :	Criticité de défaillance de la fonction de résistance _____	162
Tableau 5.4 :	Fonctions, phénomènes et symptômes intervenant dans le scénario _____	165
Tableau 5.5 :	Criticité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction de résistance F_5 _____	176
Tableau 5.6 :	Criticité de défaillance de la fonction de résistance F_5 _____	177
Tableau 5.7 :	Les scénarios à modéliser pour la base de connaissances _____	179
Tableau 5.8 :	Historiques de barrages du parc du ministère de l'environnement à modéliser _____	180

Index des figures

Figure 1.1 :	<i>Eléments et fonctions d'un système de génie civil particulier (barrage)</i>	3
Figure 1.2 :	<i>Dégradation et défaillance [ZWINGELSTEIN,96]</i>	4
Figure 1.3 :	<i>Les stratégies de maintenance</i>	5
Figure 1.4 :	<i>Démarche de gestion basée sur le retour d'expérience</i>	6
Figure 1.5 :	<i>Répartition des barrages en France selon leur contrôle</i>	9
Figure 1.6 :	<i>Répartition des barrages dans les différents types</i>	9
Figure 1.7 :	<i>Répartition des barrages en fonction de leur hauteur</i>	9
Figure 1.8 :	<i>Répartition des barrages en fonction de leur âge</i>	10
Figure 1.9 :	<i>Etat de la sécurité du parc de barrages (en 1990-94)</i>	10
Figure 1.10 :	<i>Surveillance du parc de barrages (en 1990-94) [ROYET,98]</i>	11
Figure 1.11 :	<i>Les différents intervenants dans la gestion des barrages</i>	13
Figure 1.12 :	<i>Les différents propriétaires et les usages</i>	14
Figure 1.13 :	<i>Analyse du nombre de barrages par propriétaire</i>	15
Figure 1.14 :	<i>Dates clefs de la vie d'un barrage et opérations d'IMR associées</i>	16
Figure 1.15 :	<i>Risque « inondation » lié à un polder au Pays-Bas [VRIJLING,01]</i>	18
Figure 1.16 :	<i>Diagramme de risque acceptable</i>	18
Figure 1.17 :	<i>Méthode de diagnostic par modèle physique</i>	19
Figure 1.18 :	<i>Décomposition d'un système sous forme d'un arbre fonctionnel</i>	20
Figure 1.19 :	<i>Démarche d'une étude d'analyse de risques</i>	22
Figure 1.20 :	<i>Le diagnostic et l'analyse de risques</i>	23
Figure 1.21 :	<i>Modèle de rupture d'un remblai : méthode des tranches [FRY,01]</i>	24
Figure 1.22 :	<i>Modélisation de la déformée d'un barrage voûte [BOURDAROT,01]</i>	24
Figure 1.23 :	<i>Processus de gestion du risque [ICOLD,01]</i>	25
Figure 1.24 :	<i>Surverse d'un barrage en remblai modélisée par un arbre d'événements</i>	27
Figure 1.25 :	<i>Evaluation d'un ouvrage avec la méthode EDF à base d'index [LALEU,01]</i>	29
Figure 1.26 :	<i>Traitement statistique de la piézométrie d'un barrage [BONELLI,98]</i>	30
Figure 1.27 :	<i>Les approches du diagnostic et de l'analyse de risques dans le domaine des barrages</i>	32
Figure 1.28 :	<i>Le raisonnement par analogie pour le diagnostic et l'analyse de risques par expertise</i>	35
Figure 1.29 :	<i>Démarche de notre recherche</i>	36
Figure 2.1 :	<i>Détériorations d'un barrage au cours de sa vie [ICOLD,93a]</i>	38
Figure 2.2 :	<i>Les profils des barrages poids</i>	40
Figure 2.3 :	<i>Profil du barrage de la Neste du Louron (65)</i>	42
Figure 2.4 :	<i>Evolution du diagramme des sous-pressions (la Neste du Louron)</i>	43
Figure 2.5 :	<i>Fissures de retrait verticales (barrage de la Touche Poupard)</i>	45
Figure 2.6 :	<i>Barrage de Revedevis (63) – Parement aval</i>	46
Figure 2.7 :	<i>Action du gel dégel dans la zone de marnage (Redevis)</i>	48
Figure 2.8 :	<i>Dégradation du parement amont en maçonnerie jointoyée (Lac Vert)</i>	49
Figure 2.9 :	<i>Les différents types de barrages en remblai</i>	50
Figure 2.10 :	<i>Coupe transversale du barrage CARCES et de ses fondations</i>	52
Figure 2.11 :	<i>Evolution des tassements de la crête</i>	52
Figure 2.12 :	<i>Profil piézométrique du barrage de Chamboux (21)</i>	55
Figure 2.13 :	<i>Zone humide sur le parement aval (Barrage de Chamboux)</i>	56
Figure 2.14 :	<i>« Renard hydraulique » et suffusion [CFGFB,97]</i>	57
Figure 2.15 :	<i>Granulométrie d'un sol sensible à la suffusion interne (les Ouches)</i>	58

Figure 2.16 :	Suffusion débouchant sur un renard hydraulique – Les Ouches (63)	58
Figure 2.17 :	Critère de Mohr-Coulomb dans un remblai	59
Figure 2.18 :	Glissement du barrage d'Armous et Cau (32) [LAUTRAIN,97]	59
Figure 2.19 :	Talus amont marqué par le batillage – Lussan (32) [LAUTRAIN,97]	60
Figure 2.20 :	Dégradation du masque en béton bitumineux – St Cécile d'Andorge (30)	60
Figure 3.1 :	Démarche générale de l'analyse fonctionnelle	63
Figure 3.2 :	BdF appliqué à un système de quatre composants [ZWINGELSTEIN,96]	64
Figure 3.3 :	Processus général de l'AMDE	66
Figure 3.4 :	Tableau d'AMDEC proposé dans [ICOLD,01] et [CEA,00]	67
Figure 3.5 :	Démarche de la MCPR	68
Figure 3.6 :	Structure d'un arbre d'événements [ZWINGELSTEIN,96]	68
Figure 3.7 :	Arbre des causes appliqué à un générateur de secours [CEA,00]	70
Figure 3.8 :	Graphe d'état d'un système à deux composants et deux états possibles (marche ou défaillant) [LEROY,92]	70
Figure 3.9 :	Exemple de réseau de Petri pour un système à deux composants et trois états possibles [LEROY,92]	71
Figure 3.10 :	Simulations de Monte-Carlo [LAIR,00]	71
Figure 3.11 :	Boucle de recyclage et son graphe orienté signé [TRAVE,97]	74
Figure 3.12 :	Graphe causal dynamique	74
Figure 3.13 :	Démarche d'analyse du vieillissement des barrages - organigramme de la méthode	76
Figure 3.14 :	Processus de l'analyse fonctionnelle	77
Figure 3.15 :	Définition et limite du système (barrage poids)	78
Figure 3.16 :	Matérialisation du besoin [ZWINGELSTEIN,96]	78
Figure 3.17 :	Les milieux extérieurs et l'environnement [CEA,00]	79
Figure 3.18 :	Bloc diagramme Fonctionnel du système global (barrage)	80
Figure 3.19 :	Décomposition structurelle à la granularité intermédiaire (barrage poids)	82
Figure 3.20 :	Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux flux hydrauliques (barrage poids)	83
Figure 3.21 :	Démarche d'analyse des défaillances pour les barrages	85
Figure 3.22 :	Schéma conceptuel pour l'écriture des scénarios de vieillissement	90
Figure 3.23 :	Scénario de vieillissement du masque amont d'un barrage poids	91
Figure 3.24 :	Structure du graphe orienté pour la représentation des scénarios	92
Figure 3.25 :	Mécanisme de tassement des fondations sous forme de graphe orienté	93
Figure 3.26 :	Les fonctions génériques (barrage poids)	95
Figure 3.27 :	Les phénomènes (barrage poids)	97
Figure 3.28 :	Symptôme calculé (barrage poids)	102
Figure 3.29 :	Lien orienté des symptômes vers les phénomènes	102
Figure 3.30 :	Dissolution et érosion des fondations (scénario 1.1)	106
Figure 3.31 :	Méthodologie pour la modélisation des scénarios de vieillissement	107
Figure 3.32 :	Processus d'aide au diagnostic destiné à l'expert	109
Figure 4.1 :	Concepts de risque et de criticité	111
Figure 4.2 :	Hiérarchie des démarches d'analyse de risques [KREUSER,01]	111
Figure 4.3 :	Analyse statistique des ruptures des barrages en remblai [ICOLD,95]	115
Figure 4.4 :	Démarche d'analyse de la criticité	116
Figure 4.5 :	Analyse qualitative des symptômes dans Vigie Barrages	118
Figure 4.6 :	Analyse qualitative d'un symptôme visuel	119
Figure 4.7 :	Exemple d'analyse qualitative d'un symptôme ausculté	120
Figure 4.8 :	Analyse qualitative du phénomène SOUS-PRESSION (barrage de Cublize)	122
Figure 4.9 :	Loi d'évolution de la performance d'une fonction F_i au cours du temps	123
Figure 4.10 :	Détermination de la performance d'une fonction à un instant T	124
Figure 4.11 :	Analyse de l'évolution d'une fonction à partir de $(dF/dt)(t)$	125
Figure 4.12 :	Analyse de l'évolution d'une fonction à partir des intervalles Δt_1 et Δt_2	125
Figure 4.13 :	Loi linéaire	127
Figure 4.14 :	Loi amortie	127
Figure 4.15 :	Loi exponentielle	127
Figure 4.16 :	Loi en créneaux	128
Figure 4.17 :	Système en série à deux modes de défaillance	128

Figure 4.18 :	Scénario de rupture d'un barrage à la granularité supérieure	130
Figure 4.19 :	Démarche générale de modélisation	132
Figure 4.20 :	Détermination des lois d'évolution des dégradations	133
Figure 4.21 :	Exemple d'un historique de barrage (CARCES-83)	134
Figure 4.22 :	Prévision de l'évolution des dégradations	135
Figure 4.23 :	Mesures de l'occurrence Δt_1 et Δt_2 de la perte de performance d'une fonction	137
Figure 4.24 :	Mesures des conséquences de la perte de performance d'une fonction	138
Figure 4.25 :	Mesures de criticité d'une fonction	140
Figure 4.26 :	Evolution des variables en situation de crue exceptionnelle	144
Figure 4.27 :	Niveau de la retenue selon les périodes de retour des crues	146
Figure 4.28 :	Lois d'évolution de la performance selon la situation et la crue	147
Figure 5.1 :	Grappe causal du scénario d'alcali-réaction (scénario 2.1)	152
Figure 5.2 :	Vue aval du barrage du Chambon	153
Figure 5.3 :	Confortement du barrage du Chambon	154
Figure 5.4 :	Vue en plan du barrage – Plot 11-12 et ses dispositifs d'auscultation	156
Figure 5.5 :	Séquence fonctionnelle de dégradation de la résistance aux sollicitations mécaniques du plot 11-12	156
Figure 5.6 :	Pendule direct P 11-12 - déplacements vers l'amont.	157
Figure 5.7 :	Analyse qualitative du phénomène DEFORMATION DU PLOT	158
Figure 5.8 :	Mesures du rejet de la fissure en galerie	158
Figure 5.9 :	Analyse qualitative du phénomène FISSURATION DU PLOT	159
Figure 5.10 :	Loi d'évolution de la performance de la fonction de résistance du plot 11-12	159
Figure 5.11 :	Historique de vieillissement du plot 11-12 (barrage du Chambon)	160
Figure 5.12 :	Evolution de la performance de la fonction de résistance	161
Figure 5.13 :	Evolution de la criticité de la fonction de résistance	162
Figure 5.14 :	Coupe type d'un barrage en remblai homogène avec drain vertical	163
Figure 5.15 :	Grappe causal du scénario de suffusion dans un barrage en remblai avec drain vertical central	166
Figure 5.16 :	Coupe du barrage de Cublize	167
Figure 5.17 :	Mesures des pressions interstitielles dans le remblai	168
Figure 5.18 :	Mesures des débits du drain vertical (D1)	169
Figure 5.19 :	Le remblai amont limite les flux hydrauliques (F_1) et perméabilité du remblai amont (P_1)	170
Figure 5.20 :	Eaux d'infiltration dans le remblai amont (P_3) et sous-pression dans le remblai amont (P'_3)	171
Figure 5.21 :	Le remblai amont résiste aux sollicitations hydromécaniques (F_2) et érosion interne du remblai amont (P_4)	171
Figure 5.22 :	Colmatage du drain vertical (P_6)	172
Figure 5.23 :	Le drain résiste aux sollicitations hydromécaniques (F_3) et le drain draine les flux hydrauliques (F_4)	172
Figure 5.24 :	Eaux d'infiltrations dans le remblai aval (P_8) et sous-pressions dans le remblai aval (P_9)	173
Figure 5.25 :	Erosion interne du remblai aval (P_{11}) et Le remblai aval résiste aux sollicitations hydromécaniques (F_5)	173
Figure 5.26 :	Glissement du remblai aval (P_{12}) et le remblai aval résiste aux sollicitations mécaniques (F_6)	174
Figure 5.27 :	Loi d'évolution de la performance globale du barrage de Cublize	174
Figure 5.28 :	Historique de vieillissement du barrage de Cublize	175
Figure 5.29 :	Evolution de la performance de la fonction de résistance F_5	176
Figure 5.30 :	Evolution de la criticité de la fonction de résistance F_5	177
Figure 5.31 :	Exemple de scénario de vieillissement d'un barrage poids en béton écrit à partir de Scénario Designer [Louis,99]	181
Figure 5.32 :	Architecture du système d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques	182

Annexes

- 1 – Fonctions de contrainte des barrages**
- 2 – Décomposition structurelle des barrages poids et en remblai**
- 3 – Blocs diagrammes Fonctionnels des barrages poids**
- 4 – Tableaux d'Analyse Fonctionnelle des barrages poids**
- 5 – AMDE Processus et AMDE Produit des barrages poids**
- 6 – Fonctions génériques et fonctions de précision des composants des barrages poids**
- 7 – Glossaire des phénomènes intervenant dans les mécanismes de vieillissement des barrages poids**
- 8 – Phénomènes et symptômes associés**
- 9 – Les principaux dispositifs d'auscultation des barrages**
- 10 – Collection de scénarios de vieillissement modélisés relatifs aux barrages poids**
- 11 – Démarche quantitative d'analyse de la criticité**

ANNEXE 1

Fonctions de contrainte des barrages

Les milieux extérieurs vont imposer des contraintes au système, qui doit être capable de leur résister et doit donc pour cela assurer des *fonctions de contrainte*. Ces dernières indiquent alors la réaction de l'ouvrage face aux agressions extérieures.

Elles sont obtenues en examinant successivement tous les milieux extérieurs en interaction avec l'ouvrage, résumés au tableau 3.5 du rapport pour l'application aux barrages. Nous indiquons ci-après les fonctions de contrainte des barrages. Notons qu'une analyse analogue a été conduite dans [PERRIER,96] dans une application aux barrages en remblai.

Environnement lié à l'eau

retenue ; environnement hydraulique amont

- résister à la poussée hydrostatique amont
- résister aux sollicitations hydromécaniques
- être étanche (ou suffisamment étanche)
- drainer les infiltrations
- résister à l'action chimique de l'eau de la retenue
- résister au batillage ou à l'impact des vagues

nappes de coteaux ; nappes de fondation

- résister aux sous-pressions provoquées par les nappes souterraines
- drainer les écoulements
- résister aux sollicitations hydromécaniques (résister à l'érosion interne, filtrer les écoulements...)
- éviter le colmatage des drains

eau aval ; rivière ; environnement hydraulique aval

- résister à la poussée hydrostatique aval
- éviter l'inondation des galeries, des vidanges et autres ouvrages annexes
- restituer les débits dans de bonnes conditions hydrauliques
- assurer un débit réservé au cours d'eau aval
- restituer une eau de qualité suffisante (turbidité, oxygénation...)

Géologie du site

Fondations ; appuis latéraux ; versants de la retenue

- résister aux mouvements des fondations et des appuis latéraux
- résister à un éboulement proche de l'ouvrage
- résister à l'onde de submersion provoquée par un éboulement dans la retenue

Milieux à proximité de l'ouvrage

Végétation

- éliminer et empêcher la végétation sur le système et à proximité
- éliminer et empêcher la végétation à proximité immédiate de la retenue

Faune

- éviter le creusement de terriers et galeries par les animaux fouisseurs

Embâcles

- résister aux chocs des embâcles
- résister à l'impact des matériaux de charriage

Sédiments amont

- résister à la poussée des sédiments
- assurer les fonctions de vidange et de prise d'eau malgré le dépôt des sédiments
- conserver un volume d'eau suffisant malgré le dépôt des sédiments

Alluvions aval

- résister à la poussée des alluvions
- éviter l'obstruction des galeries et des conduites de vidange
- éviter l'obstruction des exutoires des drains

Météorologie

Soleil ; UV ; température ; vent

- résister à l'action du soleil et des UV (altérations des matériaux)
- résister aux déformations dues aux gradients thermiques
- résister à l'action du vent (érosion éolienne des matériaux)

Précipitations ; humidité

- évacuer les eaux de ruissellement
- résister aux actions chimiques des eaux de pluie
- résister aux actions dues à l'humidité (altération des matériaux ; réactions chimiques)

Glace ; froid ; cycles gel-dégel

- résister aux déformations dues au froid
- résister à la poussée des glaces
- résister à l'action des températures très faibles (altération des matériaux)
- résister aux cycles gel-dégel (altération des matériaux)

Activités de l'homme

Ouvrages en amont ou aval : autres barrages, usines de production électrique, stations de pompage...

- ne pas perturber le fonctionnement des ouvrages en amont ou aval : respecter les débits ou les écoulements de restitution, respecter les charges hydrauliques, respecter les cotes d'exploitation de la retenue, respecter les niveaux des nappes, respecter les critères de qualité de l'eau...
- ne pas noyer ou inonder les ouvrages en amont ou en aval

Villes et habitations en aval ; voies de communication

- assurer la sécurité des populations en aval : interdire la rupture, contrôler les volumes d'eau relâchés en aval
- ne pas noyer ou inonder les équipements, les biens et voies de communication en aval
- prévoir des dispositifs d'alerte et d'évacuation

Événements extérieurs exceptionnels

Crues

- résister aux sollicitations exceptionnelles provoquées par les crues (jusqu'aux limites de la crue de projet) : poussées hydrostatiques amont et aval, sous-pressions
- résister aux embâcles et matériaux solides transportés lors des crues
- résister aux vagues provoquées par les crues
- restituer les débits de crues en aval dans des conditions hydrauliques correctes
- le cas échéant, laminier les crues

Séismes

- résister aux sollicitations exceptionnelles provoquées par les séismes (jusqu'aux limites du séisme de référence) : cisaillement, glissement, liquéfaction
- résister aux vagues provoquées par un séisme

Autres systèmes divers

L'homme : exploitant, usager, etc.

- permettre l'exploitation aisée de l'ouvrage (accès au barrage, aux dispositifs d'auscultation...)
- le cas échéant, résister aux charges routières
- sécuriser les zones autorisées aux usagers
- interdire l'accès aux zones dangereuses
- prévenir et/ou résister au vandalisme
- résister aux actions terroristes

Normes et recommandations liées à la sécurité et aux règles de l'art

- respecter les normes de sécurité : règles d'hygiène et sécurité, assurance qualité...
- appliquer les règlements, lois, arrêtés...

ANNEXE 2

Décomposition structurelle des barrages poids et en remblai

Nous reportons dans cette annexe 2 deux séries de décomposition structurelle. La première concerne l'analyse structurelle d'un barrage poids type et est réalisée dans les trois dimensions :

- barrage poids type : profil transversal d'un plot ;
- barrage poids type : coupe en plan dans l'axe de la galerie. Cette analyse permet de rendre compte des interactions en plan (entre les berges et les plots d'extrémité ; entre les plots entre eux).

La seconde concerne l'analyse des barrages en remblai. Nous indiquons les décompositions structurelles des trois principaux types d'ouvrages en remblai dans leur profil transversal :

- barrage en remblai homogène - profil transversal ;
- barrage en remblai à noyau central étanche - profil transversal ;
- barrage en remblai avec masque amont étanche - profil transversal.

Une analyse en trois dimensions présente un intérêt plus limité pour les ouvrages en remblai, ces derniers constituant, en plan, des ensembles homogènes (à contrario des barrages poids découpés en plusieurs plots)

Nous avons réalisé l'analyse structurelle de façon à être « raisonnablement » exhaustif, l'objectif étant de pouvoir adapter l'analyse structurelle à un maximum d'ouvrages existants. Nous avons donc envisagé une décomposition structurelle en composants simples relativement complète, qui pourra être ensuite simplifiée pour chaque barrage particulier.

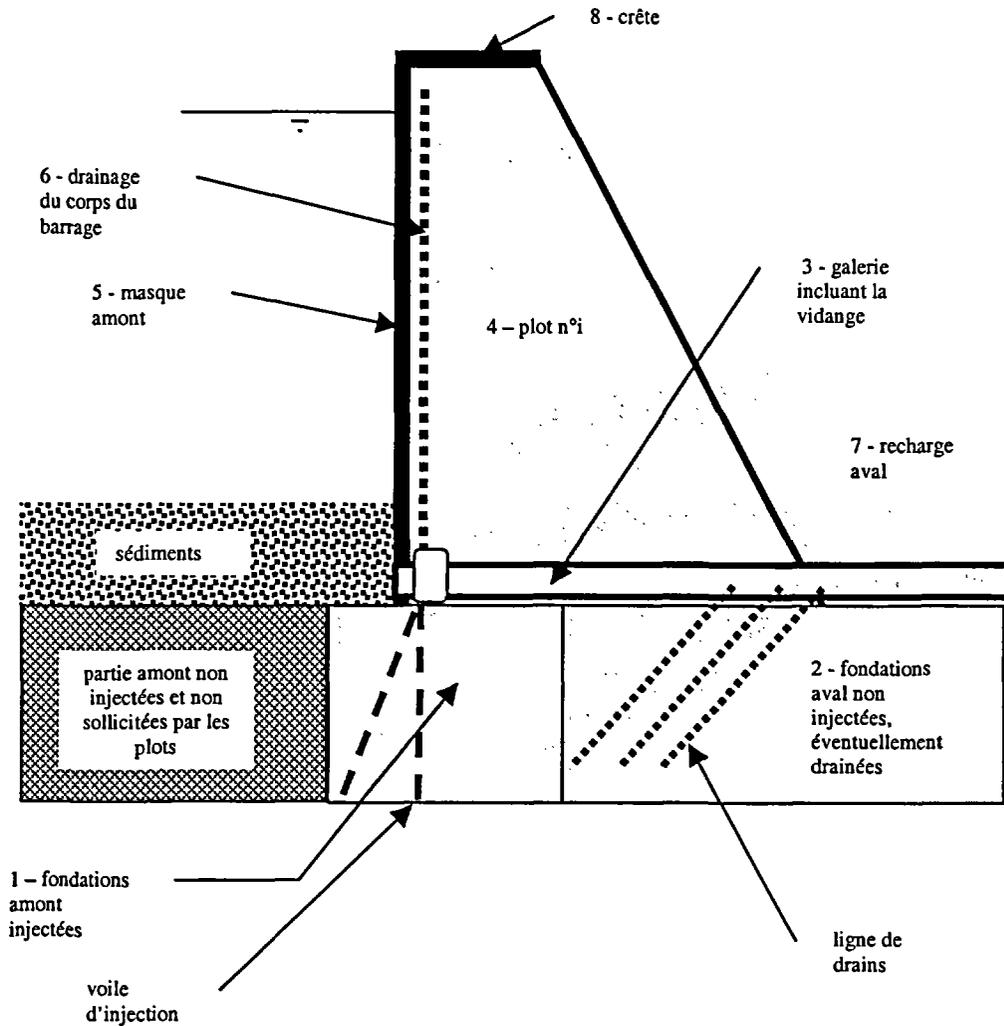
Pour la décomposition structurelle, il a été nécessaire d'établir des choix de découpage du système. La définition d'un *composant* donne des premiers éléments pour cette analyse : « *élément matériel ou ensemble matériel remplissant une fonction particulière dans un système ou un sous-système* » [ZWINGELSTEIN,96]. Par conséquent, l'examen des principales fonctions accomplies par les sous-parties du système détermine les grandes lignes de la décomposition structurelle.

Ensuite, nous avons affiné ces choix en nous posant la question suivante pour chacun des composants précédemment déterminés : *est-il possible d'intervenir distinctement sur cet élément ?* L'objectif final étant d'obtenir un découpage par composant permettant de séparer les phénomènes et les mécanismes de vieillissement.

Enfin, nous avons validé les analyses structurelles par un panel d'experts du domaine des barrages.

Barrage poids type

DECOMPOSITION STRUCTURELLE (PROFIL TRANSVERSAL D'UN PLOT)

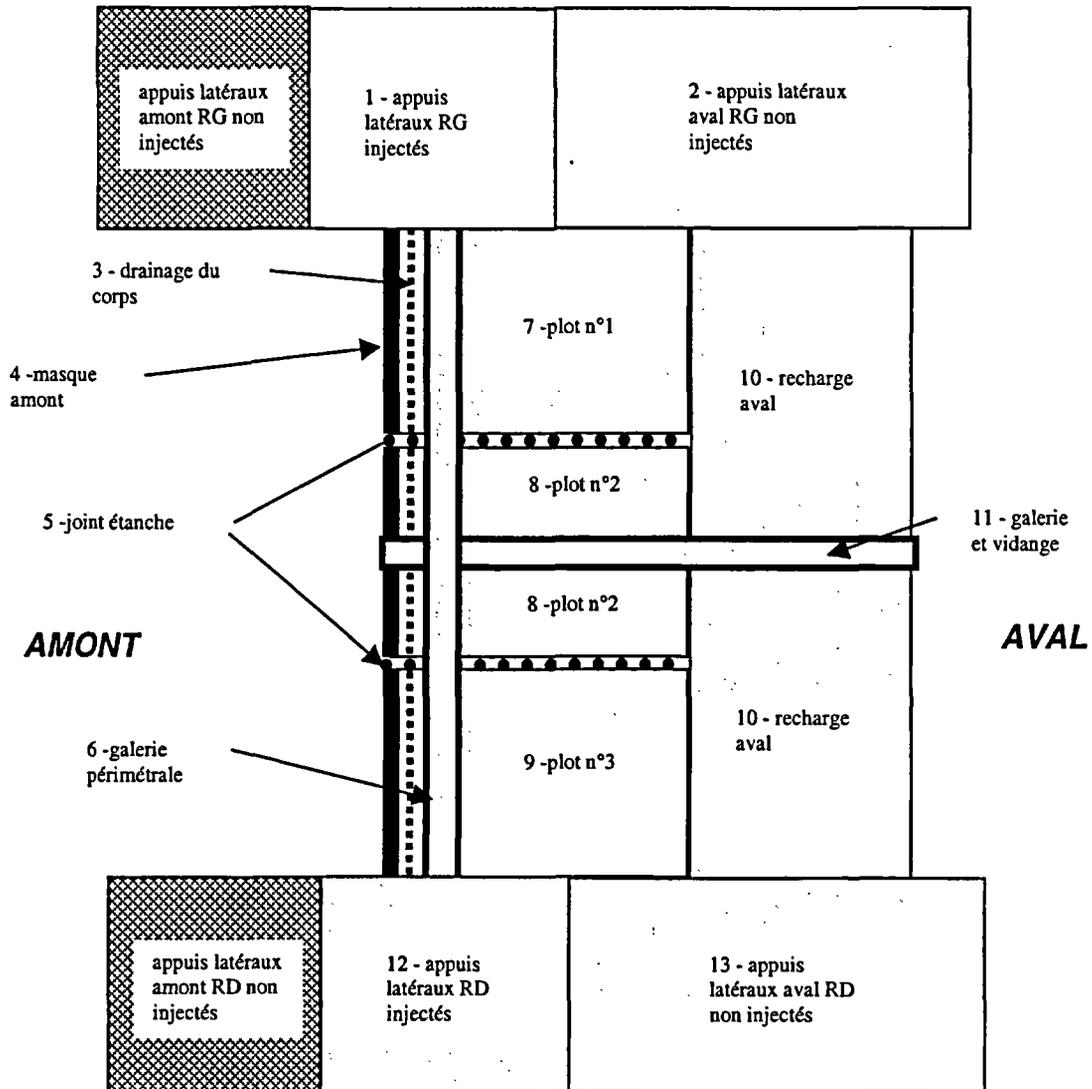


LISTE DES COMPOSANTS

n° de nomenclature	nom du composant de granularité intermédiaire
1	fondations amont injectées
2	fondations aval non injectées, éventuellement drainées
3	galerie et vidange
4	plot n°i correspondant au profil transversal
5	masque amont
6	dispositif de drainage du plot n°i
7	recharge aval
8	crête

Barrage poids type

DECOMPOSITION STRUCTURELLE (COUPE EN PLAN DANS L'AXE DE LA GALERIE)

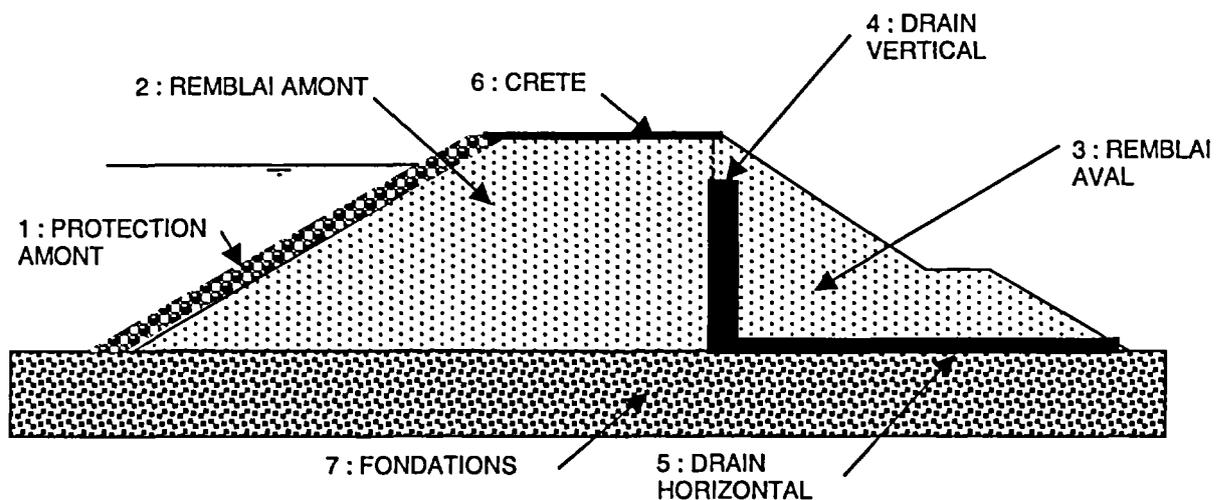


LISTE DES COMPOSANTS

n° de nomenclature	nom du composant de granularité intermédiaire
1	appuis latéraux RG injectés
2	appuis latéraux RG non injectés
3	drainage du corps du barrage
4	masque amont
5	joint étanche (water stop)
6	galerie périmétrale
7	plot n°1
8	plot n°2
9	plot n°3
10	recharge aval
11	galerie et vidange
12	appuis latéraux RD injectés
13	appuis latéraux RD non injectés

Barrage en remblai homogène

DECOMPOSITION STRUCTURELLE (PROFIL TRANSVERSAL)

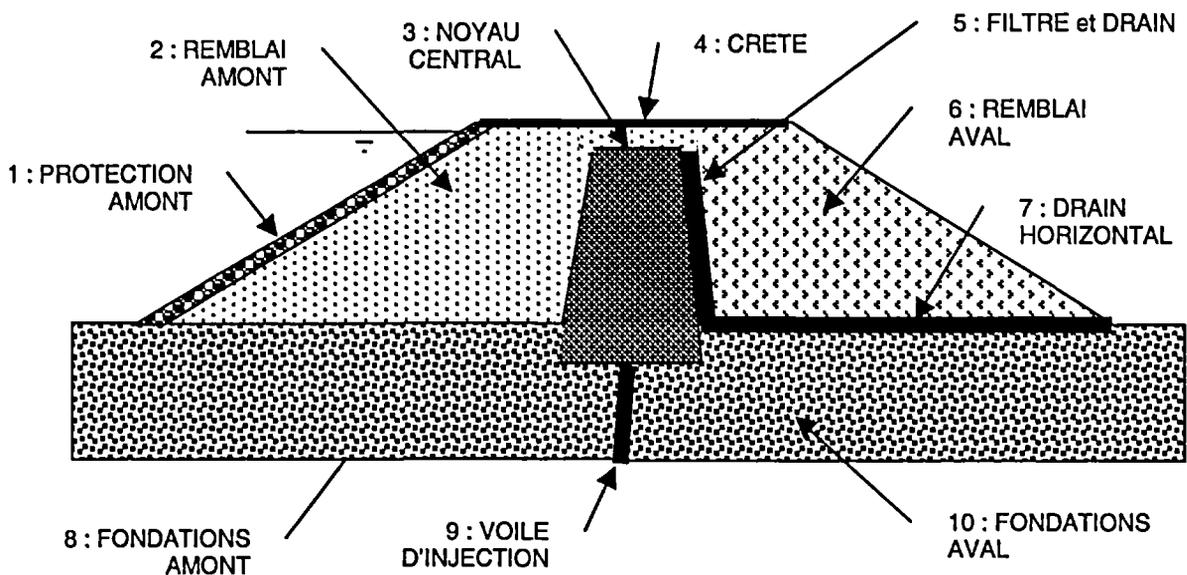


LISTE DES COMPOSANTS

n° de nomenclature	nom du composant de granularité intermédiaire
1	protection amont (masque, rip-rap, etc.)
2	remblai amont
3	remblai aval
4	drain vertical
5	drain horizontal
6	crête
7	fondations

Barrage en remblai à noyau central étanche

DECOMPOSITION STRUCTURELLE (PROFIL TRANSVERSAL)

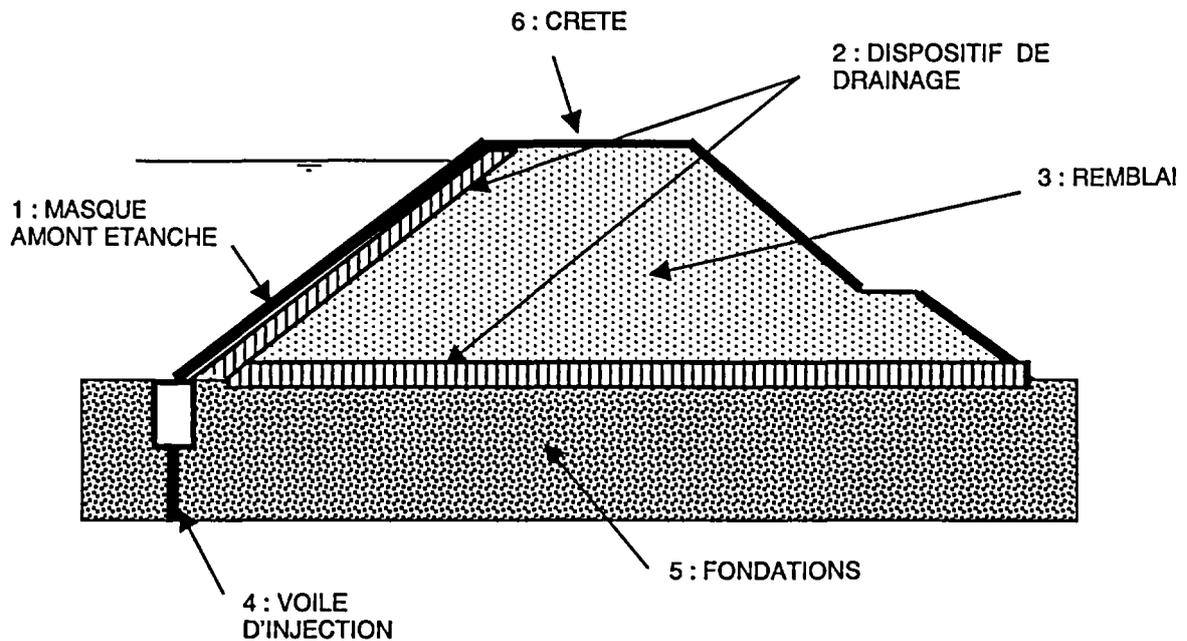


LISTE DES COMPOSANTS

n° de nomenclature	nom du composant de granularité Intermédiaire
1	protection amont (masque, rip-rap, etc.)
2	remblai amont
3	noyau central
4	crête
5	filtre et drain
6	remblai aval
7	drain horizontal
8	fondations amont
9	voile d'injection
10	fondations aval

Barrage en remblai avec masque amont étanche

DECOMPOSITION STRUCTURELLE (PROFIL TRANSVERSAL)



LISTE DES COMPOSANTS

n° de nomenclature	nom du composant de granularité intermédiaire
1	masque amont étanche (béton armé de ciment, béton bitumineux, géomembrane bitumineuse, plastomère ou élastomère)
2	dispositif de drainage
3	remblai
4	voile d'injection
5	fondations
6	crête

ANNEXE 3

Blocs diagrammes Fonctionnels des barrages poids

Les Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) matérialisent les relations des composants entre eux (relations endogènes) et entre les composants et les milieux extérieurs (relations exogènes). Ils permettent de dégager les interactions et les flux suivants :

- les interactions et les flux entre les composants et les milieux extérieurs ;
 - les interactions et les flux entre les composants eux-mêmes ;
 - les interactions et les flux entre deux éléments extérieurs, via des composants du système.
- Ces relations permettent d'obtenir les fonctions principales du système.

Les BdF sont constitués par les différents milieux extérieurs répertoriés lors de l'analyse fonctionnelle externe et par les composants du système découlant de l'analyse structurelle. Chaque flux est symbolisé par un arc, le sens d'un flux étant indiqué par une flèche. Nous avons distingué les flux appliqués directement sur un composant et les flux transmis depuis un composant vers un autre au travers un composant tiers. Enfin, afin de bien mettre en valeur les flux importants, nous avons associé à chaque type de flux une épaisseur différente indiquant son importance (un trait épais indique un flux important).

Les trois principaux BdF concernent les catégories de relations suivantes :

- les **contacts** (BdF n°1) ;
- les relations de **flux hydrauliques** (BdF n°2) ;
- les relations de **flux de charges** (BdF n°3).

Afin d'assurer une meilleure lisibilité des BdF, il apparaît intéressant de baser notre classification sur une typologie des mécanismes, à savoir des processus mécaniques, hydromécaniques, physico-chimiques, hydrauliques, chimiques et thermiques. Ainsi, les flux hydrauliques mettent en évidence d'autres types de mécanismes représentés dans deux BdF : les flux liés aux sollicitations chimiques (réactions chimiques liées aux circulations d'eau) et les flux liés aux sollicitations hydromécaniques (érosion et colmatage dus aux circulations d'eau). De même, les contacts permettent d'obtenir les relations liées aux sollicitations thermiques.

En résumé, il est alors possible de déduire des trois principaux BdF, trois nouveaux blocs-diagrammes fonctionnels renseignant sur des catégories d'interactions plus précises :

- les relations de flux liés aux **sollicitations chimiques** (BdF n°4) ;
- les relations de flux liés aux **sollicitations hydromécaniques** (BdF n°5) ;
- les relations de flux liés aux **sollicitations thermiques** (BdF n°6).

Au final, chaque Bdf a ses particularités :

- **BdF n°1 définissant les relations de contact :**

Ce BdF indique l'ensemble des contacts entre les composants entre eux et entre les composants et les milieux extérieurs. Il permet par la suite d'examiner les fonctions de contact (préparation de surface et d'appui), mais aussi les transferts possibles de flux entre les composants.

- **BdF n°2 définissant les relations de flux hydrauliques :**

Les flux hydrauliques reflètent les circulations d'eau dans l'état non dégradé du barrage. Nous séparons les flux associés à la fonction de vidange du système, à l'évacuation des eaux de crues, au drainage du système, aux infiltrations d'eau et aux eaux de ruissellement.

Nous indiquons également les flux qui seraient susceptibles d'apparaître entre les composants en cas de défaillance d'un d'entre eux.

- **BdF n°3 définissant les relations de flux de charges :**

Ce bloc diagramme fonctionnel met en évidence les différentes actions extérieures agissant sur chaque composant du barrage. Nous distinguons les forces de pesanteur, les poussées hydrostatiques amont et aval, la poussée des sédiments et des glaces, les chocs des embâcles, les sous-pressions agissant aux interfaces barrage-fondations...

- **BdF n°4 définissant les relations de flux liés aux sollicitations chimiques :**

Nous distinguons ici les actions chimiques liées aux eaux d'infiltration, de fuite, de drainage et pluviales. Toutes ces actions font référence à des interactions chimiques entre l'eau et le composant qu'elle parcourt.

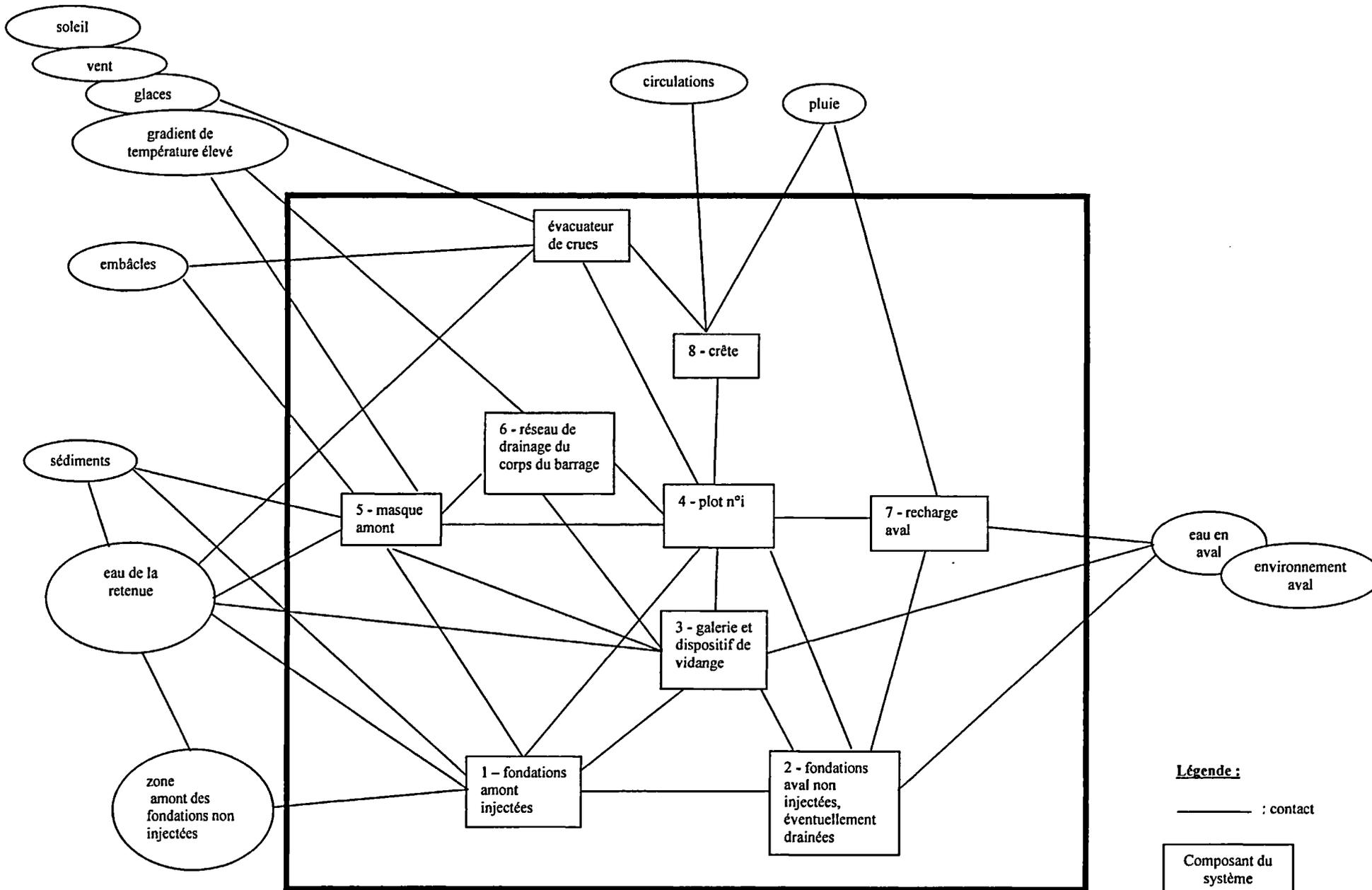
Ce BdF met aussi en évidence les effets des UV que nous considérons, pour simplifier, comme un mécanisme chimique.

- **BdF n°5 définissant les relations de flux liés aux sollicitations hydromécaniques :**

Nous distinguons ici les relations mettant en jeu les mécanismes *d'érosion* des matériaux et des composants et les mécanismes de *colmatage* dus au transport des matériaux par l'eau.

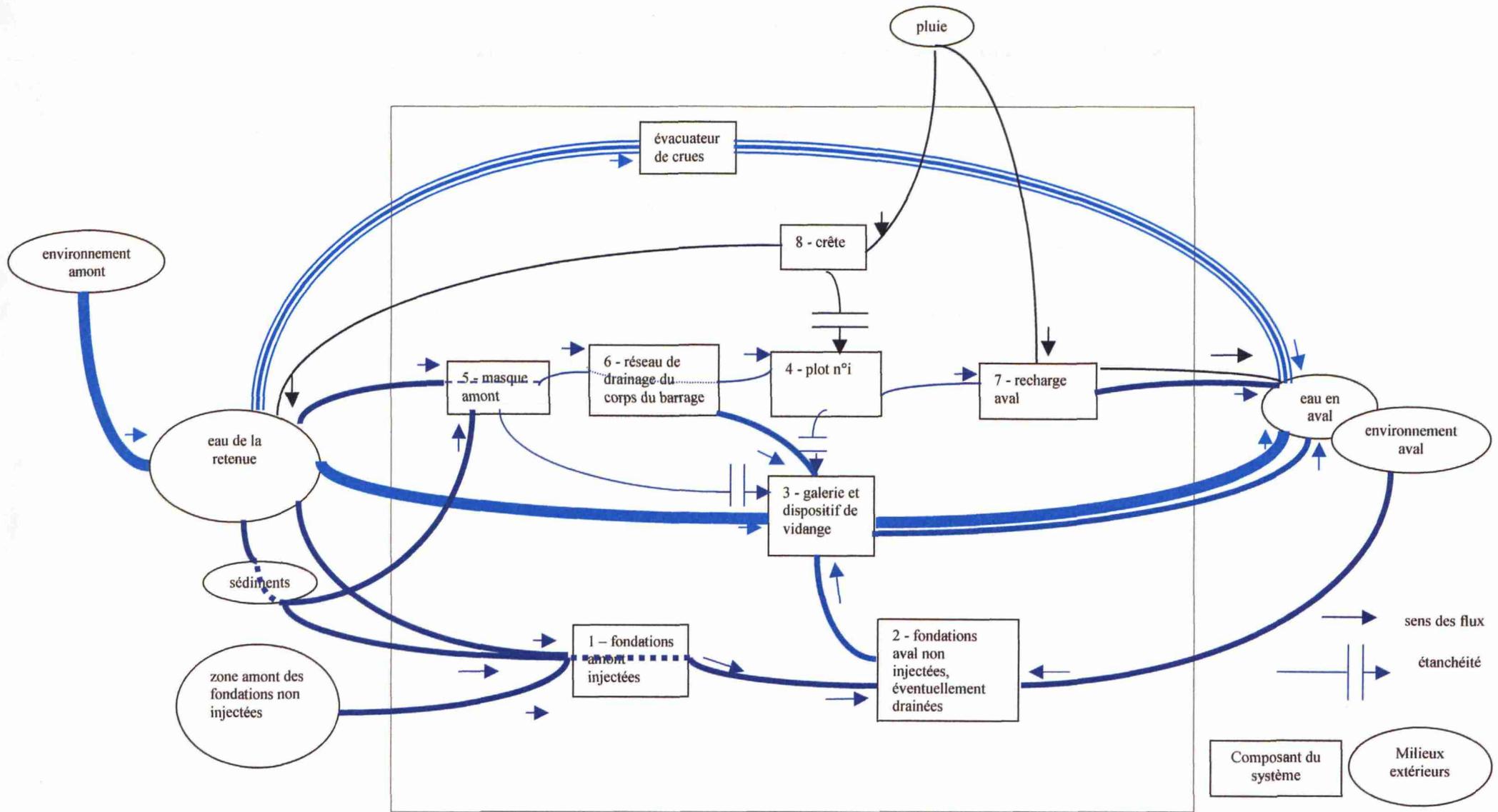
- **BdF n°6 définissant les relations de flux liés aux sollicitations thermiques :**

Nous regroupons ici les actions liées aux cycles de gel-dégel et aux gradients de température élevés (saisonnier ou journalier).



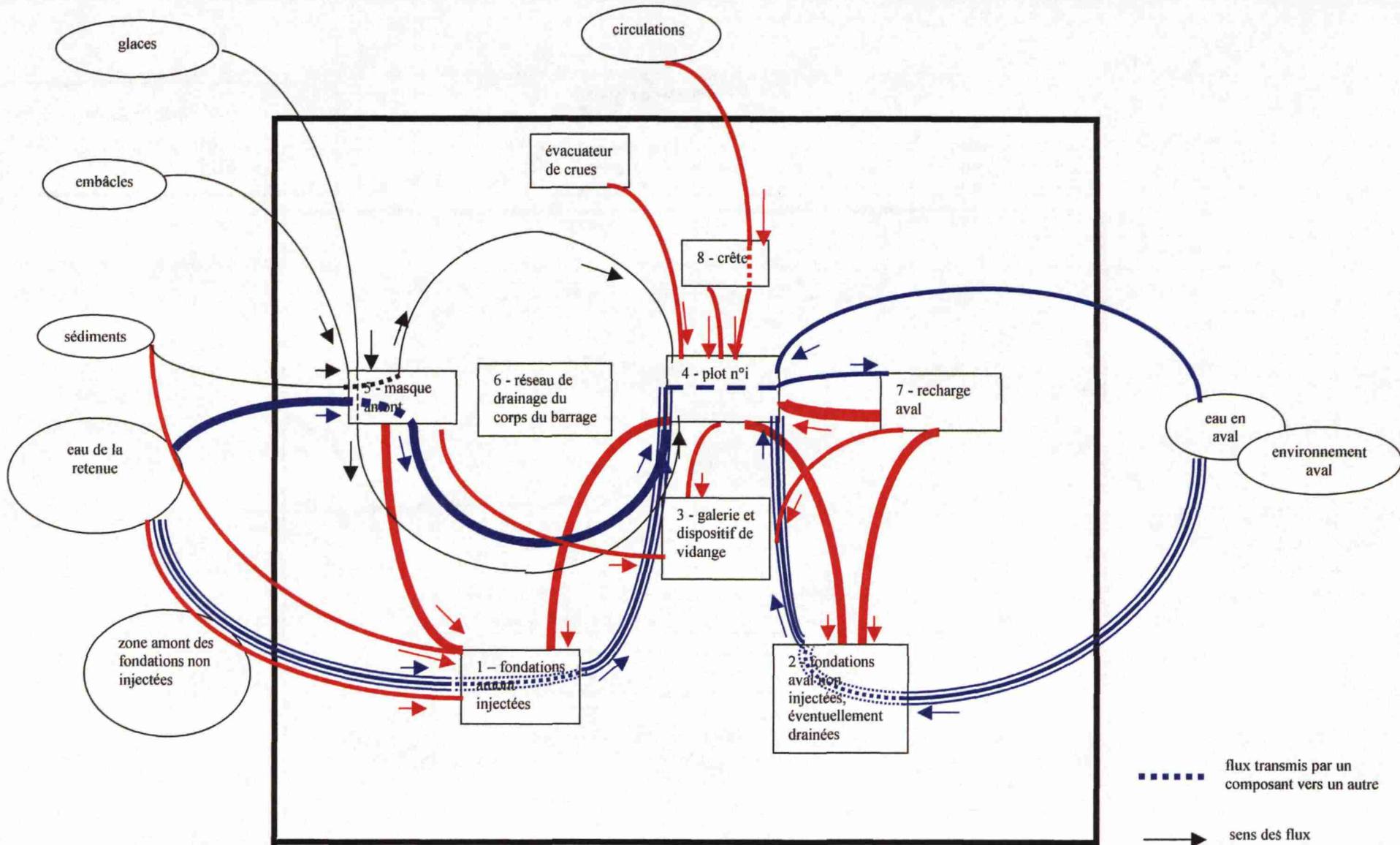
Bloc-diagramme fonctionnel n°1 :
Relations de contact

Légende :
 — : contact
 [] : Composant du système
 () : Milieux extérieurs



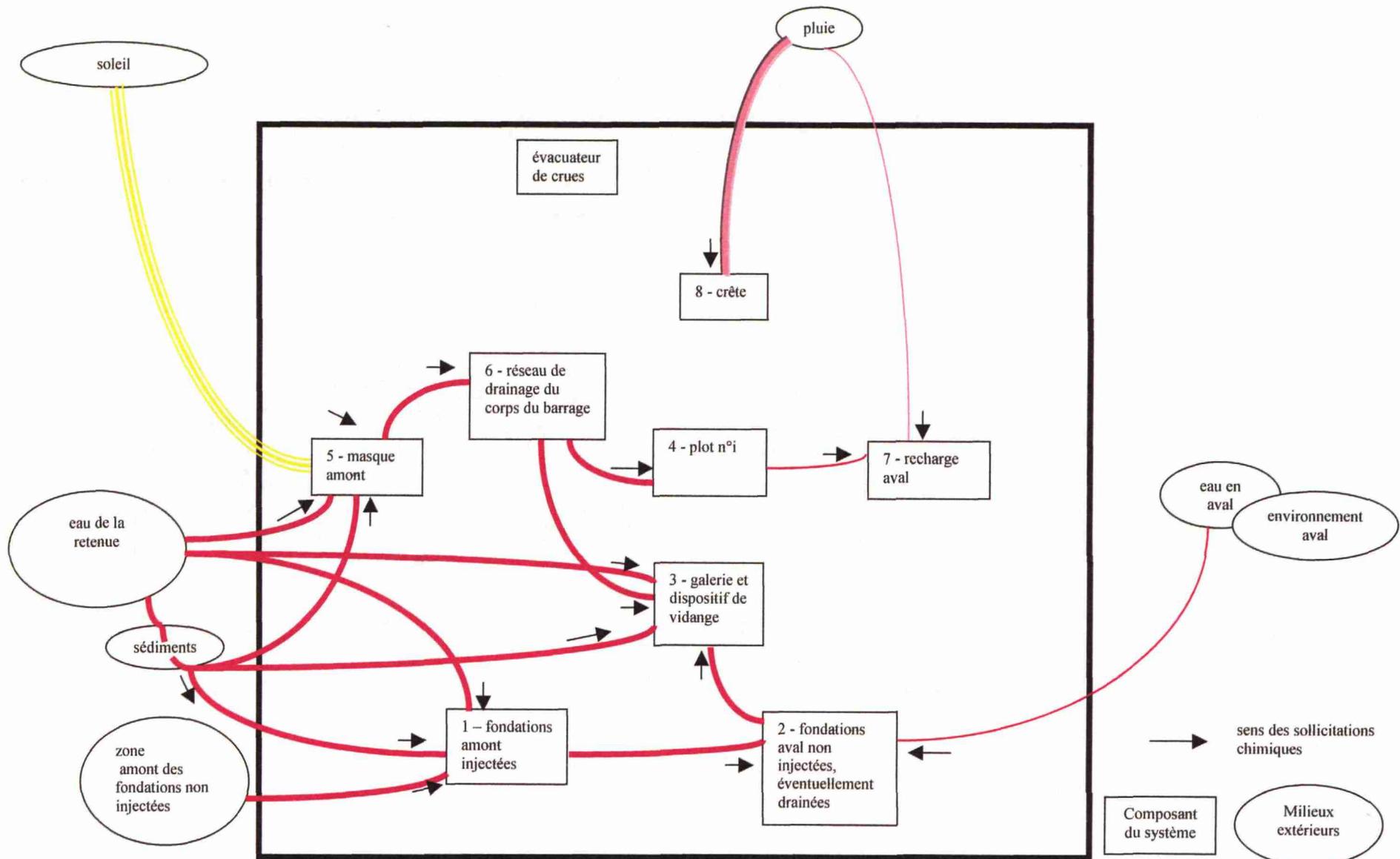
Bloc-diagramme Fonctionnel n°2 :
Relations de flux hydrauliques

- Légende :**
- flux liés à la vidange
 - flux liés aux eaux de crue
 - flux liés à l'évacuation des eaux de drainage
 - flux liés aux eaux d'infiltration
 - flux liés aux eaux pluviales
 - transmission de flux liés aux eaux d'infiltration à travers un composant



Bloc-diagramme Fonctionnel n°3 :
Relations de flux de charges

Légende :



Bloc-diagramme Fonctionnel n°4 :
Relations de flux liés aux sollicitations chimiques

légende :

flux liés aux eaux d'infiltration, de fuite ou de drainage

flux, moins importants, liés aux eaux d'infiltration, de fuite ou de drainage

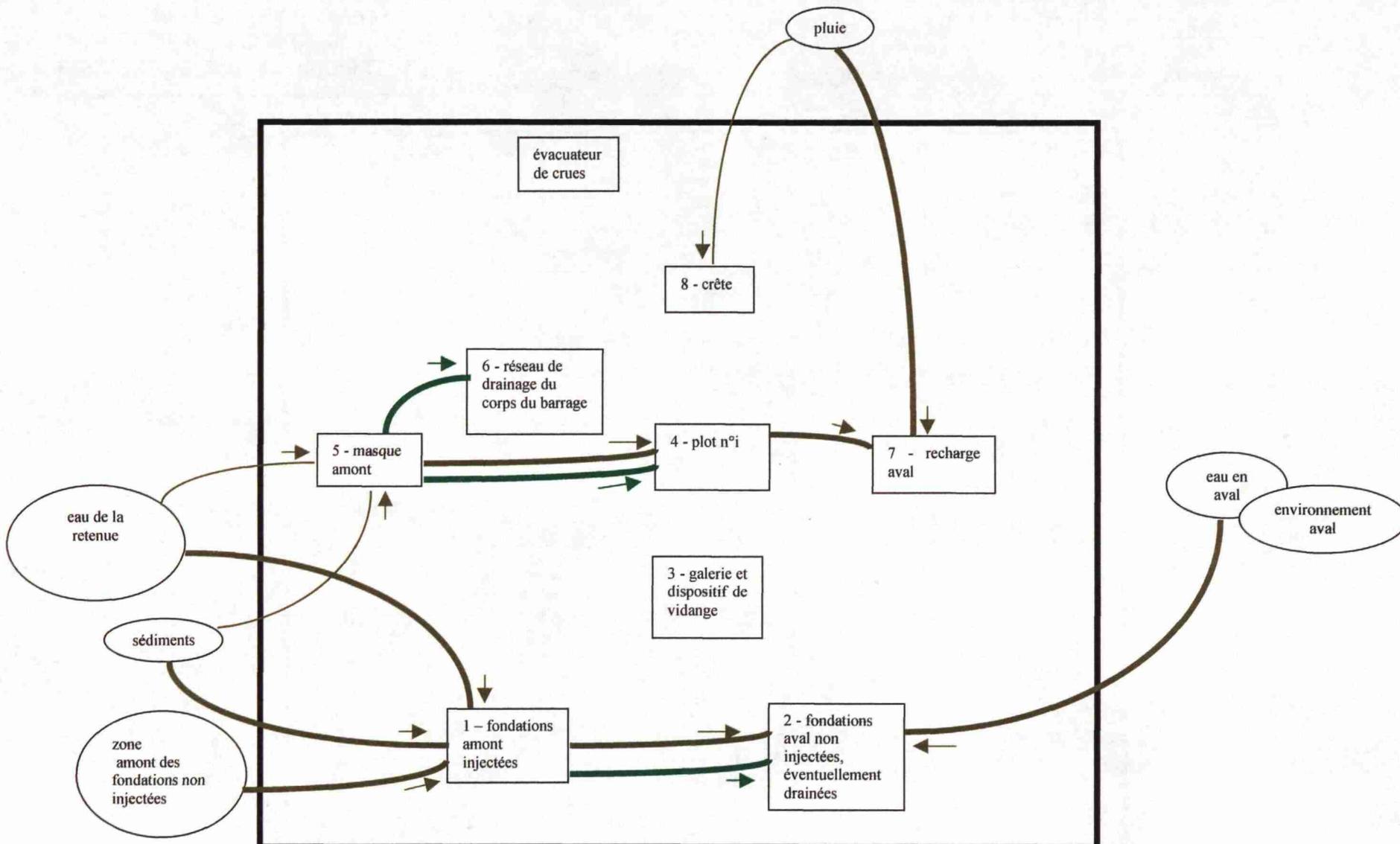
flux liés aux eaux pluviales

flux, moins importants, liés aux eaux pluviales

flux liés aux UV

→ sens des sollicitations chimiques

Composant du système Milieux extérieurs

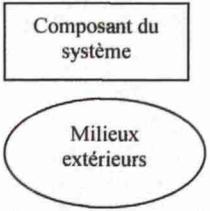


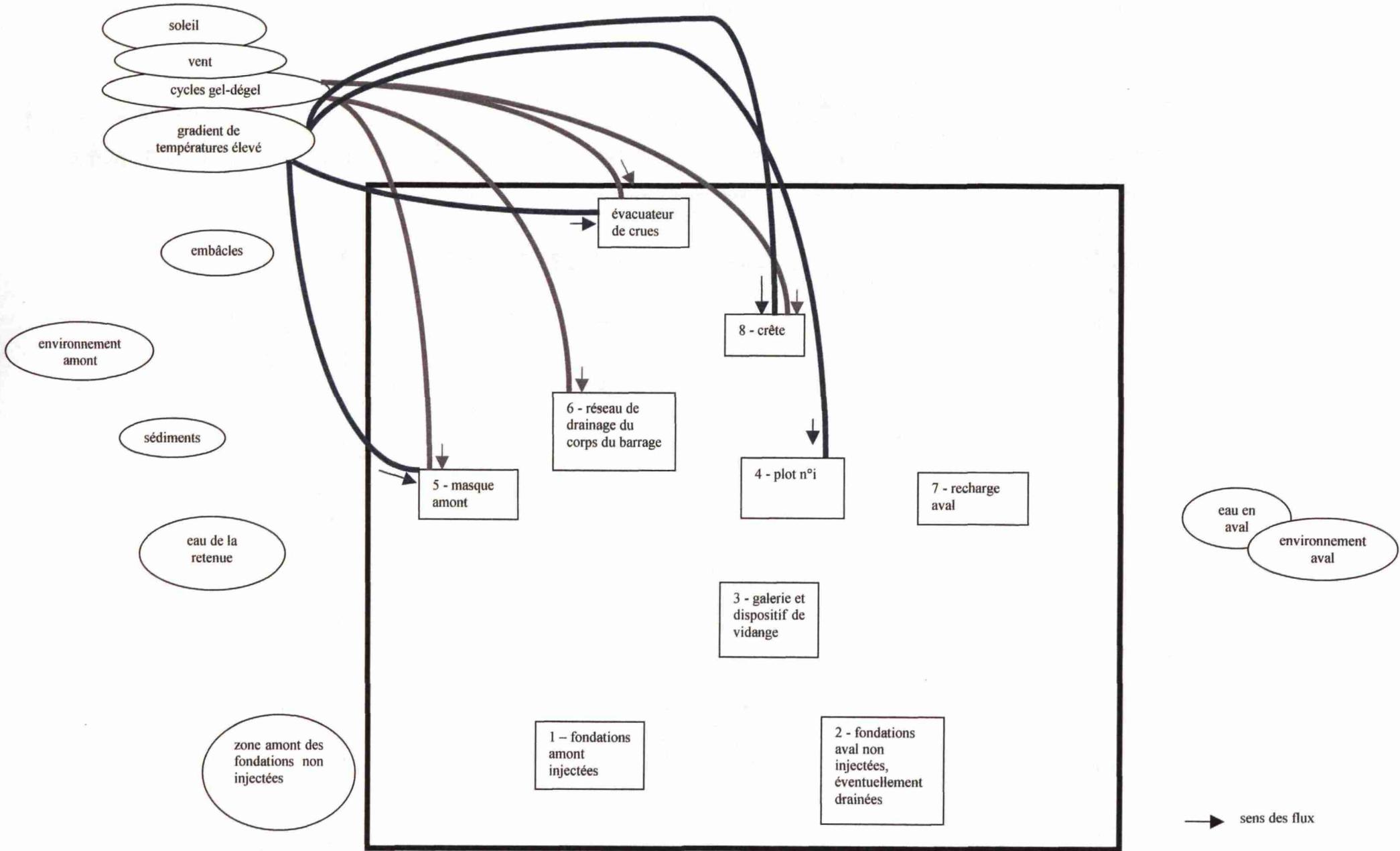
Bloc-diagramme Fonctionnel n°5 :
Relations de flux liés aux sollicitations hydromécaniques

légende :

- flux liés à l'érosion
- flux liés au colmatage

- flux, moins importants, liés à l'érosion
- flux liés au colmatage
- sens des sollicitations chimiques
- flux transmis au travers d'un composant



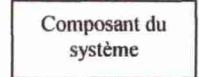


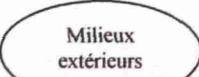
Bloc-diagramme fonctionnel n°6 :
Relations de flux liés aux sollicitations thermiques

légende :

 flux liés à des gradients de températures élevés

 flux liés à des cycles de gel-dégel

 Composant du système

 Milieux extérieurs

ANNEXE 4

Tableaux d'Analyse Fonctionnelle des barrages poids

A partir des blocs diagrammes fonctionnels, nous déterminons les fonctions de conception des composants du système. Elles correspondent, pour chaque composant de granularité intermédiaire, aux réactions face aux interactions de contact et de flux avec les autres composants et les milieux extérieurs. Ainsi, nous distinguons deux catégories de fonctions de conception : les *fonctions de contact* et les *fonctions de flux*.

Les différentes interactions entre les composants conduisent à distinguer les fonctions de conception suivantes :

1 - Fonctions liées à des contacts :

Nous distinguons deux catégories de fonctions liées aux contacts :

- des fonctions de préparation de la surface pour le composant supérieur ;
- des fonctions d'appui pour des composants voisins au composant considéré.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

→ *préparer les surfaces de contact*

2 - Fonctions liées aux flux de charges :

Les flux de charges induisent des fonctions de résistance aux sollicitations mécaniques et de transmission de sollicitations mécaniques provenant des différents milieux extérieurs. Ainsi nous considérons :

- le poids propre d'un composant voisin ;
- le poids des terres ;
- le poids des sédiments ;
- les charges d'exploitation (circulation) ;
- les sous-pressions ;
- la poussée hydrostatique amont ;
- la poussée hydrostatique aval ;
- la poussée des sédiments ;
- la poussée des glaces ;
- les chocs des embâcles.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

→ *résister aux sollicitations mécaniques*

→ *transmettre les sollicitations mécaniques*

3 - Fonctions liées à des flux hydrauliques :

Elles sont induites par la circulation de l'eau dans le système. Nous distinguons les fonctions suivantes :

- limiter les infiltrations provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur et allant vers un autre composant ou milieu extérieur ;
- étancher un composant (interdire le passage d'eaux d'infiltration) ou assurer l'étanchéité d'un composant ;

- collecter les eaux d'infiltration d'un composant (ou un milieu extérieur) vers un autre ;
- drainer les eaux d'infiltration provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur ;
- restituer les eaux de drainage, de fuite ou pluviales vers un composant ou un milieu extérieur ;
- vidanger ;
- restituer des débits de drainage ou de fuites vers un milieu extérieur.

Nous regroupons ces fonctions dans trois syntaxes :

- *limiter les flux hydrauliques*
- *transmettre les flux hydrauliques*
- *collecter les flux hydrauliques*

4 - Fonctions liées aux sollicitations chimiques :

Les sollicitations chimiques sont dues à des mécanismes variés et peuvent provoquer des effets de natures différentes. Nous distinguons les fonctions suivantes :

- résister aux sollicitations chimiques de l'eau de la retenue, de l'eau de l'environnement aval, de l'eau provenant des sols en amont du système, des eaux d'infiltration, des eaux de fuite et des eaux pluviales ;
- résister à l'action des U.V.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

- *résister aux sollicitations chimiques*

5 - Fonctions liées aux sollicitations thermiques :

Les sollicitations thermiques sont liées aux changements de température imposés par le milieu extérieur. Nous distinguons les fonctions suivantes :

- résister aux cycles gel-dégel ;
- résister aux gradients thermiques élevés ;
- résister aux actions de gel sur les eaux.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

- *résister aux sollicitations thermiques*

6 - Fonctions liées aux sollicitations hydromécaniques :

Ces sollicitations existent là où il y a possibilité d'infiltration d'eau. Nous en distinguons trois types :

- résister à l'érosion due aux infiltrations de toutes origines ;
- éviter le colmatage dû aux transports de matériaux par les eaux d'infiltration, de drainage ou de ruissellement ;
- assurer la filtration des matériaux (respecter les règles de filtres...) afin d'éviter l'érosion ou le colmatage.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

- *résister aux sollicitations hydromécaniques*

Sur la base de cette classification, nous regroupons dans les Tableaux d'Analyse Fonctionnelle l'ensemble des fonctions de conception accomplies par les composants, en considérant l'ensemble des interactions.

TABLEAU D'ANALYSE FONCTIONNELLE

Fonctions de conception		
Composant examiné : n°1 - fondations amont injectées		
Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondations aval non injectées		limiter les flux hydrauliques (eaux d'infiltrations) transmettre les flux hydrauliques (les eaux de fuites)
galerie de drainage et dispositif de vidange		
plot n°1	préparer la surface de contact	résister aux sollicitations mécaniques (poids propre)
réseau de drainage du plot n°1		
masque amont	préparer la surface de contact	résister aux sollicitations mécaniques (poids propre)
recharge aval		
crête		
évacuateur de crues		
eau de la retenue - environnement amont		résister aux sollicitations chimiques (action chimique de l'eau) résister aux sollicitations hydromécaniques (érosion) limiter les flux hydrauliques (eaux d'infiltration)
circulations		
sédiments		résister aux sollicitations mécaniques (poids propre) limiter les flux hydrauliques (eaux d'infiltration) résister aux sollicitations hydromécaniques (érosion due aux eaux d'infiltration) résister aux sollicitations chimiques (action chimique des eaux d'infiltration)
sol ou roche en amont des fondations		limiter les flux hydrauliques (eaux d'infiltration) résister aux sollicitations hydromécaniques (érosion due aux eaux d'infiltration) résister aux sollicitations chimiques (action chimique de l'eau du sol en amont des fondations)

Fonctions de conception

Composant examiné : n°2 - fondations aval drainées		
Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondations amont injectées		collecter les flux hydrauliques (drainer les eaux d'infiltrations) résister aux sollicitations hydromécaniques (colmatage, érosion) résister aux sollicitations chimiques (eaux d'infiltration des fondations amont)
galerie de drainage et dispositif de vidange		transmettre les flux hydrauliques (restituer les eaux de drainage)
plot n°1	préparer la surface de contact	résister aux sollicitations mécaniques (poids propre)
réseau de drainage du plot n°1		
masque amont		
recharge aval	préparer la surface de contact	résister aux sollicitations mécaniques (poids propre)
crête		
évacuateur de crues		
eau de la retenue - environnement amont		
circulations		
sédiments		
sol ou roche en amont des fondations		
embâcles		
vent - soleil - glace - froid		
pluie		
eau aval - environnement aval		résister aux sollicitations hydromécaniques (érosion)

Fonctions de conception

Composant examiné : n°3 - galerie de drainage et dispositif de vidange

Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondations amont injectées		
fondations aval non injectées		collecter les flux hydrauliques (eaux de drainage) résister aux sollicitations chimiques (action chimique des eaux de drainage)
plot n°i		résister aux sollicitations mécaniques (poids propre)
réseau de drainage du plot n°i		résister aux sollicitations chimiques (eaux de drainage) collecter les flux hydrauliques (eaux de drainage)
masque amont	préparer la surface de contact	limiter les flux hydrauliques (assurer l'étanchéité du masque amont au niveau de l'entrée) résister aux sollicitations mécaniques (poids propre)
recharge aval		résister aux sollicitations mécaniques (poids propre)
crête		
évacuateur de crues		
eau de la retenue - environnement amont		collecter les flux hydrauliques (vidanger l'eau de la retenue) résister aux sollicitations chimiques (eau de la retenue)
circulations		
sédiments		résister aux sollicitations chimiques (eau de la retenue)
sol ou roche en amont des fondations		
embâcles		
vent - soleil - glace - froid		
pluie		
eau aval - environnement aval		transmettre les flux hydrauliques (restituer les débits de vidange, de drainage)

Fonctions de conception

Composant examiné : n°4 - plot n°1		
Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondallons amont injectés		résister aux sollicitations mécaniques (sous-pressions des fondations amont)
fondations aval non injectées		résister aux sollicitations mécaniques (sous-pressions des fondations aval)
galerie de drainage et dispositif de vidange	préparer la surface de contact (servir d'appui) de la galerie	
réseau de drainage du plot n°1	préparer la surface de contact (servir d'appui) du réseau de drainage	
masque amont	préparer la surface de contact (servir d'appui) du masque amont	résister aux sollicitations mécaniques (poussée hydrostatique amont, poussée des sédiments et des glaces transmise par le masque amont) résister aux sollicitations chimiques (action chimique des eaux de fuite)
recharge aval	préparer la surface de contact de la recharge	résister aux sollicitations mécaniques (poids des terres) transmettre les sollicitations mécaniques (la poussée hydrostatique amont)
crête	préparer la surface de contact de la crête	résister aux sollicitations mécaniques (poids propre, charges d'exploitation transmises par la crête)
évacuateur de crues	préparer la surface de contact de l'évacuateur de crues	résister aux sollicitations mécaniques (poids propre et eau)
eau de la retenue - environnement amont		
circulations		
sédiments		résister aux sollicitations mécaniques (poussée des sédiments)
sol ou roche en amont des fondallons		
embâcles		
vent - soleil - glace - froid		résister aux sollicitations mécaniques (poussée des glaces) résister aux sollicitations thermiques (cycles gel-dégel, gradients thermiques élevés)
pluie		
eau aval - environnement aval		résister aux sollicitations mécaniques (poussée hydrostatique aval)

Fonctions de conception

Composant examiné : n°5 - masque amont

Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondations amont injectées		
fondations aval non injectées		
galerie de drainage et dispositif de vidange		
plot n°1		transmettre les sollicitations mécaniques (poussée hydrostatique amont, poussée des sédiments et des glaces) limiter les flux hydrauliques (étancher)
réseau de drainage du plot n°1		transmettre les flux hydrauliques (eaux de fuites)
recharge aval		
crête		
évacuateur de crues		
eau de la retenue - environnement amont		résister aux sollicitations chimiques (action chimique de l'eau) limiter les flux hydrauliques (eaux d'infiltration)
circulations		
sédiments		résister aux sollicitations chimiques (action chimique de l'eau)
sol ou roche en amont des fondations		
embâcles		résister aux sollicitations mécaniques (chocs des embâcles)
vent - soleil - glace - froid		résister aux sollicitations chimiques (U.V) résister aux sollicitations thermiques (cycles gel-dégel, gradients de températures élevés)
pluie		
eau aval - environnement aval		

Fonctions de conception

Composant examiné : n°6 - réseau de drainage du plot n°1		
Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondations amont injectées		
fondations aval non injectées		
galerie de drainage et dispositif de vidange		transmettre les flux hydrauliques (restituer les eaux de drainage)
plot n°1		
masque amont		collecter les flux hydrauliques (drainer les eaux d'infiltration) résister aux sollicitations hydromécaniques (colmatage du aux infiltrations) résister aux sollicitations chimiques (provoquées par les eaux de drainage)
recharge aval		
crête		
évacuateur de crues		
eau de la retenue - environnement amont		
circulations		
sédiments		
sol ou roche en amont des fondations		
embâcles		
vent - soleil - glace - froid		résister aux sollicitations thermiques (gel sur les eaux de drainage)
pluie		
eau aval - environnement aval		

Fonctions de conception

Composant examiné : n°7 - recharge aval

Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondations amont injectées		
fondations aval non injectées		
galerie de drainage et dispositif de vidange		
plot n°1		transmettre les flux hydrauliques (drainer les eaux d'infiltrations) résister aux sollicitations chimiques (action chimique des eaux d'infiltration) [p,m] transmettre les sollicitations mécaniques (poids des terres) résister aux sollicitations hydromécaniques (érosion due aux infiltrations)
réseau de drainage du plot n°1		
masque amont		
crête		
évacuateur de crues		
eau de la retenue - environnement amont		
circulations		
sédiments		
sol ou roche en amont des fondations		
embâcles		
vent - soleil - glace - froid		
pluie		résister aux sollicitations hydromécaniques (érosion due au ruissellement)
eau aval - environnement aval		transmettre les flux hydrauliques (évacuer les eaux d'infiltration)
recharge aval		

Fonctions de conception

Composant examiné : n°8 - crête

Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux hydrauliques, de flux de forces ou de flux liés aux sollicitations hydrauliques, chimiques ou thermiques
fondations amont injectées		
fondations aval non injectées		
galerie de drainage et dispositif de vidange		
plot n°i		limiter les flux hydrauliques (assurer l'étanchéité du plot n°i) transmettre les sollicitations mécaniques (charges d'exploitation)
réseau de drainage du plot n°i		
masque amont		
recharge aval		
évacuateur de crues		
eau de la retenue - environnement amont		transmettre les flux hydrauliques (évacuer les eaux pluviales de ruissellement)
circulations		
sédiments		
sol ou roche en amont des fondations		
embâcles		
vent - soleil - glace - froid		résister aux sollicitations thermiques (cycles de gel-dégel, gradients de températures élevés)
pluie		collecter les flux hydrauliques (eaux pluviales de ruissellement)
eau aval - environnement aval		transmettre les flux hydrauliques (évacuer les eaux pluviales de ruissellement)

ANNEXE 5

AMDE Processus et AMDE Produit des barrages poids

AMDE Processus

Pour la réalisation de l'AMDE Processus, il est nécessaire d'établir un choix préalable des étapes du processus de conception et de réalisation à retenir pour l'analyse. Nous avons pris le parti de ne conserver pour chaque composant que les étapes essentielles et marquantes, celles qui sont susceptibles de produire des défaillances ultérieures en phase d'exploitation. Ainsi, nous distinguons :

- pour la conception : les reconnaissances, les essais préliminaires et les études de conception ;
- pour la réalisation : les préparations des travaux revêtant parfois une importance particulière (excavation, planche d'essais...) et la réalisation proprement dite.

Bien entendu, cette analyse n'est pas exhaustive : pour l'être, il conviendrait d'affiner la granularité du processus de conception-réalisation et de détailler toutes les étapes successives : essais préliminaires, sondages, modèles de calcul, discussion du projet, choix économiques, sous-traitance, conditions de chantier, fournitures des matériaux...

Ce type de démarche aurait pour vocation l'amélioration du processus de conception-réalisation du système, ce qui n'est pas notre objectif. En effet, nous recherchons à déterminer les lacunes d'un projet pouvant avoir ultérieurement des répercussions en phase d'exploitation. A ce titre, notre analyse est suffisante pour mettre en évidence les principales défaillances du processus de conception-réalisation.

Dans les effets possibles d'un mode de défaillance, nous avons distingué, d'une part, les effets à la granularité intermédiaire (au niveau du composant) qui apparaîtront alors directement dans l'AMDE Produit (les *effets* des défaillances obtenues par l'AMDE Processus deviendront des *causes* de modes de défaillance dans l'AMDE Produit), d'autre part, les effets à la granularité inférieure indiquant avec précision les conséquences sur le composant.

AMDE Produit

L'AMDE Produit est réalisée à la granularité intermédiaire : les modes de défaillance, leurs effets et leurs causes possibles sont examinés au niveau du composant.

Par ailleurs, afin obtenir des tableaux les plus synthétiques possibles, nous avons :

- classer les *causes* et *effets* dans les différentes familles mises en évidence lors de l'analyse fonctionnelle : les différents *flux*, les *contacts*, *l'état intrinsèque du composant*, le *processus conception-réalisation* ;
- utiliser les classifications et les terminologies proposées pour les fonctions, les phénomènes et les symptômes (partie 3 du rapport).

Enfin, nous avons dans un premier temps réalisée une AMDE Produit très exhaustive, qui envisageait des *causes* et *effets* des modes de défaillance très nombreux et divers. Il s'est avéré que le résultat obtenu n'était pas satisfaisant : tableaux très lourds, informations importantes non mises en évidence, phénomènes ne pouvant pas se produire en réalité... Nous avons donc trié les informations obtenues pour ne retenir au final que les *causes* et les *effets* pertinents, ceux qui sont susceptibles d'apparaître dans les mécanismes de vieillissement.

2	fondations aval drainées	<p>reconnaitances et études géologiques, géotechniques et de renforcement des fondations</p> <p>réalisation des excavations</p> <p>réalisation des forages</p>	<p>reconnaitances insuffisantes études géologiques insuffisantes étude insuffisante des fondations drainées analyses de la composition minéralogique des fondations amont insuffisantes analyses de la qualité de l'eau de l'environnement amont insuffisantes</p> <p>excavations non conformes aux études moyens de terrassement non adaptés contrôle géotechnique insuffisant après les excavations</p> <p>forage des drains non conforme aux études diamètre des forages insuffisant densité des forages insuffisante</p>	<p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> fondations aval diaclasées ou fissurées résistance mécanique faible capacité portante des fondations aval faible capacité de drainage insuffisante qualité de l'eau susceptible de produire des réactions chimiques composition de la fondation susceptible de conduire à des dissolutions <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> présence de poches d'argile présence de plans de glissement horizontaux</p> <p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> fondations amont fissurées résistance mécanique des fondations amont faible <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> résistance mécanique superficielle mal connue partie superficielle des fondations amont fissurée partie superficielle des fondations amont de qualité médiocre</p> <p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> dispositif de drainage des fondations aval inadapté capacité de drainage insuffisante <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> drains de profondeur limitée densité des drains limitée diamètre des drains faible</p>
3	galerie de drainage et vidange	<p>étude de la galerie</p> <p>réalisation de la galerie</p>	<p>étude de la galerie non satisfaisante</p> <p>exécution de la galerie non conforme aux études moyens de percement de la galerie en rives non adaptés</p>	<p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> conception de la galerie non satisfaisante implantation de la galerie non adaptée section de la galerie non adaptée profil de la galerie incorrect capacité de vidange insuffisante capacité de drainage insuffisante</p> <p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> réalisation de la galerie non satisfaisante capacité de vidange insuffisante capacité de drainage insuffisante <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> toit et piédroits de la galerie faibles résistance à la compression de la galerie limitée <i>effets sur les contacts avec les éléments environnant</i> fissuration des fondations amont en rives à proximité de la galerie</p>

4	plot n°i	étude du matériau à mettre en œuvre	étude du matériau à mettre en œuvre insuffisante étude chimique de l'eau de la retenue insuffisante	<i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> composition du plot inadaptée qualité de l'eau susceptible de produire des réactions chimiques composition du plot susceptible de conduire à des réactions chimiques <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> ciment et/ou granulats inadaptés à l'action chimique de l'eau ciment et/ou granulats inadaptés à l'action du climat <i>effet sur les flux hydrauliques ou de force</i> eau de la retenue agressive vis-à-vis des matériaux mis en œuvre
		étude de la liaison entre les couches	étude de la liaison entre les couches insuffisante	<i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> résistance au cisaillement du plot faible capacité de déformation du plot insuffisante <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> résistance au cisaillement de la liaison des couches faible capacité de déformation des joints entre les plots insuffisante
		étude des reprises de bétonnage	étude des reprises de bétonnage insuffisante étude des liaisons entre les plots	<i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> résistance mécanique du plot faible résistance au cisaillement du plot faible <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> reprises de bétonnage du plot faibles
		préparation du matériau à mettre en œuvre	matériau réalisé non conforme aux études ciment utilisé non conforme aux études granulats utilisés non conformes aux études	<i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> résistance mécanique du plot faible résistance du plot aux sollicitations chimiques faible <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> ciment et granulats pouvant conduire à des réactions d'alcali-réaction ciment et granulats pouvant conduire à des réactions chimiques ciment et granulats non adaptés à l'eau
		réalisation du plot n°i	réalisation du plot non conforme aux études réalisation des reprises de bétonnage non conforme aux études réalisation des coffrages non conforme aux études réalisation des liaisons entre les couches non conforme aux études réalisation du compactage du BCR non conforme aux études	<i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> résistance mécanique du plot faible résistance au cisaillement du plot faible <i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> reprises de bétonnage du plot faibles clavages des couches de matériaux faibles

7	recharge aval	<p>étude de conception de la recharge essais géotechniques des matériaux réalisation des planches d'essai</p> <p>réalisation de la recharge aval</p>	<p>étude de conception de la recharge aval insuffisante étude des matériaux insuffisante essais géotechniques des matériaux insuffisants étude du dispositif de drainage et de filtration de la recharge</p> <p>réalisation de la recharge aval non conforme aux études compactage insuffisant liaison avec le plot non conforme aux études</p>	<p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> résistance mécanique de la recharge aval insuffisante dimensionnement de la recharge aval insuffisant protection contre le ruissellement insuffisante capacité de drainage de la recharge aval insuffisante capacité de filtrage de la recharge aval insuffisante</p> <p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> résistance mécanique de la recharge insuffisante déplacement ou déformation de la recharge aval poids de la recharge aval insuffisant</p>
8	crête	<p>étude de conception de la crête</p> <p>réalisation de la crête</p>	<p>étude de la composition de la crête insuffisante étude du matériau d'étanchéité en surface insuffisante étude de l'évacuation des eaux de ruissellement insuffisante étude de la résistance thermique du matériau insuffisante étude de la résistance mécanique du matériau insuffisante</p> <p>réalisation de la structure non conforme aux études dispositif d'évacuation des eaux non conforme aux études</p>	<p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> crête insuffisamment étanche capacité de drainage de la crête insuffisante résistance mécanique de la crête insuffisante résistance thermique de la crête insuffisante</p> <p><i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> revêtement de surface insuffisamment étanche dispositifs d'évacuation des eaux de ruissellement inadaptés revêtement de surface insuffisamment étanche</p> <p><i>effets sur le composant à la granularité intermédiaire</i> crête insuffisamment étanche capacité de drainage de la crête insuffisante eaux de ruissellement stagnantes sur la crête</p> <p><i>effets sur le composant à la granularité inférieure</i> revêtement de surface insuffisamment étanche dispositifs d'évacuation des eaux de ruissellement insuffisants défaut de profil ou contre-pente sur la crête</p>

AMDE Produit

N°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DÉFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DÉFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DÉFAILLANCE	SYMPTÔME DE LA DÉFAILLANCE	MOYEN DE DÉTECTION
1	Fondations amont injectées	1 - limiter les flux hydrauliques .1 limiter les eaux d'infiltration provenant de la retenue et/ou des sédiments .2 limiter les eaux d'infiltration vers les fondations aval non injectées .3 limiter les eaux d'infiltration provenant de la zone amont	la fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . fissuration . dissolution . érosion	- Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans les fondations amont . eaux d'infiltration dans les fondations aval - Flux de charges . sous-pressions dans les fondations amont injectées . sous-pressions dans les fondations aval drainées	. écoulement d'eau . mesures des débits de drainage . piézométrie . piézométrie	. géo-radar . empotement - déversoir - débitmètre . piézomètres . cellules de pressions interstitielles . piézomètres . cellules de pressions interstitielles
		2 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister au poids propre du plot n°1 .2 résister au poids propre des sédiments .3 résister au poids propre du masque amont	la fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . dissolution . érosion . fissuration	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	. déplacement des joints de roche . mesures de la perméabilité . fissures	- observation visuelle . essais in situ de perméabilité - observation visuelle
		3 - préparer les surfaces de contact .1 préparer la surface de contact du plot n°1 .2 préparer la surface de contact du masque amont	la fonction "préparer les surfaces de contact" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	- Contacts . déformation du plot n°1 . déformation du masque amont	. mesures des déplacements du plot . mesures des déplacements du masque amont	- observation visuelle - mesures topographiques . planimétrie . nivellement . mesures d'alignement - pendules directs ou inversés
		4 - résister aux sollicitations hydromécaniques .1 résister à l'érosion due aux infiltrations provenant de la retenue	la fonction "résister aux sollicitations hydromécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans les fondations amont injectées	- Etat intrinsèque du composant . érosion - Flux de charges . sous-pressions dans les fondations amont injectées . sous-pressions dans les fondations aval drainées	. dépôts de particules fines à la sortie des drains . mesures de la perméabilité . piézométrie . piézométrie	. observation visuelle . filtration des eaux de fuite . analyses minéralogiques et chimiques . essais in situ de perméabilité . piézomètres . cellules de pressions interstitielles . piézomètres . cellules de pressions interstitielles
		5 - résister aux sollicitations chimiques .1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration du sol en amont, de la retenue ou des sédiments	la fonction "résister aux sollicitations chimiques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation . qualité de l'eau . composition	- Etat intrinsèque du composant . dissolution	. mesures de la teneur en sels minéraux des eaux de drainage . mesures de la perméabilité	. analyses chimiques . essais in situ de perméabilité

COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
2 Fondations aval non injectées, éventuellement drainées	1 - collecter les flux hydrauliques .1 drainer les eaux d'infiltration provenant des fondations amont injectées .2 restituer les eaux de drainage vers la galerie de vidange	la fonction "collecter les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation . capacité de drainage - Etat intrinsèque du composant . colmatage - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans les fondations aval	- Flux de charges . sous-pressions dans les fondations amont . sous-pressions dans les fondations aval - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration vers l'aval	piézométrie fuites mesures du débit des fuites	. piézomètres . cellules de pressions interstitielles . observation visuelle . empotement - déversoir - débilimètre
	2 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister au poids propre du plot n°1 .2 résister au poids propre de la recharge aval	la fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . dissolution . érosion . fissuration	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	mesures de la perméabilité	. essais in situ de perméabilité
	3 - préparer les surfaces de contact .1 préparer la surface de contact du plot n°1 .2 préparer la surface de contact de la recharge	la fonction "préparer les surfaces de contact" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . déformation	- Contacts . déformation du plot n°1 . déformation de la recharge	. mesures des déplacements du plot . mesures des déplacements de la recharge	. observation visuelle . mesures topographiques . planimétrie . nivellement . mesures d'alignement . pendules directs ou inversés
	4 - résister aux sollicitations hydromécaniques .1 résister au colmatage des eaux d'infiltration .2 résister à l'érosion des eaux d'infiltration	la fonction "résister aux sollicitations hydromécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Flux hydromécaniques . érosion des fondations amont injectées	- Etat intrinsèque du composant . colmatage	. constat de l'état des drains . mesures du débit de drainage	. sondages . empotement - déversoir - débilimètre
	5 - résister aux sollicitations chimiques .1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration	la fonction "résister aux sollicitations chimiques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation . composition - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans les fondations aval	- Etat intrinsèque du composant . dissolution	. mesures de la teneur en sels minéraux des eaux de drainage . mesures de la perméabilité	. analyses chimiques . essais in situ de perméabilité

n°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
3	Galerie de drainage et vidange	1 - collecter et évacuer les flux hydrauliques 1 collecter les eaux de drainage provenant du réseau de drainage du plot n°1 2 collecter les eaux de drainage des fondations aval non injectées 3 évacuer l'ensemble des débits de drainage vers l'environnement aval 4 vidanger l'eau de la retenue 5 évacuer les débits de vidange vers l'environnement aval 6 évacuer les débits de drainage vers l'environnement aval	la fonction "collecter les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : . capacité de drainage . capacité de vidange - Etat intrinsèque du composant . colmatage . obstruction - Contacts . obstruction par les sédiments . obstruction par les alluvions - Flux hydrauliques . niveau hydrostatique aval	- Flux de charges . sous-pressions dans le plot n°1 . charges hydrostatiques agissant sur le plot n°1 - Flux hydrauliques . eaux restituées dans l'environnement aval . eaux de drainage vers l'environnement aval	. piézométrie . mesure du niveau hydrostatique amont . mesures du débit restitué à l'aval . mesures du débit de drainage	. piézomètres . cellules de pressions Interstitielles . échelle de niveau de la retenue . déversoir . empotement - déversoir - débitmètre
		2 - résister aux sollicitations mécaniques 1 résister au poids propre du plot n°1 2 résister au poids propre de la recharge 3 résister au poids propre du masque amont	pour mémoire				

N°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
4	Plot n°1	<p>1 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>.1 résister à la poussée hydrostatique amont transmise par le masque amont</p> <p>.2 résister aux sous-pressions des fondations amont injectées</p> <p>.3 résister aux sous-pressions des fondations aval non injectées</p> <p>.4 résister au poids de la recharge aval</p> <p>.5 résister à la poussée hydrostatique aval</p> <p>.6 résister à la poussée des sédiments transmise par le masque amont</p> <p>.7 résister à la poussée des glaces transmise par le masque amont</p> <p>.8 résister au poids propre de l'évacuateur</p> <p>.9 résister au poids propre de la crête</p> <p>.10 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête</p>	<p>la fonction</p> <p>"résistance aux sollicitations mécaniques"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Etat Intrinsèque du composant :</p> <p>. déformation</p> <p>. dissolution</p> <p>. fissuration</p> <p>- Flux de charges</p> <p>. sous-pressions dans le plot</p> <p>. sous-pressions dans les fondations amont</p> <p>. sous-pressions dans les fondations aval</p> <p>. charges permanentes agissant sur le plot</p> <p>. marnage de la retenue</p> <p>. poussée des glaces</p> <p>- Processus conception-réalisation</p> <p>. capacité de déformation</p>	<p>- Etat Intrinsèque du composant :</p> <p>. fissuration</p> <p>. déformation</p>	<p>. ouverture de l'interface béton-rocher</p> <p>. fissures verticales traversantes</p> <p>. fissures structurales</p> <p>. ouvertures des reprises de bétonnage</p> <p>. fissures plongeantes en pied du plot</p> <p>. ouverture des joints verticaux</p> <p>. mesures du développement des fissures</p> <p>. mesures des déplacements du plot n°1</p>	<p>. extensomètre multipoint (distofor)</p> <p>. observation visuelle</p> <p>. levés de fissures</p> <p>. fissuromètres</p> <p>. mesures topographiques</p> <p>. planimétrie</p> <p>. nivellement</p> <p>. mesures d'alignement</p> <p>. pendules directs ou inversés</p>
		<p>2 - préparer les surfaces de contact</p> <p>.1 servir d'appui au masque amont</p> <p>.2 servir d'appui au réseau de drainage</p> <p>.3 préparer la surface de contact de la recharge aval</p> <p>.4 préparer la surface de contact de la crête</p> <p>.5 préparer la surface de contact de l'évacuateur de crues</p> <p>.6 servir d'appui à la galerie de drainage</p>	<p>la fonction</p> <p>"préparer la surface de contact"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Etat Intrinsèque du composant</p> <p>. déformation</p>	<p>- Contacts</p> <p>. fissuration du masque amont</p> <p>. déformation de la crête</p> <p>. déformation de l'évacuateur de crue</p>	<p>. fissures horizontales du masque amont</p> <p>. fissures en forme de faïençage</p> <p>. fissures en forme d'écailles</p> <p>. fissures horizontales en pied du masque amont</p> <p>. fissures verticales traversantes</p> <p>. mesures du développement des fissures</p> <p>. mesures des déplacements de la crête</p> <p>. mesures des déplacements de l'évacuateur de crues</p> <p>. manoeuvrabilité des vannes</p>	<p>. observation visuelle</p> <p>. levés de fissures</p> <p>. fissuromètres</p> <p>. mesures topographiques</p> <p>. planimétrie</p> <p>. nivellement</p> <p>. mesures d'alignement</p> <p>. pendules directs ou inversés</p> <p>. mesures topographiques</p> <p>. nivellement</p> <p>. essais sur le matériel</p>

n°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
4	Plot n°1 (suite)	<p>3 - résister aux sollicitations thermiques</p> <p>.1 résister aux cycles de gel-dégel</p> <p>.2 résister aux gradients thermiques élevés</p>	<p>la fonction</p> <p>"résister aux sollicitations thermiques"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Flux hydrauliques</p> <p>. eaux d'infiltration dans le plot</p> <p>. stagnation d'eau sur le plot</p> <p>- Flux thermiques</p> <p>. cycles de gel-dégel</p>	<p>- Etat intrinsèque du composant</p> <p>. fissuration</p>	<p>. fissures en forme d'écaïlles sur le parement amont dans la zone de mamage</p> <p>. mesures du développement des fissures</p>	<p>. observation visuelle</p> <p>. levés de fissures</p> <p>. fissuromètres</p> <p>. levés de fissures</p>
		<p>4 - résister aux sollicitations chimiques</p> <p>.1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration</p>	<p>la fonction</p> <p>"résister aux sollicitations chimiques"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Flux hydrauliques</p> <p>. eaux d'infiltration dans le plot</p> <p>- Processus conception-réalisation :</p> <p>. composition</p> <p>. qualité de l'eau</p>	<p>- Etat intrinsèque du composant</p> <p>. déformation</p> <p>. fissuration</p> <p>. perméabilité</p> <p>. dissolution</p>	<p>. mesures des déplacements du plot</p> <p>. fissures en forme de faïençage</p> <p>. fissures en forme d'écaïlles</p> <p>. mesures du développement des fissures</p> <p>. mesures de la perméabilité</p> <p>. mesures du poids volumique du plot</p> <p>. dépôts de calcite sur le parement aval</p> <p>. mesures de la teneur en carbonate des eaux de fuites</p>	<p>. observation visuelle</p> <p>. mesures topographiques</p> <p>. planimétrie</p> <p>. nivellement</p> <p>. mesures d'alignement</p> <p>. pendules directs ou inversés</p> <p>. observation visuelle</p> <p>. levés de fissures</p> <p>. fissuromètres</p> <p>. essais de perméabilité</p> <p>. carottage</p> <p>. observation visuelle</p> <p>. analyse chimique des eaux</p>
		<p>5 - limiter les flux hydrauliques</p> <p>.1 limiter les infiltrations provenant de la retenue</p> <p>.2 limiter les infiltrations d'eaux pluviales</p>	<p>la fonction</p> <p>"limiter les flux hydrauliques"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Flux hydrauliques</p> <p>. eaux d'infiltration vers le plot</p> <p>- Etat intrinsèque du composant</p> <p>. perméabilité</p> <p>. fissuration</p>	<p>- Flux hydrauliques</p> <p>. eaux d'infiltration dans le plot</p> <p>- Flux de charges</p> <p>. sous-pressions dans le plot</p>	<p>. fuites sur le parement aval</p> <p>. résurgences d'eau au contact béton-fondation</p> <p>. mesures des débits de fuites</p> <p>. piézométrie</p>	<p>. observation visuelle</p> <p>. observation visuelle</p> <p>. empolement - déversoir - débitmètre</p> <p>. piézomètres</p> <p>. cellules de pressions interstitielles</p>

n°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
5	Masque amont	1 - limiter les flux hydrauliques .1 assurer l'étanchéité du plot n°1	la fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . perméabilité . déformation . fissuration	- Flux hydrauliques . eaux d'infiltration vers le réseau de drainage . eaux d'infiltration vers le plot	. mesures des débits de drainage . mesures des débits de drainage	. empotement - déversoir - débitmètre . empotement - déversoir - débitmètre
		2 - résister aux sollicitations chimiques .1 résister à l'action chimique de l'eau de la retenue .2 résister aux U.V	la fonction "résister aux sollicitations chimiques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : . composition . qualité de l'eau	- Etat intrinsèque du composant . perméabilité . dissolution	. mesures de la perméabilité . granulats apparents . mesures de la teneur en carbonate des eaux de fuite	. essais de perméabilité . observation visuelle . analyse chimique des eaux de drainage
		3 - résister aux sollicitations thermiques .1 résister aux cycles gel-dégel .1 résister aux gradients thermiques élevés	la fonction "résister aux sollicitations thermiques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation . composition - Flux hydrauliques . marnage de la retenue - Flux thermiques . cycles de gel-dégel . gradients thermiques	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	. constat de déformations superficielles (ventres rentrants et sortants...) . fissures en forme d'écailles . microfissures . mesures du développement des fissures	- observation visuelle . observation visuelle . levés de fissures . fissuromètres
		4 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister aux chocs des embâcles .2 résister à l'action des glaces	la fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation . composition - Flux de charges . choc des embâcles . action de la glace	- Etat intrinsèque du composant . déformation . fissuration	. constat de déformations superficielles (arrachement, endommagement...) . fissures	- observation visuelle - observation visuelle

COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
6 <i>Dispositif de drainage du plot n°1</i>	1 - collecter et évacuer les flux hydrauliques .1 drainer les eaux d'infiltration provenant du masque amont .2 évacuer les eaux de drainage vers la galerie de drainage	la fonction "collecter les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : . capacité de drainage . composition du dispositif de drainage - Etat intrinsèque du composant . colmatage - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration provenant du masque amont	- Flux de charges . sous-pressions dans le plot n°1 - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration vers le plot n°1	. piézométrie . fuites . mesures du débit des fuites	. piézomètres . cellules de pressions interstitielles . observation visuelle . empotement - déversoir - débilimètre
	2 - résister aux sollicitations thermiques .1 résister aux actions de gel sur les eaux de drainage	la fonction "résister aux sollicitations thermiques" est dégradée ou est défaillante	- Flux thermiques . température - Etat intrinsèque du composant . protection thermique	- Etat intrinsèque du composant . colmatage - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration vers la galerie de drainage	. constat de l'état des drains . mesures du débit des fuites	. sondages . empotement - déversoir - débilimètre
	3 - résister aux sollicitations hydromécaniques .1 résister au colmatage des eaux d'infiltration	la fonction "résister aux sollicitations hydromécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Flux hydromécaniques . érosion du masque amont	- Etat intrinsèque du composant . colmatage	. constat de l'état des drains . mesures du débit de drainage	. sondages . empotement - déversoir - débilimètre
7 <i>Recharge aval</i>	1 - résister aux sollicitations mécaniques .1 transmettre le poids de la recharge au plot n°1 .2 résister aux sollicitations transmises par le plot n°1	la fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque du composant . déformation . pressions interstitielles dans la recharge . composition de la recharge - Flux de charges . charges permanentes agissant sur la recharge	- Etat intrinsèque du composant . fissuration . déformation	. fissure longitudinale . glissement de la recharge	. observation visuelle . observation visuelle
	2 - collecter et évacuer les flux hydrauliques .1 évacuer les eaux pluviales vers l'environnement aval .2 drainer les eaux d'infiltration vers l'environnement aval	la fonction "collecter et évacuer les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : . capacité de drainage . composition du dispositif de drainage - Etat intrinsèque du composant . colmatage - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration provenant du plot - Flux hydromécaniques . érosion du plot	- Etat intrinsèque du composant . pressions interstitielles dans la recharge - Flux hydrauliques . eaux d'infiltration vers l'aval - Etat intrinsèque du composant . colmatage	. piézométrie . fuites . mesures du débit des fuites . constat de l'état des drains . mesures du débit de drainage	. piézomètres . cellules de pressions interstitielles . observation visuelle . empotement - déversoir - débilimètre . sondages . empotement - déversoir - débilimètre

n°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
8	Crête	1 - limiter les flux hydrauliques .1 assurer l'étanchéité du plot n°1	la fonction "assurer l'étanchéité du plot n°1" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : . composition - Etat Intrinsèque du composant . fissuration . déformation - Flux hydrauliques . stagnation d'eau sur la crête	- Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans le plot n°1 - Flux de charges . sous-pressions dans le plot n°1	. fuites sur le parement aval . piézométrie	. observation visuelle . piézomètres . cellules de pressions Interstitielles
		2 - résister aux sollicitations thermiques .1 résister aux cycles gel-dégel .2 résister aux gradients thermiques élevés	la fonction "résister aux sollicitations thermiques" est dégradée ou est défaillante	- Flux hydrauliques . stagnation d'eau sur la crête - Processus conception-réalisation : . composition	- Etat Intrinsèque du composant . fissuration	. fissures en forme d'écaillage . mesures du développement des fissures	. observation visuelle . levés de fissures . fissuromètres
		3 - collecter les flux hydrauliques .1 évacuer les eaux de ruissellement vers l'environnement amont ou aval	la fonction "évacuer les eaux de ruissellement" est dégradée ou est défaillante	- Etat Intrinsèque du composant . colmatage des drains - Processus conception-réalisation : . composition	- Flux hydrauliques . stagnation d'eau sur la crête	. constat de stagnation d'eau sur la crête	. observation visuelle
		4 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister aux charges d'exploitation	la fonction "résister aux charges d'exploitation" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : . composition - Flux de charges . charges d'exploitation	- Etat Intrinsèque du composant . fissuration . déformation	. fissures en forme d'écailles . mesures du développement des fissures	. observation visuelle . levés de fissures . fissuromètres

ANNEXE 6

Fonctions génériques et fonctions de précision des composants des barrages poids

A partir de l'analyse fonctionnelle des barrages, nous avons proposé la classification des fonctions de conception des composants dans des familles de *fonction générique* :

- résister aux sollicitations mécaniques (*resist mechanic strengths*)
- résister aux sollicitations hydromécaniques (*resist hydromechanic strengths*)
- résister aux sollicitations thermiques (*resist thermic strengths*)
- résister aux sollicitations chimiques (*resist chemical strengths*)
- préparer les surfaces de contact (*prepare contact surfaces*)
- collecter les flux hydrauliques (*collect flood*)
- limiter les flux hydrauliques (*reduce flood*)
- évacuer les flux hydrauliques (*drain off flood*)

Les Blocs diagrammes Fonctionnels permettent de déterminer l'origine physique des fonctions de conception et d'en faire une description précise :

→ résister aux sollicitations mécaniques (*resist mechanic strengths*)

Les flux de charges induisent des résistances aux sollicitations mécaniques ou des transmissions de sollicitations mécaniques à d'autres composants :

- poids propre d'un composant voisin ;
- poids des terres ;
- poids des sédiments ;
- charges d'exploitation (circulations) ;
- sous-pressions ;
- poussée hydrostatique amont ;
- poussée hydrostatique aval ;
- poussée des sédiments ;
- poussée des glaces ;
- chocs des embâcles ;
- etc.

→ résister aux sollicitations hydromécaniques (*resist hydromechanic strengths*)

Cette fonction existe là où il y a possibilité d'infiltration d'eau. Nous distinguons :

- résister à l'érosion des écoulements provenant de la retenue, des nappes et du sol ;
- filtrer les particules entraînées dans les infiltrations ;
- résister au colmatage dû aux infiltrations, aux eaux de drainage ou aux eaux pluviales.

→ résister aux sollicitations thermiques (*resist thermic strengths*)

Cette fonction est généralement liée aux changements de température imposés par le milieu extérieur :

- résister aux cycles gel-dégel ;
- résister aux gradients thermiques élevés ;
- résister aux actions de gel.

→ résister aux sollicitations chimiques (*resist chemical strengths*)

Cette fonction regroupe des mécanismes de natures diverses :

- résister aux actions chimiques des infiltrations provenant de la retenue, du sol, du drainage et des eaux pluviales ;
- résister aux U.V.

→ préparer les surfaces de contact (*prepare contact surfaces*)

Les contacts induisent des fonctions de préparation de surface qui peuvent être de deux natures mécaniques :

- des fonctions de préparation de la surface pour le composant supérieur ;
- des fonctions d'appui pour des composants voisins au composant considéré.

→ collecter les flux hydrauliques (*collect flood*)

→ limiter les flux hydrauliques (*reduce flood*)

→ évacuer les flux hydrauliques (*drain off flood*)

Les flux hydrauliques sont liés aux percolations dans le système. Plusieurs fonctions pour un même composant sont possibles :

- limiter les infiltrations provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur et allant vers un autre composant ou milieu extérieur ;
- assurer l'étanchéité d'un composant (c'est-à-dire interdire le passage d'infiltrations) ;
- collecter ou drainer les eaux d'infiltrations ou de fuites d'un composant vers un autre ;
- restituer les eaux de drainage, de fuites ou pluviales vers un milieu extérieur ;
- vidanger la retenue.

Nous regroupons, dans chaque famille de fonction générique, les fonctions de conception accomplies par un composant donné. Dans la suite, nous appelons *fonction de précision* les fonctions de conception d'un composant indiquant avec détails l'action accomplie par ce composant.

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

1 Fondations amont injectées

1 - limiter les flux hydrauliques

- .1 limiter les eaux d'infiltration provenant de la retenue et/ou des sédiments
- .2 limiter les eaux d'infiltration vers les fondations aval non injectées
- .3 limiter les eaux d'infiltration provenant de la zone amont

2 - résister aux sollicitations mécaniques

- .1 résister au poids propre du plot n°i
- .2 résister au poids propre des sédiments
- .3 résister au poids propre du masque amont

3 - préparer les surfaces de contact

- .1 préparer la surface de contact du plot n°i
- .2 préparer la surface de contact du masque amont

4 - résister aux sollicitations hydromécaniques

- .1 résister à l'érosion due aux infiltrations provenant de la retenue

5 - résister aux sollicitations chimiques

- .1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration du sol en amont, de la retenue ou des sédiments

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

2 Fondations aval non injectées, éventuellement drainées

1 - collecter les flux hydrauliques

- .1 drainer les eaux d'infiltration provenant des fondations amont injectées
- .2 restituer les eaux de drainage vers la galerie de vidange

2 - résister aux sollicitations mécaniques

- .1 résister au poids propre du plot n°i
- .2 résister au poids propre de la recharge aval

3 - préparer les surfaces de contact

- .1 préparer la surface de contact du plot n°i
- .2 préparer la surface de contact de la recharge

4 - résister aux sollicitations hydromécaniques

- .1 résister au phénomène de colmatage des eaux d'infiltration
- .2 résister à l'érosion des eaux d'infiltration

5 - résister aux sollicitations chimiques

- .1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

3 Galerie de drainage et vidange

1 - collecter les flux hydrauliques

- .1 collecter les eaux de drainage venant du réseau de drainage du plot n°i
- .2 collecter les eaux de drainage des fondations aval non injectées
- .3 évacuer l'ensemble des débits de drainage vers l'environnement aval

2 - évacuer les flux hydrauliques

- .1 vidanger l'eau de la retenue
- .2 évacuer les débits de vidange vers l'environnement aval
- .2 évacuer les débits de drainage vers l'environnement aval

3 - résister aux sollicitations mécaniques

- .1 résister au poids propre du plot n°i
- .2 résister au poids propre de la recharge
- .3 résister au poids propre du masque amont

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

4 Plot n°i

1 - résister aux sollicitations mécaniques

- .1 résister à la poussée hydrostatique amont transmise par le masque amont
- .2 résister aux sous-pressions dans les fondations amont injectées
- .3 résister aux sous-pressions dans les fondations aval non injectées
- .4 résister au poids de la recharge aval
- .5 résister à la poussée hydrostatique aval
- .6 résister à la poussée des sédiments transmise par le masque amont
- .7 résister à la poussée des glaces transmise par le masque amont
- .8 résister au poids propre de l'évacuateur
- .9 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête

2 - préparer les surfaces de contact

- .1 servir d'appui au masque amont
- .2 servir d'appui au réseau de drainage
- .3 préparer la surface de contact de la recharge aval
- .4 préparer la surface de contact de la crête
- .5 préparer la surface de contact de l'évacuateur de crues
- .6 servir d'appui à la galerie de drainage

3 - résister aux sollicitations thermiques

- .1 résister aux cycles gel-dégel
- .2 résister aux gradients thermiques élevés

4 - résister aux sollicitations chimiques

- .1 résister à l'action chimique des eaux d'infiltration

5 - limiter les flux hydrauliques

- .1 limiter les infiltrations provenant de la retenue
- .2 limiter les infiltrations d'eaux pluviales

n°	Composant	Fonctions generiques et fonctions de precision
----	-----------	--

5 Masque amont

1 - limiter les flux hydrauliques

.1 assurer l'étanchéité du plot n°i

2 - résister aux sollicitations chimiques

.1 résister à l'action chimique de l'eau de la retenue

.2 résister aux U.V

3 - résister aux sollicitations thermiques

.1 résister aux cycles gel-dégel

.1 résister aux gradients thermiques élevés

4 - résister aux sollicitations mécaniques

.1 résister aux chocs des embâcles

.2 résister à l'action des glaces

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

6 Réseau de drainage du plot n°i

- 1 - collecter les flux hydrauliques**
 - .1 drainer les eaux d'infiltration provenant du masque amont
- 2 - évacuer les flux hydrauliques**
 - .2 évacuer les eaux de drainage vers la galerie de drainage
- 3 - résister aux sollicitations thermiques**
 - .1 résister aux actions de gel sur les eaux de drainage
- 4 - résister aux sollicitations hydromécaniques**
 - .1 résister au phénomène de colmatage des eaux d'infiltration

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

7 Recharge aval

1 - transmettre les sollicitations mécaniques

- .1 transmettre le poids des terres au plot n°i
- .2 résister aux sollicitations mécaniques transmises par le plot n°i

2 - collecter et évacuer les flux hydrauliques

- .1 évacuer les eaux pluviales vers l'environnement aval
- .2 drainer les eaux d'infiltration vers l'environnement aval

3 - résister aux sollicitations hydromécaniques (pour mémoire)

- .1 résister au phénomène d'érosion due aux eaux d'infiltration ou aux eaux pluviales

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

8 Crête

1 - limiter les flux hydrauliques

.1 assurer l'étanchéité du plot n°i

2 - résister aux sollicitations thermiques

.1 résister aux cycles gel-dégel

.2 résister aux gradients thermiques élevés

3 - collecter les flux hydrauliques

.1 évacuer les eaux pluviales de ruissellement vers l'environnement amont ou aval

4 - résister aux sollicitations mécaniques

.1 résister aux charges d'exploitation sur la crête (circulation...)

ANNEXE 7

Glossaire des phénomènes intervenant dans les mécanismes de vieillissement des barrages poids

Dans cette annexe 7, nous présentons un glossaire de l'essentiel des phénomènes intervenant dans les mécanismes de vieillissement des barrages poids. Les phénomènes indiqués sont à la granularité intermédiaire et s'appliquent donc au niveau du composant.

A partir de ce glossaire, nous disposons d'une base de données de phénomènes qui est ensuite utilisée pour la construction des scénarios de vieillissement. Ainsi, tous les phénomènes intervenant dans la collection de scénarios modélisés (annexe 10) sont décrits dans cette synthèse.

Le glossaire indique donc *les choix terminologiques* (en bilingue) que nous avons adoptés pour dénommer les phénomènes utilisés dans les scénarios de vieillissement. Ces choix ont été établis au regard des termes utilisés dans les recueils d'expertise, les termes qui nous ont semblé les plus pertinents ayant été retenus, puis ensuite validés par un panel d'experts. Pour une plus grande clarté des dénominations, nous donnons pour chaque phénomène sa définition et une description du processus physique impliqué, ainsi que les scénarios dans lesquels il apparaît et les composants auxquels il s'applique.

Enfin, chaque phénomène est classé selon son origine :

- état intrinsèque du composant ;
- flux hydraulique ;
- flux de charges ;
- processus de conception et réalisation.

Nom du phénomène	Composant concerné	Description physique du phénomène	Scénario concerné par le phénomène / composant concerné dans le scénario
Famille « état intrinsèque du composant »			
DEFORMATION DEFORMATION	<ul style="list-style-type: none"> - fondation amont - fondation aval - plot - masque amont - crête - évacuateur de crues 	<p>Le phénomène DEFORMATION doit être entendu au sens littéral. Il indique un mouvement dans l'espace d'un composant ou une partie d'un composant (modification de la forme ou des dimensions géométriques), sous l'effet de sollicitations d'origines diverses.</p> <p>La DEFORMATION peut résulter de différents processus : mécanique (poussées, charges), chimique (alcali-réaction, gonflement), thermique (gradient thermique).</p>	1.1 - dissolution et érosion dans les fondations / <u>composant concerné</u> : fondation amont, plot 1.2 - vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage / <u>composant concerné</u> : fondation amont & plot 2.1 - alcali-réaction / <u>composant concerné</u> : plot, évacuateur de crues, crête 2.2 - retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau / <u>composant concerné</u> : plot 3.1 – vieillissement des revêtements amont / <u>composant concerné</u> : masque amont
FISSURATION CRACKING	<ul style="list-style-type: none"> - fondation amont - fondation aval - plot - masque amont - crête 	<p>La FISSURATION représente le phénomène d'ouverture de fissures de tout type : pénétrante, superficielle, longitudinale, transversale, diagonale, faïençage, ...</p> <p>La FISSURATION résulte d'un processus mécanique. Elle est provoquée par le développement, sur la zone de la fissure, de contraintes de traction supérieures à la résistance à la traction du matériau.</p>	1.1 - dissolution et érosion dans les fondations / <u>composant concerné</u> : fondation amont 1.2 - vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage / <u>composant concerné</u> : fondation amont & plot 2.1 - alcali-réaction / <u>composant concerné</u> : plot , masque amont 2.2 - retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau / <u>composant concerné</u> : plot & masque amont 2.4 – faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées / <u>composant concerné</u> : plot & masque amont 2.5 – faible résistance au gel et dégel / <u>composant concerné</u> : masque amont & plot 3.1 – vieillissement des revêtements amont / <u>composant concerné</u> : masque amont

<p>DISSOLUTION DISSOLUTION</p>	<p>- fondation amont - plot - masque amont</p>	<p>La DISSOLUTION représente le phénomène physico-chimique d'attaque des matériaux des fondations (roche et coulis d'injection), du corps du barrage (béton ou maçonnerie) ou du masque amont par l'eau et les gaz chargés d'agents chimiques agressifs. Le phénomène physico-chimique est commandé par l'aptitude de l'eau et des gaz chargés d'agents agressifs à diffuser dans les matériaux.</p> <p>La DISSOLUTION des plots des barrages en béton est due, dans environ 80% des cas, à l'action des eaux pures. Ces dernières, très faiblement minéralisées sont typiquement des eaux de fonte des neiges. Bien que possédant un pH voisin de 7, elles sont capables de dissoudre des constituants de la pâte de ciment, en particulier la chaux libre qui est le plus soluble d'entre eux. Une partie de cette chaux, dissoute et entraînée par l'eau, peut réagir avec l'anhydride carbonique atmosphérique ou dissous, pour former du carbonate de calcium. Les dépôts blancs de carbonate de calcium dans les galeries, les dispositifs de drainage et les parements aval des plots sont des symptômes du phénomène de DISSOLUTION.</p> <p>La capacité de l'eau à dissoudre les composés calcites (chaux, carbonate, silicate et aluminates) dépend essentiellement de la concentration chimique en ions calcium et magnésium, mais aussi de la présence d'anhydride carbonique et des paramètres physiques tels que la vitesse de circulation des eaux d'infiltration au contact du matériau et la température.</p> <p>Dans les 20% des cas, la DISSOLUTION des plots des barrages en béton est produite par des eaux acides ou par les sulfates. Ces derniers sont le fait le plus souvent de sulfates de magnésium (eaux de mer), de sodium, de calcium ou de sulfates provenant de l'oxydation du sulfure de fer (pyrite) contenu dans certains granulats. L'action des sulfates peut revêtir des formes différentes selon leur concentration : soit une cristallisation de sels complexes s'accompagnant d'une très forte augmentation de volume avec perte de cohésion du liant, soit une décomposition des silicates de calcium avec une perte de résistance importante.</p> <p>La DISSOLUTION des fondations rocheuses des barrages en béton fait intervenir les mêmes types de mécanismes. Les matériaux susceptibles d'être attaqués par les eaux d'infiltrations dans les fondations sont les roches elles-mêmes, les matériaux de remplissage des joints et les coulis d'injection de traitement des fondations.</p>	<p>1.1 - <i>dissolution et érosion dans les fondations</i> / <u>composant concerné</u> : fondation amont 1.2 - <i>vieillessement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage</i> / <u>composant concerné</u> : fondation amont 2.3 - <i>dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu</i> / <u>composant concerné</u> : plot</p>
------------------------------------	--	---	--

<p>EROSION EROSION</p>	<p>- fondation amont</p>	<p>Le phénomène EROSION des fondations rocheuses des barrages poids se présente principalement sous la forme de <i>dissolution</i> (action chimique de l'eau sur les constituants des matériaux) et d'<i>entraînement</i> des matériaux (la contrainte de cisaillement provoquée par l'écoulement est supérieure à la résistance au cisaillement des constituants des matériaux), ces derniers provenant de la roche elle-même, du remplissage des discontinuités ou des joints de roches (débouillage du matériau des joints de roches) ou encore des rideaux d'injection. Ces mécanismes de dissolution et d'entraînement conduisent à l'arrachement de particules de matériaux, qui sont ensuite transportées par les écoulements des eaux d'infiltration.</p> <p>L'EROSION résulte d'un processus, soit totalement mécanique (entraînement + transport), soit physico-chimique (dissolution + transport).</p>	<p>1.1 - <i>dissolution et érosion dans les fondations</i> / <u>composant concerné</u> : fondation amont 1.2 - <i>vieillessement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage</i> / <u>composant concerné</u> : fondation amont</p>
<p>COLMATAGE CLOGGING</p>	<p>- fondation aval drainée - dispositif de drainage</p>	<p>Le COLMATAGE représente le phénomène d'obstruction physique du système de drainage de la fondation aval drainée ou du dispositif de drainage du corps du barrage. Le COLMATAGE conduit à la diminution ou l'arrêt du drainage des eaux de fuite à travers les fondations ou le corps du barrage.</p> <p>Le COLMATAGE peut résulter soit d'un dépôt de calcite dans les orifices de drainage lié à des mécanismes de dissolution, soit à l'obstruction par des matériaux dans les conduits ou les forages de drainage liée à des mécanismes d'érosion.</p>	<p>1.2 - <i>vieillessement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage</i> / <u>composant concerné</u> : fondation aval drainée</p>

Famille « flux hydraulique »			
EAUX D'INFILTRATION WATER SEEPAGE	<ul style="list-style-type: none"> - fondation amont - fondation aval - plot - masque amont - dispositif de drainage - environnement aval - crête 	<p>Le phénomène EAUX D'INFILTRATION représente la circulation d'un flux hydraulique. Plusieurs directions de circulation sont possibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les EAUX D'INFILTRATION proviennent d'un composant ou d'un milieu extérieur ; - les EAUX D'INFILTRATION traversent un composant ; - les EAUX D'INFILTRATION se dirigent vers un composant ou un milieu extérieur. <p>Nous regroupons dans ce phénomène différents flux hydrauliques : les eaux de fuites à travers un ou des composants, les eaux de drainage à travers les dispositifs drainants et les suintements ou écoulements pouvant être observés aux exutoires (parement aval, pied aval...).</p>	<p>1.1 - <i>dissolution et érosion dans les fondations</i> / <u>composant concerné</u> : fondations amont et aval, environnement aval</p> <p>1.2 - <i>vieillessement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage</i> / <u>composant concerné</u> : fondations amont et aval</p> <p>2.1 - <i>alcali-réaction</i> / <u>composant concerné</u> : plot, dispositif de drainage, environnement aval</p> <p>2.2 - <i>retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau</i> / <u>composant concerné</u> : plot, masque amont, environnement aval</p> <p>2.3 - <i>dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu</i> / <u>composant concerné</u> : plot, environnement aval, masque amont, dispositif de drainage</p> <p>2.4 - <i>faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées</i> / <u>composant concerné</u> : plot, environnement aval, masque amont, dispositif de drainage</p> <p>2.5 - <i>faible résistance au gel et dégel</i> / <u>composant concerné</u> : masque amont, dispositif de drainage, plot</p> <p>3.1 - <i>vieillessement des revêtements amont</i> / <u>composant concerné</u> : masque amont, retenue, plot, dispositif de drainage</p>
MARNAGE DE LA RETENUE RESERVOIR LEVEL FLUCTUATION	<ul style="list-style-type: none"> - masque amont - retenue - plot 	<p>Le phénomène MARNAGE DE LA RETENUE représente les variations de niveau de la cote de la retenue d'un barrage, l'amplitude de variation pouvant être importante ou faible selon les ouvrages.</p> <p>Les ouvrages pour lesquels le phénomène MARNAGE DE LA RETENUE est important, sont susceptibles de connaître des mécanismes de vieillissement spécifiques, en particulier des vieillissements des masques ou des parements amont sous l'effet d'action des milieux extérieurs (gel, UV, gradient thermique...).</p>	<p>2.4 - <i>faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées</i> / <u>composant concerné</u> : plot, masque amont, retenue</p> <p>2.5 - <i>faible résistance au gel et dégel</i> / <u>composant concerné</u> : plot, masque amont, retenue</p> <p>3.1 - <i>vieillessement des revêtements amont</i> / <u>composant concerné</u> : masque amont, retenue</p>

<p>QUALITE DE L'EAU WATER COMPOSITION</p>	<p>- fondations amont - plot - masque amont</p>	<p>Le phénomène QUALITE DE L'EAU représente le caractère agressif d'une eau (la retenue ou les eaux d'infiltration) sur un composant du barrage. Il constitue un indicateur, soit de la pureté des eaux, soit de leur acidité, soit de leur concentration en agents agressifs (différentes formes de sulfates).</p> <p>Le phénomène QUALITE DE L'EAU est impliqué dans les processus chimiques de dégradation liés à la dissolution des matériaux.</p>	<p>1.1 - dissolution et érosion dans les fondations / <u>composant concerné</u> : retenue, fondation amont 2.3 – dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu / <u>composant concerné</u> : retenue, plot</p>
<p>HUMIDITE DU MILIEU ENVIRONMENT MOISTURE</p>	<p>- plot</p>	<p>Le phénomène HUMIDITE DU MILIEU représente l'importance de l'humidité de l'environnement extérieur d'un composant ou l'humidité au sein du composant lui-même.</p> <p>Le phénomène HUMIDITE DU MILIEU résulte d'un processus hydraulique au sein d'un composant ou d'un milieu extérieur : eaux d'infiltration... Il constitue un des paramètres du mécanisme chimique d'alcali-réaction des bétons des barrages.</p>	<p>2.2 - retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau / <u>composant concerné</u> : plot</p>
<p>STAGNATION D'EAU WATER STAGNATION</p>	<p>- plot - crête</p>	<p>Le phénomène STAGNATION D'EAU représente la capacité de l'eau, provenant du ruissellement des pluies ou de fuites, à stagner sur des composants du barrage, comme la crête ou le parement aval du plot.</p> <p>Ce phénomène est impliqué dans les mécanismes de dégradation superficielle de composants, en particulier le vieillissement des parements aval ou de la crête sous l'effet d'action des milieux extérieurs (en particulier, cycle gel-dégel).</p>	<p>2.5 – faible résistance au gel et dégel / <u>composant concerné</u> : crête, plot</p>

Famille « flux de charges »			
CHARGES PERMANENTES PERMANENT LOADS	- fondations amont ou aval - plot	Le phénomène CHARGES PERMANENTES représente les sollicitations exercées par les actions permanentes comme la poussée hydrostatique amont. Il intervient dans le mécanisme de fatigue des matériaux du plot, impliquant des contraintes de traction sur la face amont du fait d'un dimensionnement mécanique insuffisant de ce composant.	2.4 – <i>faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées</i> / <u>composant concerné</u> : plot
SOUS-PRESSIONS UPLIFT PRESSURE	- fondations amont ou aval - plot	Le phénomène SOUS-PRESSIONS représente les sollicitations produites par l'action des pressions interstitielles s'exerçant au sein des composants (fondations amont et aval, plot). Le phénomène SOUS-PRESSIONS résulte de l'infiltration d'eau dans le composant étudié et l'importance de ce phénomène est lié au niveau de saturation dans le milieu.	1.1 - <i>dissolution et érosion dans les fondations</i> / <u>composant concerné</u> : fondations amont et aval 1.2 - <i>vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage</i> / <u>composant concerné</u> : fondation amont 2.1 - <i>alcali-réaction</i> / <u>composant concerné</u> : plot 2.3 – <i>dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu</i> / <u>composant concerné</u> : plot 2.4 – <i>faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées</i> / <u>composant concerné</u> : plot
Famille « flux thermique »			
GRADIENT THERMIQUE THERMIC GRADIENT	- masque amont	Le phénomène GRADIENT THERMIQUE représente les variations au cours du temps de la température dans un composant ou une partie du composant. Le phénomène GRADIENT THERMIQUE résulte d'un processus thermique : température du milieu environnant... Il est impliqué dans les mécanismes de dégradations superficielles du masque amont (ou du parement amont). Dans le cas des barrages voûtes, ce phénomène a une importance considérable dans les cycles de déformation du corps de l'ouvrage.	3.1 – <i>vieillissement des revêtements amont</i> / <u>composant concerné</u> : masque amont
CYCLE GEL-DEGEL FREEZING AND THAWING	- plot - crête - masque amont	Le phénomène CYCLE GEL-DEGEL représente les cycles alternatifs de gel et de dégel, liés aux variations au cours du temps de la température sur un composant ou une partie du composant. Le phénomène CYCLE GEL-DEGEL résulte d'un processus thermique : température du milieu environnant... Il est impliqué dans les mécanismes de dégradations superficielles des composants, en particulier le vieillissement du masque amont, du plot ou de la crête.	2.5 – <i>faible résistance au gel et dégel</i> / <u>composant concerné</u> : masque amont, plot 3.1 – <i>vieillissement des revêtements amont</i> / <u>composant concerné</u> : masque amont

Famille « processus conception & réalisation »			
CAPACITE DE DRAINAGE <i>DRAINAGE ABILITY</i>	- fondation aval drainée - dispositif de drainage	<p>Le phénomène CAPACITE DE DRAINAGE représente l'aptitude d'un dispositif de drainage à collecter les eaux d'infiltration.</p> <p>La dégradation du phénomène CAPACITE DE DRAINAGE peut résulter du processus de conception ou de réalisation (diamètre ou réseau de drainage insuffisant, contre-pente ou obstruction de l'exutoire). Elle peut être également la conséquence du colmatage du dispositif de drainage sous l'effet de mécanismes de dissolution ou d'érosion des matériaux.</p>	1.2 - <i>vieillessement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage</i> / <u>composant concerné</u> : fondation aval drainé
CAPACITE DE DEFORMATION <i>DEFORMATION ABILITY</i>	- joints de dilatation	<p>Le phénomène CAPACITE DE DEFORMATION représente l'aptitude des joints de dilatation, placés au moment de la construction entre chaque plot, à absorber les déformations des plots liées à la contraction du béton se produisant lors des mécanismes tels que le retrait du béton.</p> <p>Le phénomène CAPACITE DE DEFORMATION résulte du processus de conception et réalisation du barrage. Une insuffisance de ce phénomène conduit à une fissuration traversante amont-aval des plots dans les zones de plus fortes contraintes.</p>	2.2 - <i>retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau</i> / <u>composant concerné</u> : joints de dilatation
PERMEABILITE <i>PERMEABILITY</i>	- fondations amont ou aval - plot - masque amont	<p>Le phénomène PERMEABILITE qualifie l'aptitude d'un matériau ou d'un composant à être plus ou moins étanche ou perméable (au sens mécanique).</p> <p>Le phénomène PERMEABILITE est impliqué dans le mécanisme de <i>dégradation des composants</i> des barrages (fondations, plot ou masque amont) sous l'effet de la circulation d'eau et de gaz chargés d'agents chimiques agressifs. Ce mécanisme physico-chimique est commandé par l'aptitude de l'eau et des gaz à diffuser dans le béton ou le mortier des composants. Le phénomène PERMEABILITE constitue donc un paramètre fondamental dans le déroulement de ce processus.</p> <p>La PERMEABILITE des matériaux (béton, mortier) dépend principalement de la compacité de la pâte (et donc du dosage et du type de ciment), de l'utilisation d'adjuvants, de la granulométrie des granulats, du rapport eau-ciment et aussi de la mise en œuvre, notamment de la vibration et de la cure.</p>	2.3 – <i>dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu</i> / <u>composant concerné</u> : plot

<p>COMPOSITION INTERNAL COMPOSITION</p>	<ul style="list-style-type: none"> - fondations amont ou aval - plot - masque amont - crête 	<p>Le phénomène COMPOSITION représente la sensibilité plus ou moins grande d'un composant (fondations amont ou aval, plot, masque amont ou crête) à un mécanisme de dégradation, du fait de sa composition chimique ou granulaire.</p> <p>Le phénomène COMPOSITION, concernant les fondations et engagé dans le scénario « érosion et dissolution dans les fondations » (1.2), représente la sensibilité des fondations à la dissolution (composition chimique du matériau) et à l'érosion (composition granulaire) par les eaux d'infiltration. En effet, certaines roches peuvent être altérées sous l'influence de la mise en eau du barrage, soit par transformation chimique, soit par action physique de l'eau. Il en est de même pour les rideaux d'injection des fondations et pour les matériaux de remplissage des joints de roche.</p> <p>Le phénomène COMPOSITION, concernant le composant « plot » et engagé dans le scénario d'alcali-réaction (2.1), représente la sensibilité du matériau du plot à l'alcali-réaction ou à l'attaque des sulfates : l'alcali-réaction dépend de la nature du ciment et des granulats et les bétons les plus exposés aux attaques des sulfates sont principalement ceux fabriqués avec du ciment Portland.</p> <p>Le phénomène COMPOSITION, concernant le composant « plot » et engagé dans le scénario de « dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu » (2.3), représente la sensibilité du matériau du plot à la dissolution par des agents agressifs. La qualité du béton et du mortier du plot est déterminante dans ce mécanisme. Les améliorations de la technologie du béton, comme une meilleur adéquation des ciments, l'abaissement du rapport eau/ciment, les études plus sûres de la granulométrie donnent des conditions plus satisfaisantes vis-à-vis des actions des eaux agressives.</p> <p>Le phénomène COMPOSITION, concernant les composants « masque amont, crête et plot » et engagé dans les scénarios « faible résistance au gel et dégel » (2.5) et « vieillissement des revêtements amont » (3.1), représente la sensibilité des matériaux au gel (matériaux gélifs) et à l'action des UV ou aux gradients thermiques.</p> <p>A titres d'exemples, les masques amont de type gunites armées, constituées de couches continues de mortier de ciment d'une dizaine de cm armé d'un treillis métallique, ont montré leur fragilité. Leur dégradation classique est un faïençage suivi d'un décollement par plaques. Les</p>	<p>1.1 - dissolution et érosion dans les fondations / <u>composant concerné</u> : fondation amont</p> <p>2.1 - réactions chimiques (alcali-réaction, actions des sulfates) conduisant à un gonflement / <u>composant concerné</u> : plot</p> <p>2.2 - retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau / <u>composant concerné</u> : plot</p> <p>2.3 – dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu / <u>composant concerné</u> : plot</p> <p>2.5 – faible résistance au gel et dégel / <u>composant concerné</u> : masque amont, crête, plot</p> <p>3.1 – vieillissement des revêtements amont / <u>composant concerné</u> : masque amont</p>
---	---	---	--

		<p>fissures sont dues au retrait du mortier puis aux variations de température, les déformations étant gênées par l'adhérence de la gunite sur son support.</p> <p>Pour les revêtements amont des barrages en maçonnerie, les joints de moellons sont garnis de mortier lissé. De tels revêtements utilisés en montagne sur les barrages poids constituent une bonne protection contre l'action des cycles gel-dégel et l'abrasion des glaces. En revanche, l'efficacité de ces revêtements laisse à désirer en ce qui concerne leur étanchéité. Le mortier de garnissage des joints se détériore sous l'action des cycles d'imbibition-dessiccation et de gel-dégel, des variations rapides de température et des déformations du barrage.</p>	
--	--	---	--

ANNEXE 8

Phénomènes et symptômes associés

Cette annexe 8 récapitule, composant par composant, les phénomènes susceptibles d'apparaître dans les scénarios de vieillissement des barrages poids et leurs symptômes associés.

Les phénomènes sont issus de la classification et des choix terminologiques établis, résumés dans le glossaire des phénomènes (annexe 7).

Pour chaque phénomène rattaché à un composant, nous trouvons dans les tableaux qui suivent leurs symptômes associés. Nous avons donc ainsi une synthèse des symptômes qu'il convient d'examiner pour chaque composant d'un barrage, susceptibles de renseigner un phénomène lié à un mécanisme de vieillissement.

Les choix terminologiques des symptômes ont été établis au regard des termes utilisés dans les recueils d'expertise. Par ailleurs, leur sémantique correspond à celle d'une observation à l'œil (symptôme visuel) ou d'une mesure d'un instrument (symptôme ausculté).

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°1 : <i>Fondations amont injectées</i>	Etat intrinsèque du composant	déformation	~ déplacements des joints du rocher
		fissuration	~ fissures ~ mesures de la perméabilité
		dissolution	~ mesures de la teneur en sels minéraux des eaux de drainage ~ mesures de la perméabilité
		érosion	~ mesures de la perméabilité ~ dépôts de particules fines à la sortie des drains
	Processus de conception	composition	~ essais au labo et in situ
		qualité de l'eau	~ mesures de la pureté et de la minéralisation de l'eau
	Flux hydraulique	eaux d'infiltration dans les fondations amont injectées	~ écoulements dans la fondation amont
	Flux de charges	sous-pressions dans les fondations amont injectées	~ piézométrie

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°2 : Fondations aval drainées	Etat intrinsèque du composant	colmatage	~ mesures des débits de drainage ~ constat de l'état des drains
	Processus de conception	capacité de drainage	~ densité et taille des drains
	Flux hydraulique	eaux d'infiltration dans les fondations aval drainées	~ écoulement souterrain d'eau ~ mesures des débits de drainage
		eaux d'infiltration vers l'aval	~ fuites ~ mesures des débits de fuites
	Flux de charges	sous-pressions dans les fondations aval drainées	~ piézométrie

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°3 : Galerie de drainage et vidange	Etat intrinsèque du composant	colmatage de la galerie	~ mesures des débits de drainage
	Processus de conception	capacité de drainage et de vidange de la galerie	~ mesures des débits de drainage et de vidange

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°4 : Plot	Etat intrinsèque du composant	déformation	~ mesures des déplacements vers le haut et vers l'amont ~ mesures des déplacements vers l'aval ~ mesures des déplacements vers la base
		fissuration	~ fissures en forme de faïençage sur le parement amont ~ fissures en forme d'écaille sur le parement amont ~ fissures en forme d'écaille sur le parement aval ~ fissures structurales ~ fissures plongeantes en pied ~ fissures verticales traversantes ~ ouverture de l'interface béton-rocher ~ ouvertures des joints verticaux ~ ouvertures des reprises de bétonnage ~ mesures du développement des fissures
		dissolution	~ mesures du poids volumique ~ dépôt de calcite sur le parement aval ~ mesures de la teneur en carbonates des eaux de fuites
		perméabilité	~ mesures de la perméabilité

	Processus de conception	composition	~ mesures en labo et in situ
		qualité de l'eau	~ mesures de la pureté et de la minéralisation de l'eau
	Flux hydraulique	eaux d'infiltration dans le plot	~ fuites sur le parement aval ~ résurgences d'eau au contact béton fondation ~ mesures du débit des fuites
		marnage de la retenue	~ mesures de la côte de la retenue
		humidité relative du milieu extérieur	~ hygrométrie
		stagnation d'eau sur le plot	~ présence d'eau sur le parement aval
	Flux de charges	sous-pressions dans le plot	~ piézométrie
		charges permanentes agissant sur le plot	~ niveau du plan d'eau
		poussée des glaces	~ couche de glace en surface de la retenue
	Flux thermique	cycles gel-dégel	~ thermométrie

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°5 : <i>Masque amont</i>	Etat intrinsèque du composant	déformation	~ ventres rentrants et sortants (membrane souple)
		fissuration	~ fissures en forme d'écailles ~ microfissures ~ fissures en forme de faïençage ~ fissures horizontales ~ fissures en forme d'écaille ~ fissures verticales traversantes ~ fissures horizontales en pied du masque amont ~ mesures du développement des fissures
		dissolution	~ granulats apparents ~ mesures de la teneur en carbonate des eaux de fuites
	Processus de conception	composition	~ mesures en labo et in situ
		perméabilité	~ mesures en laboratoire et in situ
		qualité de l'eau	~ mesures de la pureté et de la minéralisation de l'eau
	Flux hydraulique	marnage de la retenue	~ mesures de la côte d'eau
		eaux d'infiltration vers le plot	~ mesures du débit de drainage
		eaux d'infiltration vers le réseau de drainage	~ mesures du débit de drainage
	Flux thermique	cycles de gel-dégel	~ thermométrie
		gradients thermiques	~ thermométrie

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°6 : Réseau de drainage	Etat intrinsèque du composant	colmatage du réseau de drainage	~ mesures des débits de drainage ~ constat de l'état des drains
	Processus de conception	composition du réseau de drainage	~ densité et taille des drains
		composition du réseau de drainage	~ protection thermique
		capacité de drainage	~ mesures des débits de drainage
	Flux thermique	gradient thermique	~ thermométrie

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°7 : Recharge aval	Etat intrinsèque du composant	déformation	~ observation de fissures longitudinales ~ observation de glissement
		colmatage	~ mesures des débits de drainage de la recharge ~ constat de l'état des drains de la recharge
	Processus de conception	composition de la recharge aval	~ essais de mécanique des sols
		capacité de drainage	~ densité et taille des drains de la recharge
	Flux hydraulique	sous-pressions dans la recharge	~ piézométrie dans la recharge

Phénomènes et symptômes associés

Composant	Classification	phénomène	Symptômes associés
n°8 : Crête	Etat intrinsèque du composant	déformation	~ mesures des déplacements vers le haut et vers l'amont
		fissuration	~ fissures en forme d'écaille ~ mesures du développement des fissures
	Processus de conception	composition	~ mesures en laboratoire et in situ
	Flux hydraulique	stagnation d'eau sur la crête	~ flaches
		eaux d'infiltration dans le plot	~ fuites sur le parement aval
	Flux thermique	cycles de gel-dégel	~ thermométrie

ANNEXE 9

Les principaux dispositifs d'auscultation des barrages (d'après [POUPART,01])

De nombreux instruments de mesure sont disponibles pour l'auscultation des barrages. On décrit ci-après les plus couramment utilisés en France.

❶ Pour la mesure des déplacements

Les pendules - direct ou inversé - équipés d'une table de lecture dite "à pointes de visées", assurent une précision de l'ordre de 1/10 mm (Figure 1). Le pendule présente toutes les qualités exigées des appareils d'auscultation ; on peut effectuer des lectures fréquentes, en toutes saisons. L'installation de plusieurs lignes de pendules, au stade de la construction, ne pose aucun problème, que ce soit en puits ou en parements extérieurs. Ils peuvent également être installés sur de nombreux ouvrages existants où ils remplacent alors avantageusement les mesures topographiques. Le pendule est un instrument facilement automatisable, mais dans ce cas, il est toujours recommandé de conserver des mesures manuelles aux fins de vérification.

En complément des mesures effectuées sur des capteurs installés dans ou sur l'ouvrage, les **mesures topographiques** constituent un autre moyen d'obtention des déplacements. Ces mesures sont d'une mise en œuvre assez lourde, en temps et en technicité nécessaire, et d'une précision inférieure aux capteurs installés à demeure. Elles demeurent, néanmoins, le seul moyen de mesures de déplacement dans de nombreux ouvrages où d'autres moyens de mesures ne sont pas envisageables, techniquement ou économiquement. Trois méthodes sont employées sur les barrages :

- *La planimétrie*, par triangulation à partir de piliers situés autour de l'ouvrage ; on complète parfois les mesures angulaires par des mesures de distancemétrie. On accorde ensuite beaucoup d'attention aux calculs des déplacements, par utilisation de méthodes de compensation d'erreurs et par détermination de la fixité des piliers d'observations (méthode de Helmert). Cette méthode est utilisée sur des barrages de tous types et des glissements de terrain. L'ellipse d'incertitude de la mesure doit être précisée par le topographe (Figure 2) ; elle dépend de la configuration de l'ouvrage et de l'implantation des plots de visée. De l'ordre du millimètre (et parfois moins) dans les situations favorables, l'incertitude peut atteindre plusieurs millimètres pour des vallées larges, ce qui peut conduire à délaissé ce type de dispositif.
- *Le nivellement* donnant le déplacement vertical des repères installés sur les ouvrages. Cette méthode est utilisée pour la mesure des tassements de barrages en remblai. Complément indispensable de la planimétrie pour les grands barrages, le nivellement est souvent le seul suivi topographique des petits barrages, dont la hauteur ne justifie pas de mettre en place les lourds dispositifs de triangulation.

- *Les mesures d'alignement*, faites sur des repères scellés sur le couronnement de l'ouvrage, à partir de piliers implantés sur les rives, dans l'alignement des repères. Les mesures à l'alidade permettent d'obtenir le déplacement dans le sens amont - aval. Ces mesures, dont la précision est de l'ordre du millimètre sont bien adaptées à des barrages rectilignes, de taille moyenne et de tous types.

② Pour la mesure des déformations

Les extensomètres "à corde vibrante" (Figure 3), donnant la déformation du béton, ont été installés en grande quantité dans les barrages. Appareil sensible et fiable, il donne des indications importantes sur l'évolution des déformations internes, notamment pendant le début de la vie de l'ouvrage lorsque retrait et fluage sont importants.

Les extensomètres multipoints (appelés également distofors) à longue base sont présents dans quelques fondations rocheuses et sur certaines structures. Malgré une certaine fragilité, ils sont extrêmement utiles pour mesurer des déplacements sur des distances allant de quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres. Ils sont particulièrement bien adaptés à la mesure de l'ouverture du pied amont des voûtes.

Les fissuromètres sont installés sur une fissure ou un joint dont on veut suivre l'évolution. On mesure les déplacements relatifs des deux lèvres de la fissure, au moins dans l'axe perpendiculaire à son plan. Dans cette famille il existe une gamme d'instruments, du plus simple au plus sophistiqué :

- le *fissuromètre avec mesure au vernier* (précision du $1/10^e$ de mm, mesure sur un axe) ;
- le *fissuromètre avec mesure au comparateur* (précision du $1/100^e$ de mm, mesure sur un axe) ;
- le *fissuromètre avec capteur inductif* (précision du $1/100^e$ de mm, mais nécessité d'une alimentation électrique) ;
- le *vinchon*, qui est un fissuromètre triaxial (Figure 4) dont la mesure se fait au pied à coulisse avec une précision de lecture au $1/100^e$ de mm.

③ Pour la mesure de la piézométrie

La mesure de la piézométrie dans les remblais est réalisée par des **cellules à contre-pression ou à corde vibrante** (Figure 5), regroupés sous la dénomination **cellule de pression interstitielle**. La pression interstitielle régnant localement dans le remblai est transmise par une pierre poreuse au dispositif de mesure. Les cellules sont posées pendant la construction du remblai et, selon le type, un câble ou des tubulures transmettent l'information au poste de mesure situé dans un local. Le soin apporté à la pose de ces cellules est primordial pour la qualité des mesures ultérieures, d'autant que ces appareils ne sont ni réparables ni remplaçables (sauf installation dans un nouveau forage). Les cellules à corde vibrante sont recommandées pour leur longévité (mis à part les problèmes de fluage dans le temps). Leur précision est de l'ordre du demi pour cent (soit 5 cm de colonne d'eau pour une cellule 0-1 bar).

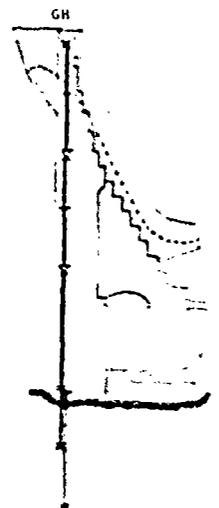
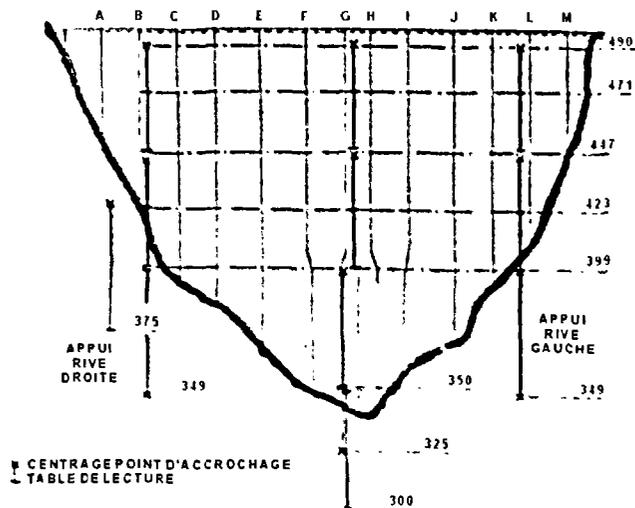
Les piézomètres sont bien adaptés à la mesure du niveau piézométrique dans les fondations (Figure 6). Il s'agit de forages de faible diamètre, équipés de crépines dans les sols meubles, à l'intérieur desquels s'établit un niveau d'eau en équilibre avec le niveau de la nappe phréatique environnante. La "chambre de mesure" est, le plus souvent, limitée à une courte partie du forage, la longueur restante étant isolée par un tubage et un coulis étanche. La mesure est basée sur une lecture directe au moyen d'une sonde électrique, au manomètre (si le forage est artésien) ou par une cellule placée dans la chambre de mesure. L'importance du volume de cette chambre de mesure et de sa perméabilité sont primordiales.

On utilise parfois des piézomètres à chambre de mesure longue, en vue de détecter des zones de venues d'eau (par exemple en aval du système de drainage d'un remblai) ; il faut alors veiller que le piézomètre ne crée pas de communications indésirables entre des zones théoriquement séparées. La mesure de niveau ne sera alors pas vraiment représentative d'un niveau piézométrique.

④ Pour la mesure des débits

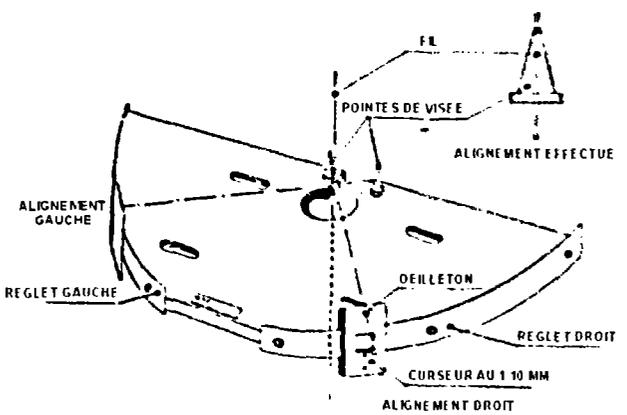
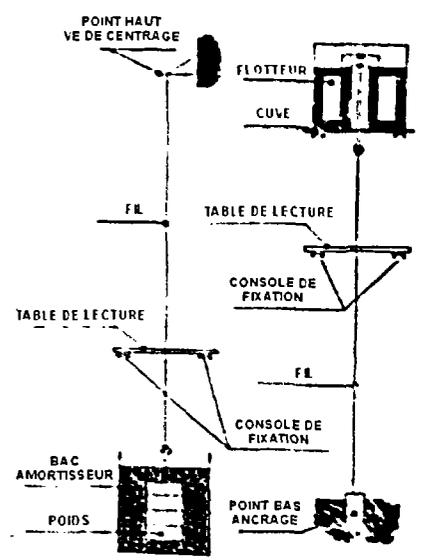
La mesure des débits de fuite ou de drainage est faite suivant deux types de méthodes, en fonction de l'importance des débits à mesurer. Pour des valeurs inférieures à environ 10 l/min, on utilise une *capacité graduée* (mesure par *empotement*) dont on observe le remplissage pendant une durée fixée (en général 30 s à 1 mn) ; au-dessus de ces valeurs, la mesure se fait par *déversoir*, mobile puis fixe, et dont le seuil est triangulaire ou rectangulaire suivant le débit à mesurer (Figure 7).

Le dispositif d'auscultation est spécifique à chaque barrage et dépend avant tout de son type. Les figures 8 et 9 indiquent les dispositifs types équipant respectivement les barrages poids et les barrages en remblai.



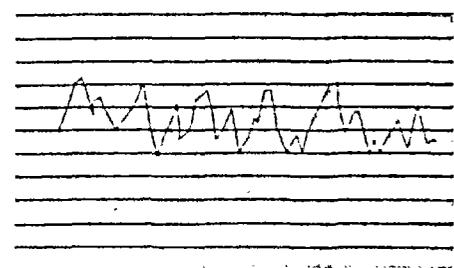
SCHEMA D'UN DISPOSITIF DE PENDULE : VUE D'AVANT

COUPE



PENDULE DIRECT PENDULE INVERSE

TABLE DE VISEE

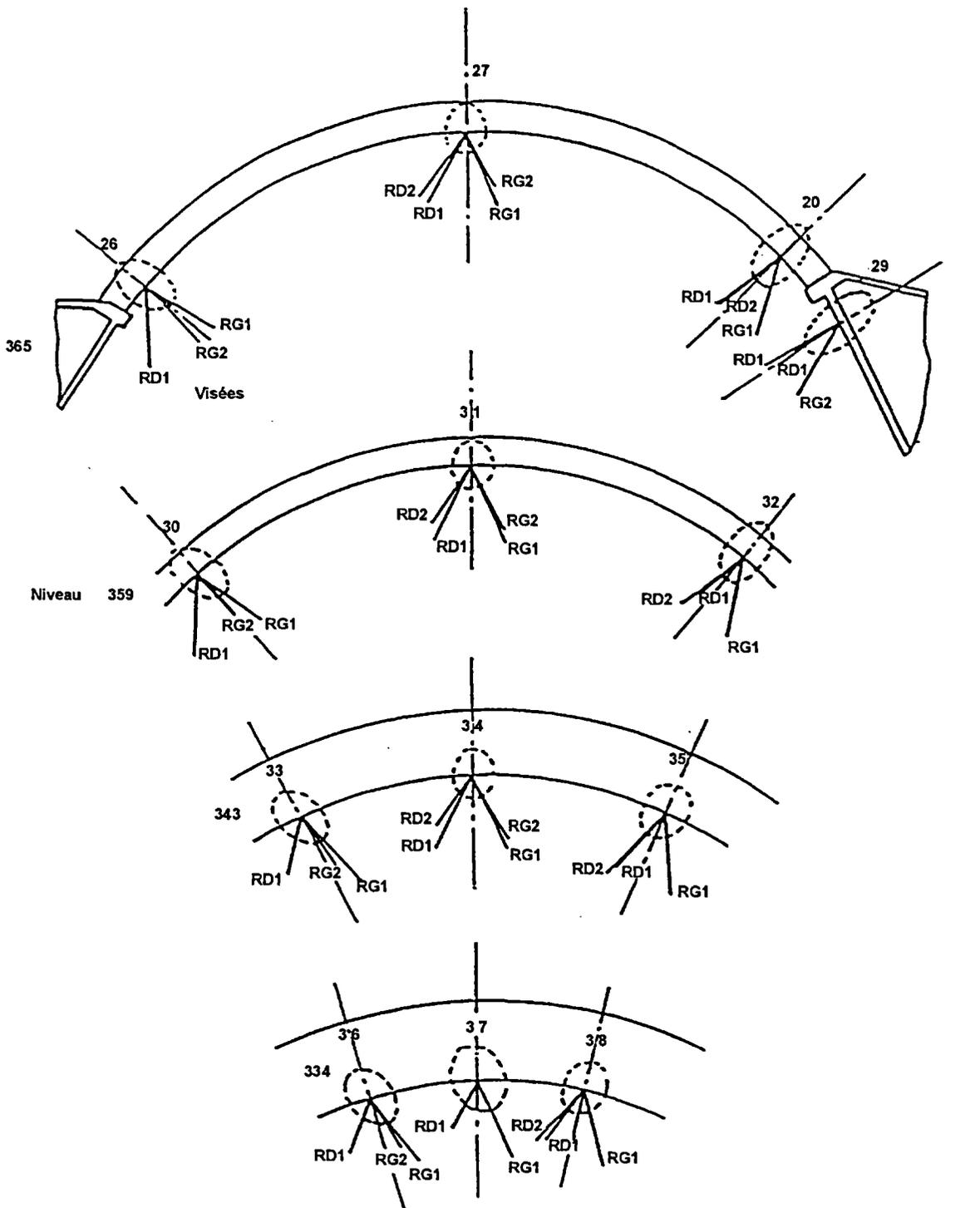


EXEMPLE DE DEPLACEMENTS D'UN PENDULE DIRECT OU INVERSE AU COURS DU TEMPS

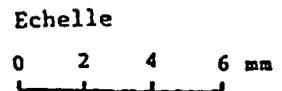
PRECISION DE LA MESURE 1/10° DE MM

Fig. 1 – Appareil de mesure des déplacements relatifs. Pendule à table de visée (source EDF)

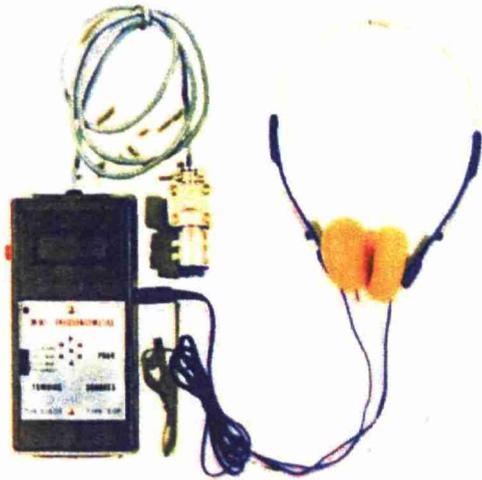
Ellipses d'incertitude



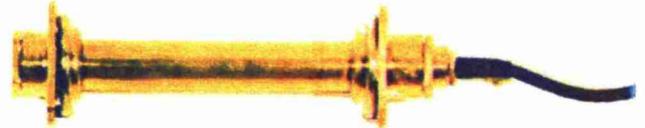
Ellipses d'incertitude de détermination
 (à 87 % avec précision des mesures $\eta = 2''$)



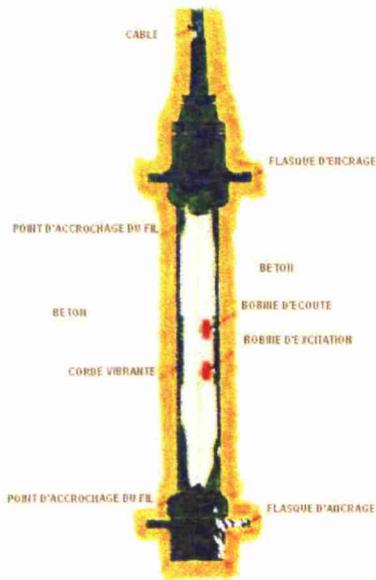
*Fig. 2 – Mesures de déplacements horizontaux par planimétrie
 . Ellipses d'incertitude (source EDF)*



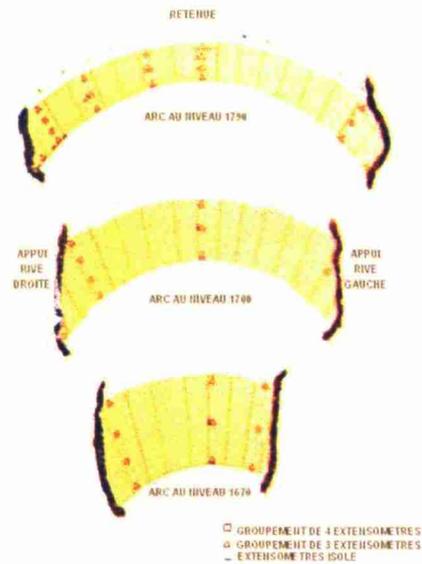
**MINIFREQUENCEMETRE
DE TERRAIN**



EXTENSOMETRE TELEMAT



PRINCIPE :
LA FREQUENCE MESUREE
EN FAISANT VIBRER LA CORDE
DEPEND ENTRE AUTRES
DE SA TENSION



**DISPOSITIF D'IMPLANTATION
DES EXTENSOMETRES
DANS UNE VOUTE**

PRECISION DE LA MESURE : 5 MICRONS PAR METRE

*Fig. 3 – Appareil de mesure des allongements, des raccourcissements dans le béton.
Extensomètre à corde vibrante (source EDF)*

- 1 - Joint entre plots
- 2 - Déplacement vertical (glissement)
- 3 - Déplacement latéral (ouverture)
- 4 - Déplacement avant-arrière (rejet)

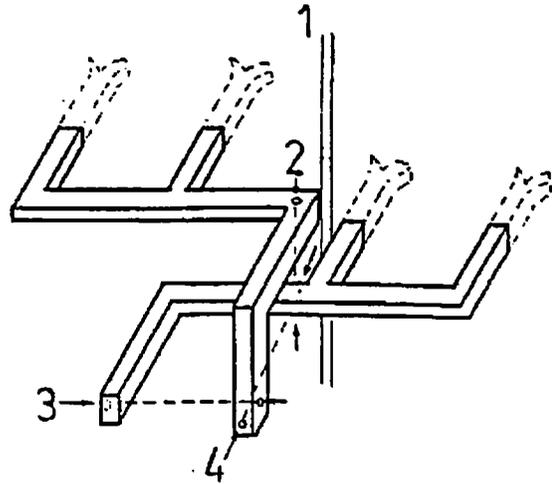


Fig. 4 – Vinchon triaxial



Vue extérieure de la sonde
(d'après catalogue TELEMAR)

Coupe schématique du capteur
(d'après catalogue GLÖTZL)

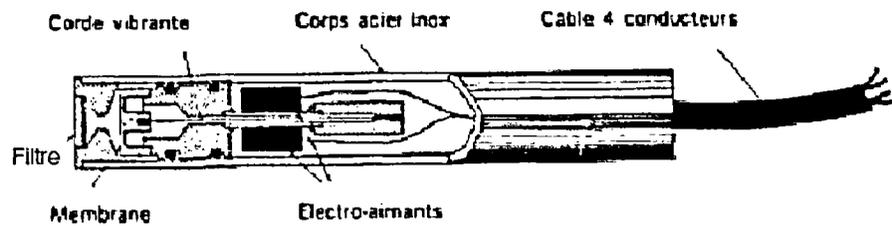
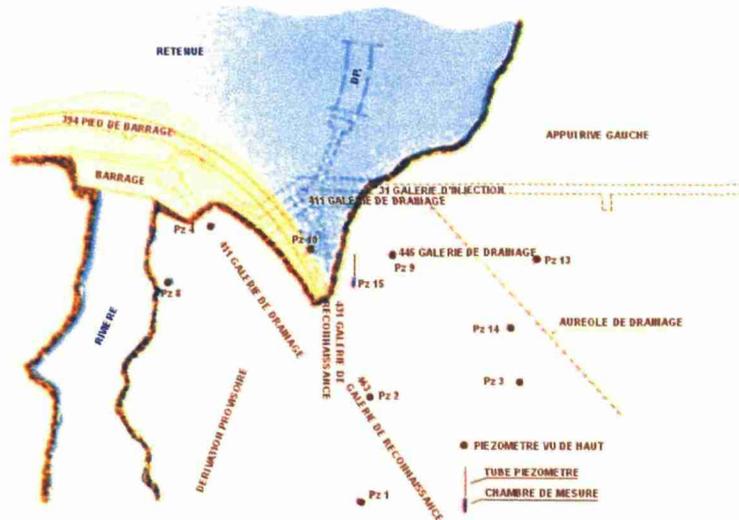
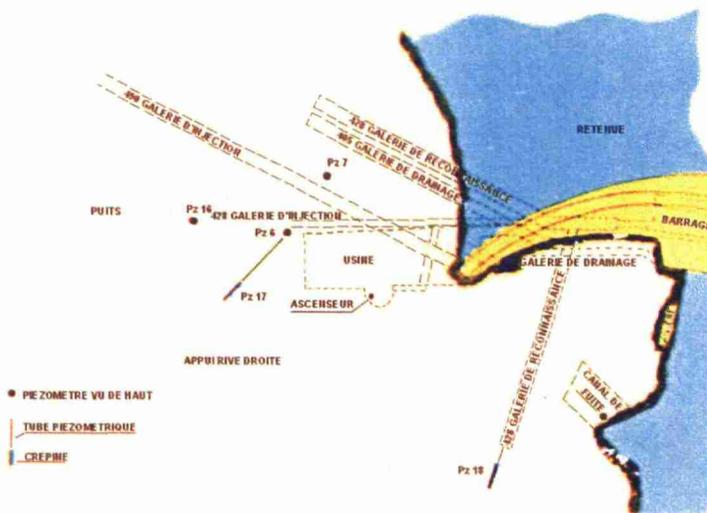
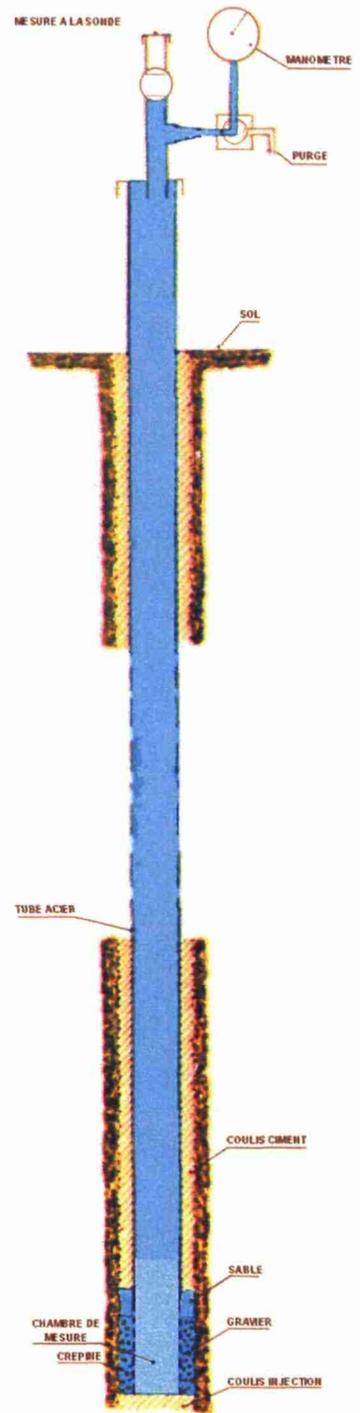


Fig. 5 – Cellule de pression à corde vibrante



**DISPOSITIF DE MESURE PIEZOMETRIQUE
D'UN BARRAGE VOUTE
DANS L'APPUI RIVE GAUCHE**



DANS L'APPUI RIVE DROITE

PRINCIPE DE LA MESURE :

PRECISION DE LA MESURE : 5 CENTIMETRE D'EAU

Fig. 6 – Mesure des pressions d'eau. Piézomètre (source EDF)



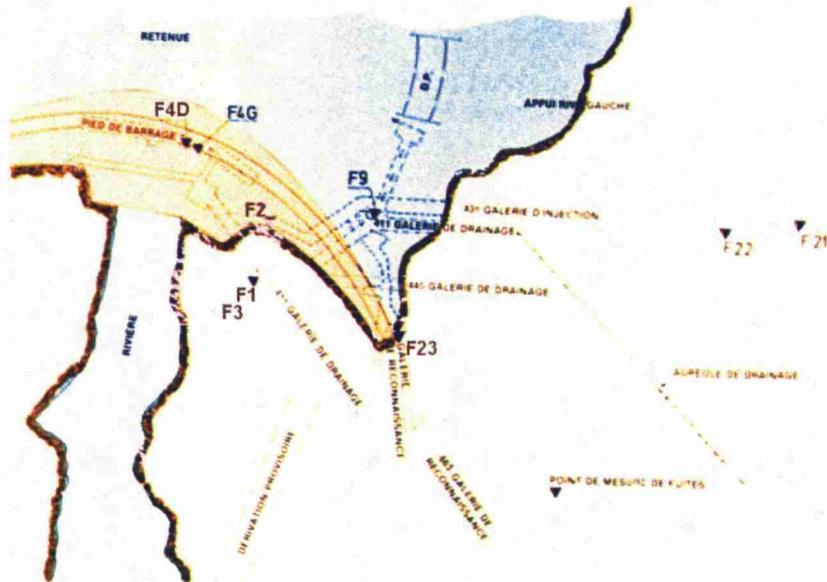
▼ **MESURE PAR
DEVERSOIR FIXE**



▼ **MESURE PAR
DEVERSOIR MOBILE**



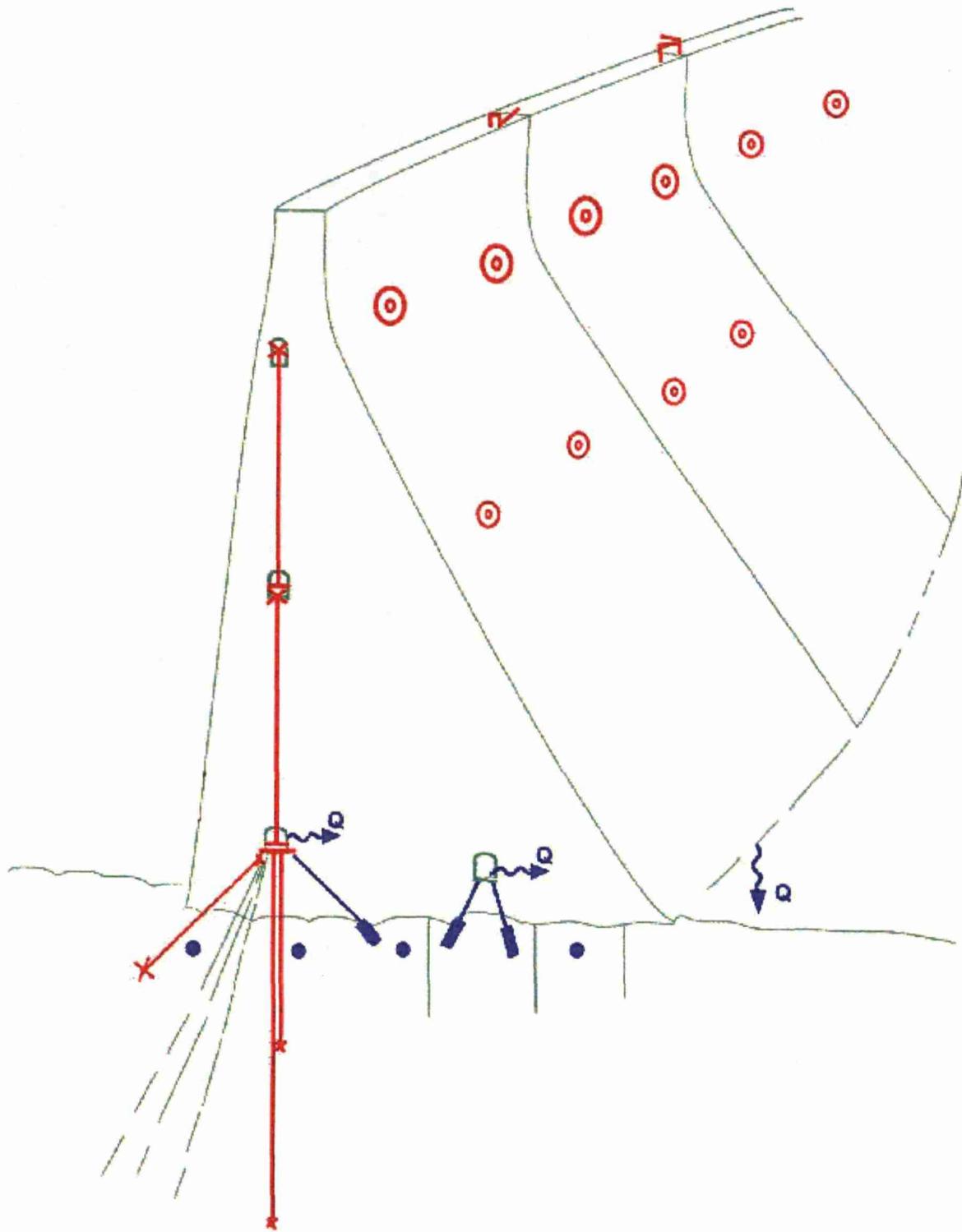
▼ **MESURE PAR
CAPACITE
(SUR 30 SECONDES)**



**DISPOSITIF PARTIEL DE MESURE DES DEBITS DE FUITES
DANS UN BARRAGE VOUTE**

PRECISION DE LA MESURE : 2 %

Fig. 7 – Appareils de mesure des débits de fuite (source EDF)



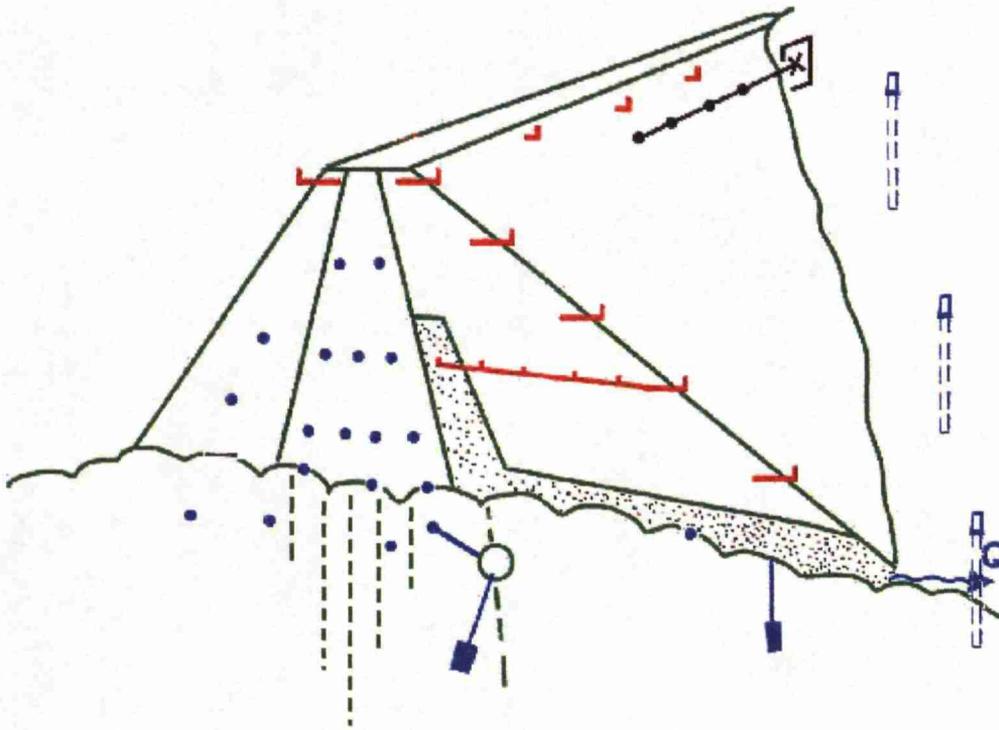
- ⊙ : Cocardes de visée topographique
- : Cellules de pression interstitielle
- ⌒ : Vinchons

-  : Drain
-  : Pendule

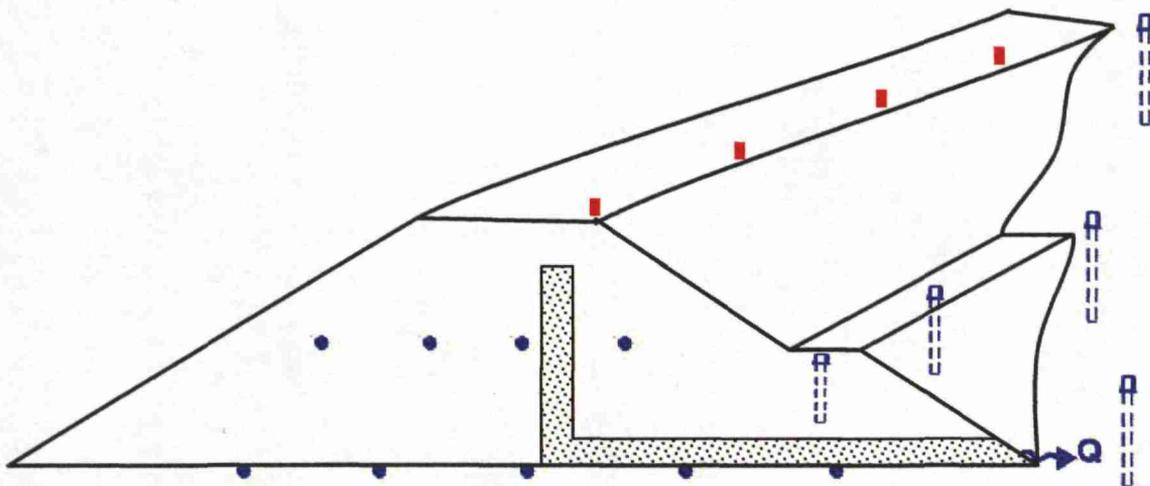
Extensomètre
à base longue :



Fig. 8 – Dispositif d'auscultation pour un barrage poids (source EDF)



Barrage en remblai à noyau central étanche



Barrage en remblai homogène

- Cellule de pression interstitielle
- Repères de tassement
- Drain
- Tassomètre (furet)
- Repère topographique (poutre dans le remblai)
- Piézomètre

Fig. 9 – Dispositif pour les barrages en remblai (source EDF)

ANNEXE 10

Collection des scénarios de vieillissement modélisés relatifs aux barrages poids

Pour modéliser un scénario de vieillissement, nous procédons en deux étapes :

Etape ① : *analyse des recueils d'expertise*

A partir des différents recueils d'expertise disponibles (partie 2), nous analysons en détail les processus physiques de vieillissement. Nous cherchons les séquences successives de défaillance, leurs causes, leurs effets et leurs symptômes. Dans cette analyse, nous transcrivons le mécanisme de vieillissement en une succession de défaillances fonctionnelles.

Etape ② : *modélisation des séquences de défaillances*

A partir du modèle de vieillissement, nous représentons le scénario fonctionnel sous forme de graphe orienté. Nous utilisons, pour cela, la terminologie proposée pour les différentes variables (fonctions, phénomènes et symptômes).

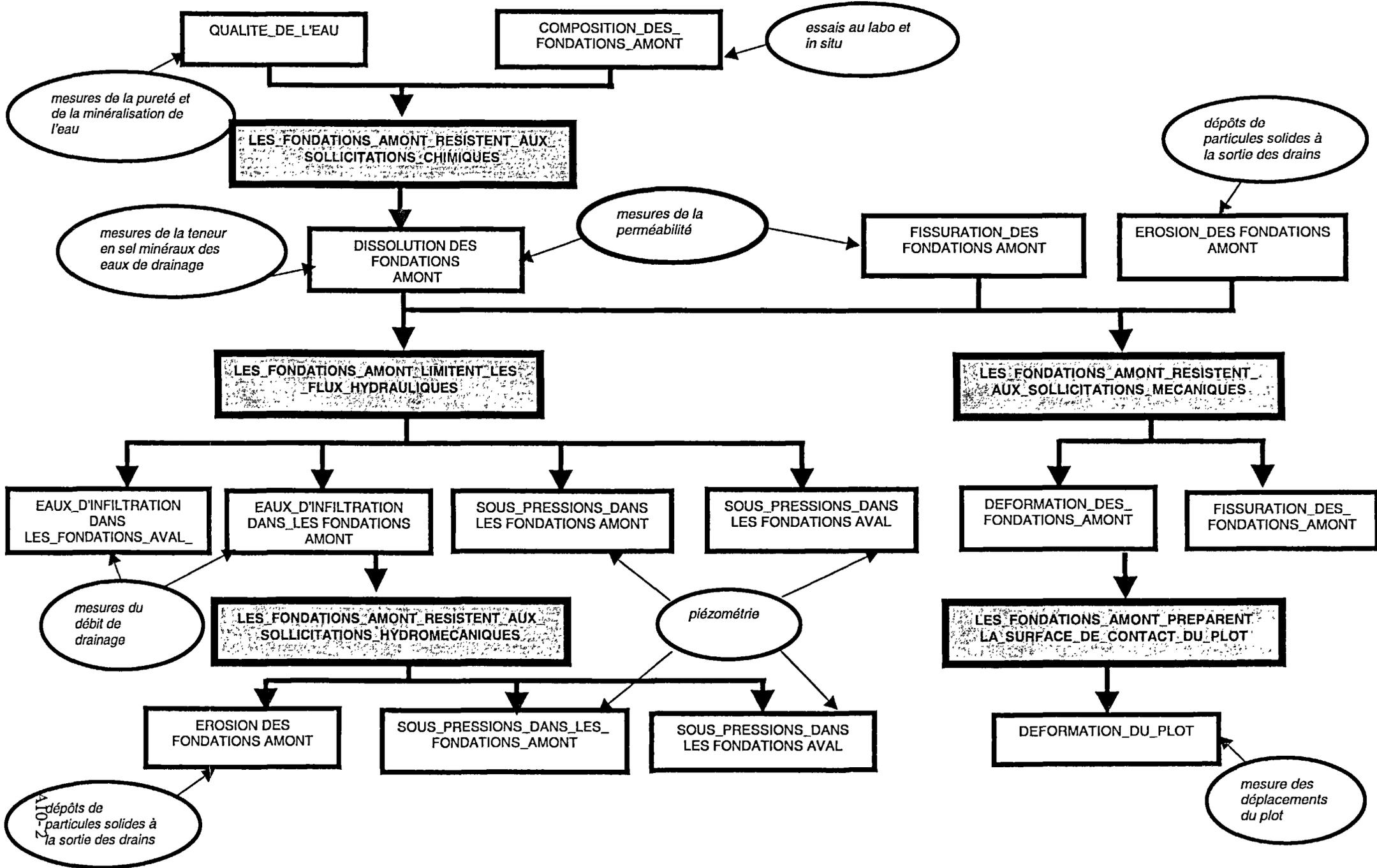
Au total, ce sont 8 mécanismes qui ont été analysés et représentés sous forme de graphe orienté :

PRINCIPAL COMPOSANT DEGRADE	SCENARIO DE VIEILLISSEMENT
Fondation (rocher)	1.2 Erosion et dissolution 1.3 Vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage
Corps du barrage (béton ou maçonnerie)	2.1 Réactions chimiques conduisant à un gonflement 2.2 Retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau 2.3 Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu 2.4 Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées 2.5 Faible résistance au gel et dégel
Masque amont	2.6 Vieillissement des revêtements amont

Chaque scénario ainsi modélisé est accompagné d'un tableau récapitulant les informations issues de l'analyse des recueils d'expertise, qui permet à l'ingénieur spécialisé de trouver des informations plus précises sur le mécanisme de vieillissement. En particulier, nous indiquons en complément des phénomènes et des symptômes figurant dans le graphe causal :

- les phénomènes synonymes ou équivalents utilisés par les experts dans les recueils ;
- les termes apportant de la précision et correspondant aux phénomènes décrits à la granularité inférieure (au niveau du sous-composant ou du matériau) ;
- les symptômes, décrits également aux granularités intermédiaire et inférieure.

Scénario 1.1 :
Dissolution et érosion des fondations

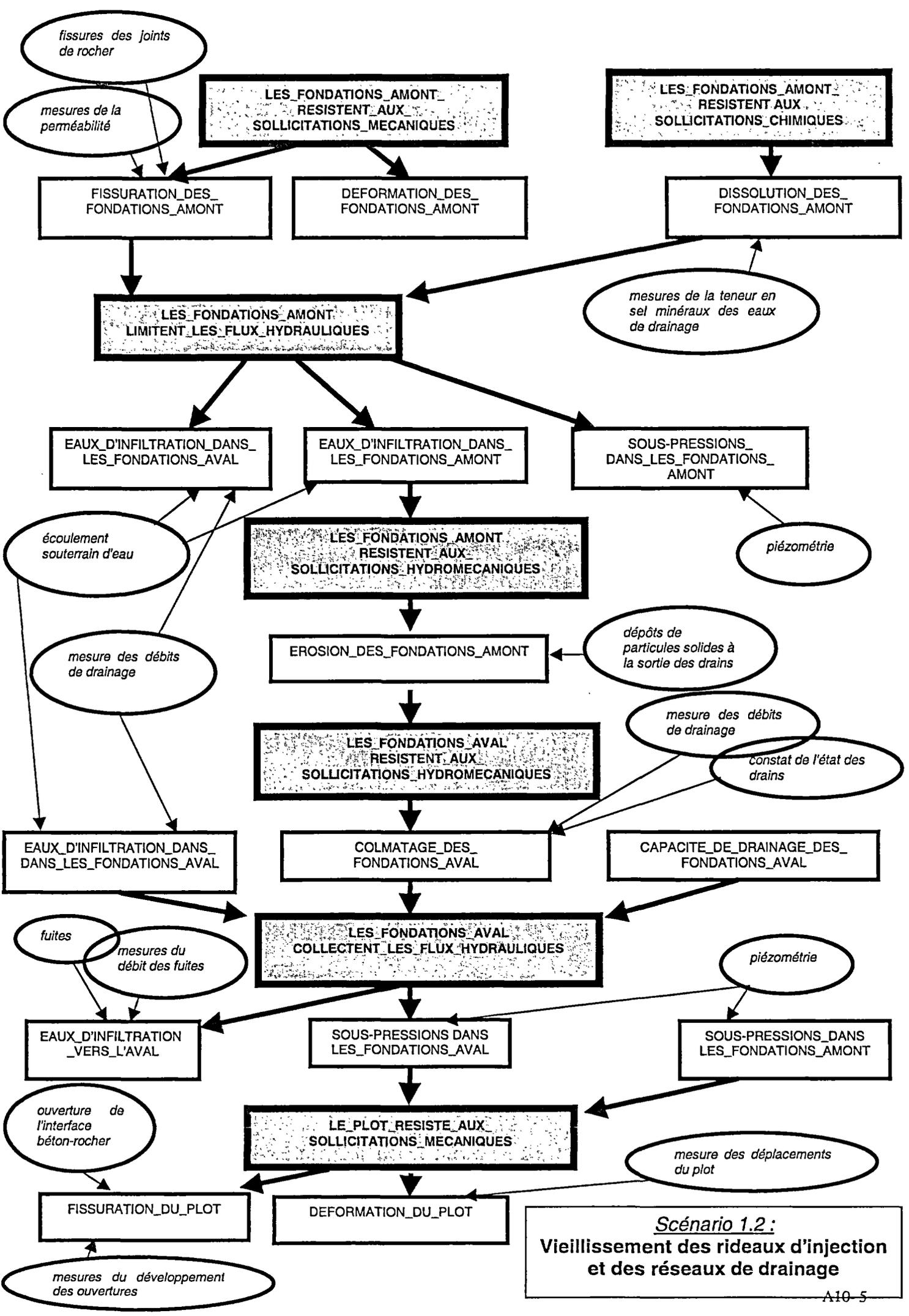


composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes
FONDATEMENTS AMONT INJECTÉES	Etat intrinsèque du composant	déformation des fondations amont injectées	mouvement des fondations amont injectées	déformation du rocher	- déplacements des joints du rocher de fondation (pour mémoire)
		dissolution des fondations amont injectées		- dissolutions de matériaux de la roche	- mesures de la teneur en sels minéraux des eaux de drainage - mesure de la perméabilité
				- dissolution des matériaux de remplissage des discontinuités	
				- dissolution des matériaux des fondations meubles - dissolution des matériaux injectés	
	érosion des fondations amont injectées	renard (pour des fondations meubles)	- entraînement de matériaux de la roche	- dépôts de particules solides à la sortie des drains - mesure de la perméabilité	
			- entraînement de matériaux du remplissage des discontinuités		
			- entraînement des matériaux des fondations meubles - entraînement des matériaux des rideaux d'injection		
	fissuration des fondations amont			- mesure de la perméabilité - observation de fissures	
	Processus de conception	composition des fondations amont injectées		composition du rocher - composition du coulis d'injection	- essais en labo et in situ
		qualité de l'eau	- eaux pures - eaux agressives		- mesure de la pureté et minéralisation de l'eau
Flux hydrauliques	eaux d'infiltration dans les fondations amont injectées	- circulation d'eau dans les fondations amont injectées		- écoulements dans les fondations	

Scénario 1.1 : Dissolution et érosion des fondations

composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes
FONDATEMENTS AMONT INJECTÉES	Flux de charges	sous-pressions dans les fondations amont injectées		pressions interstitielles	piézométrie
FONDATEMENTS AVAL DRAINÉES	Flux hydrauliques	eaux d'infiltration dans les fondations aval			- écoulement souterrain d'eau - mesures des débits de drainage
		eaux d'infiltration vers l'aval			- fuites - mesures des débits de drainage
	Flux de charges	sous-pressions dans les fondations aval drainées		pressions interstitielles	piézométrie
PLOT	Etat intrinsèque du composant	déformation du plot		- déformation du béton	- mesures des déplacements

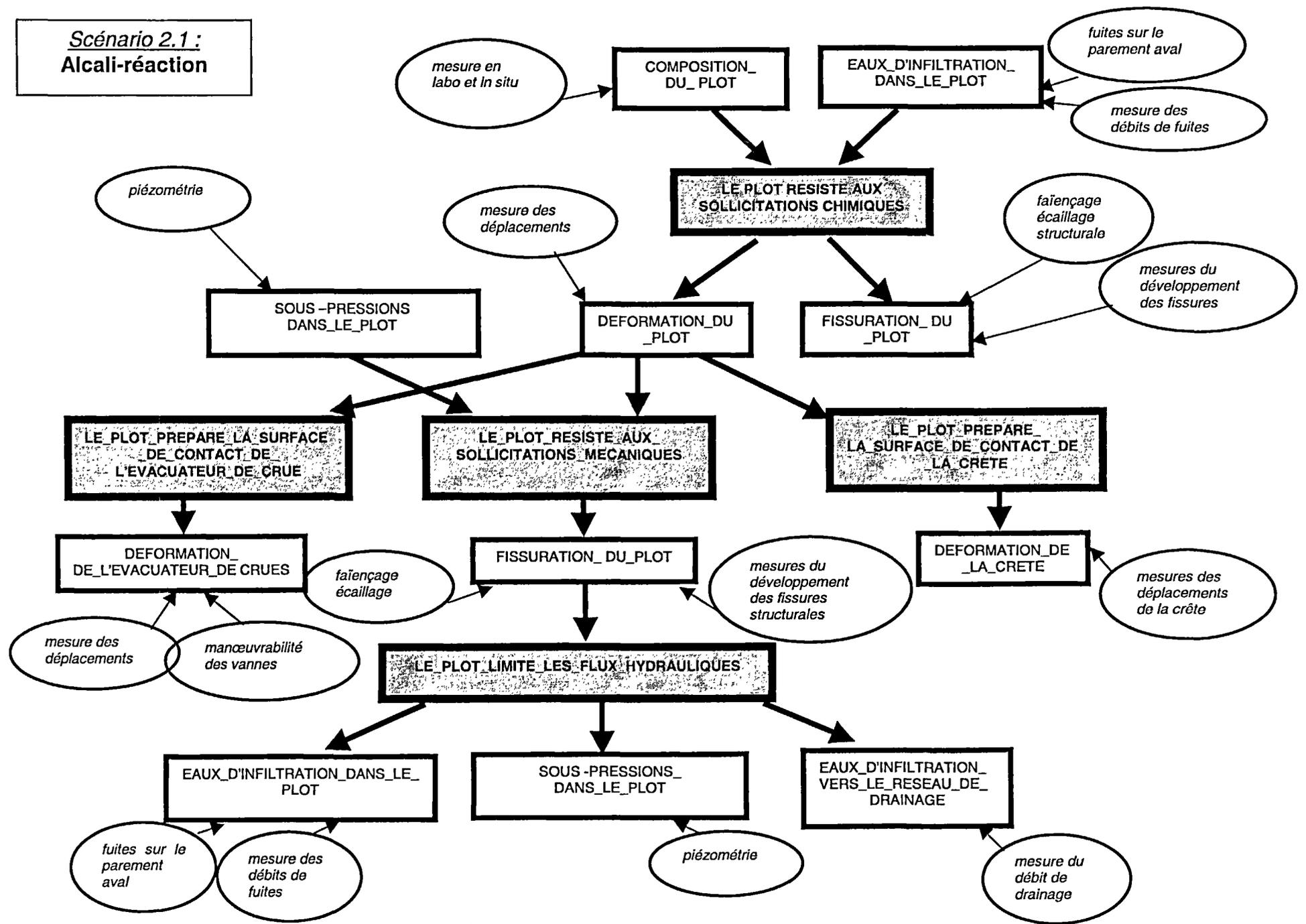
Scénario 1.1 : Dissolution et érosion des fondations



composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes
FONDACTIONS AMONT INJECTÉES	Etat Intrinsèque du composant	déformation des fondations amont injectées		déformation du rocher	- déplacements des joints de roche (pour mémoire)
		fissuration des fondations amont injectées			- fissures - mesure de la perméabilité
		dissolution des fondations amont injectées		-dissolution du coulis d'injection	- mesures de la teneur en sels minéraux des eaux de drainage
		érosion des fondations amont injectées	renard (pour les fondations meubles)	- entraînement de matériaux de la roche - entraînement de matériaux de remplissage des discontinuités - entraînement des matériaux des rideaux d'injection - entraînement des matériaux des joints de roches	- dépôts de particules fines à la sortie des drains - mesure de la perméabilité
	Flux hydrauliques	eaux d'infiltration dans les fondations amont injectées	- eaux d'infiltration au travers des fondations amont injectées - percolations	étanchéité du rideau d'injection	- écoulements dans la fondation amont
	Flux de charges	sous-pressions dans les fondations amont injectées		pressions interstitielles	- piézométrie
FONDACTIONS AVAL DRAINÉES	Etat Intrinsèque du composant	colmatage des fondations aval drainées		colmatage des forages colmatage des puits de drainage colmatage des drains	- constat de l'état des drains - mesures des débits de drainage
	Processus de conception	capacité de drainage des fondations aval drainées		matériaux de filtre ou de tuyaux dimensions des drains	- densité et taille des drains
	Flux de charges	sous-pressions dans les fondations aval drainées		pressions interstitielles	- piézométrie
	Flux hydrauliques	eaux d'infiltration dans les fondations aval drainées			
eaux d'infiltration vers l'aval					- fuites - mesures des débits de drainage
PLOT	Etat Intrinsèque du composant	déformation du plot		déformation du béton	- mesures des déplacements
		fissuration du plot		fissuration du contact béton-rocher contraintes de traction	- ouverture de l'interface béton-rocher - mesures du développement des fissures - mesures des contraintes

Scénario 1.2 : Vieillesse des rideaux d'injection et des réseaux de drainage

**Scénario 2.1 :
Alcali-réaction**



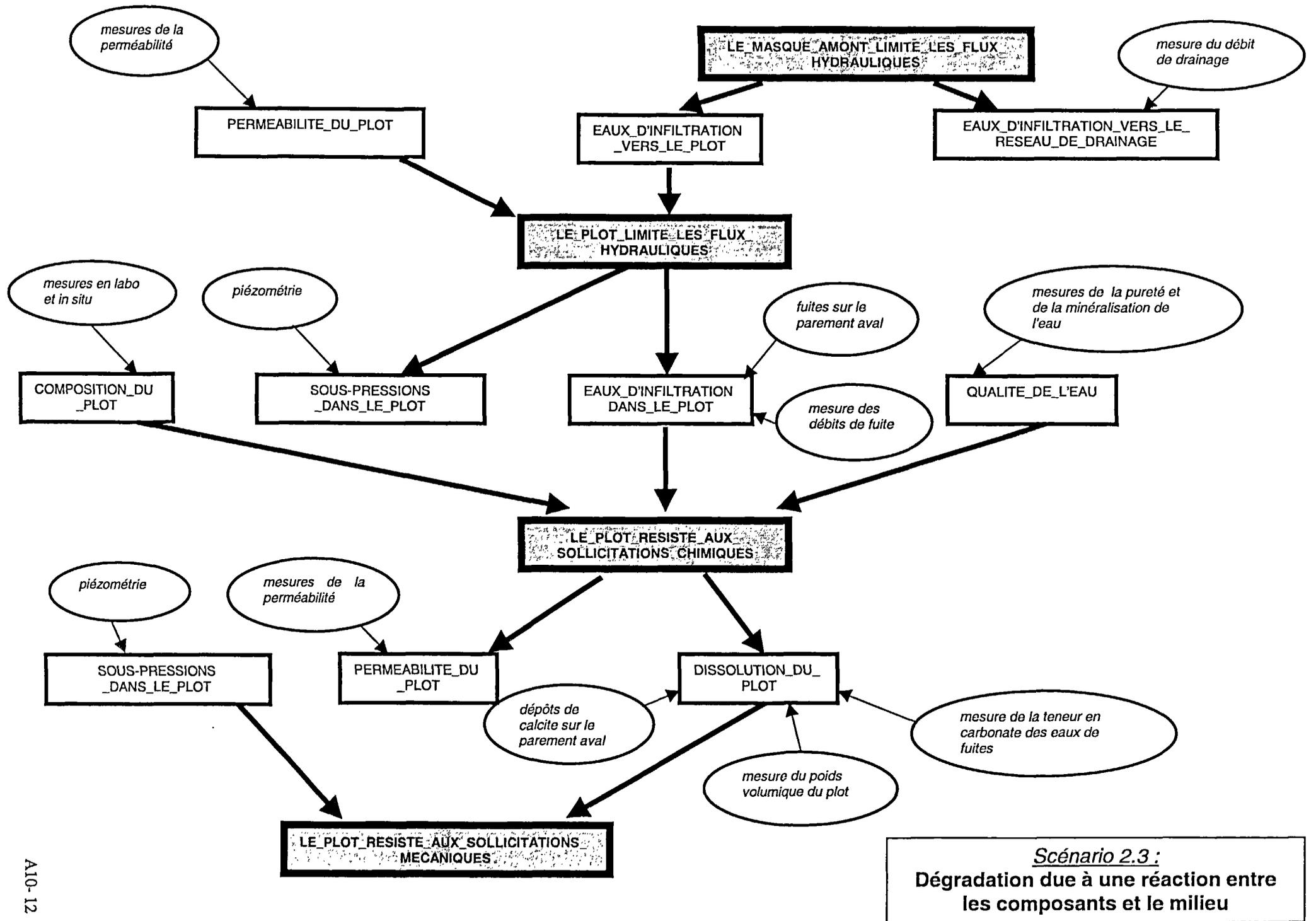
composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes
PLOT	Etat Intrinsèque du composant	déformation du plot	- mouvement différentiel du plot	gonflement du béton dilatation du béton	- mesures des déplacements du plot : - mesures des déplacements du plot vers le haut et vers l'amont
			- flambement du plot	gonflement différentiel	Autres symptômes particuliers : - mesures de la teneur en sulfate dans les eaux de fuites
			- glissement du plot	déformation du béton	- présence d'ettringite
			- gonflement homogène du plot	gonflement des parties non confinées	- mesures des déformations locales dans le plot
	fissuration du plot	fissuration du plot	- basculement du plot	gonflement des parties non confinées anisotropie du gonflement compression horizontale de rive en rive du plot	- mesures des contraintes internes dans le plot
			fissuration du béton	contraintes internes de traction	- fissures en forme de faïençage
			fissuration des reprises de bétonnage	fissuration le long des puits de drainage	- fissures en forme d'écaille
			fissuration à l'amont et à l'aval de la zone gonflante	fermeture des joints entre plots	- fissures structurales
Processus de conception du composant	composition du plot		confinement locale du plot	- mesures du développement des fissures	
			étréinte latérale du plot	- mesures des contraintes internes de compression du béton	
Flux hydrauliques	eaux d'infiltration dans le plot		composition du béton	- mesures au labo ou in situ : teneur en alcalis	
			- propriétés des granulats : présence de minéraux, roches ou autres substances susceptibles de réagir avec les alcalis - propriétés du ciment : teneur en alcalis	- mesures au labo ou in situ : quantité de composants capables de réagir avec les alcalis	
Flux de charges	sous-pressions dans le plot		- pénétration d'eau - écoulement d'eau - eaux d'infiltration dans le plot	- fuites d'eau - résurgences d'eau au contact béton fondation - mesures du débit des fuites	
			pressions interstitielles	piezométrie	

CRETE	Etat intrinsèque du composant	déformation de la crête	<ul style="list-style-type: none"> - mouvement différentiel de la crête - déport de la crête - soulèvement du couronnement - exhaussement de la crête - surrection de la crête 	- déformation des matériaux	- mesures du déplacement de la crête : - déplacement de la crête vers le haut et vers l'amont
MASQUE AMONT	Etat intrinsèque du composant	fissuration du masque amont	<ul style="list-style-type: none"> - fissuration du parement amont - fissuration de la gunite 	<ul style="list-style-type: none"> fissuration du mortier - contraintes de traction 	<ul style="list-style-type: none"> - fissures horizontales - fissures en forme de faïençage - fissures en forme d'écaille - mesures du développement des fissures
	Flux hydrauliques	eaux d'infiltration vers le plot			mesures du débit de drainage
		eaux d'infiltration vers le réseau de drainage			mesures du débit de drainage

Scénario 2.1 : Alkali-réaction

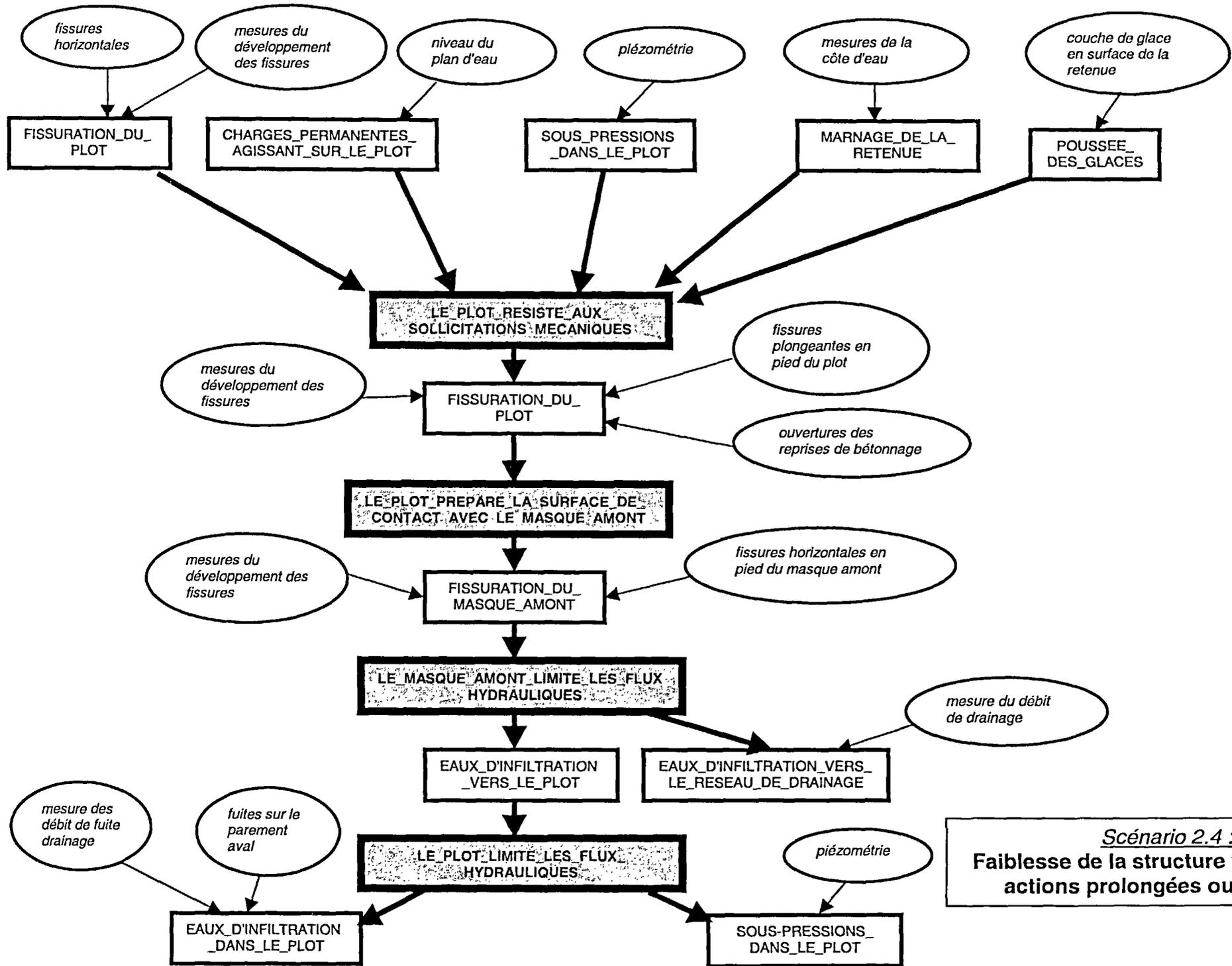
composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes
PLOT	Etat intrinsèque du composant	déformation du plot		<ul style="list-style-type: none"> - retrait hygrométrique du béton - contraction du béton - déformation du béton - fluage du béton 	<ul style="list-style-type: none"> - mesures des déplacements du plot - mesures des contraintes internes dans le béton - mesures des déformations locales dans le béton
		fissuration du plot		<ul style="list-style-type: none"> - fissuration du béton - ouverture des joints verticaux 	<ul style="list-style-type: none"> - fissures verticales traversantes - mesure du développement des fissures
	Processus de conception et de réalisation	composition du plot		<ul style="list-style-type: none"> - composition du béton - température du béton - propriété du ciment, des granulats - teneur en eau 	<ul style="list-style-type: none"> - mesures en labo et in situ
		capacité de déformation	capacité de déformation des joints entre les plots	<ul style="list-style-type: none"> - composition des joints - dimensionnement des joints - nombre de joints 	
	Flux hydrauliques	humidité relative du milieu extérieur			<ul style="list-style-type: none"> - hygrométrie
		eaux d'infiltration dans le plot	- écoulement d'eau		<ul style="list-style-type: none"> - fuites sur le parement aval - mesures du débit de fuites sur le parement aval
MASQUE AMONT	Etat intrinsèque du composant	fissuration du masque amont		<ul style="list-style-type: none"> - fissuration des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> - fissures verticales traversantes - mesure du développement des fissures
	Flux hydrauliques	eaux d'infiltration vers le plot			<ul style="list-style-type: none"> - mesures du débit de drainage

Scénario 2.2 : Retrait, fluage ou réaction conduisant à une contraction du matériau



composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes
PLOT	Etat intrinsèque du composant	dissolution du plot		dissolution du béton lixiviation du liant du béton dissolution de la pâte de ciment dissolution des composés calciques (chaux, carbonates, silicates, aluminates)	- dépôts de carbonate de calcium : - dépôts de calcite dans la galerie, sur le parement aval et le long des joints de construction ou de reprise de bétonnage efflorescences blanches mesures du poids volumique du béton mesures de la teneur en carbonates des eaux de fuites
		perméabilité du plot	- porosité du plot - dissolution du plot - fissuration du plot	porosité du béton	mesures de la perméabilité
	Processus de conception et de réalisation	composition du plot		qualité du béton	mesures en laboratoire et in situ
		qualité de l'eau	- eaux pures - acidité de l'eau - eaux agressives - eaux de fonte des neiges ou de glaciers		mesures de la pureté et de la minéralisation de l'eau
	flux hydrauliques	eaux d'infiltration dans le plot	- circulation d'eau par diffusion - pénétration d'eau - percolations - perméabilité du plot - entrée d'eau		tuiles sur le parement aval mesures du débit des fuites
	Flux de charges	sous-pressions dans le plot		pressions interstitielles	piezométrie
	MASQUE AMONT	Flux hydrauliques	eaux d'infiltration vers le plot eaux d'infiltration vers le réseau de drainage		

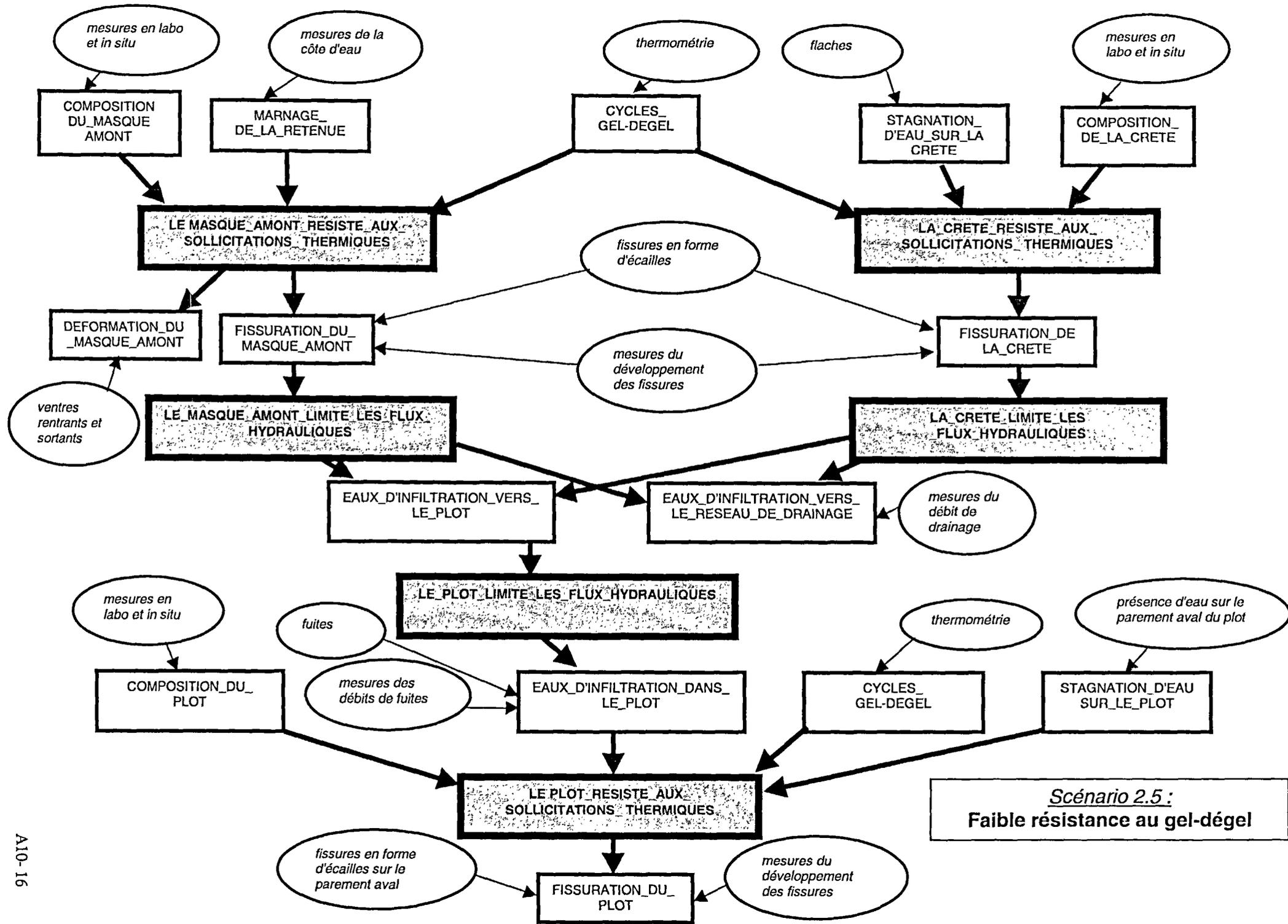
Scénario 2.3 : Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu



Scénario 2.4 :
Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées

composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes	
PLOT	Etat intrinsèque du composant	fissuration du plot		fissuration du béton fissuration en pied du plot ouverture des reprises de bétonnage	fissures horizontales plongeantes en pied du plot mesures du développement des fissures ouverture des reprises de bétonnage	
		Flux hydrauliques	marnage de la retenue	variations de niveau de la retenue		mesures de la côte d'eau
	eaux d'infiltration dans le plot		percolations écoulement d'eau dans le plot circulation d'eau dans le plot gradients hydrauliques		fuites d'eau sur le parement aval; mesures du débit des fuites	
	Flux de charges	sous-pressions dans le plot	champ de pression		pressions interstitielles	piezométrie
		charges permanentes agissant sur le plot	- sollicitations d'origine hydraulique :			
			- poussée hydrostatique sur le plot - pressions statiques ou dynamiques : - poids des ouvrages annexes			mesure du niveau du plan d'eau
poussée des glaces				couche de glace en surface de la retenue		
MASQUE AMONT	Etat intrinsèque du composant	fissuration du masque amont		fissuration du béton fissuration du pied du masque amont	fissures plongeantes en pied du masque amont mesures du développement des fissures	
		Flux hydrauliques	eaux d'infiltration vers le plot eaux d'infiltration vers le réseau de drainage	eaux d'infiltration au travers du masque amont	mesures du débit de drainage	

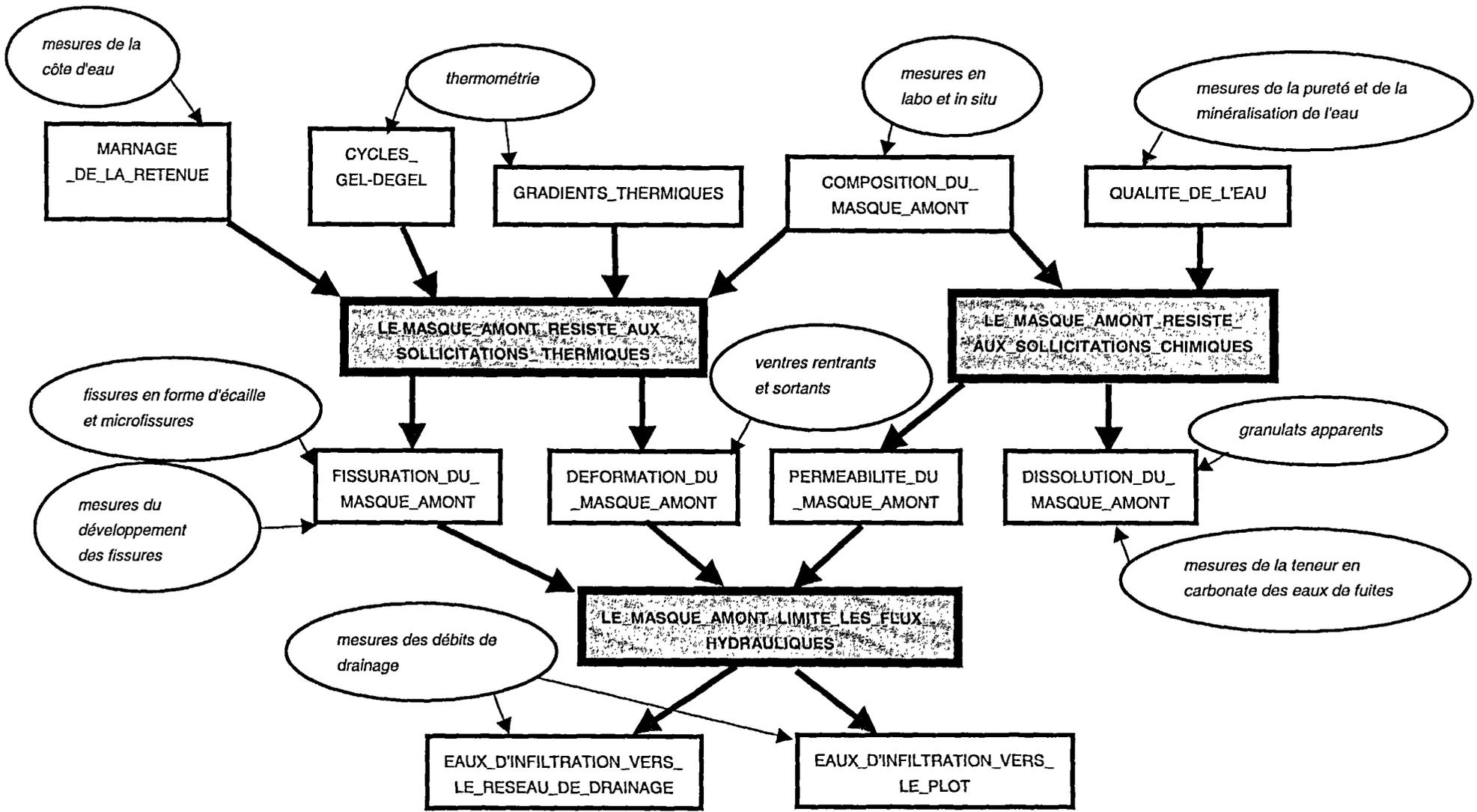
Scénario 2.4 : Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées



Scénario 2.5 :
Faible résistance au gel-dégel

composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes		
PLOT	Etat intrinsèque du composant	fissuration du plot	désintégration	fissuration du béton fissuration du parement aval	fissures en forme d'écaillés sur le parement aval mesures du développement des fissures		
		Processus de conception et de réalisation	composition du plot		mesures en laboratoire et in situ		
	Flux hydrauliques			stagnation d'eau sur le plot		perméabilité du béton teneur en eau du béton perméabilité du béton propriétés mécaniques du béton propriétés thermiques du béton	mesures en laboratoire et in situ
				eaux d'infiltration dans le plot	percolations		présence d'eau sur le parement aval
	Flux thermiques	cycles gel-dégel			thermométrie		
MASQUE AMONT	Etat intrinsèque du composant	déformation du masque amont		dilatation thermique des matériaux	ventres rentrants et sortants (membrane souple)		
		fissuration du masque amont		fissuration du béton fissuration de la zone de mamage	fissures des matériaux en forme d'écaillés mesures du développement des fissures		
	Processus de conception et de réalisation	composition du masque amont			perméabilité des matériaux teneur en eau des matériaux propriétés mécaniques des matériaux propriétés thermiques des matériaux	mesures en laboratoire et in situ	
			Flux hydrauliques	mamage de la retenue	variations du niveau d'eau de la retenue		mesure de la cote de la retenue
				eaux d'infiltration vers le plot			mesure du débit de drainage
	Flux thermiques	eaux d'infiltration vers le réseau de drainage			thermométrie		
CRETE	Etat intrinsèque du composant	fissuration de la crête		fissuration du béton	fissures mesures du développement des fissures		
		Flux hydrauliques	stagnation d'eau sur la crête			flèches	
	eaux d'infiltration dans le plot		eaux d'infiltration au travers de la crête				
	Flux thermiques	cycles de gel-dégel			thermométrie		
	Processus de conception et de réalisation	composition de la crête			- teneur en eau du matériau - perméabilité du matériau - propriétés mécaniques du matériau - propriétés thermiques du matériau	mesures en laboratoire et in situ	

Scénario 2.5 : Faible résistance au gel-dégel



Scénario 2.6 :
Viellissement des revêtements amont

composants	classification du phénomène	dénomination du phénomène	termes équivalents à la granularité intermédiaire	phénomènes associés à la granularité inférieure	symptômes	
MASQUE AMONT	Etat intrinsèque du composant	déformation du masque amont (si membrane souple)		dilatation thermique des matériaux	ventres rentrants et sortants	
		fissuration du masque amont		- fissuration du béton - fissuration de la zone de mamage	- fissures en forme d'écaillés et de faiçnage - microfissures - mesures du développement des fissures	
		dissolution du masque amont		- lixiviation du béton - dissolution du liant du béton - dissolution de la pâte de ciment : - dissolution des composés calciques (chaux, carbonates, silicates, aluminates)	- granulats apparents - mesures de la teneur en carbonate dans les eaux de fuites - dépôts de carbonate de calcium (calcite dans la galerie ou le long des joints de construction)	
	Flux hydrauliques	mamage de la retenue	variations du niveau d'eau de la retenue			- mesure de la cote du plan d'eau
		eaux d'infiltration vers le plot	eaux d'infiltration au travers du masque amont			- mesure du débit de drainage
		eaux d'infiltration vers le réseau de drainage				
	Flux thermiques	gradients thermiques	variations rapides de la température ambiante exposition au soleil, UV...			- thermométrie
		cycles de gel-dégel				- thermométrie
	Processus de conception-réalisation du composant	perméabilité du masque amont	infiltration d'eau dans le masque amont		porosité du béton	- mesures en laboratoire et in situ
		composition du masque amont	- porosité du masque amont - propriétés mécaniques du masque amont - propriétés thermiques du masque amont		- porosité des matériaux - propriétés mécaniques des matériaux - propriétés thermiques des matériaux - qualité du béton - composition du ciment - qualité des granulats	- mesures en laboratoire et in situ
		qualité de l'eau	- eaux pures - acidité de l'eau - eaux agressives - eaux de fonte des neiges			- mesures de la teneur en carbonate des eaux de fuites

Scénario 2.6 : Vieillessement des revêtements amont

ANNEXE 11

Démarche quantitative d'analyse de la criticité (d'après [MODARRES,93])

Nous résumons dans cette annexe la démarche d'analyse quantitative de la criticité proposée par [MODARRES,93] et basée sur la norme MIL-STD 1629-A. Destinée à l'origine à être appliquée sur les éléments d'un équipement militaire (de domaine a priori quelconque), elle va rechercher les paramètres de fiabilité des composants du système (Figure 2) :

1- Le taux de défaillance des composants (λ)

Le taux de défaillance (λ) d'un composant est obtenu, soit à partir de valeurs issues de la littérature (normes, recommandations...), soit à partir d'observations statistiques de défaillances obtenues à partir de tests spécifiques ou par le retour d'expérience.

La figure 1 représente l'allure classique (« courbe en baignoire ») de l'évolution du taux de défaillance λ , défini selon la norme NF X 60-500 « par la limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant de la défaillance d'un composant E soit compris dans $[t ; t+dt]$, par la durée de l'intervalle dt , lorsque dt tend vers 0, sachant que le composant n'a pas été défaillant entre $[0 ; t]$ ».

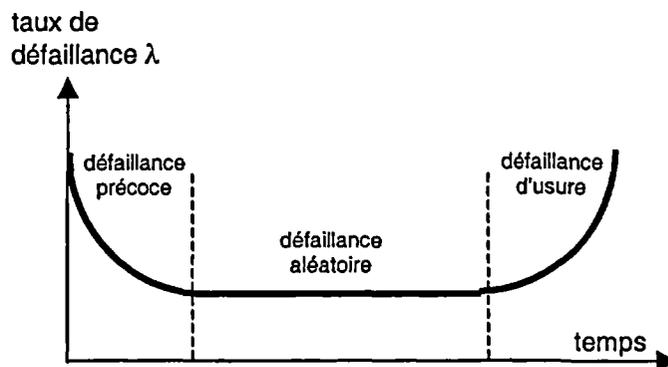


Figure 1 : Allure du taux de défaillance λ d'un composant en fonction du temps

2 - Le pourcentage du mode de défaillance (α)

Le pourcentage du mode de défaillance (α) est la contribution d'un mode de défaillance particulier au taux de défaillance du composant (λ) étudié. Si tous les modes de défaillance potentiels du composant sont pris en compte de façon exhaustive, la somme de toutes les valeurs des paramètres (α) est égale à 1.

3 - La probabilité de l'effet de la défaillance (β)

Le paramètre correspond à la probabilité conditionnelle que l'effet de la défaillance (à la granularité intermédiaire ou supérieure) apparaisse selon une sévérité donnée, sachant que le mode de défaillance s'est produit. Les valeurs de (β) représentent les jugements portés par la personne chargée de l'analyse sur la probabilité conditionnelle que la perte se produise.

Effet de la défaillance	valeur de β
perte effective	1
perte probable	$0,1 < \beta < 1$
perte possible	$0,0 < \beta < 0,1$
pas d'effet	0

Tableau 1 : Probabilité de l'effet de la défaillance (MIL-HDBK-217)

4 - La criticité du mode de défaillance (C_m)

La criticité du mode de défaillance (C_m) représente le nombre de criticité du composant lié à un mode de défaillance particulier, pour une classification de la sévérité et un temps de fonctionnement du composant (T) donnés. C_m est calculé par la relation suivante :

$$C_m = \beta \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot T$$

5 - Le nombre de criticité d'un composant (C_r)

Le nombre de criticité d'un composant (C_r) est la somme des nombres de criticité de tous les modes de défaillance d'un composant (n modes de défaillance) :

$$C_r = \sum_{i=1 \text{ à } n} (C_m)_i$$

(C_r) représente le nombre de défaillance du système lié à un composant particulier.

SYSTEME _____ DATE _____
 NIVEAU DE DECOMPOSITION _____ ANALYSE DE CRITICITE FEUILLE # _____
 SCHEMA DE REFERENCE _____ VERIFIE PAR _____
 MISSION _____ APPROUVE PAR _____

Numéro d'identification	Elément / repère fonctionnel	Fonction	Modes et causes de défaillances	Phase de la mission / mode de fonctionnement	Classe de sévérité	Probabilité de défaillance	Probabilité de l'effet de la défaillance (β)	Fréquence ou mode de défaillance (α)	Taux de défaillance (λ)	Temps de fonctionnement (t)	Criticité du mode de défaillance	Criticité de l'élément $C_r = \sum (c_m)$	Remarques
						référence banque de données taux de défaillance					$C_m = \alpha \beta \lambda t$		

Figure 2 : Analyse de la criticité (MIL-HDBK-217)

Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages

Développement de méthodes d'aide à l'expertise

Résumé :

Le diagnostic et l'analyse de risques sont des missions essentielles pour assurer la sécurité des barrages en service. Pour réaliser ces tâches, des méthodes puissantes ont été développées et apportent une aide précieuse aux ingénieurs spécialisés : modèles physiques, calculs numériques, statistiques, fiabilité...

Toutefois, face à des ouvrages complexes et uniques, dans des contextes présentant des données insuffisantes, lors de diagnostics préliminaires ou en synthèse d'analyses approfondies, il est nécessaire de recourir au jugement des experts. A partir de leurs connaissances et de leur expérience, ces derniers vont fournir alors une interprétation, un avis ou une recommandation à la question posée.

Cette recherche propose des méthodes d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques dans le cadre d'une approche par expertise. Elle vise à assister les ingénieurs spécialisés lors d'analyses préliminaires et rapides ou en synthèse d'études approfondies.

La démarche adoptée met à profit les connaissances et le retour d'expérience des experts. Elle comporte trois étapes :

- un modèle fonctionnel de vieillissement, bâti à partir de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (méthode AMDE) adaptée au domaine des barrages, et utilisant une représentation sous forme de graphes orientés. Il permet de construire des scénarios de vieillissement en enchaînant des séquences successives de défaillances ;
- une méthode qualitative pour constituer des historiques de vieillissement et pour représenter les lois d'évolution des pertes de performance ;
- des méthodes qualitatives pour évaluer la criticité des pertes de performance des barrages et de leurs composants.

La première partie d'une base de connaissances relative à la pathologie des barrages est réalisée et concerne les scénarios de vieillissement des ouvrages poids.

Après la présentation de différentes applications sur des mécanismes de vieillissement (alcali-réaction des barrages en béton et suffusion interne des remblais) et sur des ouvrages représentatifs de ces mécanismes, nous proposons divers développements et perspectives à cette recherche.

Mots-clés : *Barrage, Diagnostic, Analyse de risques, Vieillissement, Expertise, Analyse Fonctionnelle, AMDE, Scénario, Historique, Criticité*

Diagnosis and risk analysis of dam ageing

Development of methods to support expertise

Abstract:

Diagnosis and risk analysis are essential to insure safety of dams in operation. In this field, powerful methods have been produced and provide useful aid support: modelling, simulation, statistical analysis, reliability...

However it is necessary to use expert's judgement when the works are complex and unique, when data is imprecise or insufficient, and when preview diagnosis or detailed analysis synthesis are made. Using their experiences and their knowledge, experts are able to provide answers and recommendations to a specific problem.

This work proposes methods to support diagnosis and risk analysis tasks, within an expertise approach. It is used for specialised engineers during preview diagnosis or studies synthesis.

Our approach is based on capitalising on expert's knowledge and feedback. It is composed of three parts:

- an ageing functional model, built up with FMEA method, adapted to dam context and using a Causal Graph representation. This modelling represents ageing scenarios leading to loss of functions,
- a qualitative method to write dam ageing history and to represent evolution laws of performance loss,
- qualitative methods to assess the criticality of performance loss of dams and their components.

The first part of a knowledge database about dam ageing has been produced, concerning gravity dam mechanisms.

After applying these methods to specific ageing mechanisms (alkali-aggregate reaction on concrete gravity dam and internal erosion on embankment dams) and to example of dams concerned by these mechanisms, we propose various developments and prospects to this work.

Keywords: *Dam, Diagnosis, Risk analysis, Ageing, Expertise, Functional analysis, FMEA, Scenario, Ageing History, Criticality*

Université Blaise Pascal – Clermont II
Laboratoire d'Etudes et de Recherches
en MEcanique des Structures
24, avenue des Landais – BP 206
63174 AUBIERE Cedex

Cemagref
Groupement d'Aix-en-Provence
Unité de recherche « Ouvrages hydrauliques »
Le Tholonet, BP 31
13612 Aix-en-Provence cedex 1