

Pratiques françaises de l'analyse de risques et de l'évaluation de la sûreté des barrages

*French practices of dam Safety
Review and Risk Assessment*



Juin 2020

Edition CFBR – 2021
www.barrages-cfbr.eu

Pratiques françaises de l'analyse de risques et de la sûreté des barrages
French practices of dam safety review and risk assesement

ISBN : 979-10-96371-20-4 – dépôt légal 1^{er} trimestre 2021



Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 France](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr). Pour accéder à une copie de cette licence, merci de vous rendre à l'adresse suivante <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr>.

Photo page de couverture : barrage de Bimont (©Camille Moirenc pour la SCP)

Le rapport « Pratiques françaises de l’analyse de risques et de l’évaluation de la sûreté des barrages », approuvé par la commission exécutive du CFBR le juin 2020 et édité par le CFBR, a été élaboré par un groupe de travail ad-hoc.

Ce document propose une version française (pages 2 à 106) suivie de sa [traduction en anglais](#) (pages 107 et suivantes).

The report “French practices of dam Safety Review and Risk Assessment”, approved by the FrCOLD Executive Commission, June 23, 2020 and published by CFBR were developed by an ad hoc working group. This document proposes a French version of the recommendations (pages 3 to 106) followed by its [English translation](#) (pages 107 and following).

Table des matières

1	DEMARCHE D'ANALYSE DE RISQUES DES BARRAGES EN FRANCE.....	107
1.1	GENESE DE LA PRATIQUE DE L'EVALUATION ET DE MAITRISE DES RISQUES EN FRANCE	7
1.2	RAPPEL DU CADRE GENERAL DU PROCESSUS DE GESTION DES RISQUES DES BARRAGES	8
1.3	LE CADRE DES ETUDES DE DANGERS DE BARRAGES EN FRANCE	9
1.4	LA DEMARCHE ET LES ETAPES DE L'ANALYSE DE RISQUES DES BARRAGES EN FRANCE	10
1.5	POSITIONNEMENT DES PRATIQUES FRANÇAISES DES ETUDES DE DANGERS VIS-A-VIS DES PRATIQUES INTERNATIONALES DE L'ANALYSE DE RISQUES DES BARRAGES	12
2	LES DONNEES D'ENTREE DE L'ANALYSE DE RISQUES.....	14
2.1	INTRODUCTION	14
2.2	COLLECTE DES DONNEES D'ENTREE	14
2.2.1	<i>Données de référence descriptives des ouvrages et matériels</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Données d'exploitation, de surveillance et de maintenance</i>	<i>15</i>
2.2.3	<i>Documents d'organisation et procédures d'exploitation</i>	<i>16</i>
2.2.4	<i>Synthèse de la collecte des données existantes</i>	<i>17</i>
2.3	IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS	18
2.4	EXAMENS ET DIAGNOSTICS POUR L'EVALUATION DE SURETE	18
2.4.1	<i>Les inspections spécifiques</i>	<i>19</i>
2.4.2	<i>Diagnostic de l'état, de la conception et du comportement des ouvrages de génie civil</i>	<i>22</i>
2.4.3	<i>Diagnostic de l'état et du fonctionnement des matériels hydromécaniques</i>	<i>23</i>
2.4.4	<i>Diagnostic de l'état et du fonctionnement des systèmes de contrôle-commande des organes de sécurité</i>	<i>24</i>
3	ANALYSE FONCTIONNELLE	25
3.1	INTRODUCTION	25
3.2	DEFINITION DU SYSTEME ETUDIE ET DE SON ENVIRONNEMENT	26
3.2.1	<i>La zone d'étude</i>	<i>26</i>
3.2.2	<i>Le périmètre d'étude</i>	<i>27</i>
3.3	ANALYSE FONCTIONNELLE EXTERNE	28
3.4	ANALYSE FONCTIONNELLE INTERNE	30
3.4.1	<i>Principes de l'analyse fonctionnelle interne</i>	<i>30</i>
3.4.2	<i>Illustrations des pratiques de l'analyse fonctionnelle interne</i>	<i>31</i>
4	ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE ET IDENTIFICATION DES EVENEMENTS REDOUTES	34
4.1	ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES (APR)	34
4.1.1	<i>Contexte - Usage</i>	<i>34</i>
4.1.2	<i>Principes de l'APR</i>	<i>34</i>
4.1.3	<i>L'utilisation de l'APR dans les EDD – Exemples</i>	<i>35</i>
4.2	ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE ET DE LEURS EFFETS (AMDE) ET ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE (AMDEC)	40
4.2.1	<i>Contexte – Normes – Usages</i>	<i>40</i>
4.2.2	<i>Principes de l'AMDE/AMDEC</i>	<i>40</i>
4.2.3	<i>L'utilisation de l'AMDE dans les EDD – Exemples</i>	<i>41</i>
4.3	SYNTHESE DES METHODES D'ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE ET D'IDENTIFICATION DES EVENEMENTS REDOUTES	46
5	REPRESENTATION DES SEQUENCES ACCIDENTELLES PAR L'EMPLOI DE METHODES ARBORESCENTES	47
5.1	INTRODUCTION	47
5.2	ANALYSE PAR LA METHODE DES ARBRES D'EVENEMENTS	48
5.3	ANALYSE PAR LA METHODE DES ARBRES DE DEFAILLANCES	50
5.4	ANALYSE COMBINEE PAR LA METHODE DU NŒUD PAPILLON	52
5.5	SYNTHESE DE LA REPRESENTATION DES SEQUENCES ACCIDENTELLES PAR L'EMPLOI DE METHODES ARBORESCENTES	58

6	EVALUATION DE LA SURETE	59
6.1	INTRODUCTION	59
6.2	LE TRAVAIL EN PANEL D'EXPERTS	59
6.3	BARRIERES DE SECURITE	60
6.3.1	<i>Les principes</i>	60
6.3.2	<i>Prise en compte des barrières de prévention</i>	61
6.3.3	<i>Exemple – Barrière de prévention : Vidange de Fond</i>	63
6.4	PRISE EN COMPTE DU FACTEUR HUMAIN	65
6.4.1	<i>Le geste inapproprié</i>	65
6.4.2	<i>La défaillance humaine</i>	65
6.5	APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE D'EVALUATION DE LA SURETE	66
6.5.1	<i>Evaluation des occurrences des événements initiateurs (EI) ou intermédiaires</i>	66
6.5.2	<i>Principes d'agrégation dans les méthodes du Nœud Papillon ou de l'Arbre de Défaillances pour la détermination de l'occurrence des événements redoutés</i>	67
6.6	APPROCHE QUANTITATIVE D'EVALUATION DE LA SURETE	69
6.6.1	<i>Principe de l'évaluation quantitative de la sûreté à partir de la méthode de l'arbre d'événements</i>	69
6.6.2	<i>Les différentes démarches d'évaluation des probabilités</i>	69
6.6.3	<i>Exemple d'évaluation quantitative de la sûreté par la méthode de l'arbre d'événements</i>	70
6.7	SYNTHESE DES APPROCHES D'EVALUATION DE LA SURETE	71
7	ÉVALUATION DE LA GRAVITE DES SCENARIOS	72
7.1	LES PHENOMENES HYDRAULIQUES : MODELISATION ET CARTOGRAPHIE	72
7.1.1	<i>Modélisation de l'onde de rupture</i>	72
7.1.2	<i>Cartographie de l'onde de submersion</i>	74
7.2	LES ENJEUX : IDENTIFICATION, INDICATEURS ET IMPACTS	75
7.2.1	<i>Les enjeux recherchés</i>	75
7.2.2	<i>Les principales sources de données utilisées</i>	75
7.2.3	<i>Les hypothèses sur les personnes exposées</i>	76
7.2.4	<i>Cartographie des enjeux soumis aux scénarios de défaillance</i>	76
7.2.5	<i>Évaluation des impacts</i>	79
7.3	ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS	81
8	EVALUATION DE LA CRITICITE DES SCENARIOS, AFFICHAGE DES RISQUES ET MESURES DES REDUCTIONS DES RISQUES	82
8.1	EVALUATION DE LA CRITICITE DES SCENARIOS ET L'AFFICHAGE DES RISQUES	82
8.2	MESURES DE REDUCTION ET DE MAITRISE DES RISQUES	84
8.2.1	<i>Terminologie</i>	84
8.2.2	<i>Mesure de maîtrise des risques</i>	84
8.2.3	<i>Mesures de réduction des risques</i>	85
8.2.4	<i>Exemple</i>	85
9	SYNTHESE : L'APPORT DE L'ANALYSE DE RISQUES POUR LA SURETE DES BARRAGES EN FRANCE	88
9.1	LES APPORTS DE L'ANALYSE DE RISQUES POUR LA SURETE DES BARRAGES EN FRANCE	88
9.1.1	<i>Une nouvelle approche fonctionnelle multi-métier</i>	88
9.1.2	<i>Des ouvrages mieux connus</i>	88
9.1.3	<i>Identification et interclassement des risques</i>	89
9.1.4	<i>Mesures de réduction et de maîtrise des risques et posture préventive</i>	90
9.2	COMMUNICATION AUTOUR DES EDD	91
9.3	APPROPRIATION DES EDD PAR LES DIFFERENTS ACTEURS EVOLUANT SUR LE BARRAGE	92
9.3.1	<i>Pendant son élaboration</i>	92
9.3.2	<i>Après son élaboration</i>	92
9.4	INTERET POUR LE CONTROLE DE LA SURETE DES BARRAGES	92
10	REFERENCES	94
11	TERMINOLOGIE – GLOSSAIRE	108

Liste des figures

Figure 1.1 : Evolution réglementaire de la sécurité des installations industrielles au cours des derniers siècles	7
Figure 1.2 : Evolution réglementaire de la sécurité des barrages en France	8
Figure 1.3 : Démarche d'évaluation des risques du Bulletin 130 de la CIGB replacée dans un contexte normatif ISO/CEI 31010:2009	8
Figure 1.4 : Cartographie des acteurs des études de dangers des barrages en France (inspiré de l'ISO 9001)	9
Figure 1.5 : La démarche d'évaluation des risques en France.....	12
Figure 3.1 : Illustration de la zone d'étude (périmètre et son environnement)	26
Figure 3.2 : Illustration du périmètre d'étude	28
Figure 3.3 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle externe dans les études de dangers ..	29
Figure 3.4 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle interne d'un barrage mobile en rivière	33
Figure 4.1 : Répartition des méthodes d'analyse des modes de défaillance [DIEUDONNE et al. 2016]	34
Figure 5.1 : Répartition des utilisations de méthodes arborescentes par les gestionnaires dans le cadre des analyses de risques (Retour d'expérience français) [DIEUDONNE et al. 2016]	47
Figure 5.2 : Principe de la méthode de l'arbre d'évènements	48
Figure 5.3 : Exemple d'un arbre d'évènements relatif au mécanisme d'érosion interne d'un barrage en remblai d'enrochements	49
Figure 6.1 : Approche semi-quantitative - Exemple de barrières de prévention pour l'EI « Fermeture intempestive d'une vanne en crue »	63
Figure 6.2 : Approche semi-quantitative par la méthode du Nœud Papillon - Exemple d'évènement redouté « Rupture barrage » avec vidange de fond comme barrière de prévention	64
Figure 6.3 : Exemple d'évaluation de la sûreté d'un barrage en remblai vis-à-vis du scénario de surverse lié à une insuffisance du coursier.....	70
Figure 7.1 : Exemples de cartographie de zones inondables	74
Figure 7.2 : Exemple de cartographie de zones inondables avec densité de population	77
Figure 7.3 : Exemple de cartographie de zones inondables avec données INSEE de population carroyées	78
Figure 8.1 : Exemple de grille de criticité (NB : l'accident n°1 correspond à la rupture du barrage. Il s'agit de l'accident le plus grave évalué dans une étude de dangers de barrage)	82
Figure 8.2 : Exemples de grilles de criticité avec affichage des limites d'acceptabilité	83
Figure 8.3 : Exemple de grille de criticité sans affichage des limites d'acceptabilité.....	83
Figure 8.4 : Evolution de la matrice de criticité après application des mesures de réduction des risques.....	84
Figure 8.5 : Répartitions de MRR et MMR – Nouvelle Aquitaine	86
Figure 8.6 : Répartitions de MRR Travaux – Nouvelle Aquitaine.....	86
Figure 8.7 : Répartitions des études complémentaires – Nouvelle Aquitaine	87

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle interne d'un composant « remblai » d'un barrage	31
Tableau 3.2 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle interne d'un évacuateur vanné	32
Tableau 4.1 : Extrait de l'APR pour un barrage voûte muni d'un évacuateur de crues vanné.....	37
Tableau 4.2 : Extrait de l'APR pour un barrage en remblai	39
Tableau 4.3 : Exemple d'application de l'AMDE dans une EDD de barrage en enrochement	41
Tableau 4.4 : Exemple d'application de l'AMDE dans une EDD de barrage en remblai.....	45
Tableau 5.1 : Liens logiques les plus souvent utilisés dans les arbres de défaillances.....	51
Tableau 5.2 : Signification des évènements figurant dans un nœud papillon.....	53
Tableau 6.1 : Exemple de justification et cotation de barrière dans les EDD.....	62
Tableau 6.2 : Exemple de grille semi-quantitative pour l'évaluation des événements.....	67
Tableau 6.3 : Exemples de grille de retranscription du dire expert sous forme de probabilités subjectives.....	70
Tableau 7.1 : Exemple de classes de gravité.....	76
Tableau 7.2 : Exemple de comptage des personnes potentiellement impactées par l'onde de submersion.....	80

AVANT-PROPOS

[Objectifs du rapport « Pratiques françaises de l'analyse de risques et de l'évaluation de la sûreté des barrages »](#)

Le présent rapport fait état de la pratique française en matière d'analyse de risques et d'évaluation de la sûreté des barrages. Il traite des points suivants : l'analyse fonctionnelle et structurelle des barrages, l'analyse des modes de défaillance, la modélisation des scénarios de défaillance, l'évaluation de la sûreté vis-à-vis des modes de défaillance et des scénarios, l'évaluation de la gravité des scénarios, l'évaluation de la criticité et des risques incluant l'affichage des risques.

Le rapport décrit les méthodes mises en œuvre dans les pratiques et comporte de nombreux exemples d'illustration. Il vise à faire connaître la pratique française hors de nos frontières. Pour faciliter la compréhension du rapport, un glossaire des termes techniques est fourni en fin de rapport.

Ce document constitue une synthèse du retour d'expérience de la première génération des études de dangers en France réalisées entre 2007 et 2018. Il n'a pas le statut de recommandation pour la réalisation des études de dangers en France.

[Auteurs du rapport « Pratiques françaises de l'analyse de risques et de l'évaluation de la sûreté des barrages »](#)

Ce guide des pratiques françaises a été élaboré par un groupe de travail du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) qui a mené cette tâche de mai 2017 à juin 2020. Ce groupe était composé de personnalités désignées en fonction de leurs compétences et expériences dans le domaine de la sûreté des barrages, de l'analyse et de l'évaluation des risques :

Laurent PEYRAS – coordinateur	INRAE
Michel POUPART – coordinateur	Expert indépendant
Thomas ADELIN	Consultant pour ISL
Thibault BALOUIN	INERIS
Catherine CASTEIGTS	SCP
Benjamin DELARUELLE	ARTELIA
Thierry GUILLOTEAU	EDF
Frédéric LAUGIER	EDF
Jean-Charles PALACIOS	SAFEGE
Gladys PAVADAY	CNR
Guirec PREVOT	PoNSOH – Ministère chargé de l'Environnement
Agnes VALLEE	INERIS
Eric VUILLERMET	BRLi

1 Démarche d'analyse de risques des barrages en France

1.1 Genèse de la pratique de l'évaluation et de maîtrise des risques en France

L'essor de l'industrie en France a été accompagné, depuis plusieurs siècles, par une évolution constante de la réglementation visant à encadrer les activités de toutes natures susceptibles de présenter des risques pour les populations ou l'environnement. Cette réglementation a dû tenir compte au fil des décennies de nombreux paramètres de toute nature :

- la diversification des activités, des procédés ou des modes d'exploitation ;
- le rapprochement entre les habitations et les sites industriels qui devient progressivement inéluctable, conséquence directe d'un développement industriel de plus en plus intensif qui s'accélère encore dans la période d'après-guerre. Ce dernier s'est notamment intensifié le long de certains cours d'eau (procédés, logistique, ...) ;
- la sensibilisation des populations et la culture du risque consécutives à des accidents qui ont eu des conséquences désastreuses en termes d'impact sur les enjeux environnementaux, humains et économiques, ...

L'histoire de la réglementation française sur les installations dangereuses et les risques industriels trouve ses origines dès la fin du XVIII^{ème} siècle avec l'explosion dans une usine de poudre au Château de Grenelle en 1794. La frise chronologique suivante met en parallèle quelques accidents majeurs avec les principales évolutions réglementaires conduisant, au fil des années, à mettre en place et à améliorer la **gestion des risques** autour des sites en France et en Europe.

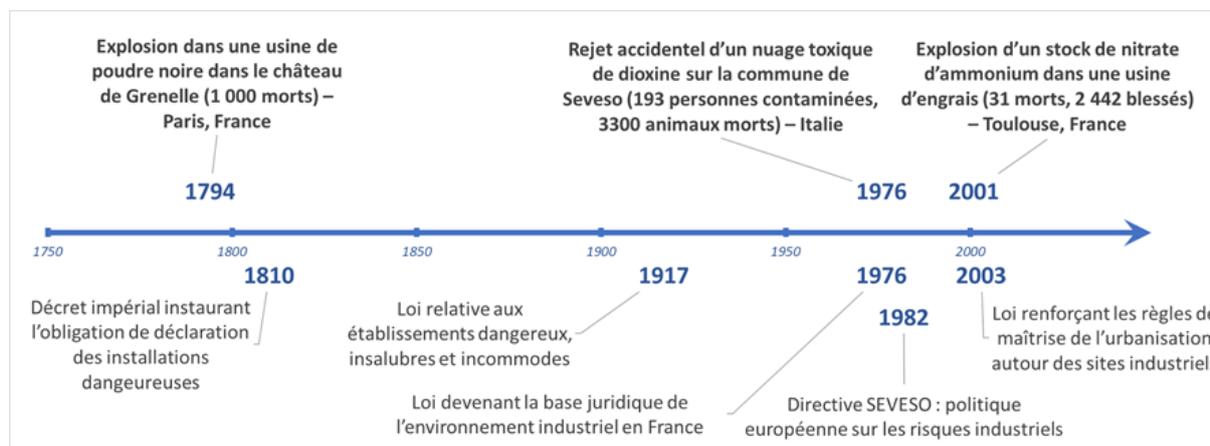


Figure 1.1 : Evolution réglementaire de la sécurité des installations industrielles au cours des derniers siècles

L'évolution de la réglementation et de la gestion des risques dans le domaine des barrages est également liée à cet essor industriel et marquée par la survenue de deux accidents majeurs en France : la rupture du barrage de Bouzey en 1895 et la rupture du barrage de Malpasset en 1959. Ce dernier accident catastrophique a conduit à un renforcement très sensible du contrôle de l'État sur la sécurité des barrages, avec la création du Comité Technique Permanent des Barrages en 1966 qui statue sur tous les projets de création ou de confortement de grands barrages, et la promulgation de règlements ministériels portant sur l'inspection et la surveillance des barrages intéressant la sécurité publique. Plus récemment à partir de 2006, la législation française a connu une évolution sensible avec une refonte de ses textes réglementaires relatifs à la sécurité des ouvrages hydrauliques et l'instauration des études d'analyse de risques à l'instar des autres domaines de l'industrie à risques. La figure

suivante montre l'évolution de la réglementation des barrages en France en lien avec ces deux évènements.

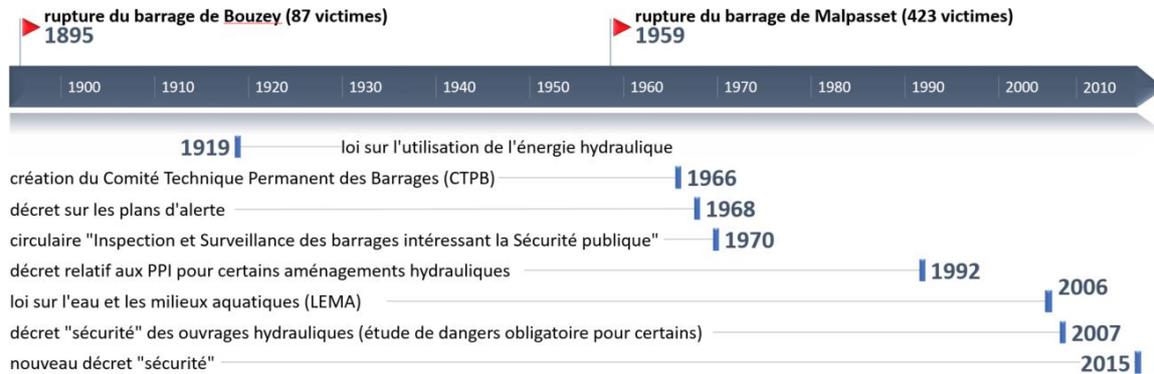


Figure 1.2 : Evolution réglementaire de la sécurité des barrages en France

1.2 Rappel du cadre général du processus de gestion des risques des barrages

Le Bulletin 130 de la CIGB « Évaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage » pose les principes de la gestion des risques des barrages dont les principaux objectifs sont :

- l'identification de l'ensemble des configurations susceptibles de remettre en cause la sécurité et l'intégrité d'un ouvrage et par voie de fait la sécurité des enjeux humains, économiques et environnementaux situés en amont ou à l'aval de l'ouvrage ;
- l'analyse de la performance des dispositions techniques, humaines et organisationnelles prises par l'exploitant pour maintenir un niveau de sécurité acceptable du risque.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre normatif plus général du processus de gestion des risques, issue de la norme ISO/CEI 31010:2009 « Gestion des risques - Techniques d'évaluation des risques ».

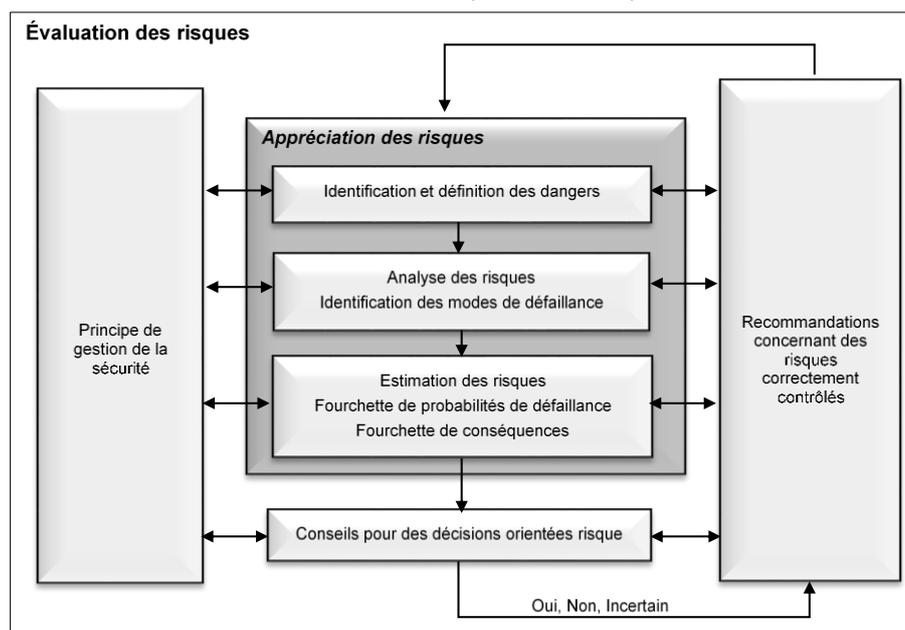


Figure 1.3 : Démarche d'évaluation des risques du Bulletin 130 de la CIGB replacée dans un contexte normatif ISO/CEI 31010:2009

La gestion et l'évaluation des risques constituent donc un processus itératif qui a pour objet de réduire les risques à un niveau jugé acceptable. Cette démarche est fondée sur **l'analyse des risques** qui consiste à :

- identifier les sources de dangers c'est-à-dire les éléments susceptibles d'engendrer des dommages significatifs dans leur environnement ;
- identifier de façon détaillée les différentes conditions dans lesquelles les dangers identifiés peuvent se matérialiser à travers des modes de défaillance ;
- caractériser les risques de façon quantitative, semi-quantitative ou qualitative, selon plusieurs critères tels la gravité des conséquences et la probabilité d'occurrence ;
- proposer des mesures de maîtrise et/ou de réduction des risques en les priorisant, notamment si le risque est jugé non maîtrisé. Le processus de réduction des risques se poursuit alors jusqu'à atteindre un niveau aussi bas que raisonnablement possible (ALARP : As Low As Reasonably Practicable).

1.3 Le cadre des études de dangers de barrages en France

Pour répondre à ces problématiques d'identification, de caractérisation et de gestion des risques des barrages, la réglementation française a introduit l'obligation de réaliser des analyses de risques à travers les « études de dangers ». Au cœur du dispositif de prévention des risques, l'étude de dangers constitue une base de travail essentielle dans l'élaboration des stratégies de prévention. Réalisée sous la responsabilité du responsable de l'ouvrage, elle s'attache principalement à démontrer explicitement la gestion des risques et la maîtrise des risques d'accidents majeurs associés au barrage et aux ouvrages annexes. Les études de dangers sont réalisées par des chargés d'études – bureaux d'études, services techniques du responsable de l'ouvrage - agréés par l'État pour leurs compétences démontrées. Elles sont soumises à l'examen de l'autorité de contrôle de l'État.

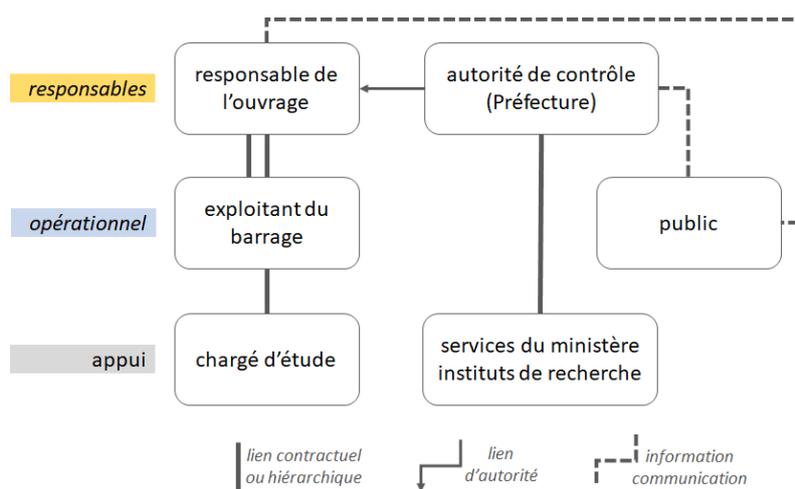


Figure 1.4 : Cartographie des acteurs des études de dangers des barrages en France (inspiré de l'ISO 9001)

Le cadre général de l'analyse de risques des barrages en France a été introduit dès 2007 dans le code de l'environnement, qui a rendu obligatoire la réalisation d'étude de dangers pour les grands barrages (voir encadré n°1 plus bas). L'objectif des études de dangers de barrages est l'évaluation des risques

que présente l'ouvrage pour la sécurité publique, directement ou indirectement, que la cause soit interne ou externe à l'ouvrage. Les causes externes sont liées aux aléas naturels (crues, séismes, glissements de terrain, avalanches,...) ou à l'environnement (défaillance d'autres ouvrages) ; le risque terroriste et de malveillance n'est pas considéré. Les causes internes comprennent l'état et le comportement du barrage, sa performance vis-à-vis des efforts auxquels il est soumis, mais aussi le fonctionnement des ouvrages de sécurité comme les évacuateurs de crues et les vidanges de fond, ainsi que les causes organisationnelles et humaines. Les études de dangers intègrent les événements de gravité moindre mais de probabilité plus importante tels que les accidents et incidents liés à l'exploitation courante de l'aménagement. Elle décrit également l'organisation du responsable de l'ouvrage et de son exploitant, en vue d'assurer la sûreté d'exploitation en situation courante ou lors d'un événement exceptionnel.

Les barrages en France sont classés en 3 classes en fonction de critères de hauteur et de volume retenu : la classe A concerne les grands barrages au nombre de 200, la classe B les barrages d'importance intermédiaire au nombre de 400 et la classe C les petits barrages au nombre de 1500. Les barrages de classe A et B sont soumis à étude de dangers. La périodicité des études de dangers est de 10 ans pour les barrages de classe A et de 15 ans pour les classes B. Depuis l'origine de la réglementation sur les études de dangers, quelques 600 études de dangers ont été réalisées en France.

L'évaluation des risques dans les études de dangers comprend l'évaluation de la sûreté des ouvrages et de leurs équipements et l'évaluation des enjeux. Elle comporte la détermination de la probabilité d'occurrence des défaillances et des accidents et la détermination des conséquences de leurs effets caractérisés en termes d'intensité, de cinétique et de gravité.

La réglementation sur les études de dangers date de 2007 avec une évolution en 2015. Les études de dangers intègrent un bilan de conception et d'état du barrage, incluant une analyse de la conception initiale du barrage, de la construction et des travaux importants, une analyse des conditions d'exploitation, de surveillance et de maintenance, une analyse du comportement notamment au vu des données d'auscultation et un bilan d'état établi sur la base des différentes inspections et examens approfondis menés sur le barrage. Le bilan d'état couvre l'ensemble des ouvrages qui constituent le barrage, y compris les parties habituellement noyées ou difficilement accessibles et les ouvrages de sécurité. L'ensemble de ces éléments constitue les données d'entrée pour l'analyse de risques proprement dite.

L'analyse de risques se conclut par la définition et la justification des mesures propres à réduire la probabilité d'occurrence et la gravité des conséquences de ces accidents. Les études de dangers de barrages en France identifient et proposent différentes mesures envisageables pour réduire les risques, de manière pérenne ou provisoire, programmées à court et moyen termes. Le bénéfice attendu de ces mesures de réduction des risques est indiqué.

1.4 La démarche et les étapes de l'analyse de risques des barrages en France

Les études de dangers telles que prévues par la réglementation française se réfèrent explicitement à l'analyse de risques et aux méthodes de la sûreté de fonctionnement associées. Les méthodes d'analyse, incluant l'évaluation de la sûreté et des enjeux, sont laissées au choix du responsable de l'ouvrage et de son chargé d'études, en fonction des caractéristiques de l'ouvrage à étudier.

En premier lieu, elle comprend l'analyse fonctionnelle du système étudié, incluant une analyse fonctionnelle externe portant sur les interactions avec l'environnement du barrage et une analyse fonctionnelle interne portant sur le système lui-même. Cette première étape débouche sur la définition des fonctions assurées par le barrage dans son environnement.

La deuxième étape est une analyse des modes de défaillances, qui étudie les causes et les effets des défaillances des fonctions assurées par le barrage.

La troisième étape est celle de la représentation des scénarios à partir de méthodes d'arbres, qui consistent à enchaîner les modes de défaillance selon un ordonnancement fonctionnel jusqu'à l'apparition de l'accident.

La dernière étape concerne l'évaluation de la sûreté. Pour chaque scénario, les études de dangers déterminent la probabilité d'occurrence, l'intensité, la cinétique et la durée de ses effets (débits et volumes relâchés) et la gravité des conséquences dans la zone concernée. Une étude de propagation de l'onde de submersion est fournie a minima pour les scénarios de rupture de l'ouvrage conduisant à une libération d'eau incontrôlée et préjudiciable. Les différents scénarios d'accidents sont positionnés les uns par rapport aux autres en fonction de leur probabilité d'occurrence et de la gravité des conséquences, en prenant en considération l'atteinte aux enjeux humains et matériels.

L'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un scénario est souvent réalisée de façon semi-quantitative à base de classes de probabilité. Parfois, elle est évaluée de façon quantitative incluant des modèles probabilistes notamment pour l'évaluation des aléas naturels. Dans les évaluations, le jugement de l'expert est fortement présent, notamment pour l'évaluation de défaillances pour lesquelles les données statistiques sont souvent insuffisantes.

L'analyse de la criticité croise l'évaluation de la probabilité d'occurrence et celle de la gravité des conséquences sur les enjeux pour chaque scénario d'accident. Elle est produite le plus souvent au moyen de grilles de criticité. Celles-ci ne sont pas imposées dans le code de l'environnement français et sont laissées à l'appréciation du gestionnaire et de son chargé d'études. Ainsi, la criticité apparaît dans la pratique française comme une notion subjective dont les niveaux d'acceptabilité ne sont pas définis dans la réglementation.

Les analyses de risques en France sont réalisées par des équipes plurielles, incluant différentes compétences de l'ingénierie – ingénierie du risque, génie civil, géotechnique, hydrologie, hydraulique, électromécanique, etc. –, le responsable de l'ouvrage et son exploitant du barrage, les différents prestataires (auscultation, suivi de l'ouvrage, ...). Cette synergie est importante pour recueillir toutes les informations relatives au barrage et à ses équipements, pour l'évaluation des scénarios et pour la définition des mesures de réduction des risques.

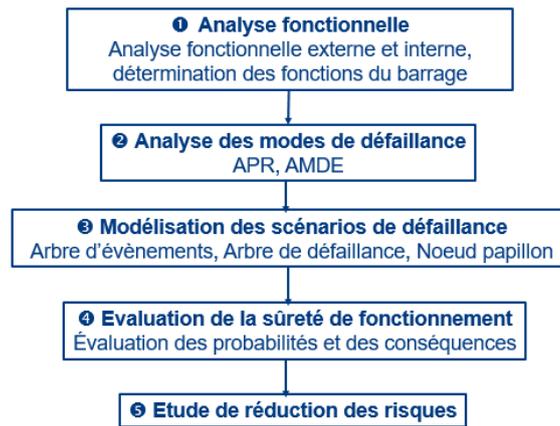


Figure 1.5 : La démarche d'évaluation des risques en France

1.5 Positionnement des pratiques françaises des études de dangers vis-à-vis des pratiques internationales de l'analyse de risques des barrages

Le terme « études de dangers » (EDD) vient de la terminologie employée en France dans les industries à risques. Ce sont ce que l'on appelle « évaluation des risques » (risk assessment) dans la pratique internationale, dont une des composantes est l'analyse de risques.

Au niveau international, l'analyse de risques a émergé dans les années 80 aux USA sous l'impulsion des agences fédérales suite aux catastrophes de Teton et de Kelly Barnes. Parmi d'autres pays, ce sont essentiellement l'Australie, le Canada et la Grande Bretagne qui ont développé des méthodologies dans les années 90. Tous ces acteurs ont développé des guides et des outils pour aider les praticiens à utiliser l'analyse de risques, avec des évolutions relativement fréquentes jusqu'à ces dernières années. Mais sauf exception il n'y a pas d'exigences réglementaires qui imposent le recours à l'évaluation des risques, ce qui constitue une différence importante par rapport au contexte français.

Les pratiques de l'analyse de risques utilisées à l'international présentent des différences, mais on peut dégager des points communs et comparer ce qui est proche ou diffère de la pratique française.

L'analyse fonctionnelle est présente partout et ne se distingue que par le niveau de détails où vont parfois certaines études.

L'analyse des modes de défaillance est souvent également plus détaillée que la moyenne de la pratique française, avec emploi fréquent de l'AMDEC (FMECA).

Il y a par contre des différences au niveau de la représentation des scénarios de défaillance : la pratique internationale est très axée sur les modes de rupture de l'ouvrage (PFMA en anglais) et cherche à en quantifier les probabilités. On trouve ainsi des études poussées sur les processus d'érosion interne, la stabilité des barrages sous sollicitations normales ou extrêmes, la submersion en période de crues, etc. Pour certains de ces modes de rupture, la modélisation de scénario utilise les arbres d'évènements (« event tree method »). La pratique française est différente car elle identifie d'abord, à partir d'une Analyse Préliminaire de Risques (APR) ou moins souvent à partir d'une AMDE, les événements dommageables, qui incluent les cas de ruptures totale ou partielle du barrage mais aussi des accidents d'exploitation dont les conséquences sont jugées inacceptables. Les scénarios sont modélisés ensuite par un arbre de défaillances (« fault tree ») ou moins souvent par un arbre d'évènements (« event tree ») identifiant les événements et/ou process qui peuvent conduire à ces

accidents. Les deux méthodes ont leurs avantages et inconvénients. La pratique française permet a priori de prendre en compte plus facilement l'ensemble des facteurs contributifs aux événements dommageables, et en particulier les facteurs organisationnels et humains. Elle permet également le positionnement des « barrières » sur les branches de l'arbre de défaillance et ainsi de bien visualiser les effets de ces barrières sur la propagation des événements pouvant conduire à un événement dommageable.

Une autre grande différence réside dans l'évaluation des risques (risk assessment) et l'évaluation de la probabilité des scénarios. Elles sont essentiellement quantitatives dans la pratique internationale alors que la pratique française fait le plus souvent le choix d'une évaluation semi-quantitative (détermination d'une classe de probabilité). Ainsi la pratique internationale utilise le plus souvent des graphes type F-N et y positionne les différents scénarios le plus précisément possible. L'évaluation des conséquences sur la population d'une rupture du barrage est donc très poussée, avec des modèles qui peuvent être très sophistiqués pour évaluer le nombre potentiel de victimes alors que la pratique française consiste à évaluer le nombre de personnes exposées. Il y a deux explications à cette différence majeure : dans certains pays le classement des barrages est basé sur les conséquences potentielles d'une rupture, et il y a donc intérêt à les évaluer au mieux. D'autre part l'acceptabilité sociétale d'un scénario de défaillance est parfois définie par sa position dans des zones d'acceptation ou non sur des graphes de type F-N. On peut noter cependant que les critères de décision sont actuellement rarement basés directement sur les résultats de l'analyse de risques (approche appelée « Risk Based Decision Making ») mais suivent plutôt une démarche de type « RIDM » (Risk Informed Decision Making) dans laquelle les décisions sont prises en prenant en compte les estimations du risque ainsi que de nombreux autres facteurs contributifs tels que l'incertitude de l'analyse elle-même, les résultats des études déterministes, les contextes régionaux et nationaux, etc.

En France le classement des barrages ne dépend pas des conséquences d'une rupture mais de la géométrie du barrage et du volume de la retenue. Il n'y a pas non plus de règles formelles concernant l'acceptabilité sociétale des scénarios de défaillance et en ce sens on se rapproche d'une démarche RIDM. Les conséquences sont évaluées par les moyens habituels (modèles d'écoulement 1D ou 2D, dénombrement des zones et populations impactées). Les résultats sont utilisés pour positionner les accidents dans une matrice de criticité ce qui facilite leur inter comparaison et la priorisation des décisions de réduction de risques lorsque cela est jugé nécessaire.

2 Les données d'entrée de l'analyse de risques

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de préciser la nature des données que l'on va collecter et produire pour la réalisation des analyses.

La pratique française des études de dangers prévoit le recueil des d'entrées sous la forme suivante :

- Les données générales de l'ouvrage, incluant les données descriptives et les données sur l'organisation de l'exploitation ;
- Les données sur les aléas naturels ;
- Les données issues d'examens et de diagnostics spécifiques prévus lors de la réalisation de l'étude de dangers. (Définir/introduire du diagnostic de l'état)

Ces points sont développés dans la suite du chapitre.

2.2 Collecte des données d'entrée

2.2.1 Données de référence descriptives des ouvrages et matériels

- Caractéristiques de la retenue ;
- Données géologiques et géotechniques : rapport de synthèse des reconnaissances géotechniques, caractéristiques mécaniques des terrains de fondation et des matériaux de construction, procès-verbal de réception des fonds de fouille, rapports de travaux d'injection et/ou autre dispositifs d'étanchéité, étude de stabilité des versants de la retenue ...
- Notes de calcul de génie civil et de la vantellerie, avec hypothèses retenues à la conception : caractéristiques mécaniques des matériaux de construction, hypothèses de chargement, méthode de calcul employée, coefficients de sécurité obtenus pour la stabilité globale et la résistance interne, ... ;
- Plans de dimensionnement des ouvrages et des matériels ;
- Etudes techniques spécifiques : hydrologie, étude d'aléas sismique, hydraulique des ouvrages, débitance des vannes, transport sédimentaire, ...
- Schéma unifilaire d'alimentation électrique du barrage,
- Schémas et/ou notices de fonctionnement :
 - Des modes de commande des vannes ;
 - Des automatismes de surveillance (mesures de niveau, élaboration et diffusion des alarmes, ...) ;
 - De l'automatisme de commande automatique (Automate Programmable Barrage, ...).
- Rapports de mise en eau ;
- Procès-verbaux et dossiers de récolement mentionnant les essais de réception et de qualification des matériels et fonctions.

Ces données ont pu être actualisées et modifiées au cours du temps, par exemple l'hydrologie ou l'aléa sismique, les cotes d'exploitation en crue, la débitance des vannes ... l'établissement d'un état actualisé de ces données de références est essentiel.

Lors de la phase de collecte, il est également nécessaire de s'attarder sur les travaux de maintenance et de modification des ouvrages et des matériels, avec les plans et les études associés, qui ont pu entraîner une modification des usages, des fonctions assurées par le barrage et des procédures d'exploitation. Il s'agit en particulier de retrouver les comptes rendus de travaux conséquents d'entretien ou de réparation (réfection de l'étanchéité du barrage,...), des travaux modificatifs (ajout d'un évacuateur de secours,...) ainsi que les comptes rendus d'expertise et de travaux réalisés suite à incident ou situation à risque pour l'amélioration de la sûreté (par exemple réfection des vannes ou de leur système de manœuvre,...).

Les données descriptives des enjeux susceptibles d'être impactés par le barrage et son exploitation sont également collectées : activités, occupation du territoire, zones à enjeu, Par exemple, il peut être intéressant de collecter les règlements ou décisions qui impactent l'exploitation des ouvrages, les conditions d'accès aux ouvrages, à la rivière ainsi que les arrêtés locaux qui définissent généralement les activités en bordure et/ou sur la retenue ainsi que les interdictions.

Enfin, il est utile de faire preuve d'esprit critique lors de la phase de collecte : valider les informations et de s'assurer de leur qualité pour établir une base de données fiable est un prérequis indispensable.

2.2.2 Données d'exploitation, de surveillance et de maintenance

L'évaluation de la sûreté de l'ouvrage repose sur une bonne connaissance du comportement et de l'état de l'ouvrage en exploitation pour évaluer sa performance et détecter les anomalies et les désordres. Cela est également nécessaire pour analyser de la bonne adéquation de l'exploitation, de la maintenance, de la surveillance et des mesures menées pour maintenir et/ou améliorer le niveau de sûreté.

Les documents nécessaires peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur fréquence de production :

- Les documents courants renseignés en continu ;
- Les documents de synthèse et d'analyse émis à fréquence prédéfinie (annuelle, biennale, quinquennale, décennale) ;
- Les documents exceptionnels émis suite à des sollicitations exceptionnelles (crues, séismes,...) ou relatifs à des défaillances.

2.2.2.1 Les données d'exploitation

Elles regroupent :

- un journal de l'exploitant qui contient une brève description des actions de surveillance, des événements particuliers (crue, séisme) et des travaux réalisés ;
- Les éléments de gestion de l'ouvrage notamment lors du passage des crues.

Ces données sont tracées dans un **registre** tenu à disposition de l'Autorité de contrôle.

En cas d'incident ou d'accident ou d'événements marquants, une information de l'autorité de contrôle est faite au travers d'une première déclaration, et le cas échéant d'un **rapport d'évènements**. Par exemple, pour les épisodes hydrologiques marquants, l'Exploitant rédige un **rapport de crue**.

2.2.2.2 Les données de surveillance

Les données nécessaires sont :

- Le recueil des conditions d'exploitation hydraulique de la retenue
- Les comptes-rendus :
- des inspections visuelles de routine menées par l'Exploitant
- des investigations approfondies pour un suivi régulier de l'état des ouvrages ;
- Les rapports d'auscultation ou d'analyse comportementale ;
- Les rapports d'incidents.

Dans la pratique française, ces documents prennent la forme suivante :

- Le **rapport de surveillance** intègre notamment la synthèse des visites de routine programmées et des visites techniques approfondies ;
- Le **rapport d'auscultation** rédigé par un organisme agréé « Auscultation » par l'Administration ;
- Un **examen technique complet** associé à une **revue de sûreté** conduits par un organisme agréé « Dignes et barrages - études et diagnostics » et permettant de préciser l'état de chacun des composants de l'ouvrage ;
- Les **rapports d'incidents ou d'accidents** relatifs à la sécurité des personnes ou à des dommages aux biens et déclarés à l'Autorité de Contrôle conformément aux exigences réglementaires. Ces événements peuvent être relatifs à une action d'exploitation, au comportement intrinsèque de l'ouvrage ou à une défaillance d'un de ses éléments. Ceux qui ont eu une conséquence sur la sécurité des personnes ou causé des dommages aux biens sont des « EISH » (événements importants pour la sûreté hydraulique). Les événements précurseurs ou presque accidents sont également recensés.

2.2.2.3 Les données de maintenance

Les travaux de maintenance peuvent avoir un caractère préventif, correctif ou d'urgence. Les programmes de maintenance planifiée concernent notamment des interventions périodiques comme les essais de fonctionnement (manœuvres de vannes), l'entretien des composants, le contrôle de capteurs. Le résultat de ces interventions est tracé et permet d'évaluer le niveau de fiabilité du fonctionnement de certains organes mais aussi des systèmes de protection mis en œuvre.

2.2.3 Documents d'organisation et procédures d'exploitation

2.2.3.1 Organisation

Le SGS (système de gestion de la sécurité) décrit l'organisation mise en place pour assurer l'exploitation de l'ouvrage, son entretien et sa surveillance en toutes circonstances, les moyens d'information et d'alerte lors des aléas naturels (crues, séismes). Ce document est indispensable pour l'étude de dangers.

Dans la pratique française, le propriétaire d'un barrage produit ce document dont les éléments sont intégrés directement dans les études de dangers dans un chapitre portant sur la Politique de sécurité et le Système de Gestion de la Sécurité.

2.2.3.2 Procédures d'exploitation

Les documents relatifs aux activités d'exploitation et de surveillance des ouvrages décrivent :

- Les opérations de surveillance ;
- Les conditions d'organisation, de partage de l'information et de gestion des ouvrages en exploitation normale et en crue ;
- Les modalités de manœuvres des organes mobiles (vannes) en essais, en période de crues ou lors des vidanges ;
- Les procédures à suivre en cas d'évènements non courants (séismes, accidents...) ;
- La prévention des accidents.

Dans la pratique française, ces informations sont rassemblées dans **les consignes de surveillance** des ouvrages et **les consignes d'exploitation en période de crue**.

2.2.4 Synthèse de la collecte des données existantes

L'étape préalable de collecte des informations est un élément primordial du processus car la complétude et la qualité des données conditionnent la pertinence de l'analyse de risques et de l'évaluation de sûreté. Même s'il s'agit d'un exercice souvent fastidieux et relativement onéreux, qui s'apparente quelquefois à un véritable travail d'historien ou de documentaliste, il est essentiel d'accorder à cette phase de collecte suffisamment de temps et de moyens pour obtenir des données d'entrée pleinement utilisables.

L'une des principales difficultés de la phase de collecte est d'apprécier la pertinence et la qualité des données. Une analyse critique nécessitant des compétences dans les différents domaines concernés (génie civil, hydraulique, géotechnique, vannerie, etc..) mais également dans les méthodes d'analyses de risques, est indispensable pour juger de l'intérêt et de la qualité des données, et identifier les éventuelles lacunes. C'est la conclusion de cette analyse critique qui permettra à l'ingénieur de préconiser à bon escient des études voire des travaux complémentaires : calculs de stabilité, campagnes de reconnaissances, étude hydrologique, etc...

Pour un barrage récent, la collecte et l'analyse seront normalement facilitées : données bien archivées, en nombre suffisant, qui répondent aux critères récents vis-à-vis du dimensionnement des ouvrages et de la sûreté.

Dans le cas d'un barrage ancien, les données de référence (hypothèses de conception, plans de projet) sont souvent beaucoup plus problématiques à obtenir. Elles ont pu être égarées au fil du temps (changement de propriétaire, déménagement ou destruction des archives, etc..), sont souvent incomplètes ou peu précises. Les plans d'origine et les documents d'archive permettent rarement de définir avec précision les caractéristiques des ouvrages, leur constitution, le mode de construction, etc... Pour le cas extrême de barrages très anciens, ces données de référence n'ont jamais existé, le dimensionnement des ouvrages étant à l'époque réalisé sans méthodologie ou règles clairement établies, et avec un minimum de traçabilité. De même, les données d'exploitation, de surveillance et de maintenance sont souvent hétérogènes, incomplètes et difficilement utilisables en l'état. Les incertitudes sont alors trop importantes pour mener à bien l'analyse de risques.

Si le but premier de la collecte est d'alimenter l'analyse de risques, c'est également l'occasion de rassembler, trier, classer, archiver, mettre à jour et compléter toutes les données existantes. Cet état

des lieux est précieux pour le responsable d'ouvrage, qui dispose, une fois les études réalisées, d'un descriptif complet, précis et fiable du barrage et de son fonctionnement, qui lui permettra d'améliorer l'exploitation et la maintenance de son ouvrage. L'investissement consacré à la collecte des données, si ces dernières sont pérennisées (par exemple en numérisant et archivant soigneusement tous les documents récupérés), est donc largement justifié.

Lorsque les données collectées sont insuffisantes et qu'il est difficile pour le responsable de l'ouvrage de lancer des investigations rapidement, l'analyse de risques tient compte des incertitudes correspondantes et préconise, si nécessaire, des investigations pour lever les incertitudes.

2.3 Identification et caractérisation des aléas naturels

Tous les aléas naturels présents au niveau du barrage et dans son environnement sont recensés, sans préjuger à ce stade de leur sensibilité vis-à-vis de la sûreté du barrage.

La caractérisation de chaque aléa s'appuie sur les études existantes disponibles sur l'ouvrage étudié en application des réglementations, règles de l'art et recommandations, et en tenant compte des observations et des manifestations les plus récentes de l'aléa. En l'absence de référence existante pour définir le dimensionnement attendu de l'aléa, une étude spécifique peut être réalisée pour alimenter l'étude de dangers.

Les principaux aléas naturels considérés sont systématiquement :

- L'hydrologie et les crues du bassin versant alimentant la retenue,
- Le séisme.

D'autres aléas spécifiques au site peuvent être considérés selon les situations :

- Les risques de mouvements de terrain et d'avalanches, en particulier autour de la retenue,
- Le vent,
- La foudre,
- Les feux de forêt,
- Le gel,
- La neige,
- L'envasement,
- Et pour les remblais, les érosions de berges et les évolutions morphologiques du lit.

2.4 Examens et diagnostics pour l'évaluation de sûreté

Pour réduire les incertitudes d'évaluation des scénarios de défaillance et de leurs conséquences, les études de dangers des barrages en France prévoient spécifiquement :

- Des examens des parties d'ouvrages et matériels ne faisant pas l'objet d'une surveillance régulière afin de disposer d'une « photographie » complète et actualisée de l'état des ouvrages et des matériels ;
- Des diagnostics de l'état, du comportement et du fonctionnement des différents ensembles techniques étudiés dans le cadre de l'analyse de risques. Ceux-ci s'appuient sur les études

existantes et éventuellement sur des compléments d'études afin de préciser certaines hypothèses ou résultats de calculs.

2.4.1 Les inspections spécifiques

Ces inspections ont pour objectif de fournir des informations additionnelles ou manquantes, par rapport à celles déjà produites par les activités de surveillance réalisées à des pas de temps annuels ou infra-annuels. Il s'agit ainsi d'examens spécifiques :

- sur des ouvrages et matériels situés dans des zones immergées ou difficiles d'accès ;
- nécessitant des moyens spéciaux d'inspection et d'essais, ou générant de fortes contraintes et impacts sur les usages, l'exploitation, l'environnement, les riverains, et l'activité économique liée au barrage.

Les conditions de réussite de ces examens résident dans leur préparation (de l'ordre de 1 an, voire jusqu'à 3 ou 4 ans en cas de vidange), et la définition préalable :

- de la liste détaillée des ouvrages et matériels objets des examens,
- des attendus et objectifs détaillés des examens : par exemple, mesurer l'épaisseur d'une conduite métallique, évaluer son état de corrosion, caractériser l'état de fissuration du masque étanche d'un parement amont, évaluer l'évolution d'une surface de glissement sur un versant de la retenue, déterminer les caractéristiques mécaniques d'un béton par carottage et analyse en laboratoire ...
- des conditions et contraintes d'exploitation,
- des moyens techniques nécessaires et des compétences requises pour leur réalisation,
- des restitutions attendues des examens : supports photographiques, vidéos, plans détaillés de fissuration, résultats numériques de mesures, ...

Les figures 2.1 à 2.9 ci-dessous illustrent différents types d'examens ayant été réalisés sur des barrages dans le cadre de l'analyse de risques.

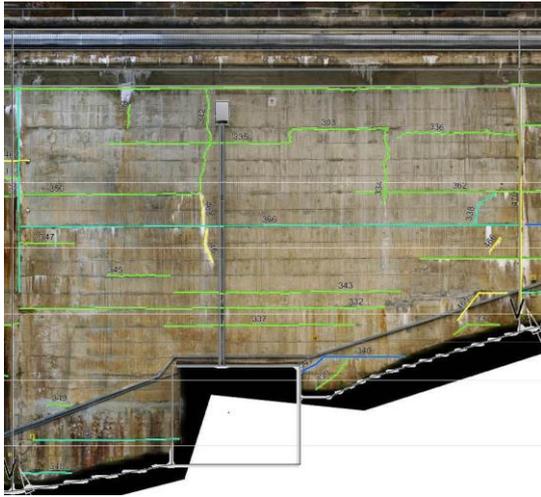


Figure 2.1 – Relevé d'un état de fissuration sur ortho-photographie

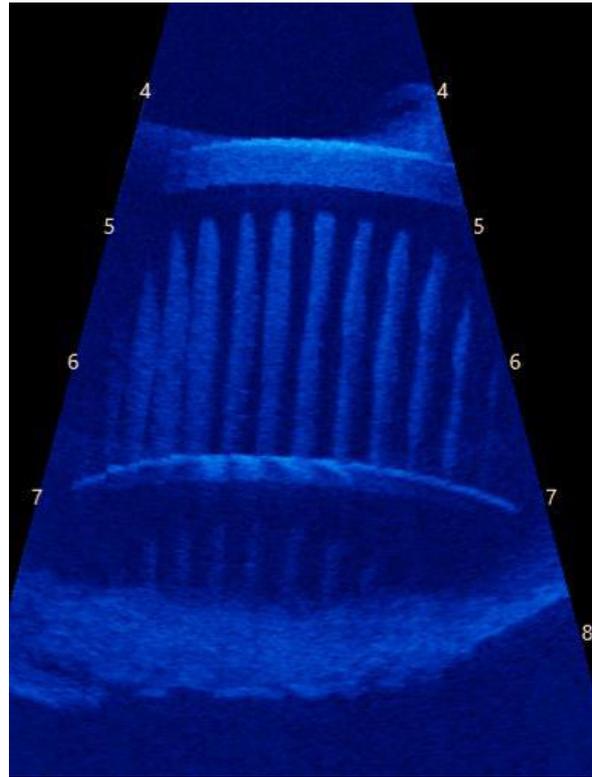


Figure 2.2 – Vérification du dégagement par caméra acoustique des grilles de la prise d'eau d'un conduit de vidange de fond



Figure 2.3 – Vérification de la position des poires d'alarme dans un puits



Figure 2.4 – Relevé par robot sous-marin de la dégradation de l'enduit d'étanchéité à proximité d'un joint amont

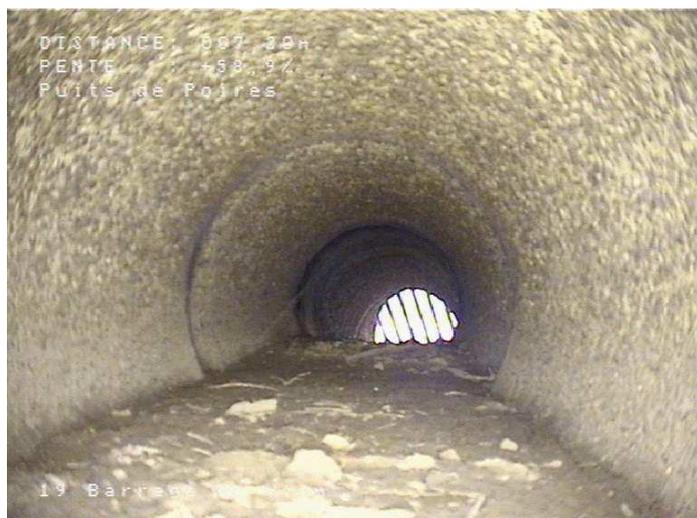


Figure 2.5 – Inspection par caméra de l'état d'un drain



Figure 2.6 – Examen de l'état de la chaîne Galle de manœuvre d'une vanne d'évacuateur de crues



Figure 2.7 – Examen de l'état de la lentille d'une vanne papillon dans un conduit de vidange



Figure 2.8 – Examen de l'état des raccords inox entre le vérin et la centrale oléo-hydraulique



Figure 2.9 – Examen géologique de blocs instables sur l'une des rives du barrage

2.4.2 Diagnostic de l'état, de la conception et du comportement des ouvrages de génie civil

Dans la pratique des analyses de risques en France, ces diagnostics ont pour objectif l'évaluation :

- De la capacité des ouvrages et structures à répondre aux sollicitations attendues : on pense naturellement au barrage lui-même, mais cela concerne aussi les structures de génie civil (y compris les ouvrages en remblai) nécessaires à l'évacuation des crues (prises d'eau, seuils, coursiers, bajoyers, fosses aval, ...), la vidange, les structures de reprise d'efforts des vannes ...
- De l'évolution au cours du temps de leur état et de leur performance, en évaluant les conséquences potentielles des dégradations, pathologies et phénomènes anormaux.

Ce diagnostic s'appuie sur les données collectées, et produites lors des examens :

- Les notes d'études, de conception et de dimensionnement, ainsi que les données décrivant la phase de réalisation. La perspective historique est ici très importante pour comprendre les choix initiaux du concepteur, valider que les hypothèses de dimensionnement sont toujours acceptables, se faire une idée du soin apporté et des difficultés rencontrées lors du chantier et analyser toutes les évolutions et modifications intervenues en phase d'exploitation ;
- Le comportement actuel et passé du barrage, sous l'effet du vieillissement et des différentes sollicitations rencontrées depuis sa mise en eau, en caractérisant les évolutions mesurées au cours du temps. Cette analyse se fait à partir de toutes les données d'auscultation disponibles, notamment celles acquises lors de la mise en eau, voire en phase chantier, si elles ont pu être récupérées ;
- Les défauts et dégradations des ouvrages relevés lors des visites techniques, et les pertes de performance révélées par des examens et analyses spécifiques (par exemple analyses en laboratoire des caractéristiques de matériaux ou sols, examen par caméra de l'état des drains, ...), les évolutions des caractéristiques et des conséquences des agresseurs présents dans la zone étudiée ;
- Les conséquences observées à la suite d'évènements rares ou de sollicitations inhabituelles des ouvrages et structures : après un séisme, suite au passage d'une crue, en cas d'atteinte d'une cote inhabituellement haute, pendant une période de froid exceptionnel, lors d'une vidange, ...

Des compléments d'études pourront s'avérer nécessaires lorsque les données disponibles ne permettent pas l'établissement d'un diagnostic avec un niveau de complétude et d'incertitude acceptables. Par exemple :

- Sur la caractérisation des aléas naturels : hydrologie, séisme ;
- Sur la justification des facteurs de sécurité des ouvrages vis-à-vis des différents cas de chargement ou modes de défaillance possibles ;
- Sur le dimensionnement d'un bouchon en béton dans une galerie ancienne.

2.4.3 Diagnostic de l'état et du fonctionnement des matériels hydromécaniques

Ce diagnostic concerne les composants mécaniques assurant une fonction de sécurité : vannes, chaînes cinématiques, vérins, Il a pour objectif l'évaluation :

- De leur capacité à résister aux efforts et à manœuvrer sans dommage dans les différentes configurations d'exploitation envisagées ;
- De leur fiabilité de fonctionnement dans les différents cas d'usage prévus ;
- De l'évolution de leur état, en évaluant les conséquences potentielles des dégradations relevées (notamment des phénomènes de corrosion et de fatigue).

Pour les ouvrages anciens, lorsque des remplacements ou des modifications de matériels ont été effectuées, le diagnostic se limite aux matériels en service au moment de l'analyse.

Le diagnostic d'état des matériels électromécaniques s'appuie sur les données collectées et produites lors des examens, en analysant en particulier :

- Les notes d'études, de conception et de dimensionnement, ainsi que les procès-verbaux des contrôles de fabrication et des essais de réception. La connaissance des ateliers ou usines de fabrication peut fournir des renseignements utiles sur les procédés utilisés et la qualité de réalisation des différents éléments ;
- Les défauts et dégradations relevés lors des examens visuels, ainsi que les résultats des essais périodiques réalisés par l'exploitant. La dérive des paramètres mesurés lors des essais (temps d'ouverture/fermeture, efforts de manœuvre des vérins ou intensité des moteurs électriques, niveau de remplissage de la chambre de mise en pression pour l'ouverture d'une vanne à flotteurs) peut ainsi permettre de détecter des précurseurs de défaillances futures ;
- Les incidents de fonctionnement et les défaillances matérielles rencontrés en exploitation normale : ouvertures ou fermetures intempestives, rupture d'un vérin, d'une brimbale ou d'un circuit hydraulique ... et les actions menées a posteriori ;
- Le bilan du fonctionnement des organes de sécurité lors d'évènements rares ou lors de sollicitations inhabituelles : après un séisme, après le passage d'une crue, en cas d'atteinte d'une cote inhabituellement haute, en période de froid sévère ou de gel, ...

Des compléments d'études peuvent s'avérer nécessaires lorsque les données disponibles ne permettent pas l'établissement d'un diagnostic avec un niveau de complétude et d'incertitude acceptables. Par exemple :

- Justification des marges de sécurité disponibles pour la résistance des vannes et des conduits d'organes de sûreté suite à des pertes d'épaisseur par corrosion ;
- Vérification de la débitance d'un circuit de vidange de la retenue qui aurait été modifié.

2.4.4 Diagnostic de l'état et du fonctionnement des systèmes de contrôle-commande des organes de sécurité

Ce diagnostic concerne les systèmes de contrôle-commande des organes de sécurité et a pour objectif l'évaluation :

- De la robustesse et de la fiabilité de fonctionnement des dispositifs de surveillance détectant et transmettant des informations à un automate et/ou à l'exploitant avec une finalité précise, par exemple : manœuvre de vanne, arrêt de pompage, ... ;
- De la disponibilité et de l'éventuelle redondance des sources d'énergie nécessaires au fonctionnement des organes et dispositifs de sécurité du barrage. Cela concerne les réseaux électriques, les groupes électrogènes de secours, les batteries, etc. ;
- De la robustesse et de la fiabilité de fonctionnement des systèmes de commande, de contrôle et de protection des organes de sécurité. Cela concerne les locaux et les armoires de commande, les crantages pour limiter l'ouverture, les arrêts de secours, les câblages, les capteurs (cote de retenue, indicateurs d'ouverture, limiteurs d'efforts ...).

Tous ces systèmes ont généralement connu de nombreuses évolutions de leur conception, de leur technologie (transmissions par fibre optique ou liaison GPRS), ainsi que des modifications et des remplacements de logiciels et de composants. Des schémas techniques et fonctionnels actualisés des systèmes, ainsi que des échanges avec l'exploitant, sont souvent utiles à une bonne compréhension de leur fonctionnement dans les différentes configurations d'exploitation envisagées.

Le diagnostic s'appuie sur les données collectées, et produites lors des examens, pour analyser :

- La conception des différents systèmes, avec un regard attentif sur les redondances et les modes communs existants ;
- Les résultats des actions de surveillance et de contrôle périodiques ;
- Les incidents de fonctionnement et les défaillances matérielles rencontrés en exploitation normale et ayant des enjeux de sûreté : non détection d'évènement par un capteur, erreur de la mesure de cote, poire de détection de niveau haut de la retenue défaillante, non transmission des alertes, pertes fréquentes d'alimentation des organes de sécurité, groupe électrogène de secours en panne, comportement non attendu de l'automate d'un barrage ... et les actions menées a posteriori ;
- Le bilan de leur fonctionnement à la suite de modifications de consignes d'exploitation, lors d'évènements rares ou lors de sollicitations inhabituelles : lors du passage d'une crue, en cas d'atteinte d'une cote inhabituellement haute, ...

Les compléments d'études sont peu fréquents dans ce domaine, mais peuvent s'avérer nécessaires par exemple :

- Pour justifier du bon dimensionnement de la puissance d'un moteur électrique ;
- Pour vérifier l'autonomie de fonctionnement d'un groupe électrogène.

3 Analyse fonctionnelle

3.1 Introduction

L'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions. Elle décrit les usages assurés par le barrage étudié – stockage d'eau, production hydroélectrique, écrêtement des crues, soutien d'étiage.... Elle définit les fonctions des différents composants ainsi que les interactions entre le barrage et son environnement.

La réalisation d'une analyse fonctionnelle se déroule généralement en trois étapes principales comprenant :

- La description du système étudié et de son environnement ;
- L'analyse fonctionnelle interne ;
- L'analyse fonctionnelle externe.

L'objectif de l'analyse fonctionnelle est donc de disposer :

- d'une description précise du barrage, de ses composants et sous-composants, et des liens entre composants et environnement de l'ouvrage ;
- d'une liste des fonctions principales et technologiques de chaque composant et sous-composants.

Les informations obtenues par l'analyse fonctionnelle servent de base à l'application de méthodes de recherche de modes de défaillance (chapitre 4) mais aussi dans l'appréciation des conséquences de ces défaillances.

L'analyse fonctionnelle utilise les données d'entrée décrites au chapitre 2, notamment celles relatives à la description des ouvrages et de leurs composants, et celles relatives au fonctionnement.

3.2 Définition du système étudié et de son environnement

3.2.1 La zone d'étude

Un préalable à l'analyse fonctionnelle est la définition de la zone d'étude qui comprend les éléments de l'environnement de la retenue et du barrage qui peuvent agir en tant qu'agresseurs ou enjeux potentiel :

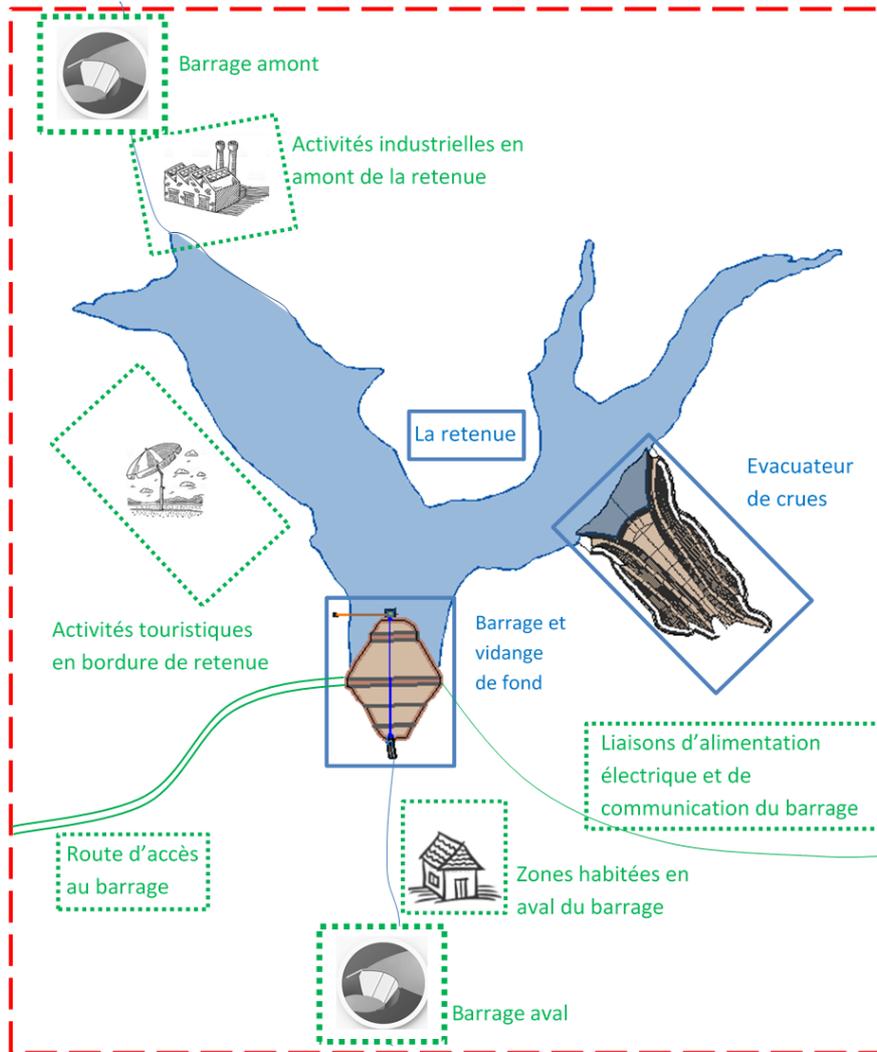


Figure 3.1 : Illustration de la zone d'étude (périmètre et son environnement)

- Les zones dans l'environnement du barrage et du réservoir (fond et rives de la retenue, fondations, appuis et versants du barrage et du réservoir principalement) qui participent ou peuvent influencer sur les fonctions de retenue, de passage de l'eau et de stabilité des ouvrages ;
- Les enjeux aval et amont susceptibles d'être impactés par un événement accidentel en lien avec le barrage :
 - Les zones habitées et les infrastructures sensibles (école, hôpital...) ;
 - Les barrages en amont et en aval ;
 - Les activités industrielles et agricoles avec une attention en amont sur les activités pouvant générer des embâcles et en aval sur les installations classées ;

- Les activités touristiques, de pêche et de chasse ;
- Les voies de communication et infrastructures de transports ;
- Les ouvrages et matériels situés à proximité du barrage ou de la retenue susceptibles d'influer sur les fonctions listées précédemment. Ils peuvent agir de manière défavorable (en tant qu'agresseur) ou favorable (en tant que barrière) ;
 - Les voies d'accès : la coupure de l'une des voies d'accès au barrage ou de l'unique voie d'accès peut présenter un enjeu majeur (impossibilité d'accéder rapidement à l'ouvrage pour manœuvrer les vannes de crues, ...) ;
 - L'alimentation électrique : un défaut d'alimentation pourrait conduire à l'impossibilité de manœuvrer normalement les organes de sécurité ;
 - Certains éléments peuvent également agir en tant que barrière de sécurité, comme les alimentations de secours : ligne électrique secondaire, groupe électrogène, possibilité de manœuvrer manuellement les organes de sécurité ;
 - Les dispositifs et automatismes de surveillance, et les liaisons de télécommunication du barrage : une défaillance de ces matériels pourrait conduire à un problème de détection d'un défaut ou de transmission des alarmes à l'exploitant ;
 - Les équipements d'usine rattachés à la fonction de service de l'ouvrage mais non inclus dans le périmètre de l'analyse fonctionnelle interne car ne constituant pas une fonction de sécurité.

3.2.2 Le périmètre d'étude

Le périmètre d'étude de l'analyse fonctionnelle comprend :

- Le barrage et tous les ouvrages et matériels associés contribuant directement aux fonctions de sécurité ;
- Le corps du barrage, avec sa fondation et ses appuis, ainsi que les dispositifs d'étanchéité et de drainage de l'ouvrage. Cela peut inclure également des structures accolées au barrage :
 - Participant directement à la stabilité d'ensemble du barrage : centrale hydroélectrique en pied de barrage par exemple,
 - Ou constituant elle-même un « barrage » : centrale hydroélectrique accolée au barrage et barrant la rivière.
- L'évacuateur de crues et la vidange de fond, qui peuvent être décomposés chacun en différents sous-composants :
 - Structure génie civil, en particulier dans le cas d'ouvrages déportés du barrage,
 - Vantellerie : vanne segment, vanne wagon...,
 - Chaîne cinématique et énergie de manœuvre des vannes : par exemple, treuil à chaîne Galle, chaîne de brimbales ou vérins hydrauliques...,
 - Dispositif de commande des vannes : lieu de manœuvre des vannes (en local et/ou en déporté, avec vue ou non sur la vanne) et mode de commande (par exemple, action sur des boutons poussoirs de l'armoire de commande de la vanne).

- Les conduits et ouvrages traversant le barrage, sa fondation ou ses appuis ou les dispositifs d'étanchéité : il peut s'agir d'une ancienne galerie de dérivation provisoire fermée par un bouchon béton ou un fond plein métallique ou encore un dispositif de restitution du débit réservé.

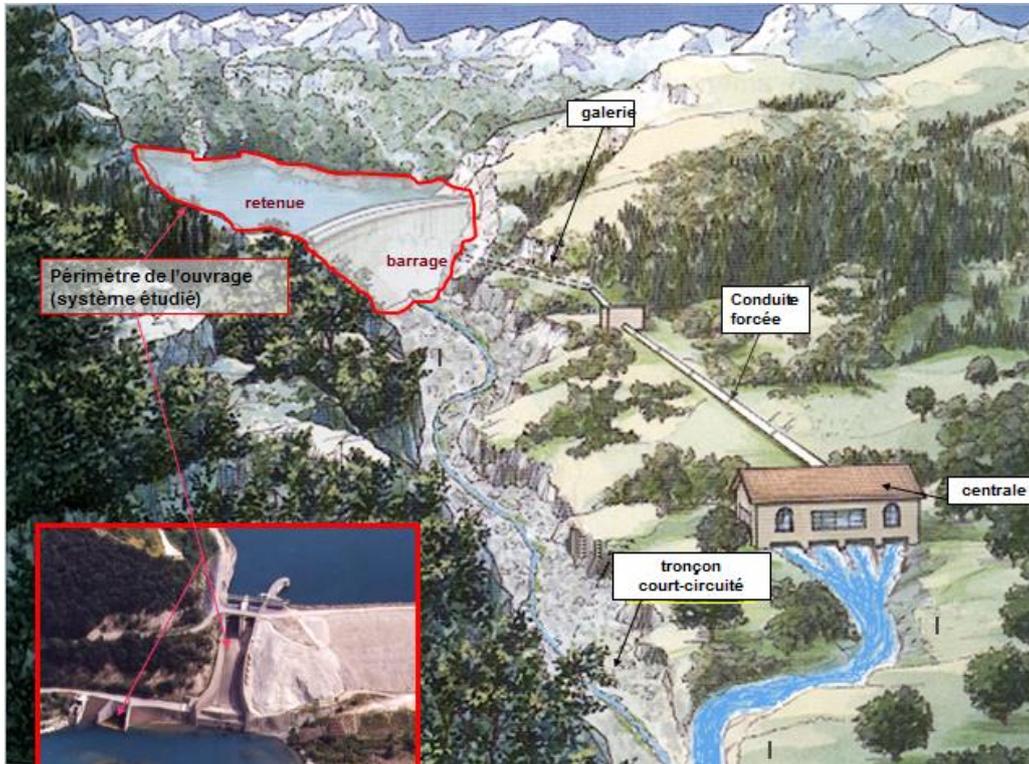


Figure 3.2 : Illustration du périmètre d'étude

3.3 Analyse fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle externe a pour objet de décrire les interactions entre l'environnement de l'ouvrage et le barrage lui-même, de manière à déterminer les fonctions accomplies à l'échelle du barrage. On entend par environnement de l'ouvrage tous les éléments situés en amont et en aval de l'ouvrage et possédant un lien avec l'objet de l'analyse des risques. Ce lien peut s'établir suivant deux grandes thématiques :

- Les facteurs d'agression externe de l'ouvrage ou les aléas ;
- Les enjeux potentiels en termes de sécurité.

Les interactions entre l'environnement et le barrage sont analysées en considérant les fonctions suivantes :

Les fonctions principales (FP) liées à la sûreté du barrage :

- Le barrage permet de retenir l'eau ;
- Les débits à l'aval du barrage sont maîtrisés ;
- Le niveau amont du barrage est maîtrisé.

D'autres fonctions principales existent sans être généralement étudiées :

- Le barrage permet d'assurer la fonction de « production » : hydroélectricité, alimentation en eau pour l'irrigation, le soutien d'étiage, ...
- Le barrage permet d'assurer le maintien d'un débit réservé à l'aval immédiat du barrage.

En parallèle, on peut distinguer **les fonctions technologiques** (ou *fonctions de contrainte FC*), qui répondent à une contrainte extérieure imposée par l'environnement. Un certain nombre de ces fonctions sont listées ci-dessous :

- Le barrage doit résister aux actions de l'eau (sous-pressions, poussée hydrostatique, infiltrations/percolation, lâchures du barrage amont) ;
- Le barrage doit résister aux séismes ;
- Le barrage est suivi, entretenu et surveillé pour assurer sa sécurité ;
- Le barrage est alimenté électriquement ;
- Le barrage est accessible au personnel d'exploitation et de maintenance en toutes circonstances et en parfaite sécurité ;
- Le barrage est exploitable lors d'évènements climatiques singuliers (incendie, gel, neige, vent) ;
- La vitesse de descente du plan d'eau est maîtrisée vis-à-vis du risque de glissement d'un ouvrage amont.

Le recueil de ces éléments est indispensable pour permettre, l'analyse de risques et l'évaluation des scénarios de défaillance (chapitre 6).

Le rendu de l'analyse fonctionnelle externe peut être réalisé sous forme de bloc diagramme fonctionnel, mais certaines EDD ne formalisent pas l'analyse fonctionnelle externe et donnent directement les fonctions principales liées à la sûreté à l'échelle de l'ouvrage.

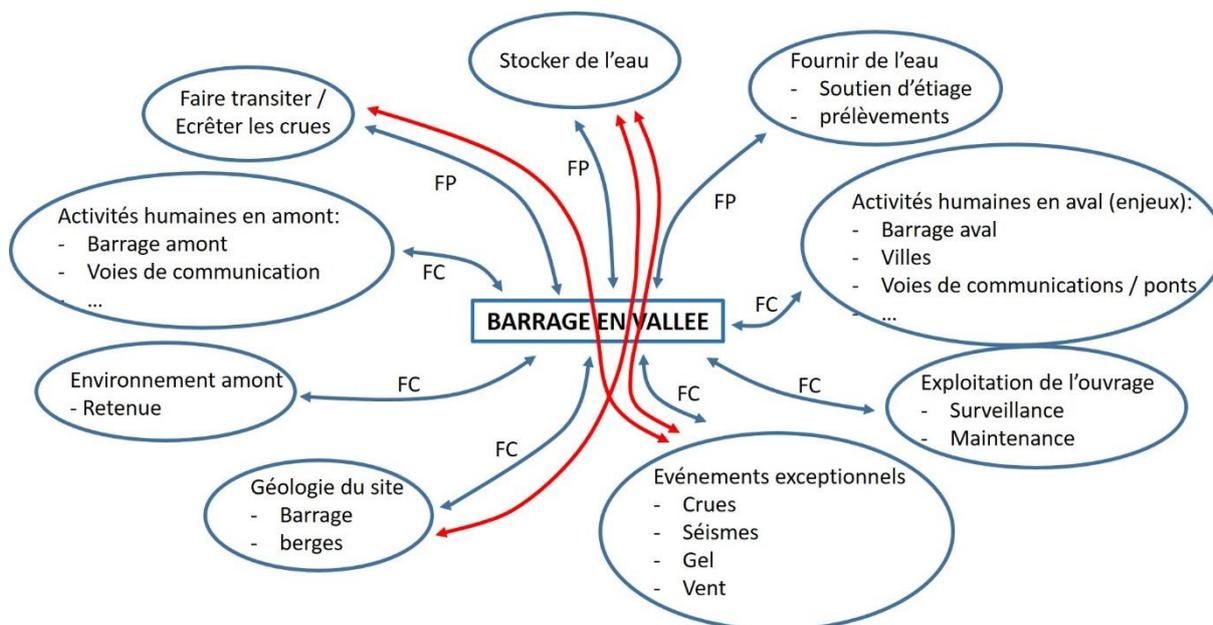


Figure 3.3 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle externe dans les études de dangers

Dans cette représentation, on distingue :

- les **fonctions principales** du barrage dont deux (« retenir de l'eau » et « faire transiter les crues ») sont en relation avec le niveau de sûreté de l'ouvrage ;
- les **fonctions technologiques** (FC) qui interagissent avec l'ouvrage soit en tant que sollicitations, soit en tant qu'enjeux.

On établit aussi des liens entre des fonctions principales et des fonctions technologiques : par exemple, la capacité de rétention de l'eau est fonction du contexte géologique au travers de l'étanchéité tant en fondation du barrage qu'au droit de la retenue.

3.4 Analyse fonctionnelle interne

3.4.1 Principes de l'analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle interne a pour objectif d'identifier les fonctions réalisées par les composants constituant le barrage. Elle conduit généralement à distinguer deux classes de fonctions à l'échelle du composant :

- Les **fonctions principales** qui représentent la fonction majeure du composant, celle pour laquelle il a été conçu ;
- Les **fonctions technologiques** (appelées aussi **fonctions de contrainte**). Elles représentent les fonctions que le composant doit remplir pour maintenir son intégrité et garantir sa performance. Une dégradation ou une défaillance des fonctions technologiques mène souvent à une défaillance des fonctions principales. Les fonctions technologiques sont, la plupart du temps, relatives aux caractéristiques physiques, mécaniques ou chimiques des matériaux constituant les composants, et ayant donc fait l'objet d'un choix technique ou d'un dimensionnement. Elles peuvent donc être classées selon leur origine en plusieurs catégories :
 - Les sollicitations mécaniques,
 - Les flux hydrauliques,
 - L'état intrinsèque du composant.

Certaines EDD ne distinguent pas cette typologie de fonction et les regroupent en une seule catégorie.

Lors de l'analyse fonctionnelle interne, le niveau de détail de l'étude des fonctions est à l'échelle du composant du barrage. Toutefois, il est parfois nécessaire d'étudier un niveau plus fin qui s'intéresse aux sous-composants ou aux matériaux constituant les composants.

3.4.2 Illustrations des pratiques de l'analyse fonctionnelle interne

Le résultat de l'analyse fonctionnelle interne est représenté soit sous la forme d'un tableau synthétique, parfois nommé tableau d'analyse fonctionnelle, soit sous la forme d'un diagramme. Ces éléments de synthèse reprennent les fonctions de chaque composant définies préalablement dans l'analyse fonctionnelle interne.

Exemple 1 :

Cet exemple montre pour un barrage en remblai, une analyse fonctionnelle interne incluant une décomposition à deux niveaux associée à un descriptif des fonctions technologiques.

Composant	Sous-composants	Fonction technologique
Remblai	Rip-rap	Protection du remblai amont contre l'érosion externe (batillage, vagues,..)
	Recharge amont	Participe à la stabilité de la recharge amont (notamment en vidange rapide)
	Noyau	Participe à l'étanchéité de l'ouvrage
	Recharge aval	Participe à la stabilité de la recharge aval
	Recharge aval	Résiste à l'érosion interne
	Recharges amont et aval	Résistent aux séismes (stabilité, liquéfaction)
	Fondation	Résiste à l'érosion interne
	Fondation	Participe à la stabilité de la recharge aval
	Fondation	Participe à l'étanchéité de l'ouvrage
	Fondation	Résiste au poids du remblai (portance)
	Matériaux drainants : filtre/ tapis aval	Participent à la gestion des flux hydrauliques internes / Résistent à l'érosion interne
	...	
...		

Tableau 3.1 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle interne d'un composant « remblai » d'un barrage

Pour ce type d'ouvrage, la décomposition en un seul niveau de sous-composant est suffisante. Chaque sous-composant est facilement identifiable puisqu'il constitue des éléments issus de la conception de l'ouvrage. Pour cette approche, une analyse fonctionnelle interne permet donc de lister les composants constitutifs de l'ouvrage et de déterminer les interactions entre composants mais aussi entre les composants et les milieux extérieurs.

Exemple 2 :

Pour un barrage équipé d'un évacuateur vanné, l'analyse fonctionnelle interne a adapté le niveau de décomposition en deux ou trois rangs. On retrouve la description de la fonction technologique assurée par les sous-composants.

Dans cet exemple pour le composant « vanne », le niveau de détail a dû être affiné en distinguant la structure des organes de manœuvre et ce, notamment, afin de décomposer la chaîne cinématique de la manœuvre des vannes. Ce détail de décomposition est nécessaire puisqu'il permettra de distinguer les défaillances à différents niveaux.

Composant principal	Sous-composant	Sous-composant	Sous-composant	Fonction technologique	
Evacuateur de crue vanné	Vanne segment	Corps de vanne	Tablier	Retenir l'eau	
			Bras	Transmettre les efforts	
			axe	Permettre la rotation Transmettre les efforts au GC	
		Organes de manœuvre	vérin	Permettre le mouvement de la vanne	
			flexibles	Transmettre les actions	
			Centrale à huile	Permettre les actions de manœuvre	
			Armoire de commande	Commande les actions	
				énergie	Permettre le fonctionnement
		Structure génie civil	Seuil		Assurer l'étanchéité
			Bajoyer amont		Assure l'étanchéité Guider les vannes en manœuvre
	Bajoyer			Reprendre les efforts au droit des axes	
	Coursier/saut à ski			Diriger les flux / dissiper l'énergie	
	Automate	Capteur de niveau		Mesurer la cote du plan d'eau	
		Capteur de position des vannes		Indiquer l'état d'ouverture des vannes	

Tableau 3.2 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle interne d'un évacuateur vanné

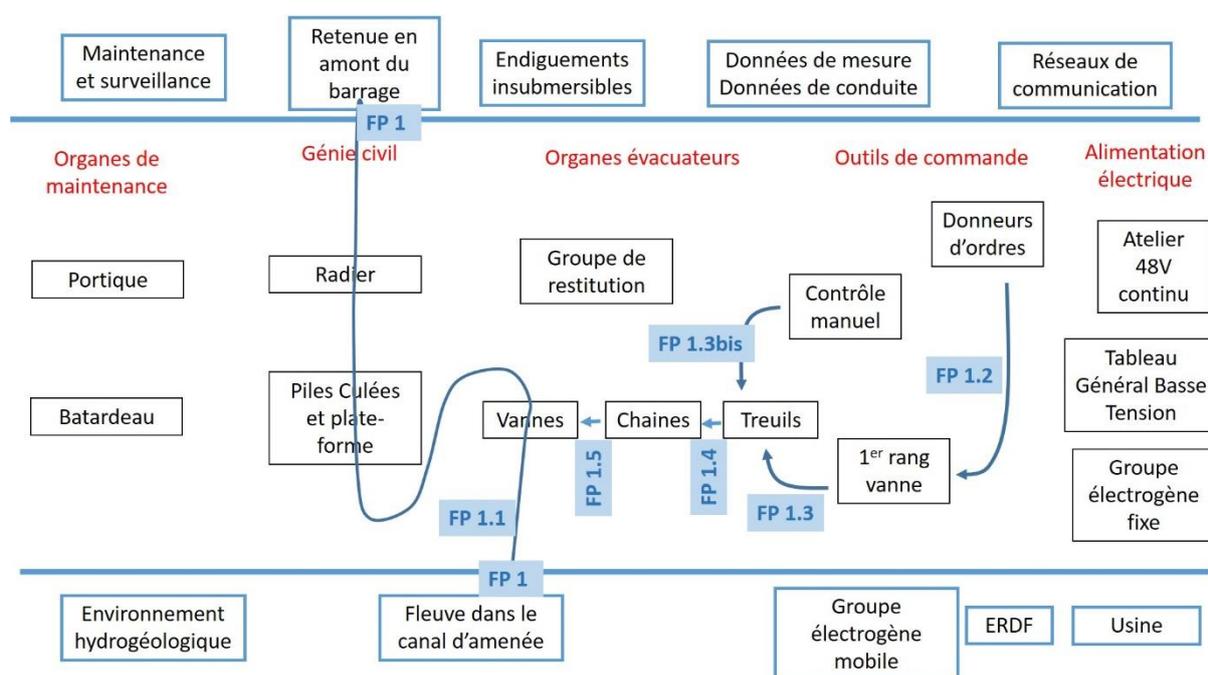
Exemple 3 :

Diagramme de synthèse d'analyse fonctionnelle interne

Dans ce diagramme, on note :

- En partie haute et basse, les éléments issus de l'analyse fonctionnelle externe (cadre bleu) ;
- La partie centrale correspond à l'analyse fonctionnelle interne avec une décomposition en composants principaux (en rouge) et en sous-composants.

Au travers de ce diagramme, on peut distinguer les différentes fonctions reliant les sous-composants pour répondre à la fonction principale « retenir de l'eau »



FP1	Le barrage de retenue assure la dérivation de l'eau vers l'usine
FP 1.1	L'ensemble radier, piles, vannes gère le flux d'eau
FP 1.2	Les donneurs d'ordre commandent les automates de 1 ^{er} rang
FP 1.3	Les automates de 1 ^{er} rang pilotent les treuils
FP 1.3bis	Les treuils peuvent être commandés manuellement
FP 1.4	Les treuils assurent le déplacement des chaînes
FP 1.5	Les chaînes assurent le déplacement des vannes

Figure 3.4 : Illustration de synthèses d'analyse fonctionnelle interne d'un barrage mobile en rivière

4 Analyse des modes de défaillance et identification des évènements redoutés

L'objet des méthodes présentées dans ce chapitre est la recherche et l'analyse des modes de défaillance, et l'identification des évènements redoutés. Deux méthodes sont pratiquées en France : l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) qui est la méthode la plus utilisée, et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE).

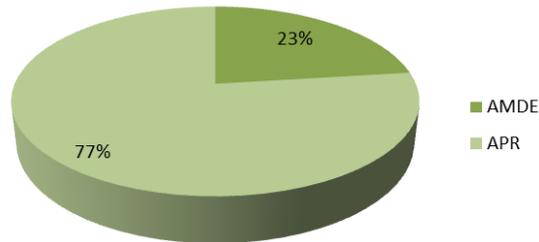


Figure 4.1 : Répartition des méthodes d'analyse des modes de défaillance [DIEUDONNE et al. 2016]

4.1 Analyse Préliminaire des Risques (APR)

4.1.1 Contexte - Usage

L'Analyse Préliminaire des Risques dresse un inventaire le plus exhaustif possible des modes de défaillance de l'ouvrage et de ses organes de sécurité, pour toutes les conditions d'exploitation. Il ne s'agit pas d'une méthode normalisée. L'APR s'appuie sur des recommandations et sur la documentation technique disponible, comme [MORTUREUX 2002].

La démarche APR se situe en amont de la construction des scénarios de défaillance et leur sert de données d'entrée. Elle constitue une analyse macroscopique des situations à risques de l'ouvrage, et elle permet de détecter les évènements redoutés à étudier et d'évaluer les risques associés. Elle comprend également une première évaluation de la gravité des défaillances identifiées et une caractérisation des évènements en termes de cinétique.

4.1.2 Principes de l'APR

L'objectif de l'APR est d'identifier tous les phénomènes dangereux susceptibles de porter atteinte aux tiers. Il s'agit de faire un premier tri des évènements à retenir ou au contraire pouvant être écartés. L'APR fournit donc les données d'entrée pour la modélisation détaillée des scénarios de défaillance, mais ne s'y substitue pas. En effet, des éléments non identifiés lors de l'APR pourront être ajoutés lors de la construction des scénarios de défaillance, qui est une phase d'approfondissement de l'analyse des risques.

Les différentes étapes pour la conduite de l'APR sont les suivantes :

- L'identification experte des modes de défaillance de chaque élément du périmètre de l'ouvrage, dans différentes conditions d'exploitation données. Cette identification s'appuie sur l'analyse fonctionnelle des éléments du périmètre ;

- L'estimation des conséquences de ces défaillances, caractérisée par la cinétique et l'étendue des effets de cette défaillance. Cette estimation est qualitative. Elle s'appuie, à dire d'experts, sur l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage ;
- Le choix des modes de défaillance à retenir compte-tenu de la gravité de leurs conséquences ;
- L'identification préliminaire des causes des modes de défaillance retenus et des moyens de prévention existants.

De manière pratique, l'APR s'effectue sous forme d'un tableau qui peut revêtir différentes formes selon les études.

4.1.3 L'utilisation de l'APR dans les EDD – Exemples

(1) Élément de l'ouvrage concerné	(2) Conditions d'exploitation, condition d'état, position correspondante	(3) Mode de défaillance	(4) Fonction du barrage affectée	(5) Conséquences	(6) Cinétique post accidentelle	(7) Gravité	(8) Type	(9) Cinétique pré accidentelle	(10) Commentaires et justification de la non prise en compte en ERC ou EI
						uniq. pour ERC mineur, grave	ERC= Evénement Redouté Central EI= Evénement Initiateur pour un ERC		
Barrage	Toutes conditions	Rupture	Retenir l'eau	Onde de submersion à l'aval. Baisse soudaine du niveau de la retenue.	Rapide	Grave	ERC 1		<p>Le séisme n'a pas été retenu comme pouvant mener à la rupture barrage. Le barrage est situé dans une zone de sismicité faible (niveau 1), et le retour d'expérience du comportement des barrages-voûtes au séisme apparaît globalement très favorable. Cet élément n'a donc pas été conservé pour la suite de l'analyse.</p> <p>La rupture d'une conduite forcée n'a également pas été retenue. La fuite serait collectée via les drains du barrage, et serait visible :</p> <ul style="list-style-type: none"> via les piézomètres (visite toutes les deux semaines, périodicité suffisante avec la cinétique du phénomène d'introduction de sous-pressions suite à perte de confinement d'une des conduites forcées, pouvant mener à la rupture barrage) ; visuellement au niveau de l'usine en cas de début d'inondation. Par ailleurs, présence de 2 poires inondation usine au niveau du puits d'exhaure avec génération d'une alarme urgente pour faire tomber la vanne de tête. <p>Cet élément n'a donc pas été conservé pour la suite de l'analyse.</p>
Vanne segment, Evacuateur de Crues	Normale / non sollicitée fermée	Rupture	Retenir l'eau	Vague à l'aval de 550m³/s. Baisse du niveau de la retenue	Rapide	Grave	ERC 2		<p>Débit de 550 m³/s (équivalent à la plus grande crue connue – avant la construction de l'ouvrage). Défaillance des liaisons (chaise palière) : des inspections sont réalisées tous les 10 ans sur les chaises palières. La RS fait état d'un très bon comportement (état excellent).</p>
		Ouverture intempestive	Maîtrise des variations de débit à l'aval						Non retenue de par la technologie de la vanne (tendance à la fermeture), alimentation condamnée (sectionneur ouvert) (Geste inapproprié : non conservé car vanne non sollicitée en exploitation normale).
		Non fermeture	Maîtrise des variations de débit à l'aval						Incohérent (vanne déjà fermée).
		Non ouverture	Maîtriser les variations du niveau du plan d'eau amont						Incohérent (état "non sollicitée").
		Fermeture intempestive	Maîtriser les variations du niveau du plan d'eau amont						Incohérent (vanne déjà fermée).

(1) Elément de l'ouvrage concerné	(2) Conditions d'exploitation, condition d'état, position correspondante	(3) Mode de défaillance	(4) Fonction du barrage affectée	(5) Conséquences	(6) Cinétique post accidentelle	(7) Gravité	(8) Type	(9) Cinétique pré accidentelle	(10) Commentaires et justification de la non prise en compte en ERC ou EI	
						uniq. pour ERC mineur, grave	ERC= Evénement Redouté Central EI= Evénement Initiateur pour un ERC			
Vanne segment, Evacuateur de Crues	Crue / sollicitée ouverte	Rupture	Retenir l'eau	Vague à l'aval de 550 m³/s Baisse du niveau de la retenue	Rapide	Grave	ERC 2		(Débit : entre Q10 et Q100) Choc par corps flottants : présence de pontons, base de loisirs, embarcations... qui en crue pourraient avec le courant arriver rapidement sur la vanne et entrainer sa rupture.	
		Ouverture intempestive	Maîtrise des variations de débit à l'aval	Vague maximale à l'aval de 550 m³/s Baisse du niveau de la retenue	Lente	Grave	ERC 3		La coupure de l'alimentation électrique (ouverture du sectionneur – pour la défaillance de l'automatisme de commande) n'a pas été conservée car la manœuvre des vannes étant faite préférentiellement depuis le local commande usine, l'agent ne serait pas sur place et la manœuvre de la vanne se ferait avec une cinétique rapide (par ailleurs, en crue les ascenseurs n'étant pas utilisés, le temps d'atteinte de la galerie de crête serait très long).	
		Non fermeture	Maîtrise des variations de débit à l'aval	Amont : baisse du niveau de la retenue Aval : aucune conséquence (débit déjà établi en rivière)				Non retenu		
		Non ouverture	Maîtrise de la cote du plan d'eau amont	Exhaussement du niveau de la retenue				EI2 des ERC 1 et ERC 2 (par exhaussement du plan d'eau (E11))	Lente	EI pouvant mener, par exhaussement du plan d'eau, à la rupture d'une des vannes ou du barrage par dépassement des cotes de dimensionnement de la vanne ou de la cote de danger du barrage.
		Fermeture intempestive	Maîtrise de la cote du plan d'eau amont	Exhaussement du niveau de la retenue				EI3 des ERC1 et ERC 2 (par exhaussement du plan d'eau (E11))	Rapide	EI pouvant mener, par exhaussement du plan d'eau, à la rupture d'une des vannes ou du barrage par dépassement des cotes de dimensionnement de la vanne ou de la cote de danger du barrage. Erreur humaine possible (erreur d'interprétation). La rupture des deux chaînes n'a pas été étudiée (double défaillance), et la rupture d'une seule chaîne ne générerait que le coincement de la vanne. La coupure de l'alimentation électrique (ouverture du sectionneur) n'a pas été conservée car la manœuvre des vannes étant faite préférentiellement depuis le local commande usine, l'agent ne serait pas sur place et la manœuvre de la vanne se ferait avec une cinétique rapide (par ailleurs, en crue les ascenseurs n'étant pas utilisés, le temps d'atteinte de la galerie de crête serait très long).

Tableau 4.1 : Extrait de l'APR pour un barrage voûte muni d'un évacuateur de crues vanné

Dans cet exemple, les éléments du périmètre sont tout d'abord rappelés (colonne 1), avec les conditions d'exploitation (colonne 2). En préliminaire, on note que le corps du barrage est analysé dans sa globalité, sans détailler les défaillances qui pourraient survenir sur les culées, la voûte ou la structure génie civil de l'ouvrage vanné.

Les modes de défaillance sont ensuite listés pour chaque élément du périmètre et pour chaque condition d'exploitation (colonne 3). Ces modes de défaillance sont définis par le panel d'experts, qui se base sur son expérience, sur les données collectées et produites lors de l'examen de l'ouvrage, et sur une liste de situations dangereuses adaptées au barrage. A ce stade, les combinaisons incohérentes modes de défaillance/conditions d'exploitation sont supprimées (voir dans l'exemple précédent les combinaisons surlignées en orange). De même, les combinaisons qui ne présentent pas de conséquences particulières en termes de sûreté ne sont pas retenues (voir dans l'exemple précédent la combinaison surlignée en vert).

Les conséquences des défaillances (colonne 5) et les cinétiques (colonnes 6 et 9) sont ensuite identifiées à un niveau macroscopique. Les conséquences directes et indirectes des défaillances sont décrites. Par exemple, la rupture du barrage conduirait à une onde de submersion à l'aval : il s'agit d'une conséquence directe dont la cinétique post accidentelle est à caractériser. Mais la fermeture intempestive de la vanne segment en crues peut conduire à la réduction de la capacité d'évacuation des crues et donc mener indirectement à un phénomène dangereux : l'exhaussement du niveau de la retenue avec risque de surcharge de la vanne et/ou de l'ouvrage. Il s'agit d'une conséquence indirecte pour laquelle la cinétique pré accidentelle est à évaluer. On distingue généralement deux niveaux pour les cinétiques : rapide ou lente.

Il s'agit ensuite d'évaluer la gravité des conséquences (colonne 7) pour les modes de défaillance ayant des conséquences directes. On retient en première approche une échelle binaire, avec des conséquences « graves » correspondant à un impact possible sur les tiers, ou « mineures » correspondant à des dommages matériels sans impact sur les tiers. Si la gravité des conséquences est estimée « mineure », le mode de défaillance correspondant n'est pas retenu dans la suite de l'étude.

Cette approche permet de retenir uniquement les modes de défaillance les plus critiques (en considérant le croisement de la gravité et de la probabilité), qui seront ensuite étudiés en détail dans la phase de modélisation des scénarios de défaillance (colonne 8).

Les modes de défaillance ayant des *conséquences directes graves* sont retenus en tant qu'Evènement Redouté (ER). Les modes de défaillance ayant des *conséquences indirectes* et une cinétique pré-accidentelle rapide sont retenus en tant qu'Evènement Initiateur (EI) de l'évènement redouté. Lorsque la cinétique pré-accidentelle est identifiée comme lente au stade de l'APR, la question de la fréquence de l'évènement se pose. En effet, dans le cas d'un évènement rare présentant une cinétique pré-accidentelle lente, l'évènement n'est généralement pas retenu pour la suite de l'étude. Cette fréquence est déterminée de manière qualitative, et basée sur le retour d'expériences sur des ouvrages et matériels similaires.

Un deuxième exemple de tableau APR est présenté en page suivante (Tableau 4.2).

Index des situations dangereuses sur un barrage en remblais				Estimation de la probabilité des scénarios							
	Organes / Éléments importants pour la sécurité	Situation dangereuse	Cause potentielle	Probabilité initiale		Justification	Barrières de sécurité existantes			Probabilité avec barrières	
				Fréquence	Niveau		N°	Intitulé	NC	Fréquence	Niveau
B A R R A G E E N R E M B L A I	Cavalier	Rupture du cavalier par surverse	Tassement point bas	x	x	Sans objet : le profil en long du barrage fait l'objet d'un suivi et d'un entretien régulier pour le rendre conforme au cahier des charges	x	x	x	x	x
	Talus amont	Rupture de l'ouvrage suite à un glissement du talus amont	Erosion du talus amont suite à une protection du talus insuffisante par rapport aux crues (blocométrie insuffisante suite au gel ou au vent - phénomène	P=10 ⁻²	3	Probabilité de la crue à l'origine de l'accident potentiel	232	Surveillance courante et adaptée, analyse et actions	2	P=10 ⁻⁵	0
							202	Mise en œuvre d'une parade	1		
	Corps du barrage	Rupture par érosion interne	Formation de renards (anomalie géologique) (phénomène lent)	P=10-2	3	Probabilité de rupture en section courante sans les barrières de sécurité, Cf. calculs érosion interne	232	Surveillance courante et adaptée, analyse et actions	2	P=10-5	0
							202	Mise en œuvre d'une parade	1		
		Rupture par charge hydraulique excessive	Décolmatage du barrage lié à un entrainement de fines (suite à une onde de disjonction par ex.), associé à un mauvais drainage	x	x	Sans effet : Le barrage est stable y compris quand le parement amont n'est pas colmaté et donc pas étanche. Cf. calculs de stabilité	x	x	x	x	
		Rupture suite à une agression externe	Animaux fouisseurs	x	x	Sans objet : Le barrage, par construction et par les matériaux présents, n'est pas sensible à ce genre d'agression	x	x	x	x	x
	Talus aval	Rupture par érosion externe	Endommagement du parement aval suite à la présence de végétation	x	x	Sans objet : pas de végétation dans la partie inférieure du talus aval	x	x	x	x	x
		Rupture par perte de stabilité	Glissement du talus aval suite à un mauvais drainage	x	x	Sans objet : l'étude de stabilité des endiguements montre que le talus aval n'est pas sensible au glissement même en cas de drainage défavorable	x	x	x	x	x
		Rupture par surcharge physique combinée à un défaut de drainage	Passage sur le barrage d'engins de transport trop lourd sur la piste de risberme	P=10 ⁻²	3	Probabilité de rupture du barrage en section courante sans les barrières de sécurité	232	Surveillance courante et adaptée, analyse et actions	2	P=10 ⁻⁵	0
					202	Mise en œuvre d'une parade	1				

Tableau 4.2 : Extrait de l'APR pour un barrage en remblai

Dans ce deuxième exemple concernant un barrage en remblai, le barrage est décomposé en composants qui sont étudiés indépendamment (cavalier, talus amont, corps du barrage et talus aval). Viennent ensuite la situation dangereuse et la cause potentielle décrites de façon sommaire, qui servent à la détermination des Evénements Redoutés. Apparaissent également dans la colonne « Justification » les éléments d'explication retenus pour la suite de l'analyse, selon leur pertinence ; il est notamment fait référence aux éléments figurant dans la description des ouvrages, ou dans des études associées à l'EDD afin d'étayer la justification. Enfin par commodité, le rédacteur a choisi de faire apparaître sur ce même support les probabilités des événements initiateurs retenus qui sont étudiées ultérieurement, ainsi que les barrières de sécurité retenues.

En conclusion, le tableau APR peut revêtir différentes formes et niveaux de détail. Le premier exemple (Tableau 4.1) qui concerne un barrage-voûte vanné, est une APR simplifiée où l'analyse préliminaire est menée à l'échelle du périmètre de l'ouvrage. Le deuxième exemple (Tableau 4.2) qui concerne un barrage en remblai correspond à une APR complète où l'analyse est réalisée à l'échelle du composant du barrage. Mais si les informations présentes et le niveau de détail peuvent varier, les APR comportent toujours pour chaque organe identifié, les situations dangereuses ou conséquences, et leur cause potentielle ou mode de défaillance, ainsi qu'un argumentaire sur le fait de retenir ou non ces événements initiateurs pour la suite de l'étude.

4.2 Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

4.2.1 Contexte – Normes – Usages

La méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) constitue une méthode d'analyse détaillée des modes de défaillance des composants d'un système. Elle se décline parfois sous forme d'analyse AMDEC qui consiste en une analyse AMDE dans laquelle une analyse spécifique de la Criticité est rajoutée. La méthode AMDE est d'un usage très répandu dans l'industrie mécanique (spatiale, nucléaire, automobile...). Elle fait l'objet de plusieurs normes en France, en Europe et à l'international (NF X 60-510, CEI 812-1985, MIL-STD-1269 A).

4.2.2 Principes de l'AMDE/AMDEC

La méthode AMDE consiste en une analyse systématique des composants du système sous forme de tableau, pour rechercher les modes de défaillance, leurs causes et leurs effets. Les modes de défaillance constituent les non réalisations des fonctions des composants du système ou leurs réalisations dégradées ou partielles, et leur recherche repose sur les résultats de l'analyse fonctionnelle réalisée préalablement à la mise en œuvre de l'AMDE. En raison de son caractère systématique, l'AMDE garantit l'exhaustivité de l'analyse des modes de défaillance dès lors que l'analyse fonctionnelle a été réalisée de façon complète. La mise en œuvre de l'AMDE est produite sous forme de tableau indiquant :

- Les composants du système ;
- Les fonctions principales et techniques des composants ;
- Les modes de défaillance : non réalisation ou réalisation partielle de fonction ;

- Les causes possibles des modes de défaillance :
 - Liées aux contacts entre l’environnement et les composants,
 - Liées aux interactions hydrauliques ou contraintes avec l’environnement et les composants,
 - Liées à l’état intrinsèque du composant.
- Les effets possibles des modes de défaillance :
 - Sur les contacts entre l’environnement et les composants,
 - Sur les interactions hydrauliques ou contraintes avec l’environnement et les composants,
 - Sur l’état intrinsèque du composant.

4.2.3 L’utilisation de l’AMDE dans les EDD – Exemples

Dans le domaine des barrages, la méthode AMDE est citée parmi les méthodes de référence pour la recherche des modes de défaillance avec notamment les références suivantes : [CEA, 2000], [ICOLD 2005], [IRSTEA 2010]. Quelques exemples d’utilisation de l’AMDE dans les EDD de barrages en France sont donnés ci-après :

N°	Analyse fonctionnelle (rang 1)			AMDE (rang 1)		
	Composant rang 1	Fonctions principales	Fonctions techniques	Modes de défaillance	Causes	Effets
1	Recharge amont	Assurer la stabilité amont et du noyau. Résister aux sollicitations mécaniques. Ne pas glisser.	Résister aux sollicitations hydrodynamiques (vagues).	Glissement de la recharge amont – Rupture d’ensemble.	Sollicitations sismiques excessives, déplacements horizontaux ou verticaux de la fondation et / ou de l’interface excessifs.	Glissement du talus amont et du noyau.
				Erosion du talus amont.	Batillage excessif, dégradation excessive des enrochements sur la zone de marnage, perte de matériaux.	Erosion dans la zone de marnage.
2	Drain-Filtre amont	Drainer les eaux ayant traversé le noyau.	Assurer la transition entre la recharge amont et le noyau. Filtrer les fines provenant du noyau.	Filtration défaillante (filtration insuffisante).	Filtration insuffisante.	Erosion ou suffusion du noyau.
				Défaillance du dispositif de drainage (filtration trop importante).	Colmatage du drain. Circulation d’eau excessive, dépassement de la capacité de drainage du drain-filtre amont.	Diminution de la capacité de ressuyage du noyau à la vidange du plan d’eau.

Tableau 4.3 : Exemple d’application de l’AMDE dans une EDD de barrage en enrochement

Cet exemple (Tableau 4.3) illustre l’application de la méthode AMDE à un barrage en enrochements à noyau central d’argile et présente un extrait pour deux composants *recharge amont* et *drain-filtre amont*. Dans cet exemple, il est présenté dans le même tableau les résultats de l’analyse fonctionnelle préalable en faisant figurer les fonctions principales et technologiques. Les modes de défaillance sont alors obtenus directement en considérant les non réalisations ou les dégradations des fonctions obtenues dans l’analyse fonctionnelle. De fait, si l’analyse fonctionnelle est complète, il n’y a pas de

possibilité d'omettre des modes de défaillance, l'analyse présentant un caractère systématique. Les causes et les effets des modes de défaillance sont recherchés dans les composants eux-mêmes et dans leurs contacts avec d'autres composants et leur environnement. Là également, la méthodologie de recherche des causes et effets des modes de défaillance garantit la non omission d'un élément.

La réalisation d'une AMDE est faite par un ingénieur spécialisé en analyse de risques et accompagné par un groupe d'experts spécialisés. Ce travail collectif permet de produire des simplifications dans l'analyse et de ne garder dans les tableaux AMDE que les causes et effets réalistes sur le barrage étudié, et d'éliminer ceux irréalistes.

N°	Composant	Analyse Fonctionnelle		AMDE		
		Fonction principale	Fonction technologique / Contrainte	Mode de défaillance	Cause	Effet
3	Fondations du barrage					
3.1	Fondations du barrage	Transmettre les efforts au sol Limiter les infiltrations d'eau	Résister aux contraintes mécaniques (déformation, poinçonnement, liquéfaction) Résister aux sollicitations hydrauliques (érosion interne, infiltrations)	Déformation/Rupture	Tassement différentiel Erosion interne Sollicitations sismiques (liquéfaction)	Perte des capacités de reprise des efforts mécaniques du barrage
3.2	Dispositif d'étanchéité (rideau d'injections)	Améliorer l'étanchéité en fondation	Résister aux sollicitations hydrauliques	Infiltrations excessives d'eau	Déplacement ou déformations des fondations Dissolution, dégradation du rideau d'injections	Infiltrations vers la fondation aval
4	Dispositif de prise d'eau et de vidange					
4.1	Ouvrage de prise d'eau amont	Prélever de l'eau en fond de retenue	Résister au risque d'obstruction	Prélèvement impossible	Embâcles, envasement	Impossibilité de vidanger
4.2	Batardeau amont	Assurer la coupure du débit restitué Permettre le transit des eaux de prise, de restitution et de vidange	Résister aux sollicitations mécaniques et hydrauliques	Vanne bloquée en position ouverte Vanne bloquée en position fermée	Manque d'essais de fonctionnement Défaillance du système de manœuvre hydraulique Déformation (séisme) Corrosion avancée Manque d'essais de fonctionnement Défaillance du système de manœuvre hydraulique Déformation (séisme) Corrosion avancée	Impossibilité de réaliser des travaux sur les vannes Impossibilité de vidanger en cas de travaux ou d'inspection ou d'urgence

		Analyse Fonctionnelle		AMDE		
N°	Composant	Fonction principale	Fonction technologique / Contrainte	Mode de défaillance	Cause	Effet
4.3	Tour de prise et de vidange	Abriter les équipements hydrauliques et les organes de manœuvres des vannes	Résister aux contraintes mécaniques (déformation, rupture)	Effondrement de la tour et/ou de la passerelle	Dégradation du béton / Sollicitations sismiques excessives	Déformation excessive du corps du barrage
4.4	Vanne papillon DN700	Permettre le transit des eaux de vidange	Résister aux sollicitations mécaniques et hydrauliques	Effacement intempestif de la vanne	Rupture d'un composant Défaut de fonctionnement (défaillance système commande hydro)	Libération non maîtrisée de flux hydrauliques vers l'aval

				Vanne bloquée en position fermée	Mauvaise manœuvre / Malveillance Corrosion avancée Manque d'essais de fonctionnement Défaillance du système de manoeuvre hydraulique Déformation (séisme)	Impossibilité de vidanger en cas de travaux ou d'inspection ou d'urgence
4.5	Conduite de vidange	Assurer le transit de l'eau à l'aval du barrage	Résister aux sollicitations mécaniques et hydrauliques	Obstruction de la conduite de vidange Fissuration, déformation ou déboitement de la conduite de vidange, perte d'étanchéité	Embâcles, sédiments Sollicitations mécaniques (séisme) Dégradation joints, corrosion	Diminution des capacités de vidange de la retenue
4.6	Vanne Monovar DNS00	Assurer la régulation du débit restitué	Résister aux sollicitations mécaniques et hydrauliques	Effacement intempestif de la vanne Blocage de la vanne en position fermée et/ou régulation impossible	Rupture d'un composant Défaut de fonctionnement (défaillance système commande hydro) Mauvaise manœuvre / Malveillance Corrosion avancée Manque d'essais de fonctionnement Défaillance du système de manoeuvre hydraulique Déformation (séisme)	Libération non maîtrisée de flux hydrauliques vers l'aval Impact sur le milieu aquatique à l'aval du barrage

		Analyse Fonctionnelle		AMDE		
N°	Composant	Fonction principale	Fonction technologique / Contrainte	Mode de défaillance	Cause	Effet
4.7	<i>Bassin de dissipation</i>	Dissiper l'énergie des flux hydrauliques	Résister aux sollicitations hydrodynamiques	Incapacité à dissiper l'énergie des flux hydrauliques	Sous-dimensionnement du bassin de dissipation Obstruction du bassin de dissipation	Ecoulement en aval non maîtrisé Diminution des capacités d'évacuation
4.8	<i>Dispositif de commande manuelle des vannes</i>	Assurer l'ouverture et la fermeture des vannes manuellement	Résister aux sollicitations extérieures (agresseurs physico-chimiques, gel, etc.)	Commande défaillante	Corrosion avancée Manque d'entretien du système de manœuvre Manque d'essais de fonctionnement	Impossibilité de manœuvrer les vannes

Tableau 4.4 : Exemple d'application de l'AMDE dans une EDD de barrage en remblai

Dans ce second exemple (Tableau 4.4), le barrage d'une hauteur de 15 m est constitué d'un remblai homogène à drain cheminée central. L'étanchéité en fondation est assurée par une clé d'étanchéité et un voile d'injections. Les ouvrages de prise, d'évacuation des crues et de vidange sont regroupés en un ouvrage unique de type tour en béton armé. Enfin, l'évacuateur de crues est un déversoir semi-circulaire de type tour tulipe. La méthode AMDE est mise en œuvre pour chacun des composants identifiés dans l'analyse fonctionnelle. Le deuxième exemple est proposé pour deux de ces composants (Tableau 4.4) : *Fondations du barrage* et *dispositif de prise d'eau et de vidange*. On retrouve dans ce deuxième exemple les mêmes principes d'analyse : identification des modes de défaillance à partir directement des fonctions issues de l'analyse fonctionnelle, identification des causes et des effets dans les composants eux-mêmes et dans leurs contacts avec d'autres composants et leur environnement, utilisation de l'expertise pour ne conserver que les informations pertinentes sur le barrage étudié.

4.3 Synthèse des méthodes d'analyse des modes de défaillance et d'identification des événements redoutés

Les deux principales méthodes appliquées dans les études de dangers de barrages en France sont : i) la méthode APR (Analyse Préliminaire des Risques – 77% des études) qui repose sur une analyse simple des risques basée sur l'expertise, ii) la méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets – 23% des études) qui constitue une analyse plus complète des modes de défaillance. [Dieudonné et al. 2016]

L'application de la méthode d'APR repose largement sur une appréciation experte : l'identification des dangers est effectuée grâce à l'expérience, à la connaissance du panel d'experts. On constate que les APR se basent généralement sur une analyse fonctionnelle interne sommaire et elles exposent alors une analyse de premier ordre de grandeur en mettant en évidence uniquement les modes de défaillance majeurs susceptibles d'être rencontrés sur les barrages. En termes de retour d'expérience pratique, un des avantages de la méthode d'APR est d'examiner les situations à risques. La méthode est pertinente pour les barrages, dans la mesure où le jugement de l'expert reste très important pour la détermination d'un certain nombre de dégradations et de défaillances. Il convient de noter qu'en absence de normalisation de la méthode, les pratiques de l'APR dans les EDD en France montrent une grande variabilité des tableaux utilisés et donc de l'analyse produite. Ainsi, certaines APR apparaissent très complètes dans l'analyse des modes de défaillance et s'apparentent au final plus à des AMDE.

La méthode AMDE permet d'aboutir à une analyse détaillée des modes de défaillance du barrage. Dans un cadre normalisé, son principal avantage est la précision et la qualité de l'analyse : en effet, la méthode AMDE constitue une analyse complète des modes de défaillance des composants du barrage, après une analyse fonctionnelle de qualité. Elle est donc bien adaptée à une analyse de risques complète, voire quantitative ultérieure. L'expertise intervient lors de la mise en œuvre de la méthode AMDE, dans la simplification des causes et effets irréalistes sur le barrage étudié. Son application est conditionnée à la connaissance structurelle et fonctionnelle du barrage et dépend donc de la qualité apportée à l'analyse fonctionnelle. Par conséquent, on constate que cette méthode est principalement développée dans les études présentant une analyse fonctionnelle complète et détaillée. Il faut bien prendre garde à conserver la cohérence entre l'analyse fonctionnelle et l'AMDE, sinon cela peut conduire à une perte d'informations et l'omission de modes de défaillance.

5 Représentation des séquences accidentelles par l'emploi de méthodes arborescentes

5.1 Introduction

Les méthodes d'analyse des modes de défaillance décrites au chapitre précédent (APR et AMDE(C)) considèrent des défaillances simples et indépendantes d'un élément ou d'un composant du système étudié. Leur mise en œuvre s'appuie sur des tableaux d'identification des séquences accidentelles à partir des causes. Ces méthodes ne sont pas adaptées à rendre compte de la combinaison de plusieurs composants ou événements dans un scénario de défaillance (techniques, humaines ou organisationnelles). Pour cela, d'autres méthodes sont disponibles pour prendre en compte ces différents types de défaillances et leurs combinaisons. Elles reposent sur une visualisation graphique des séquences accidentelles susceptibles de se produire sur l'ouvrage. On parle alors d'approche arborescente. Dans les pratiques françaises, les méthodes considérées sont :

- La méthode des arbres d'évènements;
- La méthode des arbres de défaillances;
- La méthode du nœud papillon.

L'utilisation de méthodes arborescentes permet de prendre en compte la succession ou la simultanéité de défaillance de plusieurs éléments indépendants ou non conduisant à un accident.

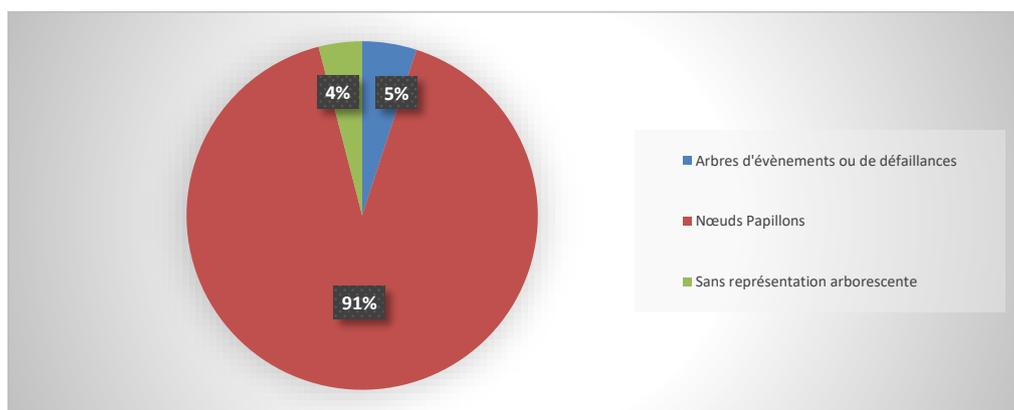


Figure 5.1 : Répartition des utilisations de méthodes arborescentes par les gestionnaires dans le cadre des analyses de risques (Retour d'expérience français) [DIEUDONNE et al. 2016]

En France, près de 91% des gestionnaires d'ouvrage mettent en œuvre une approche de type nœud-papillon dont la partie fondamentale est l'arbre des défaillances. Ces nœuds papillons sont établis sur la base de tableaux d'analyse de risques préalablement réalisés en groupe de travail (suivant les méthodes décrites précédemment : APR, AMDE(C)).

5.2 Analyse par la méthode des Arbres d'Évènements

Développée au début des années 1970 pour l'estimation du risque lié aux centrales nucléaires, la méthode des arbres d'évènements (appelée parfois la méthode des arbres des conséquences) s'est étendue à d'autres secteurs d'activités et trouve ses applications dans les études de sûreté des systèmes ayant un fonctionnement approximativement binaire ou discret et dont l'évolution dépend du temps. La séquence des évènements de l'arbre se déroule de façon inductive, à partir de l'évènement initiateur jusqu'aux évènements redoutés (ER) finaux. Elle permet de traiter des systèmes comportant de nombreuses barrières de sécurité. L'objectif de cette méthode est de décrire les scénarios de fonctionnement du système à partir d'un évènement initiateur et de supposer la défaillance d'un composant ou d'une partie du système pour déterminer les évènements qui en découlent. On détermine ainsi la dérive du système en envisageant l'enchaînement des modes de défaillances jusqu'à l'occurrence d'un potentiel accident.

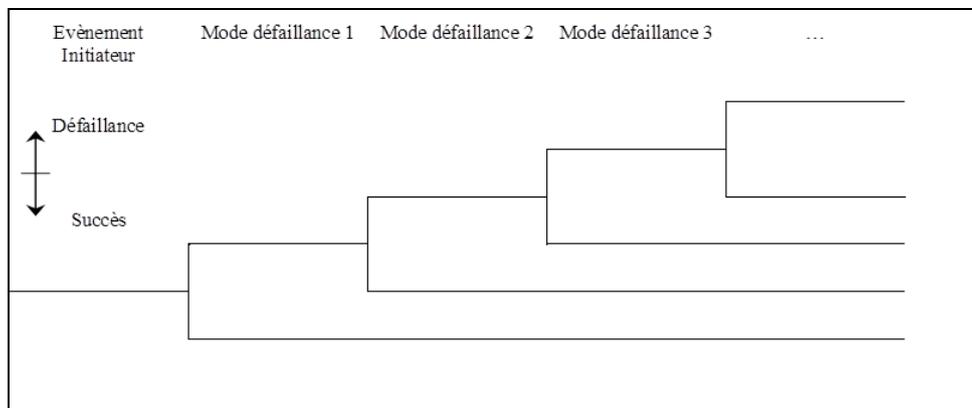


Figure 5.2 : Principe de la méthode de l'arbre d'évènements

La qualité des scénarios obtenus à partir d'un arbre d'évènements dépend de la qualité de l'identification des fonctions de sécurité prévues pour faire face à l'évènement. Dans la pratique, on constate que la mise en œuvre de la méthode de l'arbre d'évènements est précédée d'une analyse de type AMDE(C) afin de s'assurer de l'exhaustivité des défaillances.

La méthode des arbres d'évènements présente l'intérêt de permettre une évaluation des probabilités d'occurrence des différents scénarios par une analyse semi-quantitative, mais aussi quantitative, l'arbre d'évènement constituant en fait un arbre de probabilité : elle permet ainsi l'évaluation de la probabilité d'apparition d'un scénario par le produit de la probabilité d'apparition des évènements et de la probabilité de défaillance ou de fonctionnement des fonctions de sécurité identifiées. L'utilisation de la méthode AMDE avant l'application de la méthode de l'arbre d'évènement garantit en principe l'indépendance des évènements successifs. La méthode de l'arbre d'évènements permet ainsi de suivre le déroulement fonctionnel et chronologique d'un scénario et d'évaluer l'influence des barrières mises en œuvre sur la fréquence d'apparition du scénario.

Dans le domaine des barrages, la méthode de l'arbre d'évènements est citée parmi les méthodes de référence pour la modélisation des scénarios de défaillance. On trouve notamment les références suivantes : [CEA 2000], [ICOLD 2005], [IRSTEA 2010].

Exemple 1 :

Dans cet exemple appliqué à un barrage en remblai d’enrochements, le scénario de rupture lié à l’érosion interne dans le noyau du barrage (filtration insuffisante) a été modélisé sous forme d’un arbre d’évènements. Celui-ci enchaîne, à partir de l’évènement initiateur qui est la présence d’une charge hydraulique, les modes de défaillances des fonctions de sécurité liées à la capacité de dispositif drain-filtre du noyau, à la résistance à l’érosion du noyau et la résistance à l’érosion de la recharge aval. La barrière de sécurité associée à l’auscultation du drainage et surveillance visuelle a été introduite dans l’arbre, après s’être assuré que l’exploitant disposait d’un système de gestion de la sécurité adéquat permettant d’analyser, interpréter et intervenir dans des délais rapides pour que la barrière soit effectivement efficace.

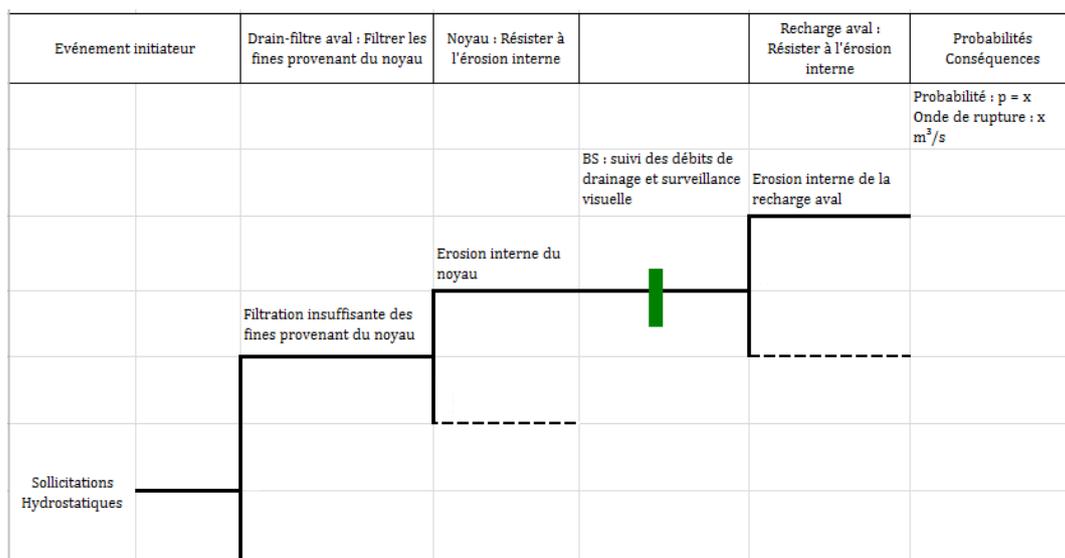


Figure 5.3 : Exemple d’un arbre d’évènements relatif au mécanisme d’érosion interne d’un barrage en remblai d’enrochements

Exemple 2 :

Dans cet autre exemple appliqué à un barrage en remblai, le scénario de rupture lié à l'érosion interne dans le noyau du barrage a été modélisé sous forme d'un arbre d'évènements. Celui-ci enchaîne, à partir de l'évènement initiateur qui est la survenue d'une crue exceptionnelle, les modes de défaillances des fonctions de sécurité liées à la capacité du dispositif d'évacuation des crues, à la résistance à l'érosion par surverse et à la résistance du noyau.

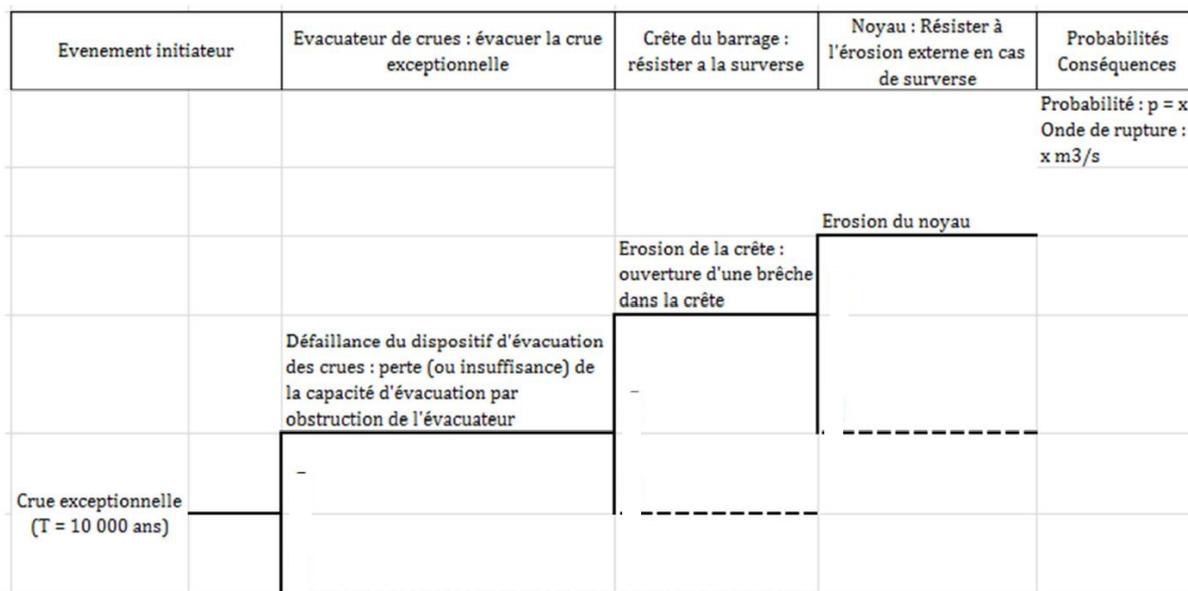


Figure 5.4 : Exemple d'un arbre d'évènements relatif à l'évènement initiateur « Crue exceptionnelle »

En synthèse, la méthode de l'arbre d'évènements présente les avantages suivants pour les applications aux barrages :

- sur la base d'une AMDE de qualité, elle est simple et intuitive à mettre en œuvre, en suivant une logique fonctionnelle ;
- elle garantit l'exhaustivité des défaillances, garantissant la complétude des scénarios, de leurs modes de défaillance ;
- elle est bien adaptée à une analyse semi-quantitative, mais aussi quantitative des scénarios.

Les inconvénients potentiels de cette méthode sont liés au traitement et à l'évaluation d'un grand nombre d'arbres lorsque le système à étudier comprend plusieurs composants, pour rendre compte des différents scénarios pouvant se produire. Ainsi, l'analyse peut apparaître moins synthétique que par une démarche déductive de construction des scénarios.

5.3 Analyse par la méthode des Arbres de Défaillances

La méthode des arbres de défaillances (appelée parfois méthode des arbres de fautes ou des arbres de causes) est une méthode d'analyse déductive. Cette démarche est apparue dans les années 1960 aux États-Unis en particulier dans le domaine militaire et aéronautique puis dans le nucléaire.

Il s'agit de représenter de manière graphique les combinaisons possibles d'évènements qui conduisent à la réalisation d'un évènement redouté (ER) préalablement défini lors de l'analyse des modes de défaillance (APR ou AMDE). Le point de départ de la construction de chaque arbre est donc

l'évènement redouté lui-même. Le principe est de définir ensuite des niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs évènements du niveau précédent. Le processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que la finesse de l'analyse soit jugée suffisamment pertinente par le groupe de travail en charge de l'analyse. Ces évènements non décomposés de l'arbre sont appelés évènements initiateurs.

Une telle représentation graphique met donc en évidence les relations de cause à effet. Des opérateurs logiques (ou portes) permettent de définir précisément les liens entre les évènements des différents niveaux.

Fonction	Symbole	Description
PORTE « OU »		L'évènement de sortie ne se produit que si au moins un des évènements d'entrée est présent.
PORTE « ET »		L'évènement de sortie se produit si tous les évènements d'entrée surviennent simultanément.

Tableau 5.1 : Liens logiques les plus souvent utilisés dans les arbres de défaillances

Cette technique est complétée par un traitement mathématique qui permet la combinaison de défaillances et permet ainsi de quantifier ou qualifier l'occurrence de l'évènement redouté (cf § 6.5.2).

Dans la mise en œuvre de la méthode de l'arbre de défaillance, il est nécessaire que les évènements élémentaires soient indépendants entre eux. Cela n'est pas toujours le cas comme par exemple avec des évènements initiateurs fréquemment rencontrés : la survenance d'une crue et les difficultés d'accès de l'opérateur pour actionner l'ouverture d'un évacuateur. En effet, on conçoit facilement qu'une crue n'occasionnera pas uniquement des difficultés sur l'ouvrage mais aussi sur tout son environnement.

Dans les études de dangers en France, cette méthode n'a été que peu rencontrée seule. Ci-dessous (Figure 5-5) un exemple d'arbre de défaillances illustrant ce paragraphe.

La méthode de l'arbre de défaillance présente l'avantage de permettre une vision globale des différents scénarios de défaillance, en mettant en exergue leurs causes et les liens logiques existant entre elles et les dispositifs de sécurité. C'est une méthode simple de réalisation et de mise en œuvre, s'appuyant sur une forte expertise métier.

Les difficultés de la méthode sont dans la complétude, l'exhaustivité et l'indépendance des évènements figurant dans l'arbre, ainsi que le risque de mélange des granularités des défaillances. De fait, cette méthode se prête à une analyse semi-quantitative des scénarios impliquant une forte expertise et n'est pas adaptée à une analyse quantitative probabiliste.

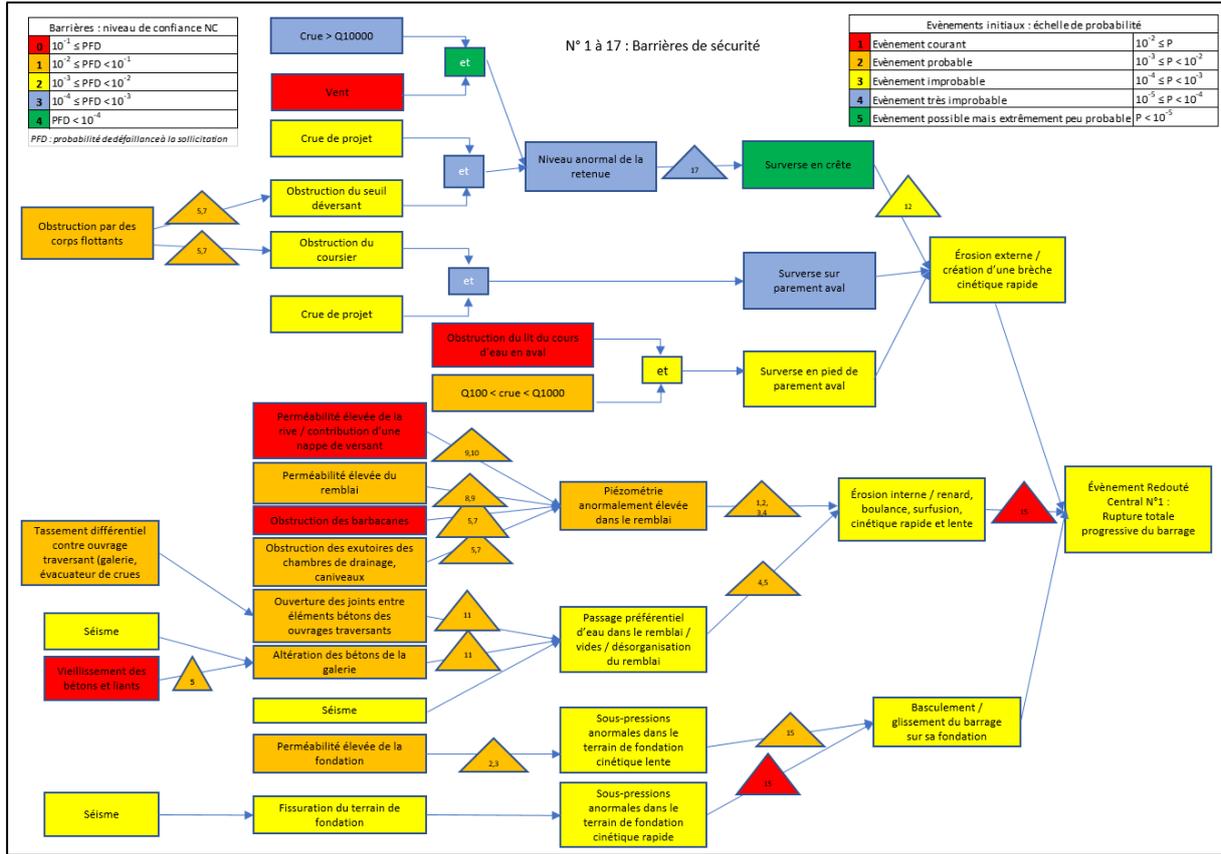


Figure 5.5 : Exemple d'un arbre de défaillances relatif à la rupture totale progressive du barrage

5.4 Analyse combinée par la méthode du Nœud Papillon

La méthode du nœud papillon a été initiée et développée dans l'industrie pétrolière et est utilisée dans les pays européens possédant une approche probabiliste de la gestion des risques. [INERIS 2006, 2011, 2016 ; IDDIR 2008]

Ce type d'outil graphique combine un arbre de défaillances et un arbre d'événements autour d'un même événement redouté central (ERC). Dans la méthode du Nœud Papillon, les ERC sont des situations dangereuses conduisant principalement à la perte d'intégrité physique partielle ou totale, ou de dysfonctionnement de l'ouvrage ou d'un de ses éléments (par exemple la rupture d'une vanne de fond ou de surface, la rupture d'un bouchon de galerie ...). Les ERC sont obtenus au moyen d'une analyse des modes de défaillance (APR ou AMDE).

La représentation des arbres de défaillances et d'événements a été adaptée pour l'outil du nœud papillon, leurs formes étant légèrement différentes de celles décrites dans les paragraphes précédents. Le nœud papillon permet d'avoir une vision globale des différents scénarios d'accidents en mettant en exergue leurs causes et les liens logiques existant entre elles et les dispositifs de sécurité.

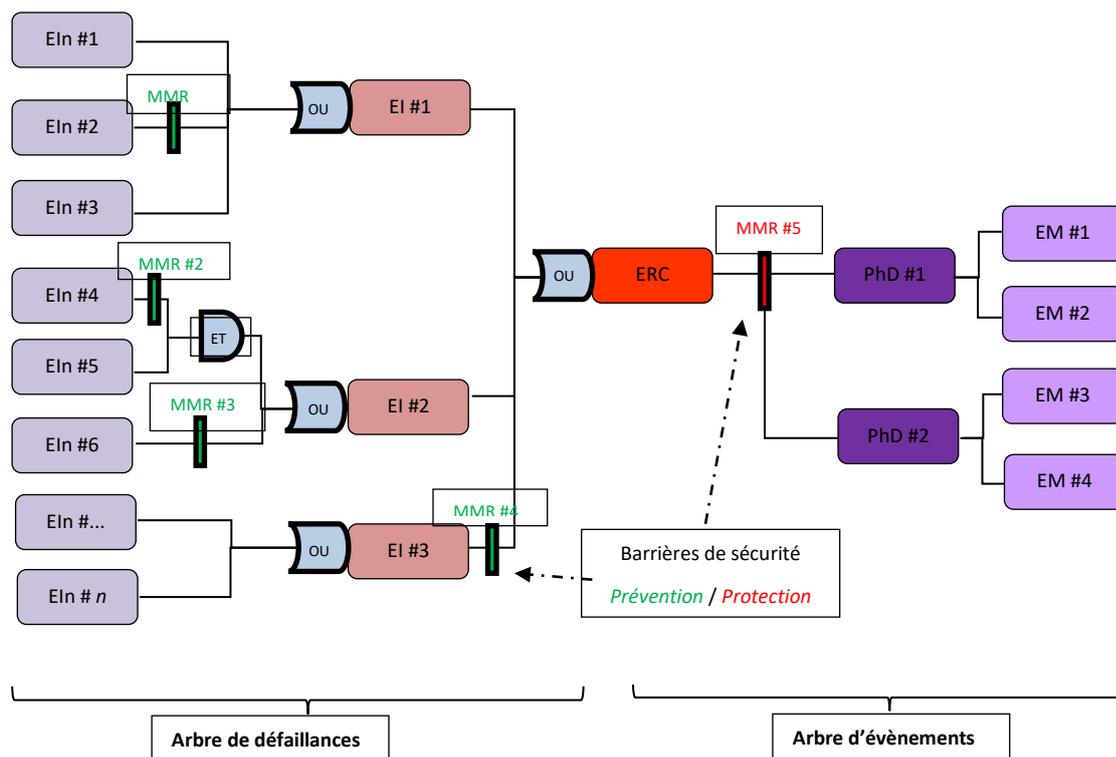


Figure 5.6 : Principe de représentation des scénarios d'accident avec la méthode du Nœud-Papillon

Le tableau ci-après reprend les éléments identifiés dans la figure précédente.

Désignation	Signification	Définition / Exemples
EI	Évènement initiateur	Les évènements initiateurs peuvent être des défaillances primaires du système étudié. Par exemple, le vieillissement des matériaux, le choc d'embâcles, la défaillance humaine lors d'une manœuvre, des fuites sur les systèmes de commande hydraulique, des pertes d'alimentation électrique ou de transmission ou encore des agressions externes comme les crues, les séismes, la foudre, l'avalanche, ...
EIn	Évènement intermédiaire	Les évènements intermédiaires correspondent à des regroupements en famille de plusieurs évènements initiateurs. Plusieurs exemples peuvent être donnés : agresseurs externes, défaillances matérielles, erreurs humaines, etc.
ERC	Évènement Redouté Central	Il s'agit de la défaillance (rupture ou dysfonctionnement) du système étudié (structure de l'ouvrage ou d'un de ses éléments, : vanne de fond, vanne de crue, bouchon de galerie, ...). Dans le langage usuel, l'ERC peut être appelé « accident » (rupture du barrage, rupture d'une vanne...).
PhD	Phénomène dangereux	Le phénomène dangereux est la conséquence directe de la perte de confinement du système. Dans la très grande majorité des cas, pour les barrages, il s'agit de formation d'une onde de submersion de plus ou moins grande intensité.
EM	Effets Majeurs	Il s'agit ici d'identifier : <ul style="list-style-type: none"> - les enjeux humains impactés (habitations, établissements recevant du public, ...) - les enjeux environnementaux impactés (station de captage, ...) - les enjeux économiques impactés (barrages à l'aval, industries, routes, ...). <i>Note : La présentation de ces types d'effets sur un nœud papillon n'est pas systématique. Ces éléments peuvent être déterminés ultérieurement (cf. 7.2).</i>
MMR	Mesure de Maîtrise des Risques	Il s'agit ici des barrières de sécurité identifiées comme participant à la réduction de l'occurrence de l'ERC (barrière de prévention) ou à la limitation des effets d'un accident (barrière de protection). Les barrières de sécurité identifiées en amont et en aval de l'ERC peuvent être à la fois des mesures techniques et/ou humaines reposant sur une organisation plus ou moins robuste de gestion de la sécurité.

Tableau 5.2 : Signification des évènements figurant dans un nœud papillon

Les nœuds papillons utilisent les principes des arbres de défaillances et d'évènements : les défaillances dans le barrage sont prises en charge par un arbre de défaillances et les conséquences des ERC dans l'environnement du barrage sont prises en charge par un arbre d'évènements. Ainsi, la branche gauche du nœud papillon (arbre de défaillances) traitant de la modélisation des défaillances dans le barrage se trouve considérablement plus importante que la branche droite (arbre d'évènements) traitant des conséquences.

Leurs élaborations nécessitent une forte expertise métier et ils sont construits en mobilisant un groupe de travail pluridisciplinaire. Ils permettent ainsi de visualiser :

- les scénarios susceptibles de conduire à des accidents ;
- les mesures de maîtrise des risques ou barrières de sécurité identifiées comme concourant à la réduction de l'occurrence de l'accident ou limitant ses conséquences ;
- et, en conséquence directe des deux points précédents, les chemins critiques ne présentant pas suffisamment de mesures de maîtrise du risque.

En règle générale, ces représentations sont construites à la suite d'une première analyse de risques menée à l'aide des méthodes APR, AMDE(C). Le travail consiste à reprendre les séquences accidentelles contribuant au même ERC et à positionner / regrouper les différents éléments les uns par rapport aux autres en utilisant des connecteurs logiques.

Les exemples suivants sont des représentations utilisées dans le cadre des études de dangers de barrages en France. Dans certains cas, certains événements initiateurs (EI) d'un ERC sont qualifiés de « complexes ». Ils sont alors détaillés par ailleurs sur un autre graphique (notamment par un arbre de défaillances), afin de garder une bonne lisibilité de l'ERC concerné. C'est le cas de l'exemple donné sur les Figures 5.7 et 5.8 suivantes.

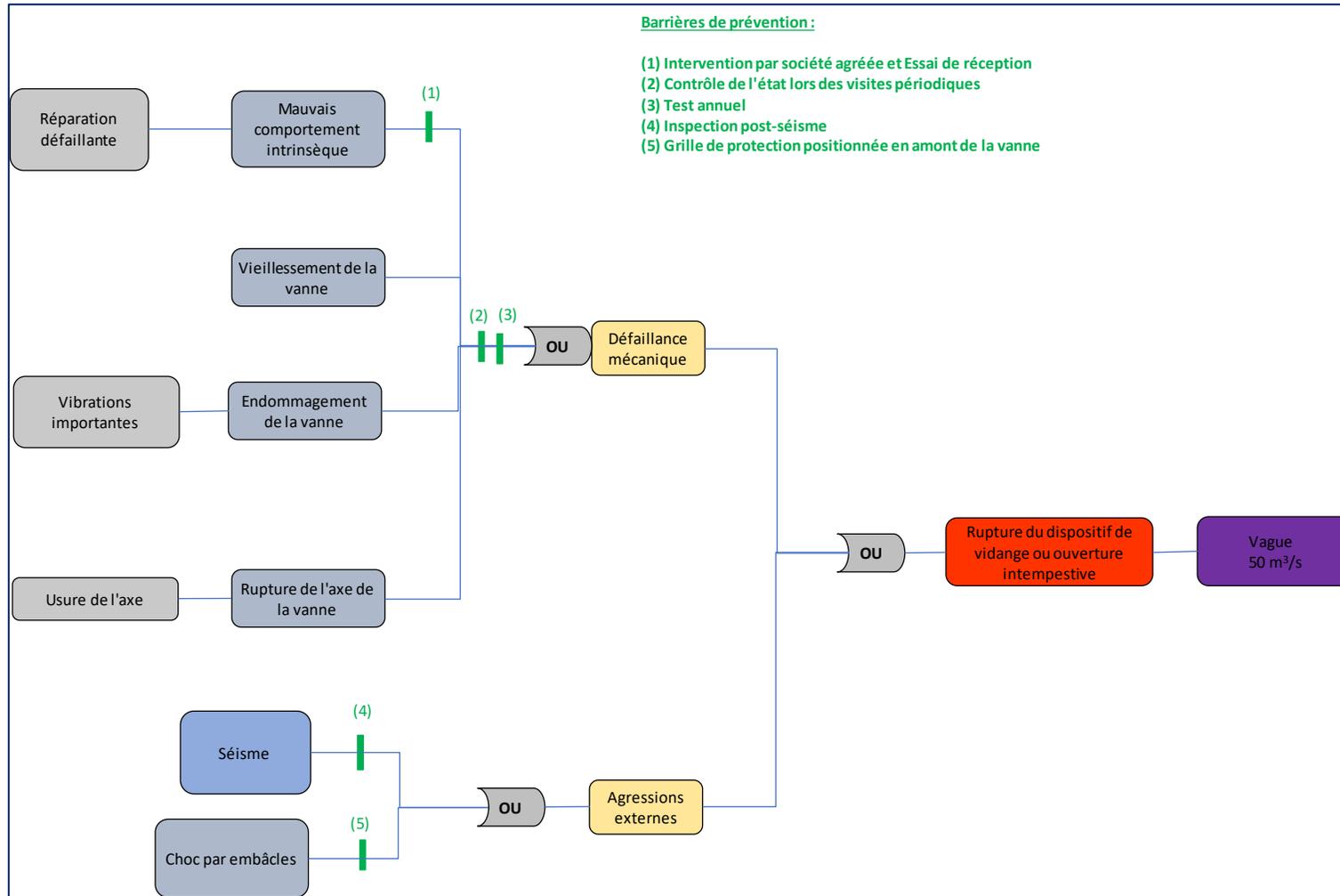


Figure 5.7 : Exemple de nœud papillon relatif à la perte d'intégrité d'une vanne de fond sur un barrage-voûte



Le vieillissement et l'état actuel des différents composants sont considérés comme un contexte général de l'analyse de l'Événement Redouté Central, et sont intégrés dans les cotations des événements initiateurs (voir les argumentations correspondantes).

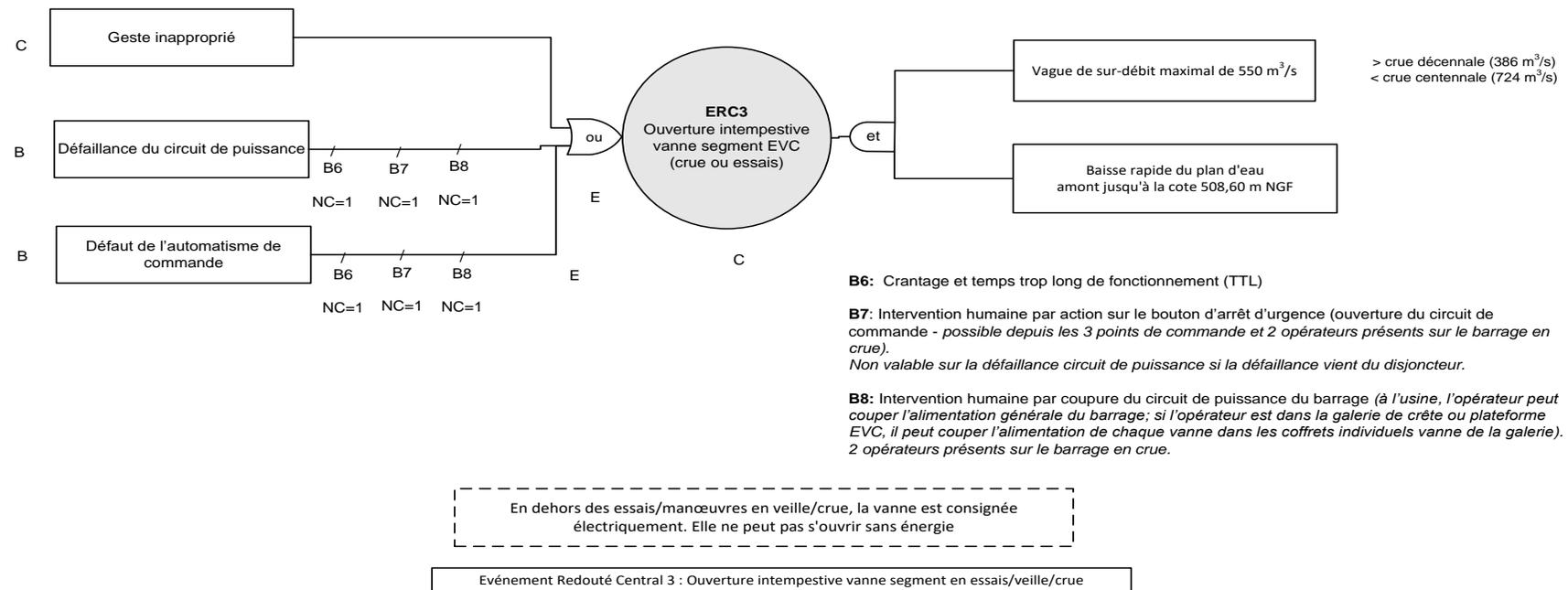


Figure 5.8 : Exemple de nœud papillon associé à une ouverture intempestive de vanne segment

Les nœuds papillons offrent une visualisation complète des scénarios d'accident qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des éléments vulnérables identifiés. Ils mettent également en valeur l'action des barrières de sécurité s'opposant à ces scénarios d'accident et permettent d'apporter une démonstration renforcée de la maîtrise des risques par le gestionnaire de l'ouvrage.

La représentation par la méthode des nœuds papillons présente plusieurs avantages :

- Une méthodologie structurante pour la réflexion permettant une appropriation rapide ;
- Une cohérence de présentation et de raisonnement. Elle permet une inter-comparaison facilitée non seulement entre nœuds papillons au sein d'une même EDD, mais également entre EDD de barrages différents ;
- Une représentation d'ensemble depuis les événements initiateurs amont jusqu'aux conséquences aval. Les barrages présentent en général un niveau de complexité fonctionnel simple par rapport à d'autres installations industrielles. La plupart des nœuds papillons de barrages restent ainsi facilement lisibles et appréhendables dans leur globalité ;
- Les nœuds papillons sont le support d'un raisonnement fonctionnel permettant l'agrégation d'événements ou de barrières de toutes natures facilitant le développement d'approches multi-métiers.

Son utilisation est généralement réservée à des événements jugés critiques pour la sûreté de l'ouvrage et/ou pour les enjeux identifiés et pour lesquels une démonstration de la maîtrise des risques est indispensable.

Les principaux risques liés à son utilisation pourraient être :

- Une tentation du « Copier/Coller » trop rapide de nœuds papillons semblant similaires d'un barrage à l'autre ;
- De profiter de la facilité apparente offerte par une structuration rapide fournie par le nœud papillon et ne pas suffisamment approfondir l'analyse de risques. Derrière la représentation graphique du nœud papillon, une partie essentielle reste constituée par le texte décrivant et justifiant les EI et les ERC. Le nœud papillon ne reste que la transcription d'une analyse pertinente et d'un raisonnement fonctionnel global ;
- Une représentation ne permettant pas toujours de se rendre compte de la spécificité des barrières de sécurité vis-à-vis de chacun des chemins identifiés qui mènent à l'accident et pour lesquels la barrière est censée fonctionner (par exemple, efficacité d'une barrière de 100 % sur un chemin mais 50 % sur un autre...) ;
- Le risque de non complétude, de non exhaustivité et de non indépendance des événements figurant dans l'arbre.

Enfin, à l'instar de la méthode des arbres de défaillances, la méthode est peu adaptée à une analyse quantitative probabiliste.

5.5 Synthèse de la représentation des séquences accidentelles par l'emploi de méthodes arborescentes

Les méthodes arborescentes décrites dans ce chapitre représentent des méthodes de modélisation des séquences accidentelles conduisant à un accident. La pratique française utilise les trois méthodes arborescentes : les arbres de défaillances, les arbres d'évènements et le nœud papillon.

La méthode du Nœud Papillon, qui combine les méthodes des arbres des défaillances pour les défaillances sur le barrage et la méthode des arbres d'évènements pour les conséquences sur l'environnement est la plus utilisée dans les études de dangers de barrages, et est mise en œuvre par les principaux industriels des barrages en France. En pratique, son usage dans les études de dangers des barrages s'apparente essentiellement à la méthode des arbres de défaillances qui traite les modes de défaillance des barrages. Son intérêt principal réside dans une représentation synthétique et simplifiée des scénarios de défaillance, bien adaptée aux barrages qui sont des ouvrages de structuration et de fonctionnement simples. La mise en place de la méthode du nœud papillon (ou de l'arbre d'évènements) nécessite la recherche préalable des modes de défaillance par une méthode telle que l'APR ou l'AMDE, qui va permettre de déterminer les événements redoutés et initiateurs. Une forte expertise métier doit accompagner l'application de ces méthodes.

La méthode des arbres d'évènements est utilisée dans les EDD en France à un moindre niveau que les deux méthodes précédentes. Elle s'appuie sur une analyse exhaustive des modes de défaillance obtenue par la méthode AMDE. La méthode de l'arbre d'évènement garantit en principe l'indépendance des évènements successifs et permet de suivre le déroulement fonctionnel et chronologique d'un scénario et d'évaluer l'influence des barrières mises en œuvre sur la fréquence d'apparition du scénario. Les inconvénients de cette méthode sont liés à l'évaluation d'un grand nombre potentiel d'arbres lorsque le système à étudier est complexe.

6 Evaluation de la sûreté

6.1 Introduction

Le principe consiste à évaluer individuellement les probabilités des défaillances ou des événements élémentaires d'un scénario, puis les agréger par des règles mathématiques adaptées à la méthode choisie, permettant d'obtenir au final la probabilité globale du scénario. Ainsi, le problème complexe d'évaluation de la probabilité d'un scénario est ramené à l'évaluation d'une succession de défaillances ou d'événements élémentaires dont l'évaluation est plus facile.

Dans la pratique de l'analyse de risques des barrages en France, on constate deux pratiques de l'évaluation des probabilités pour les défaillances ou événements élémentaires :

- une approche semi-quantitative d'évaluation de la sûreté, dans laquelle les évaluations sont obtenues au moyen de grilles d'analyse faisant correspondre des dires d'experts à des intervalles de probabilité. Cette approche est celle qui est la plus utilisée dans les études de dangers en France ;
- une approche quantitative probabiliste d'évaluation de la sûreté, dans laquelle les évaluations se font au moyen de modèles probabilistes, d'analyses statistiques, ou à défaut par jugement expert. Cette deuxième approche est moins pratiquée.

6.2 Le travail en panel d'experts

Quelle que soit l'approche adoptée, l'évaluation de la sûreté est produite en s'appuyant sur un groupe de travail regroupant un panel d'experts et d'exploitants dont le rôle sera :

- Le contrôle et la validation de la modélisation des scénarios sous la forme de succession de défaillances ou d'événements élémentaires ;
- L'évaluation des probabilités des défaillances ou des événements élémentaires, sous forme d'un intervalle de probabilité ou d'une probabilité unique ;
- Le contrôle et la validation de l'évaluation de la probabilité du scénario dans son ensemble, notamment par l'inter comparaison avec les évaluations des différents scénarios et leur hiérarchisation entre eux.

Le groupe de travail comprend les différentes composantes de l'ingénierie et de l'exploitation nécessaires pour ces analyses. Typiquement, les panels d'experts sont composés : d'un animateur du panel spécialisé dans les méthodes d'analyse de risques, d'un (ou des) ingénieur(s) en génie civil spécialisé(s) dans les barrages et ayant une bonne connaissance de l'ouvrage à évaluer, l'exploitant du barrage. Autant que de besoin et selon les évaluations à produire pour les scénarios, le panel pourra être élargi à un ingénieur hydraulicien, un hydrologue, un ingénieur spécialiste en électromécanique et contrôle-commande, etc., le groupe pouvant être adapté au besoin en fonction de la complexité du barrage. Le rôle des représentants de l'exploitant du barrage est fondamental pour la réussite de l'exercice. C'est lui qui possède en pratique la meilleure connaissance concrète du barrage et de ses équipements ainsi que le retour d'expérience terrain de son fonctionnement incluant la connaissance de la bonne réalisation de la maintenance, des essais et ayant la connaissance des incidents et défaillances ayant affectées le barrage. Dans la constitution du groupe, il convient d'être vigilant à ce que l'exploitant du barrage mandate une ou des personnes possédant effectivement cette connaissance opérationnelle du barrage et de ses organes.

Différentes techniques de recueil du jugement d'expert peuvent être utilisées au sein du panel : la mise en situation des experts, des techniques d'interviews dirigées, des interviews individuelles puis collectives, des recherches de consensus au sein du panel.

Dans le souci d'objectiver et d'homogénéiser les évaluations d'experts, on se réfère à des guides de cotations de la profession ou basés sur les retours d'expériences (REX) internes de l'exploitant et externes. Ces éléments peuvent être issus de bases de données d'incidentologie des barrages, qui peuvent provenir de bases de données ou de rapports/ études partagés par la profession, ainsi que de l'exploitation du REX disponible sur les événements survenus à l'international ou chez d'autres exploitants.

6.3 Barrières de sécurité

6.3.1 Les principes

Les barrières de sécurité constituent l'ensemble des éléments techniques et/ou organisationnels nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. Elles permettent ainsi d'amener les scénarios étudiés à une criticité acceptable. En général, il existe deux types de barrières de sécurité :

- les barrières de prévention : elles comprennent les mesures visant à annuler ou diminuer la probabilité d'un événement indésirable, en amont du phénomène dangereux ;
- les barrières de protection : elles comprennent les mesures visant à limiter les conséquences sur les cibles potentielles par diminution de la vulnérabilité. Dans les EDD jusqu'à présent, seules les barrières de prévention sont prises en compte et les barrières de protection liées aux plans d'urgence ne sont pas intégrées, la mise en œuvre des plans d'urgence des barrages ne dépendant pas que du responsable de l'ouvrage.

Pour pouvoir être retenue en tant que barrière et permettre une décote de l'occurrence, les critères suivants sont examinés :

- **Indépendance** avec l'événement et avec les autres barrières accomplissant la même fonction de sécurité.
Exemple : si l'évènement à évaluer est « erreur opérateur », l'opérateur ne peut pas être une barrière. En revanche, un deuxième opérateur agissant en tant que vérificateur (= tâche de contrôle) pourra rattraper la dérive et être considéré comme barrière ;
- **Efficacité** de la barrière. L'efficacité d'une barrière dépend de nombreux paramètres et, pour l'évaluer, on étudie sa conception, sa disponibilité, son accessibilité, sa résistance aux contraintes spécifiques, etc. ;
- **Temps de réponse** lorsqu'il est pertinent (par exemple, il prend en compte les temps d'ouverture de vanne, le temps d'arrivée sur place de l'opérateur, etc.). Il doit être en adéquation avec la cinétique de l'événement sur lequel la barrière est censée agir ;
- **Testabilité/maintenabilité** pour les barrières techniques, comprenant la formation/audit/exercices pour les barrières humaines.

Ces quatre critères permettent de déterminer le **Niveau de confiance (NC)** : il est évalué par le groupe de travail en fonction de la probabilité de défaillance de la barrière. Il permet de décoter d'un ou plusieurs niveaux ou ordres de grandeur l'occurrence de l'événement. En pratique, le REX des EDD montre que la plupart des barrières ont un niveau de confiance de 0, 1 ou exceptionnellement 2. En

termes d'ordre de grandeur quantitatif, un niveau de confiance de 0 correspond à une barrière qui ne change pas l'évaluation du scénario, et un niveau de confiance de 1 pour une barrière signifie qu'elle est efficace environ 9 fois sur 10.

6.3.2 Prise en compte des barrières de prévention

Une barrière comprend en général : un capteur (détecteur), une chaîne de transmission et de traitement du signal, et un (ou des) actionneur(s).

On peut distinguer 3 catégories de barrières de prévention : technique, humaine et mixte. Dans le cas d'une barrière humaine (basée sur l'organisation et les procédures), tous ou seulement certains des éléments de la chaîne de sécurité font intervenir le facteur humain.

Exemple d'action suite à détection d'anomalie : vanne d'évacuation manœuvrée manuellement suite à détection d'un problème d'alimentation ; baisse de cote du réservoir suite à détection par l'auscultation de mesures jugées anormales de fuites ou piézométrie (la chaîne de transmission et de traitement du signal peut être humaine et l'actionneur correspond à une prise de décision et action de l'exploitant).

Une barrière est dite **passive** si elle ne nécessite pas d'énergie pour être actionnée ou s'il s'agit d'une disposition constructive intrinsèque (exemple : verrou passif). Dans le cas contraire, la barrière est dite **active** (exemple : incident détecté par action de surveillance, intervention d'un agent, mise en œuvre des actions du plan interne pouvant aller jusqu'à la décision de procéder à la vidange, et d'actionner la vanne d'évacuation, sa source d'énergie pouvant être électrique, hydraulique ou humaine).

De manière générale, la barrière permet de décaler l'occurrence d'un événement. La décote de 0 à 2 niveaux est fonction du niveau de confiance attribué à la barrière, et correspond, approximativement, à la probabilité de défaillance à la sollicitation de la barrière.

Exemple : dans le cadre d'une évaluation semi-quantitative de la sûreté et si l'occurrence de l'EI est de classe B (cf cotation selon approche semi-quantitative ci-dessous, exemple : érosion interne) et qu'il existe, vis-à-vis de cet événement, une barrière de prévention dont le NC est estimé à 2 (exemple : dispositif d'auscultation, seuil de déclenchement et action exploitant), alors l'occurrence de l'événement redouté (ER) résultant est de classe D.

Exemple de non barrière : la conception, le dimensionnement, la réalisation, la formation, le document d'organisation de l'exploitant, la maintenance courante, ... ne sont pas des barrières en soi. Ces éléments concourent éventuellement à réduire la fréquence d'un événement et à garantir le NC des barrières, mais ne suffisent pas à s'opposer au déroulement accidentel. On ne les fait pas apparaître dans les nœuds papillons, mais dans les argumentaires de cotation des barrières ou des événements initiateurs.

Réf	Intitulé de la barrière	Critères	Validité	Justifications	Décote
B3	Dispositif de crantage	Indépendance	OUI	Pas besoin d'intervention humaine et indépendant de l'automate du barrage	1
		Efficacité	OUI	Deux dispositifs indépendants agissant sur le premier rang: - Crantage mécanique : stoppe la manœuvre après 25cm de distance (hachage tous les 20 cm) - Surveillance par temporisation : stoppe la manœuvre après un temps continu trop long Cette barrière permet de stopper la manœuvre continue d'une vanne	
		Temps de réponse	OUI	Réponse immédiate et compatible avec le temps d'ouverture de la rehausse	
		Test, maintenance	OUI	Essais fréquents sans remontée de défauts particuliers	
		Niveau de confiance	1		
B11	Fermeture manuelle de la vanne	Indépendance	OUI	Barrière indépendante de l'automate et de la barrière B3	1
		Efficacité	OUI	Arrêt immédiat de la manœuvre même avec un premier rang en défaut	
		Temps de réponse	OUI	La vanne s'ouvre complètement en 85 min. Soit l'exploitant est sur place, soit l'exploitant d'astreinte peut arriver sur le site en maximum 20 min, comme le prévoit l'organisation du groupement d'usines. L'alerte sera réalisée par l'APB suite à une incohérence entre les paramètres amont et aval.	
		Test, maintenance	OUI	Essais fréquents sans remontée de défauts particuliers	
		Niveau de confiance	1(*)		

Tableau 6.1 : Exemple de justification et cotation de barrière dans les EDD

(*) Le niveau de confiance dans cet exemple a été fixé à 1 dans la mesure où les 4 critères (indépendance, efficacité, temps de réponse, test-maintenance) sont satisfaits

La maintenance spécialisée peut être considérée comme une barrière de prévention, sous réserve que les travaux nécessaires soient parfaitement identifiés et préparés, et qu'un dispositif de surveillance spécifique soit en place pour déclencher l'opération et réaliser les travaux dans un temps compatible avec la cinétique de l'événement redouté (ex : contrôle bathymétrique et éventuel confortement aval à la suite d'une crue).

S'il existe plusieurs barrières indépendantes (c'est-à-dire avec indépendance de tous les éléments constituant la chaîne de sécurité et sans mode commun de pannes), les décotes de ces barrières peuvent s'additionner.

Exemple de barrières non-indépendantes (modes communs) :

- l'existence d'un second chemin d'accès ne constitue pas forcément une barrière vis-à-vis de l'événement « impossibilité d'accéder au barrage pour cause de voie bloquée par la chute d'arbres » puisque ce second chemin sera lui-aussi, très certainement, obstrué par la chute d'arbres en situation de tempête.
- des vannes utilisant une même source d'énergie ne peuvent pas être considérées comme totalement redondantes.

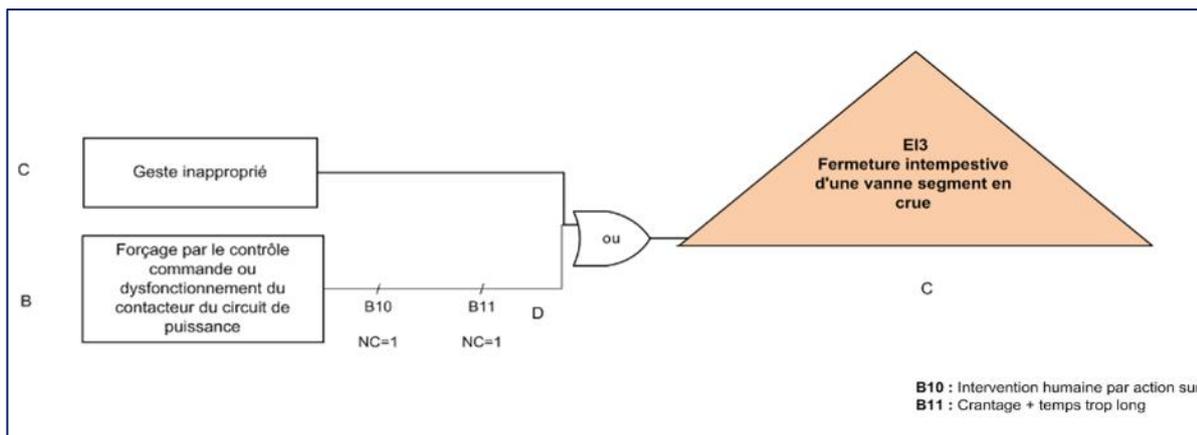


Figure 6.1 : Approche semi-quantitative - Exemple de barrières de prévention pour l'EI « Fermeture intempestive d'une vanne en crue »

6.3.3 Exemple – Barrière de prévention : Vidange de Fond

En France, la vidange de fond peut être utilisée comme barrière de prévention du risque rupture barrage hors situation de crue, et la pratique des EDD montre qu'elle est souvent utilisée à cet effet. Elle permet ainsi de mettre le barrage en sécurité suite à la détection d'une anomalie. Il en serait ainsi dans le cas où un composant essentiel de la sécurité du barrage serait défaillant, par vieillissement, situation accidentelle post sismique ou autre : il peut s'agir par exemple du drainage, de l'étanchéité ou des caractéristiques des matériaux.

Cette barrière ne peut être utilisée que si la surveillance et le déclenchement effectif de cette barrière sont compatibles avec la cinétique d'apparition de l'ER. Le niveau de confiance de cette barrière peut varier en fonction de sa sensibilité intrinsèque et du dimensionnement hydraulique de la vidange de fond. Le niveau de confiance peut être encore augmenté, s'il existe deux vannes de fond indépendantes sur le barrage.

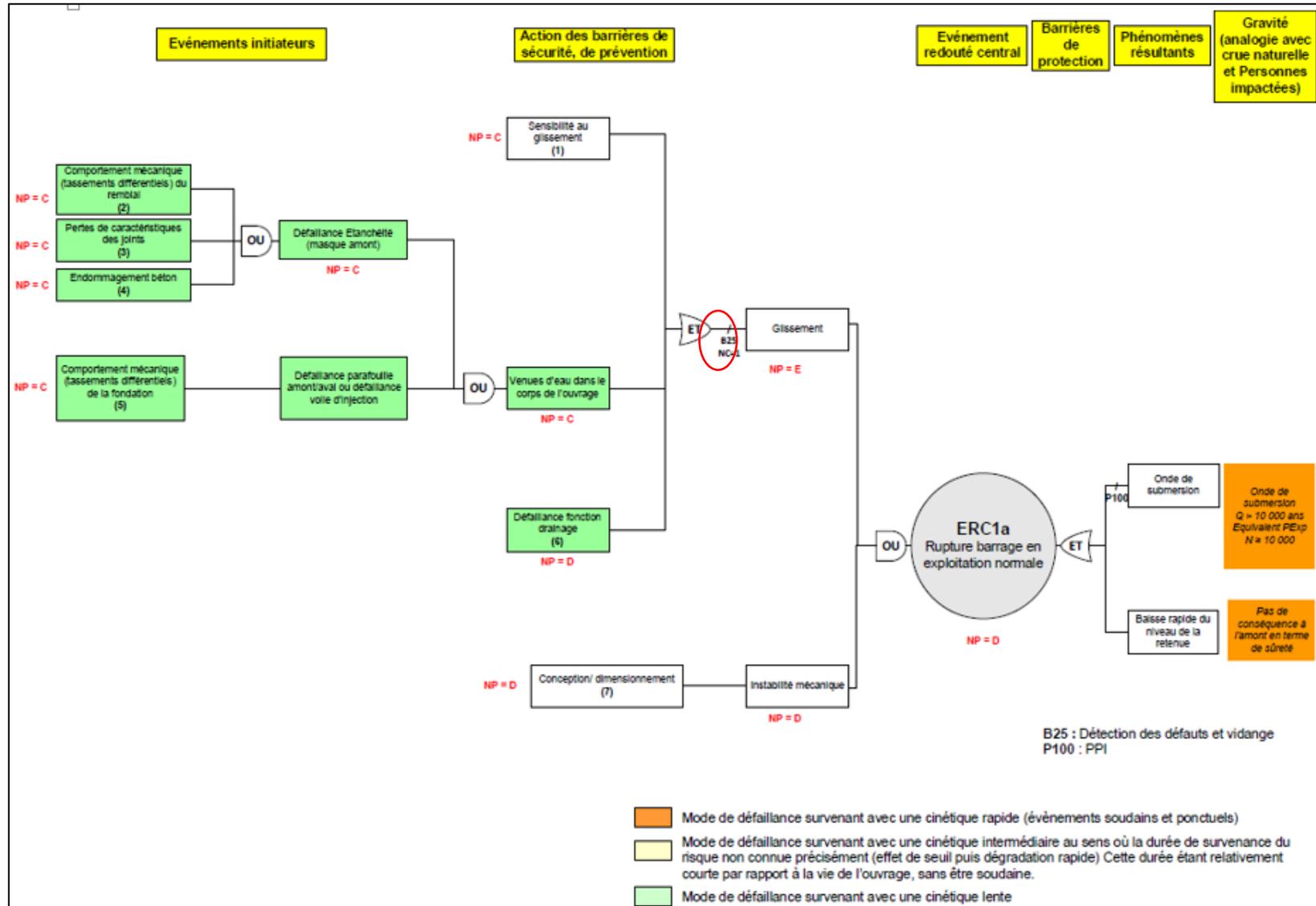


Figure 6.2 : Approche semi-quantitative par la méthode du Nœud Papillon - Exemple d'évènement redouté « Rupture barrage » avec vidange de fond comme barrière de prévention

6.4 Prise en compte du facteur humain

Une défaillance liée au facteur humain peut être le résultat de plusieurs facteurs (manque de clarté des procédures, stress, manque de compétences sur une opération complexe, etc.). Evaluer les risques d'erreur humaine revient à s'interroger sur la fiabilité du système socio-organisationnel qui peut produire ces erreurs. Les défaillances liées au « facteur humain » sont libellées de façon explicite, adaptées et justifiées (argumentées) en regard du scénario de défaillance qu'elles initient. On peut distinguer 2 familles d'événements liés au « facteur humain » :

- Le « geste inapproprié » ;
- La « défaillance humaine ».

6.4.1 Le geste inapproprié

Cette famille de défaillances est relative au geste professionnel, à une activité à accomplir. Ce « geste », que l'on qualifie alors d'« inapproprié », s'appréhende par un écart, une erreur d'interprétation ou d'exécution, un oubli de la part d'un individu (d'une équipe) clairement identifié, intervenant dans le cadre d'une activité et d'une situation de travail données, voire par une défaillance du système organisationnel. Le terme de « geste » est à considérer dans un sens large (pas seulement une manœuvre, mais aussi une transmission d'information, ou la préparation d'une tâche par exemple).

L'occurrence de cette défaillance renvoie à l'évaluation d'un dysfonctionnement dans les domaines organisationnels et humains pour réaliser une activité donnée en lien avec l'ER et en adéquation avec sa cinétique. Ce qui est évalué et coté n'est pas l'occurrence du geste lui-même, mais l'occurrence des facteurs ayant une influence sur ce geste. La démarche adoptée relève d'une approche systémique, dans le sens où l'on cherche à évaluer différents facteurs non techniques (organisationnels, sociaux, humains, contextuels, individuels et collectifs) qui, combinés entre eux, produisent potentiellement un geste approprié ou non.

L'évaluation de l'occurrence d'un événement de type « geste inapproprié » peut être construite sur l'examen et l'évaluation de 4 critères qui sont questionnés séparément : [LAROUZEE 2015]

- La compétence des opérateurs (le niveau de savoir et savoir-faire d'une équipe et les conditions de transmission du savoir au sein de l'organisation) ;
- la complexité de la tâche à accomplir (relative au système à actionner) ;
- la situation de travail au sens des conditions de réalisation d'une opération (en tant qu'influence du contexte sur l'opérateur) ;
- la capacité d'autocorrection (ergonomie et réversibilité, agissant comme un réducteur du risque d'initier l'ER).

6.4.2 La défaillance humaine

Cette famille d'événements est relative à une notion d'interruption inopinée d'une activité en cours de réalisation ou attendue, liée à la « fiabilité intrinsèque » d'un individu ou d'intervenants. Sa cause

est généralement appréhendée comme un événement subi et indépendant de l'organisation (par exemple : malaise, chute de plain-pied, accident de circulation).

La pertinence de cette défaillance est à apprécier d'une part avec un certain réalisme sur la situation dans laquelle elle peut engendrer le scénario redouté (notamment en lien avec la cinétique du scénario) et d'autre part en fonction des dispositions techniques et organisationnelles mises en œuvre (il faut que l'action attendue de l'opérateur ne dépende que de lui et lui seul dans la cinétique du scénario de l'événement redouté).

Afin d'éviter toute ambiguïté sur l'événement initié par le « facteur organisationnel et humain », il convient d'identifier clairement, au niveau de l'événement, le geste professionnel objet du dysfonctionnement redouté. Il s'agit donc de privilégier la désignation de l'événement en des termes précisant la situation de travail, par exemple :

- « Erreur de manœuvre lors d'essais périodiques » pouvant conduire à un ER d'ouverture intempestive et totale d'une vanne ;
- « Erreur de manœuvre lors de la conduite en crue » pouvant conduire à un ER d'ouverture intempestive et totale d'une vanne ou amener à une fermeture partielle ou totale des organes d'évacuation d'un barrage ;
- « Mise en position inadaptée de la vanne d'admission/échappement lors d'une opération d'entretien » pouvant conduire à un ER d'ouverture intempestive ou un événement complexe de non ouverture ;
- « Non-détection de l'arrivée d'une crue » pouvant conduire à un scénario d'absence de personnel pour des manœuvres d'organes de crues.

La pertinence de cet événement nécessite de s'assurer que la tâche attendue dépend de la seule intervention de l'agent dans la cinétique du scénario de mode de défaillance amenant à l'ER (avant application de barrières techniques ou organisationnelles).

6.5 Approche semi-quantitative d'évaluation de la sûreté

6.5.1 Evaluation des occurrences des événements initiateurs (EI) ou intermédiaires

Certains EI sont associés à l'occurrence d'un aléa naturel, dont les deux principaux sont les crues et les séismes. Pour ces événements, les occurrences sont évaluées à partir de la connaissance de la fréquence ou la période de retour associée à l'intensité de l'aléa considérée dans le scénario, qui renseigne directement sur la probabilité annuelle d'occurrence de l'EI, et donc ensuite, sa classe semi-quantitative.

Pour les événements initiateurs ou intermédiaires correspondant à une défaillance intrinsèque à l'ouvrage, les occurrences de ces événements sont évaluées par le panel d'experts, sur une base semi-quantitative. Elles sont idéalement précisées dans un guide méthodologique de cotation assurant la cohérence des différentes cotations au sein des organes d'un même ouvrage.

Pour les EDD en France, les valeurs d'occurrence sont le plus souvent exprimées en classe ou niveau de fréquence. Le tableau ci-après constitue un exemple de grille utilisée pour l'évaluation semi-quantitative, proposant 5 classes [A à E] :

Echelle de probabilité	E	D	C	B	A
Qualitative (si le nombre d'installations et le REX sont suffisants)	« événement possible mais extrêmement peu probable » : <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations</i>	« événement très improbable » : <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité</i>	« événement improbable » : <i>un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité</i>	« événement probable » : <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation</i>	« événement courant » : <i>s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation, malgré d'éventuelles mesures correctives</i>
Semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'art.4 de l'arrêté				
Quantitative (par unité et par an)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	

Tableau 6.2 : Exemple de grille semi-quantitative pour l'évaluation des événements

Pour les équipements, organes, matériels, les valeurs d'occurrence des événements initiateurs ou intermédiaires intègrent la conception, le dimensionnement, la réalisation et l'état de l'équipement au moment de l'analyse ainsi que les contraintes auxquelles il est soumis (exemple acidité de l'eau qui accentuerait le phénomène de corrosion). La cotation de ces événements intègre implicitement la maintenance et la surveillance courantes.

Par ailleurs, il convient de souligner la difficulté de cotation de certains EI externes liés à des aléas naturels qui posent des questions méthodologiques et scientifiques (glissement de terrain, avalanche, gel..).

Pour chacune des évaluations des événements de la méthode arborescente utilisée, l'EDD justifie soigneusement les classes d'occurrence retenues pour ces événements.

6.5.2 Principes d'agrégation dans les méthodes du Nœud Papillon ou de l'Arbre de Défaillances pour la détermination de l'occurrence des événements redoutés

L'occurrence des ER est déterminée à partir des occurrences des événements initiateurs ou intermédiaires et tient compte des NC attribués aux barrières de prévention identifiées. Dans les méthodes du Nœud Papillon ou de l'Arbre de Défaillances, des opérateurs logiques « ET » et « OU » sont utilisés et permettent l'agrégation des événements initiateurs et intermédiaires. Les principes d'agrégation de ces opérateurs ne sont pas standardisés et les principes énoncés ci-après constituent un exemple de principes retenus pour certaines EDD de barrages en France.

Porte « ET » :

Les occurrences événements initiateurs ou intermédiaires « s'additionnent » selon la matrice suivante :

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

Par exemple si l'occurrence de l'EI1 = B et l'occurrence de l'EI2 = C alors l'occurrence de l'évènement intermédiaire EI1 **ET** EI2 vaut D.

Précaution concernant l'usage des portes ET :

- La classe d'occurrence A pouvant représenter des probabilités proches de 1, la combinaison d'un événement de classe d'occurrence « A » ET d'un autre événement peut amener à conserver, par dérogation au tableau ci-dessus, l'occurrence de cet autre événement, en fonction du niveau accordé à l'évènement de classe d'occurrence « A » ;
- Les principes ci-dessus s'appliquent lorsque les deux événements en entrée de la porte ET sont indépendants. Cela n'est pas nécessairement le cas lorsqu'on combine une crue et un dysfonctionnement d'évacuateur de crues. Dans cette combinaison, on vérifie donc que la cotation de l'évènement résultant de la porte ET soit cohérente avec l'échelle qualitative et si nécessaire, coter la combinaison par dérogation au tableau ci-dessus.

Porte « OU » :

L'occurrence la plus faible prévaut selon la matrice suivante :

OU	A	B	C	D	E
A	A	A	A	A	A
B	A	B	B	B	B
C	A	B	C	C	C
D	A	B	C	D	D
E	A	B	C	D	E

Par exemple si l'occurrence de l'EI1 = B et l'occurrence de l'EI2 = C alors l'occurrence de l'évènement intermédiaire EI1 **OU** EI2 vaut B.

Dans le cas particulier où il y a de nombreux EI en amont d'une porte « OU », il est prudent de considérer que l'occurrence résultante est plus faible que celle résultant de la stricte application de ces principes. Par exemple, si on a 6 EI de classe d'occurrence « C » conduisant à l'ER, alors l'occurrence de l'ER peut être évaluée en classe « B ». Ces règles sont indicatives. De façon générale, le groupe de travail peut décider un écart d'une classe autour de la référence donnée par les tableaux ci-dessus, à condition de le signaler explicitement, de justifier et d'argumenter cette décision dans l'EDD.

6.6 Approche quantitative d'évaluation de la sûreté

6.6.1 Principe de l'évaluation quantitative de la sûreté à partir de la méthode de l'arbre d'événements

L'évaluation quantitative de la sûreté est produite dans les études de dangers en France au moyen de la méthode de l'arbre d'événements. Celle-ci permet de décrire les scénarios à partir d'un événement initiateur, le développement de l'arbre se faisant chronologiquement de façon inductive et permettant de représenter l'enchaînement des événements jusqu'aux événements redoutés finaux dont certains correspondent à des défaillances.

Lors d'une analyse quantitative de la sûreté et sur la base de l'arbre d'événements, on évalue la probabilité d'apparition de chaque événement élémentaire de l'arbre : les aléas naturels, les modes de défaillance, les barrières de sécurité. La probabilité d'apparition d'un scénario est alors égale au produit des probabilités d'apparition des événements amenant à ce scénario. La méthode de l'arbre d'événements permet de suivre le déroulement d'un scénario et d'évaluer l'influence des barrières de prévention mises en œuvre sur la fréquence d'apparition du scénario.

6.6.2 Les différentes démarches d'évaluation des probabilités

On rencontre différentes démarches d'évaluation quantitative des probabilités des événements de l'arbre d'événements dans les études de dangers pratiquées en France :

6.6.2.1 Les démarches probabilistes

Celles-ci sont mises en œuvre pour l'évaluation des aléas extérieurs tels que les crues et les séismes. Ces aléas sont caractérisés dans la pratique française dans un cadre probabiliste qui associe à une intensité d'un événement une probabilité d'occurrence ou une période de retour donnée.

Exemple 1 : Modèle probabiliste hydrologique associant les crues à une probabilité annuelle d'occurrence

Exemple 2 : Modèle probabiliste pour la sollicitation sismique associant les séismes à une probabilité annuelle d'occurrence

Cette approche relevant souvent de la recherche et développement et étant utilisée dans quelques études de dangers, certaines défaillances peuvent faire l'objet d'évaluation mécanique-probabiliste. Sont concernées les modes de défaillance relevant d'états-limites ultimes tels que l'état-limite de cisaillement d'un barrage-poids ou l'état-limite de glissement d'un barrage en remblai. Dans les évaluations de ces modes de défaillance, les sollicitations et les propriétés de résistance des matériaux sont modélisées par des variables aléatoires, puis des simulations de type Monte Carlo permettent de déterminer la probabilité associée aux modes de défaillance.

6.6.2.2 Les démarches fréquentielles

Il s'agit de déterminer les fréquences de défaillance d'un composant du barrage par le retour d'expérience. Cette démarche est pertinente si le retour d'expérience du mode de défaillance concerné est suffisamment abondant pour conduire une analyse statistique, le taux de défaillance étant alors obtenu par le rapport entre le nombre de pannes et le nombre de sollicitations. Les bases de données d'incident/accident liées aux barrages peuvent venir en support de ces évaluations.

Exemple : cette démarche d'évaluation peut être pertinente pour des composants tels que systèmes électromécaniques : vannes, clapets, commandes électriques, commande de secours, générateur

électrique, ou certaines barrières de sécurité telles que les systèmes d'auscultation, ou encore les systèmes d'organisation et certaines défaillances humaines : défaut de surveillance, défaut d'auscultation, défaut d'alerte, défaut de commande.

6.6.2.3 Les démarches déclaratives à dire d'experts

Certaines défaillances ne peuvent faire l'objet d'une analyse probabiliste ou fréquentielle car les données disponibles sont insuffisantes. Ces situations conduisent à utiliser le jugement expert pour conduire des analyses déclaratives expertes de la probabilité d'occurrence de la défaillance.

Ces évaluations sont produites dans le cadre d'un panel d'experts selon les principes présentés plus haut. Des grilles spécifiques de traitement du jugement expert sont utilisées, permettant de retranscrire un dire qualitatif en probabilité d'occurrence :

Verbal Description	Probability Equivalent	Low	High	Appréciation experte de la probabilité d'occurrence	Traitement quantitatif des dires d'experts
virtually impossible	0.01	0.00	0.05	« très probable »	0,60
very unlikely	0.10	0.02	0.15	« probable »	0,40
unlikely	0.15	0.04	0.45	« moyennement probable »	0,20
fairly unlikely, rather unlikely	0.25	0.02	0.75	« peu probable »	0,10
fair chance, toss-up	0.50	0.25	0.85	« très peu probable »	0,01
usually, good chance, probable, likely	0.75	0.25	0.95	« extrêmement peu probable »	0,001
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 6.3 : Exemples de grille de retranscription du dire expert sous forme de probabilités subjectives

6.6.3 Exemple d'évaluation quantitative de la sûreté par la méthode de l'arbre d'événements

L'exemple considère l'évaluation de la sûreté d'un barrage en remblai vis-à-vis du scénario de surverse lié à une insuffisance du coursier.

Evenement initiateur	Evacuateur de crues : évacuer la crue Ti	Recharge aval : résister à l'érosion externe	Probabilités Conséquences
			Probabilité : $p = 10^{-6}$ Onde de rupture : 2500 m ³ /s
		0,1	
		Erosion du talus aval : ouverture d'une brèche autour du coursier	
		10^{-1}	
		Défaillance du dispositif d'évacuation des crues : perte (ou insuffisance) de la capacité du coursier	
		-	
1/10 000			
Crue Ti			

Figure 6.3 : Exemple d'évaluation de la sûreté d'un barrage en remblai vis-à-vis du scénario de surverse lié à une insuffisance du coursier

Ce scénario comprend la succession de trois modes de défaillance modélisant fonctionnellement le mécanisme de surverse lié à une insuffisance du coursier d'un barrage en remblai : 1) événement initiateur : l'aléa hydrologique, 2) la défaillance de l'évacuateur par débordement depuis son coursier, 3) la défaillance de la fonction de résistance à l'érosion externe de la recharge aval le long du coursier.

Les évaluations de la sûreté des événements sont produites au moyen du modèle probabiliste hydrologique pour l'événement initiateur et par jugement expert sous forme de probabilité subjective pour les modes de défaillance (2) et (3). L'évaluation globale du scénario d'érosion interne est obtenue par la multiplication des probabilités élémentaires, l'arbre d'événements étant de fait un arbre de probabilités.

6.7 Synthèse des approches d'évaluation de la sûreté

Les approches semi-quantitatives d'évaluation de la sûreté présentent certains avantages :

- Une relative simplicité de mise en œuvre ;
- Leur compréhension aux non spécialistes de l'analyse de risques ;
- Une démarche qui s'appuie sur les dires d'experts pour la cotation des événements / barrières / NC ;
- Un outil bien adapté à la réalité du domaine des barrages où les ouvrages présentent des caractères uniques ;
- Une démarche semi-quantitative d'évaluation de la sûreté qui peut être mise en œuvre avec les différentes méthodologies d'analyse de risques, sachant que le REX des approches semi-quantitatives en France montre principalement la mise en œuvre d'une analyse de risques comprenant APR/AMDE puis la méthode du Nœud Papillon.

Parmi les limites des évaluations semi-quantitatives, on peut citer une modélisation simplifiée macroscopique par les nœuds papillons ou les arbres de défaillance construits, par comparaison avec d'autres constructions d'analyses probabilistes complexes existantes pour d'autres processus industriels. Les règles ET / OU sont peu précises et ne traduisent pas toujours des dépendances intermédiaires d'événements.

L'évaluation quantitative de la sûreté présente, pour sa part, les avantages d'une évaluation rigoureuse sur le plan mathématique, la méthode de l'arbre d'évènements constituant un arbre de probabilités permettant d'obtenir la probabilité globale du scénario par la multiplication des probabilités des événements élémentaires. Cette approche nécessite une modélisation rigoureuse des scénarios pour assurer l'indépendance des événements de l'arbre. Cela suppose donc une analyse fonctionnelle de qualité, suivie de la mise en place d'une méthode d'analyse des modes de défaillance précise telle que l'AMDE.

Parmi les limites des évaluations quantitatives et comme pour l'approche semi-quantitative, le jugement expert intervient dans l'évaluation des modes de défaillance pour lesquels les données de retour d'expérience ou de l'aléa sont insuffisantes pour conduire une approche probabiliste ou statistique, ce qui est souvent le cas pour les modes de défaillance des barrages. In fine, la probabilité du scénario obtenue constitue donc une probabilité subjective, mêlant à la fois des approches expertes, mais parfois statistiques ou probabilistes. De façon pratique dans le domaine des barrages, les évaluations des modes de défaillance pourront se faire dans un cadre probabiliste pour les aléas naturels associés à un modèle probabiliste (crue et séisme) ou parfois pour certains états-limites ultimes avec des calculs mécanique-probabilistes. Les autres limites sont liées aux nombreux arbres potentiellement nécessaires pour modéliser l'ensemble des scénarios, notamment en cas de système complexe.

7 Évaluation de la gravité des scénarios

Les conséquences de chaque scénario de défaillance sur les enjeux humains, matériels, organisationnels et environnementaux sont évaluées afin de mesurer leurs degrés de gravité. Les moyens mis en œuvre ici sont adaptés à l'importance des enjeux pour la sécurité des personnes et des biens. Les conséquences de chaque accident potentiel sont caractérisées par les débits et volumes relâchés à partir de l'ouvrage, l'intensité, la cinétique et la durée de ces effets qui permettent alors l'évaluation de la gravité des conséquences pour la zone touchée, notamment au droit des enjeux importants.

Il est signalé au lecteur que le CFBR a publié en 2017 le guide intitulé « *Dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage par les dommages incrémentaux ou différentiels : Recommandations pour la mise en œuvre d'une méthode applicable aux barrages en France* » [CFBR 2017c], qui présente des approches complémentaires à celles qui sont développées dans la suite de ce paragraphe. Ces méthodes n'ont pas été mises en œuvre à ce jour dans le cadre des études de dangers.

7.1 Les phénomènes hydrauliques : modélisation et cartographie

Une étude de propagation de l'onde de submersion est fournie a minima pour les scénarios de rupture de l'ouvrage conduisant à une libération d'eau incontrôlée et préjudiciable. L'étendue des zones submergées lors de la réalisation d'un scénario accidentel fait l'objet d'une représentation cartographique à une échelle adaptée pour chacun des accidents étudiés.

Les phénomènes pris en compte sont généralement de trois types :

- Les ondes de submersion (rupture partielle, rupture totale, vague de surverse) ;
- Les lâchers intempestifs (défaillance mécanique, électrique ou de contrôle commande, défaut d'exploitation ...) ;
- La surélévation du niveau du plan d'eau et de la ligne d'eau amont (inondation à l'amont).

Les principales caractéristiques des phénomènes utiles à l'analyse sont :

- L'emprise (généralement la limite aval du phénomène) ;
- La hauteur de submersion (par classes) ;
- La cinétique (temps d'arrivée, vitesse de montée verticale, vitesse de courant...).

Le choix des outils et modèles hydrauliques est fait en fonction des caractéristiques propres des phénomènes et de l'importance estimée des enjeux impactés.

La représentation cartographique fait l'objet d'un soin tout particulier : les cartes des phénomènes présentant un danger en amont ou en aval des barrages permettent d'appréhender graphiquement l'ampleur du danger, au moins de façon qualitative.

7.1.1 Modélisation de l'onde de rupture

En France, la modélisation de l'onde de rupture du barrage est réalisée dans chaque étude de dangers. Il s'agit d'étudier la propagation de l'onde de submersion due à la rupture du barrage, qui se traduit par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval. L'objectif est de pouvoir définir un ordre de grandeur du temps d'arrivée de l'onde et du nombre de personnes potentiellement impactées.

Afin de permettre une évaluation suffisante de la gravité des conséquences, des études de propagation d'onde de submersion peuvent être réalisées pour d'autres scénarios de défaillance (rupture d'une vanne de crues, ...).

La modélisation de l'onde de submersion nécessite la définition des paramètres suivants :

- La géométrie de la retenue : des campagnes de relevés bathymétriques (ou topographiques au moment d'une vidange) permettent de modéliser la retenue et son volume ; la comparaison entre les volumes modélisés et les volumes réels mesurés sur site permettent de caler cette modélisation ;
- La définition de la géométrie de la vallée : les sources d'information principales sont les cartes à l'échelle 1/25 000^{ème} de l'Institut Géographique National (données topographiques de précision 1 m en altitude), qui constituent le fond de plan des cartes d'inondation, ainsi que les profils en long levés par le service du Nivellement Général de la France au début du XX^{ème} siècle. Ces données peuvent être complétées par des relevés topographiques spécifiques (profil en travers à l'aval immédiat de l'ouvrage, relevé LIDAR de la zone d'étude, ...) ;
- Les caractéristiques hydrauliques de la zone d'étude : les coefficients de frottement du terrain (type Strickler ou Manning) et les coefficients de débit des singularités sont généralement choisis « à dire d'expert » ;
- L'état hydraulique initial de la zone d'étude : les hypothèses sont discutées et le scénario le plus vraisemblable est choisi. Pour beaucoup d'études réalisées et dans la continuité des plans d'alerte, les retenues ont été considérées initialement à la cote des Plus Hautes Eaux et les vallées à l'aval « sèches ». Dans certains cas, des vitesses de propagation plus importantes ont été retenues avec d'autres hypothèses (par exemple une propagation sur une vallée en crue). Pour des barrages particuliers comme par exemple les barrages écrêteurs, l'onde de submersion ne peut être provoquée qu'en situation de crue exceptionnelle : les hypothèses sur la retenue au moment de la rupture et sur les apports des affluents aval sont alors regardées au cas par cas ;
- Le mode de rupture du barrage : on distingue deux grands types de barrages, les barrages « rigides » en béton ou maçonnerie et les barrages « meubles » en remblais. En première approche, les barrages rigides sont supposés se rompre totalement et instantanément tandis que les barrages « meubles » sont supposés se rompre de façon progressive, par érosion interne ou externe. Pour les barrages rigides, d'autres schémas de rupture sont possibles sur la base de justifications, en particulier pour les barrages poids ;
- Le comportement des barrages situés à l'aval lors de l'arrivée de l'onde : dans la pratique française, deux grandes méthodes sont utilisées pour la modélisation des barrages à l'aval. La première méthode consiste à modéliser la retenue aval par une ligne d'eau initiale. Le volume de la retenue aval n'est alors mobilisé que lorsque l'onde de submersion atteint cette retenue aval. Cela revient à considérer qu'il y a une rupture totale et instantanée du barrage aval. Cette méthode est à utiliser dans le cas des barrages aval pour lesquels il n'y a pas de doutes sur leur rupture instantanée dès l'arrivée de l'onde. La deuxième méthode consiste à modéliser le barrage aval par une ligne d'eau initiale et un seuil. La modélisation d'un seuil permet de définir une cote de rupture pour le barrage aval : dès que le niveau d'eau atteint cette cote de rupture, il y a disparition du seuil ;
- Le comportement des ouvrages types ponts, seuils, remblais à l'aval lors de l'arrivée de l'onde : en dehors des barrages aval, présentés précédemment, seuls les ouvrages qui résistent partiellement ou totalement au passage de l'onde et qui ont un impact sur la ligne d'eau sont intégrés dans le modèle. Il peut s'agir de ponts, de seuils, de remblais ferroviaires ou autoroutiers... La géométrie de ces ouvrages peut être déterminée grâce à des données récupérées auprès des administrations locales ou suite à un relevé spécifique.

Des visites spécifiques de terrain avec relevés peuvent être réalisées dans le cas d'ouvrages à forts enjeux (géométrie d'un pont, le niveau d'un seuil ...) si l'on estime que cela est indispensable pour la qualité des résultats, en particulier l'estimation du nombre de personnes potentiellement impactées ;

- Le point d'arrêt de l'onde : pour les barrages réservoirs destinés par exemple à la production d'électricité ou d'eau potable, avec des vallées généralement sèches à l'aval alimentées principalement par les débits réservés issus de ces barrages, l'étude s'arrête en général dans la pratique française lorsque le débit maximum devient inférieur au débit de la crue décennale. Pour d'autres types de barrages, comme par exemple pour les barrages écrêteurs de crues présentant des volumes de retenue importants, l'onde de submersion due à la rupture s'arrête lorsque le niveau d'eau atteint sans rupture est équivalent, c'est-à-dire lorsque la différence des niveaux sans et avec rupture est jugée négligeable.

7.1.2 Cartographie de l'onde de submersion

Les résultats de l'onde de submersion sont présentés sous forme de cartographie des zones inondables. Deux exemples sont présentés ci-après. On retrouve les informations suivantes : l'axe hydraulique, la position des profils en travers et des Points Kilométriques, l'indication du temps d'arrivée de l'onde ainsi que le contour et la surface de la zone inondable.

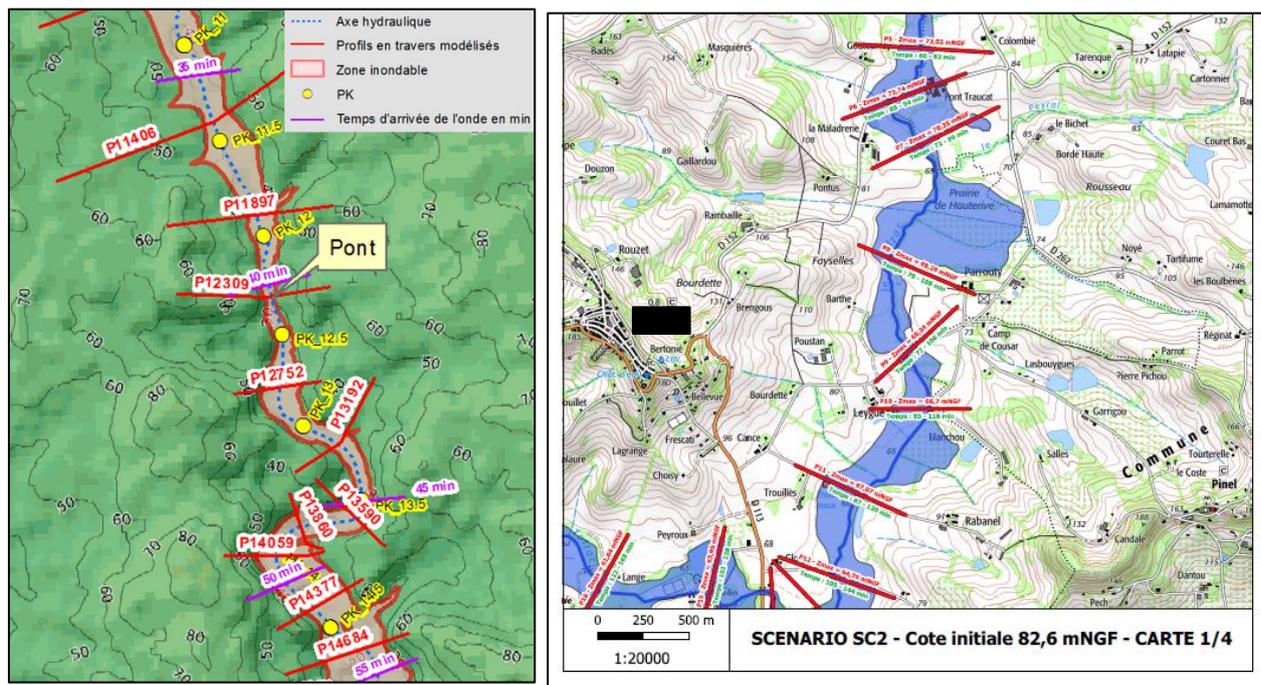


Figure 7.1 : Exemples de cartographie de zones inondables

La pratique des EDD a souvent adopté la réglementation des plans d'alerte, qui est la suivante :

- Minoration des temps d'arrivée de l'onde de l'ordre de 10 à 15% ;
- Majoration des hauteurs d'eau maximales de l'ordre de 15% avec un minimum de 1 m pour les valeurs de hauteur supérieures ou égales à un mètre. Les hauteurs inférieures à un mètre sont doublées ;

7.2 Les enjeux : identification, indicateurs et impacts

7.2.1 Les enjeux recherchés

Le niveau d'exposition des populations à l'aval des barrages constitue la préoccupation centrale dans l'évaluation de la gravité des accidents potentiels de barrages. L'évaluation de la gravité porte en premier lieu sur l'ordre de grandeur du nombre de personnes exposées. Pour l'évaluation du nombre de personnes exposées, on recherche avant tout à caractériser un ordre de grandeur et non pas à obtenir un comptage précis.

L'indicateur principal correspondent aux « Personnes Potentiellement Impactées » (PAR en anglais : People at Risk). Théoriquement d'autres indicateurs peuvent être utilisés pour enrichir l'évaluation de la gravité (nombre de blessés, nombre de décès, montants des dommages...). Dans la pratique, ces indicateurs complémentaires sont souvent difficiles à calculer et ne sont pas utilisés dans les EDD en France.

Selon les cas, les études peuvent développer une approche plus complète des enjeux selon les 4 cibles principales suivantes :

- les établissements sensibles (hôpitaux, maisons de retraites, écoles, lycées...) et les établissements utiles à la gestion de crise (mairies, casernes de pompiers...) ;
- les enjeux économiques (logements, établissements publics, entreprises, agriculture, réseaux, transports, installations et infrastructures, emplois) ;
- les enjeux environnementaux (pollution eau potable, déchets, sites classés) ;
- les enjeux patrimoniaux (sites remarquables ou classés).

Cette cartographie plus complète des enjeux exposés s'inspire du cadre méthodologique national lié à la politique de prévention du risque inondation (voir [CGDD 2014]).

La population et éventuellement les autres enjeux sont recherchés dans le périmètre d'impact des scénarios de défaillance : sur les versants de la retenue (risque de glissement de terrain et risque de surélévation du plan d'eau) et dans les vallées en aval (risque de lâcher par rupture ou manœuvre intempestive).

7.2.2 Les principales sources de données utilisées

Il existe des méthodes simplifiées s'appuyant sur une décomposition de l'espace en ensembles homogènes repérables sur un plan dont on peut déterminer la surface ou la longueur (établissements recevant du public, zones habitées, zones industrielles, commerces, campings, terrains non bâtis, voies de circulation...) et une estimation majorée du nombre de personnes à l'hectare selon le type de zone (en décomposant par exemple selon des ensembles du type « rural/habitat très peu dense », « semi-rural », « urbain », « urbain dense »). Pour les zones industrielles, les effectifs des diverses entreprises présentes sur la zone sont recherchés avec une indication de la nature des activités.

La base de données Corine Land Cover (CLC) permet une présentation globale de l'environnement, notamment à l'aval des ouvrages. Cette base de données permet de représenter l'occupation du sol selon une nomenclature standard hiérarchisée à 3 niveaux et 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire, dont notamment les postes : tissu urbain continu, tissu urbain discontinu, zones industrielles et commerciales, réseaux routier et ferroviaire et espaces associés, zones portuaires, aéroports, extraction de matériaux, décharges, chantiers.

D'autres méthodes peuvent être également utilisées et adaptées aux ouvrages hydrauliques, comme par exemple les « Éléments pour la détermination de la gravité des accidents » de la circulaire DPPR/SEI2/CB-06-0388 du 28 décembre 2006 issue des analyses de risques sur les installations industrielles classées.

En France l'INSEE met à disposition des données géolocalisées de population par carreaux de 200 m de côté. Cela permet d'obtenir rapidement un bon ordre de grandeur de la population exposée au scénario de défaillance du barrage.

7.2.3 Les hypothèses sur les personnes exposées

Les mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets sont prises en compte, ainsi que la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'accident, si la cinétique de l'accident le permet.

Il n'est pas toujours possible de prévoir les conditions de l'environnement le jour où se produirait l'accident (vacances scolaires, heure d'encombrement sur les routes, etc.), ou d'évaluer les possibilités de mises à l'abri des personnes. Il est alors recherché une approche du contexte de l'accident qui présente la gravité des conséquences de manière réaliste et représentative.

Cette évaluation par accident peut ensuite être ramenée à des classes de gravité. Par exemple, une grille de référence est construite de la manière suivante, en distinguant les personnes exposées en zone à cinétique rapide de celles situées en zone à cinétique lente (disposant de plus de temps pour se mettre à l'abri). L'attribution d'une classe de gravité est alors effectuée sur la base du scénario le plus réaliste.

	CLASSES DE GRAVITÉ DES CONSÉQUENCES (par ordre décroissant)	NOMBRE DE PERSONNES exposées en zone à cinétique rapide	NOMBRE DE PERSONNES exposées en zone à cinétique lente
5	Désastreux	plus de 1 000	plus de 10 000
4	Catastrophique	100 à 999	1 000 à 9 999
3	Important	10 à 99	100 à 999
2	Sérieux	1 à 9	10 à 99
1	Modéré		1 à 9

Tableau 7.1 : exemple de classes de gravité

7.2.4 Cartographie des enjeux soumis aux scénarios de défaillance

En complément de la cartographie des zones inondables mentionnées au §. 7.1.2, certains responsables d'ouvrages ont pris le parti de fournir une cartographie des communes par classe de densité d'habitants, sur laquelle on peut retrouver les informations suivantes : l'axe du cours d'eau et les Points Kilométriques, la zone d'emprise de l'onde, les zones urbanisées (>25 ha), les zones industrielles et commerciales, ainsi que des étiquettes indiquant le temps d'arrivée de l'onde, la cote maximale atteinte et la vitesse d'écoulement à la cote maximale.

Ces cartographies servent de support de communication auprès des communes susceptibles d'être impactées par une défaillance du barrage.

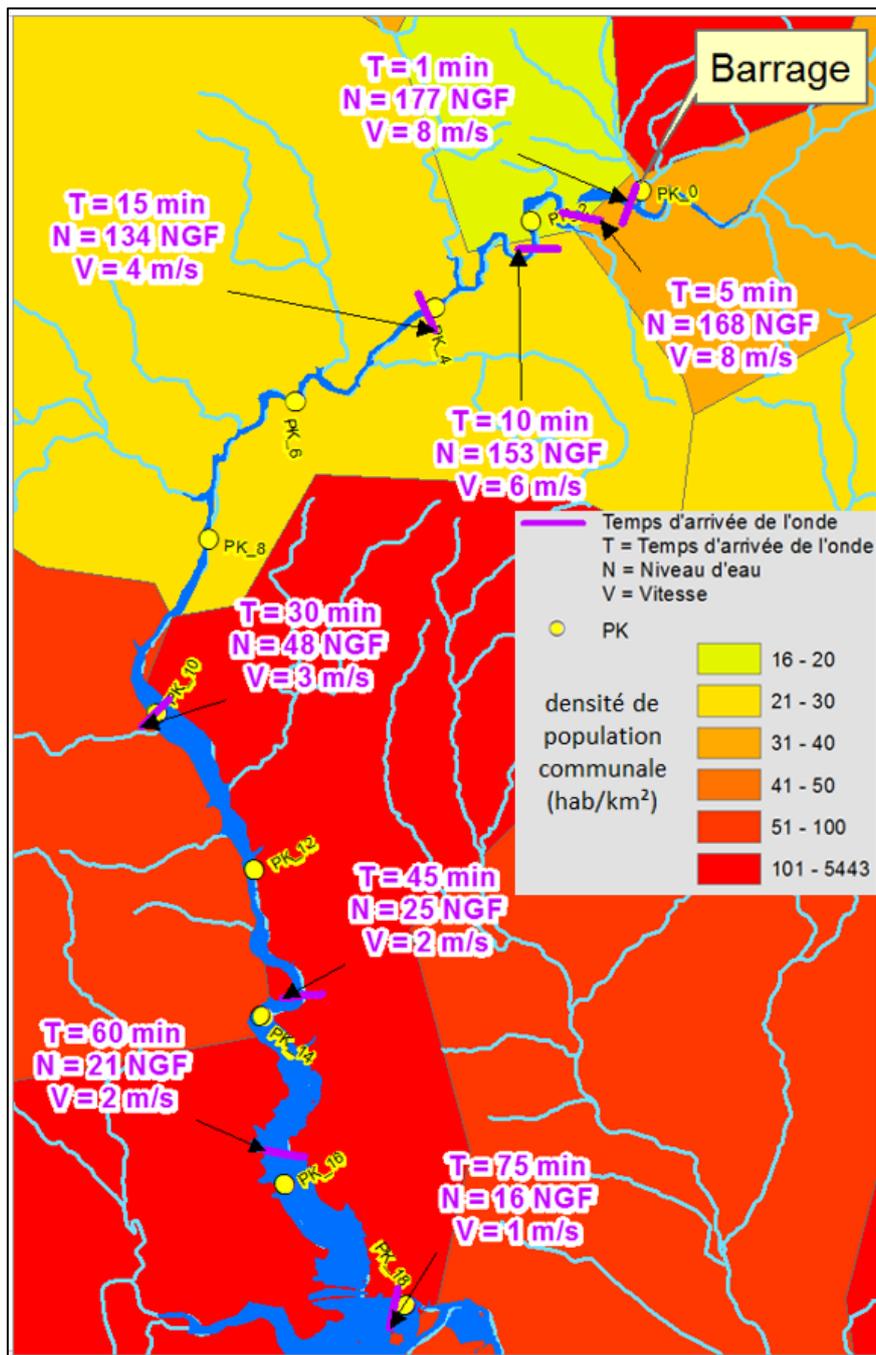


Figure 7.2 : Exemple de cartographie de zones inondables avec densité de population

D'autres responsables d'ouvrages préfèrent fournir des cartographies complémentaires basées sur les données INSEE de population carroyées 500 m x 500 m.

7.2.5 Évaluation des impacts

L'évaluation du nombre de personnes exposées est d'abord menée de manière simplifiée, par commune, à partir des résultats de l'étude de propagation de l'onde submersion. Un approfondissement peut être réalisé dans le cas d'agglomérations denses pour lesquelles une évaluation plus détaillée est estimée nécessaire. Dans les études réalisées, la pratique française a généralement distingué trois types de situations :

- Lorsque l'onde couvre la totalité d'une commune, le nombre de personnes exposées est considéré comme égal à la population totale de la commune ;
- Lorsque l'onde couvre une proportion non négligeable d'une commune, une estimation de la proportion de bâti impacté est effectuée sur carte (sous SIG), ce qui permet d'obtenir un pourcentage de la population affectée ;
- Enfin, lorsque l'onde n'affecte que quelques bûts dispersés, le nombre d'habitations est compté et multiplié par un taux d'occupation (généralement 2,5 en France selon l'INSEE - institut français chargé de la statistique) pour obtenir une estimation du nombre de personnes correspondant.

L'évaluation du bâti impacté est généralement basée sur le référentiel SCAN25 de l'IGN. Une précision plus importante est parfois recherchée. Dans ce cas des données cadastrales permettent d'obtenir des informations géoréférencées plus détaillées sur le bâti (logements à la parcelle, logements par étage, ...).

Selon l'intérêt, les EDD prennent en compte des enjeux remarquables tels que :

- Les campings ;
- Les centres commerciaux ;
- Les autres Établissements Recevant du Public (ERP), comme les gares et aéroports, hôpitaux, groupes scolaires, stades..., une recherche de la capacité peut être réalisée auprès des Autorités locales (Mairie, Préfecture...) ou sur site ;

Un comptage plus fin, mais moins répandu dans la pratique française, consiste à proposer deux scénarios :

- Un scénario diurne, avec les personnes au travail, à l'école ou dans les magasins et autre ERP (Établissement Recevant du Public) ;
- Un scénario nocturne, où les personnes sont chez elles, avec les entreprises et ERP vides à quelques exceptions près.

Enfin, l'évaluation des impacts peut également tenir compte de la présence occasionnelle liée aux loisirs : il s'agit des pêcheurs et randonneurs qui peuvent se trouver à proximité des cours d'eau.

Les résultats sont ensuite présentés dans un tableau indiquant, par commune, le nombre de personnes potentiellement impactées (cf. exemple en page suivante).

Nom de la commune impactée par l'onde de submersion	Département	Population totale (INSEE 2006)	Surface totale (en km²)	Densité de population de la commune (en habi/Km²)	Surface suppl. inondée par l'onde (en ha)	Nombre de personnes exposées selon la classification de la zone concernée										Zones sensibles (Hôpitaux, Lycées, Zones de Baignade, etc ...)	Total de la population communale impactée	% de la population communale impactée	Nombre TOTAL de personnes exposées	Commentaire			
						Terrains bâtis				Terrains non bâtis													
						Par évaluation du pourcentage du bâti impacté		Par évaluation du nombre de constructions impactées		Non aménagés et très peu fréquentés (forêts, champs, ..)	Aménagés et peu fréquentés (pêche, ...)	Aménagés et potentiellement fréquentés ou très fréquentés	Campings										
						% du bâti impacté	nombre de personnes exposées	Nbre de constructions	2.5 pers par construction				1 pers/100 ha	1 pers/10 ha	10 pers/1 ha						Nbre d'emplacements	2.5 pers par emplacement	
Commune A	123	9345	67	140	214		13	33											150	33	0.35	324	Le sentier de randonnée de l'Everest
																			20				Office national des forêts
																			100				Les 2 lacs du Congo
Commune B	123	1860	49	38	30														0	0.00	3		
Commune C	123	2996	29	104	40														0	0.00	44	Golf	
																						25	Les 2 lacs du Congo
Commune D	123	1717	21	84	11														0	0.00	1		
Commune E	123	13125	107	122	32														0	0.00	3		
Commune F	123	2555	89	29	13														0	0.00	1		
total toutes communes confondues		31598	362	87	340		13	33											33	0.10	376		

Tableau 7.2 : Exemple de comptage des personnes potentiellement impactées par l'onde de submersion

7.3 Analyse critique des résultats

L'étude d'onde de submersion permet d'obtenir un ordre de grandeur du nombre de personnes susceptibles d'être impactées par une défaillance du barrage. Il n'est pas possible de reproduire dans tous ses détails un phénomène d'onde de submersion, compte tenu de la complexité des modes de rupture ou de défaillance des barrages et des importantes incertitudes sur le comportement des corps flottants, du transport solide et des ouvrages aval (pont, seuil, barrages...). Un comptage global des personnes susceptibles d'être impactées reste donc suffisant.

Le plus important reste le temps d'arrivée de l'onde, qui permet aux autorités locales de prévoir des plans d'intervention en conséquence. Les valeurs de niveaux d'eau calculés sont corrigées et majorées pour tenir compte des incertitudes liées à l'imprécision du modèle, des données et de la connaissance imparfaite du déroulement du phénomène.

La qualité d'une étude d'onde de submersion dépend finalement des hypothèses retenues qui englobent la totalité des phénomènes plausibles, afin de pouvoir définir un ordre de grandeur cohérent des impacts.

8 Evaluation de la criticité des scénarios, affichage des risques et mesures des réductions des risques

8.1 Evaluation de la criticité des scénarios et l'affichage des risques

Une fois la gravité des conséquences et l'occurrence des scénarios déterminées, le croisement de ces deux informations permet d'établir la criticité des scénarios. Compte tenu de la difficulté d'avoir des résultats quantitatifs, en particulier sur la quantification de l'occurrence, la pratique française s'est appuyée sur des matrices de criticité, consistant en un affichage et une hiérarchisation des différents scénarios dans un tableau synthétique. On retrouve ainsi les deux entrées « gravité » et « occurrence » des scénarios potentiels, comme l'illustre la figure suivante.

Gravité	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
	E	D	C	B	A
Désastreux		1			
Catastrophique					
Important	7				
Sérieux	5, 6, 8, 9, 10	2	3		
Modéré	4				

Figure 8.1 : Exemple de grille de criticité (NB : l'accident n°1 correspond à la rupture du barrage. Il s'agit de l'accident le plus grave évalué dans une étude de dangers de barrage)

NB : les classes de probabilité figurant dans cet exemple de grille sont données au tableau 8.1

La matrice de criticité peut être complétée par des limites d'acceptabilité. Ces limites sont en général représentées par un dégradé de couleurs, allant d'un risque inacceptable (rouge) à acceptable (blanc), comme le premier exemple de la figure ci-dessous. Le second exemple, le plus couramment utilisé, utilise un code couleur rouge (inacceptable), jaune (tolérable), vert (acceptable).

Gravité	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
	E	D	C	B	A
V. Désastreux		1			
IV. Catastrophique					
III. Important	7				
II. Sérieux	5, 6, 8, 9, 10	2	3		
I. Modéré	4				

Probabilité	Fréquent	A					
	Probable	B				ERC 1	
Peu probable	C			ERC 2 ERC 3			
Rare	D			ERC 4			
Extrêmement rare	E						
			Mineure	Significative	Sévère	Critique	Catastrophique
			Gravité				

	Risque inacceptable
	Risque à surveiller
	Risque acceptable

Figure 8.2 : Exemples de grilles de criticité avec affichage des limites d'acceptabilité

Comme on le remarque sur les exemples des figures 8.1 et 8.2, les études de dangers ne considèrent pas systématiquement les mêmes échelles pour les variables occurrence et gravité. En effet dans le cadre de la réglementation française, **le législateur n'a pas imposé la définition de ces limites, laissant ce choix au responsable d'ouvrage**. Certains responsables n'ont pas voulu se prononcer. La matrice de criticité ne présente donc pas de limites d'acceptabilité (voir illustration ci-dessous).

Occurrence Personnes impactées	E	D	C	B	A
	Possible mais extrêmement peu probable	Très improbable	Improbable	Probable	Courant
> 10 000		ERC01			
1 000 – 10 000			ERC-02		
100 – 1 000					
10 – 100		ERC-04	ERC-03		
< 10		ERC-08 (80 m ³ /s)	ERC-06 (60 m ³ /s) ERC-07 (80 m ³ /s) ERC-09 (76 m ³ /s)	ERC-05 (60 m ³ /s) ERC-10 (60 m ³ /s)	

Figure 8.3 : Exemple de grille de criticité sans affichage des limites d'acceptabilité

Au final, ce travail permet au responsable d'ouvrage de proposer des mesures permettant de maîtriser et/ou réduire les risques aussi raisonnablement que possible (principe ALARP : As Low As Reasonably Practicable).

Certains responsables d'ouvrages affichent des objectifs à atteindre d'amélioration de la sûreté de leur ouvrage. Cela consiste à évaluer l'apport des différentes mesures de réduction des risques (§ 8.2 ci-dessous) dans une matrice de criticité résiduelle après leurs mises en œuvre.

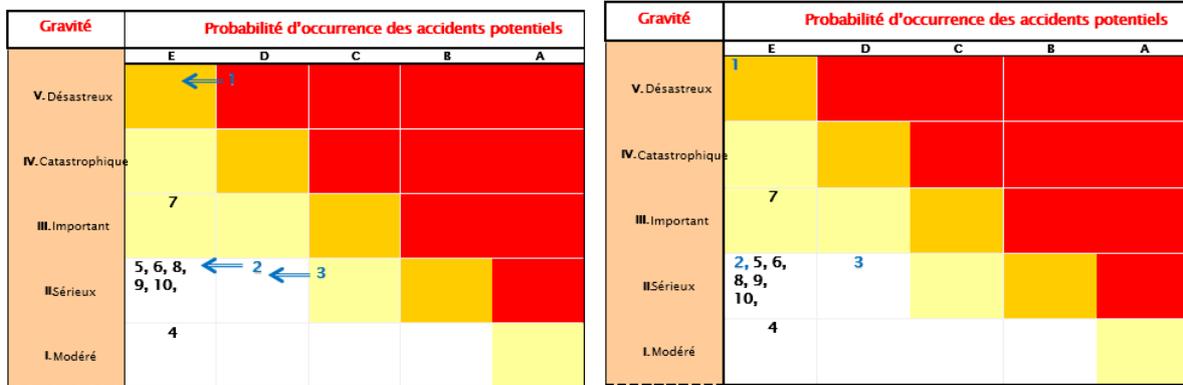


Figure 8.4 : Evolution de la matrice de criticité après application des mesures de réduction des risques.

8.2 Mesures de réduction et de maîtrise des risques

8.2.1 Terminologie

Les mesures de maîtrise des risques sont des démarches que le responsable d'ouvrage et son exploitant s'engagent à mettre en œuvre et à maintenir dans le temps un niveau de sûreté satisfaisant (par exemple, maintien d'une politique de maintenance et d'entretien des matériels...). Cela ne modifie pas la criticité du scénario identifié.

Les mesures de réduction des risques sont des engagements du responsable d'ouvrage et de son exploitant pour diminuer le niveau des risques considérés comme non acceptables. La mise en œuvre de ces mesures conduira à revoir la criticité du scénario sur lequel la mesure portera.

En outre, des besoins en études complémentaires destinées à approfondir la connaissance de l'ouvrage, des aléas et des risques qu'il peut induire se sont fait sentir sur plusieurs barrages (en particulier les plus modestes dont les connaissances étaient plus limitées). Ces études complémentaires, qui ne constituent pas en tant que tel des mesures de réduction des risques, ont contribué à une réduction de l'incertitude sur l'appréciation du niveau des risques évalué dans l'étude de dangers.

8.2.2 Mesure de maîtrise des risques

Les mesures de maîtrises des risques se traduisent par :

- Des réductions des incertitudes d'évaluation des incidents initiateurs ou du niveau de confiance accordé aux barrières de sécurité (par exemple la réalisation d'une mesure d'épaisseur sur une conduite traversant le barrage avec une estimation de sa résistance) ;
- Une maintenance des ouvrages et des matériels dans un bon état de fonctionnement et de fiabilité (par exemple, la poursuite d'une politique de maintenance sur une vanne) ;

- Une optimisation et une amélioration de la pertinence des actions de surveillance (par exemple, des campagnes de mesures rapprochées sur une mesure de débit de fuite).

8.2.3 Mesures de réduction des risques

Les mesures de réduction des risques se traduisent par la mise en œuvre de différentes barrières de sécurité ou de travaux sur l'ouvrage et ses équipements permettant de réduire le risque. Elles peuvent être techniques (par exemple l'ajout d'un verrou mécanique pour prévenir l'ouverture intempestive d'un organe de crue) ou organisationnelle (modification de l'organisation et des procédures de l'exploitant pour garantir l'ouverture d'une vanne en temps voulu). Ces mesures peuvent être aussi plus lourdes, avec des modifications structurelles de l'ouvrage ou de ses organes de sécurité en cas d'un faible niveau de sûreté avéré. Dans ce dernier cas, des mesures provisoires sont proposées pour garantir un niveau de sûreté de l'ouvrage acceptable avant la réalisation des travaux (par exemple une baisse de niveau de la retenue, des consignations, une présence renforcée...).

Lors de la mise en œuvre des mesures de réduction des risques, on veille à maintenir les autres risques à un niveau acceptable (exemple d'un clapet à flotteur, mal équilibré avec une tendance à l'ouverture intempestive, dont le flotteur a été (trop) allégé, avec un risque induit de non-ouverture en cas de crue).

Le retour d'expérience des EDD françaises a montré que les mesures de réduction proposées concernaient uniquement la réduction de l'occurrence d'un accident plutôt que sa gravité.

8.2.4 Exemple

L'autorité de contrôle a produit un travail de synthèse des mesures de réduction des risques produites sur les Etudes de Dangers d'une région de France (région Nouvelle Aquitaine). Il s'agit des mesures de réduction des risques identifiées par les responsables d'ouvrages à l'issue des EDD complétées parfois des demandes de l'autorité de contrôle. Ainsi, sur 111 barrages relevant de différents usages et d'une large palette d'exploitants, 298 mesures de réduction des risques ont été proposées, rassemblées sur les figures suivantes.

Ces figures montrent que beaucoup de mesures de réduction des risques proposées traduisent un manque de connaissances des ouvrages : 44% des mesures de réduction des risques sont des engagements sur la réalisation de reconnaissances et d'études complémentaires pour confirmer/infirmier la cotation d'un événement ou la stabilité des différents ouvrages (Figure 8.5). Par ailleurs, 12% des mesures de réduction des risques concernent une amélioration de l'auscultation et donc la connaissance du comportement de l'ouvrage (Figure 8.5).

44% des mesures concernent des mesures de réduction des risques proprement dites (Figure 8.5) par la réalisation de travaux sur le génie civil des ouvrages (29%) et sur les organes de sécurité (29%) (Figure 8.6). Les EDD ont aussi permis d'améliorer les systèmes de contrôle commande (15%) et l'organisation des exploitants (27%) (Figure 8.6). Ces derniers chiffres montrent que l'amélioration de la sûreté des ouvrages ne se traduit pas uniquement par des travaux structurels sur les ouvrages.

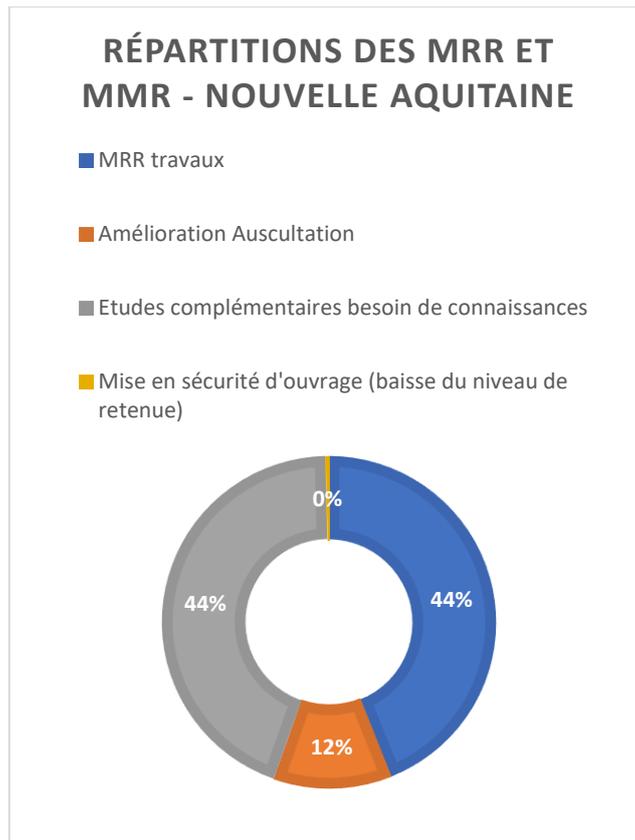


Figure 8.5 : Répartitions de MRR et MMR – Nouvelle Aquitaine

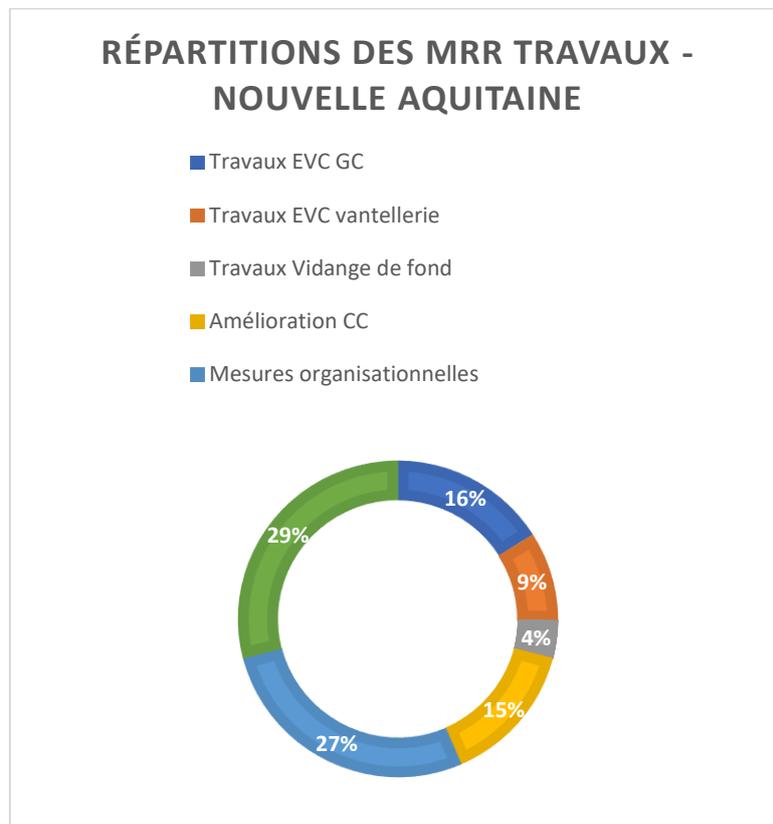


Figure 8.6 : Répartitions de MRR Travaux – Nouvelle Aquitaine

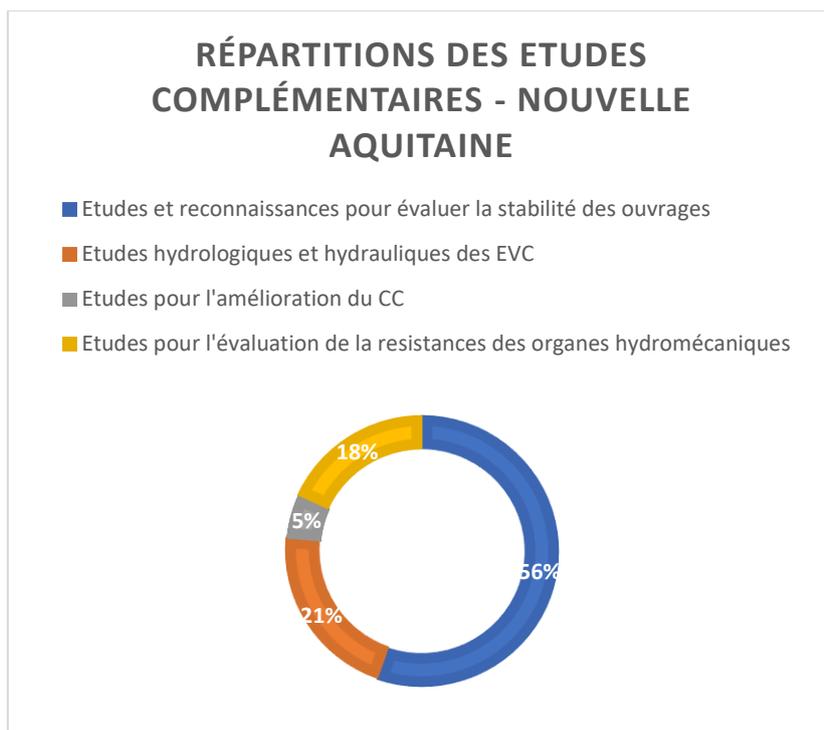


Figure 8.7 : Répartitions des études complémentaires – Nouvelle Aquitaine

Exemples de mesures de réduction des risques :

Type de MRR	Exemples
Travaux EVC GC	Réalisation de travaux de recalibrage de l'évacuateur de crues pour le passage de la crue de dimensionnement
Travaux EVC vantellerie	Traitement (sablage et remise en peinture) des vannes de l'évacuateur de crues
Travaux Vidange de fond	Neutralisation d'une ancienne vidange de fond non nécessaire
Amélioration CC	Fiabilisation de la motorisation de secours des évacuateurs de crues
Mesures organisationnelles	Organiser un suivi formalisé des formations des agents pour la surveillance et la conduite des aménagements en crue
Travaux sur les ouvrages (hors organes de sécurité)	Reprise de la zone dégradée sur le masque amont

9 Synthèse : l'apport de l'analyse de risques pour la sûreté des barrages en France

9.1 Les apports de l'analyse de risques pour la sûreté des barrages en France

La pratique des analyses de risques de barrage en France s'est illustrée au travers des études de dangers de barrages, exigence essentielle de la réglementation pour tous les grands barrages. A la genèse de l'analyse de risques en 2007 et pour la première génération d'EDD, il a fallu que l'ingénierie se forme aux méthodologies d'analyse de risques. Ce domaine est dorénavant bien en place dans les pratiques et la démarche d'analyse de risques présentée dans les chapitres précédents s'applique aux barrages sans difficulté méthodologique majeure.

Les analyses de risques menées à travers les EDD en France ont eu, de l'avis de tous les acteurs, des impacts positifs notables pour la sûreté des barrages. Parmi les apports majeurs, on peut citer :

- Une nouvelle approche fonctionnelle multi-métier qui va au-delà de la traditionnelle approche « Génie civil » ;
- Une amélioration notable de la connaissance générale et exhaustive des ouvrages ;
- Une identification et un interclassement des scénarios de défaillance et des risques sûreté majeurs ;
- La réduction effective de ces risques par la mise en œuvre d'actions éventuellement entreprises à l'issue de l'EDD avec l'adoption d'une posture préventive.

9.1.1 Une nouvelle approche fonctionnelle multi-métier

De manière générique, les EDD ont institué une nouvelle approche fonctionnelle multi-métiers par opposition au cloisonnement qui pouvait exister entre chaque métier. La sûreté des barrages a longtemps été examinée essentiellement sous l'aspect « génie civil ». La question de la maîtrise des lâchers non contrôlés de débit à l'aval était également devenue une problématique importante en France, suite notamment à l'accident du barrage de la Croux en 1984 [REVERCHON 2015]. Toutefois l'approche fonctionnelle multi-métiers a assurément permis de définir un nouveau paradigme dans la manière d'aborder de manière globale la sûreté des barrages dans leur environnement (prise en compte des risques incendie, avalanche, glissement de terrain, gel, etc.).

9.1.2 Des ouvrages mieux connus

La principale difficulté d'une analyse de risques réside certainement dans l'existence, la qualité et l'exhaustivité des données d'entrées qui alimentent les différentes étapes afin de justifier les hypothèses et choix réalisés pour dérouler la méthodologie. La connaissance du fonctionnement des barrages et de leurs équipements ainsi que de leurs dimensionnements et de leur état est donc l'élément essentiel de la réussite d'une EDD.

Par cet effort, un des premiers bénéfices de l'analyse de risques a été une connaissance sensiblement améliorée des ouvrages, tant d'un point de vue de leur conception technique que du point de vue de leur fonctionnement. A ce titre, l'EDD constitue une excellente synthèse documentaire et descriptive de la connaissance du barrage. Les données s'y trouvant ont fait l'objet d'une critique et d'une validation formelles. D'autre part, l'analyse de risques a conduit à une relative exhaustivité de cette

connaissance en explorant des aspects, pouvant paraître du détail, mais jouant un rôle important dans la chaîne fonctionnelle. On pourrait citer à titre d'exemple certaines parties d'ouvrages qui avaient été négligées telles que des bouchons béton ou des fonds pleins d'anciennes galeries de dérivation, des pathologies de génie civil à cinétique très lente ou telle poire de niveau jouant un rôle dans le système d'alerte et d'information du barrage.

La réalisation des EDD a ainsi amené les différents services techniques d'ingénierie ou d'exploitation à partager leurs connaissances respectives d'une partie du barrage afin de contribuer à la connaissance globale de l'ouvrage et à la réalisation de l'analyse de risques. L'agrégation de ces connaissances et leur synthèse dans l'analyse de risques constitue un livrable commun et partageable à tous les niveaux du responsable de l'ouvrage.

Les ouvrages d'importance moyenne (classe B selon la réglementation française) qui ne bénéficiaient pas toujours de l'historique des plus grands barrages, étaient moins bien connus et documentés. La connaissance de ces ouvrages a ainsi d'autant plus progressé grâce aux EDD. Les EDD ont eu un intérêt particulier pour tous les ouvrages équipés de nombreuses vannes et de dispositifs de contrôle-commande. L'analyse de risque a pu mettre en évidence des scénarios complexes mêlant des défaillances hydromécaniques ou de contrôle-commande, à des scénarios hydrologiques, conduisant aux évènements redoutés.

9.1.3 Identification et interclassement des risques

Identification de nouveaux risques

Les outils de l'analyse de risques ont permis l'émergence de scénarios de défaillance qui n'auraient pas été aisément identifiables sans une approche méthodologique d'analyse de risques multi-disciplinaires. Des failles potentielles qui n'étaient pas nécessairement appréhendées par l'exploitant du barrage ont parfois pu être mises en lumière. Suite à l'exercice de l'analyse de risques, l'attention des exploitants s'est considérablement élargie en termes de risques sûreté des ouvrages. Les attentions usuellement portées au génie civil se sont largement enrichies des aspects mécaniques et contrôle-commande.

Une nouvelle hiérarchisation des risques

La quantification des évènements initiateurs a permis de dégager des grandes tendances. Même s'il convient de rester prudent pour la quantification individuelle de la probabilité des évènements initiateurs, les différentes méthodes, nonobstant leurs qualités intrinsèques, ont fourni un outil pour inter-comparer aussi objectivement que possible et in-fine interclasser les principaux risques sûreté de l'ouvrage. Certains problèmes plus ou moins connus ou traités ont ainsi pu être remis en évidence et pesés en importance.

Une aide pour les décisions d'exploitation ou de modification

Il s'agit là d'un résultat important qui a permis de disposer d'une vision globale des risques d'un barrage, avec une proposition de hiérarchisation, constituant ainsi un outil précieux d'aide à la décision. Cela peut être par exemple le cas, dans le cadre de la mise en place d'une béquille bloquant temporairement un clapet automatique à flotteur, pour arbitrer entre un risque de type maîtrise des variations de débit à l'aval et les risques de rupture d'ouvrage posés par le passage de crues.

Les notions de cote ou de situation de danger

La notion de cote de danger a par ailleurs été renforcée par l'apparition des EDD et est devenue un indicateur essentiel de la sûreté du barrage. Sa détermination reste cependant une question technique ouverte pour de nombreux ouvrages et reste à approfondir pour l'avenir. L'exercice même de l'analyse de risques a permis d'élargir la notion de cote de danger à celle de situation ou d'évènement de danger (par exemple concomitance du chargement thermique et hydrostatique pour une voûte ou bien les différentes situations de chargement hydrostatique sur un barrage mobile en rivière).

Un effort de recensement des incidents et accidents à poursuivre

La réalisation de cet exercice a également amené à approfondir les connaissances sur les retours d'expérience d'incidentologie et d'accidentologie liés aux barrages. Ces efforts permettent à la fois de mieux apprécier quantitativement certains risques, mais aussi de se réinterroger sur les principaux modes de rupture des ouvrages et composants. Un certain nombre de publications et de travaux [GASTAUD et al. 2015, DIEUDONNE et al. 2016, ALBRECHT et al. 2016, DEROO et al. 2016, BOURDAROT 2016] en ce sens ont été produits, notamment en France, depuis le lancement des EDD, même si cet aspect reste cependant à approfondir. La pratique des EDD a donc mis en exergue la nécessité de recueillir l'accidentologie. A ce titre, le CFBR a mis en place un groupe de travail, qui publie des bulletins thématiques sur l'incidentologie et l'accidentologie. Le contrôle-commande et l'hydromécanique étant encore une fois les domaines où les progrès se font collectivement le plus sentir, ces sujets ont donc été traités dans les deux premiers bulletins [CFBR 2017a et b].

9.1.4 Mesures de réduction et de maîtrise des risques et posture préventive

L'identification et la hiérarchisation des risques menées dans les EDD ont permis de déboucher sur une série de mesures de réduction ou de maîtrise des risques. Leur échéance de réalisation est proposée à plus ou moins long terme en fonction des enjeux identifiés. L'EDD permet donc d'établir une véritable feuille de route pour le responsable de l'ouvrage, d'ici à sa prochaine version.

Par ailleurs, la participation des équipes de l'exploitation tout au long de l'élaboration de l'EDD permet à l'exploitant de prendre conscience rapidement de certaines mesures qui, à peu de frais, diminuent rapidement et concrètement le risque sur un scénario de défaillance (par exemple ajout d'un bouton d'arrêt d'urgence d'ouverture de vanne ou modification d'une consigne d'exploitation pour la prise en compte du risque gel).

La réalisation de l'EDD et son caractère révisable inscrivent les actions du responsable de l'ouvrage dans la logique des EDD. Avec le recul, les mesures de réduction des risques proposées sont davantage évaluées par rapport à leur impact sur les événements initiateurs et les événements redoutés identifiés dans l'EDD. L'EDD constitue une aide non seulement à la rédaction des cahiers des charges mais parfois à la définition des solutions les plus efficaces à mettre en œuvre. Les EDD ont largement contribué à ce que la sûreté des barrages soit renforcée en tant que préoccupation constante à tous les niveaux hiérarchiques du responsable de l'ouvrage et de l'exploitant.

9.2 Communication autour des EDD

- **à l'externe** : vulgarisation nouvelle de l'analyse des risques liée aux barrages

Les études de dangers des barrages sont pour le public une approche nouvelle. Les seuls éléments relatifs aux risques connus jusqu'à présent par les populations avant la mise en place des études de dangers proviennent des plans d'alerte prévus pour les risques de ruptures des plus grands barrages. À la différence des plans d'alerte qui s'inscrivent dans une démarche pensée pour la gestion de crise, les EDD ne prennent pas en compte les dispositions d'évacuation de la population. Les études de dangers viennent en conséquence compléter de manière significative la connaissance des risques majeurs et autres risques liés à l'exploitation des barrages.

La réglementation prévoit dans le contenu type des études de dangers un résumé non technique destiné à la communication externe. Il a pour objet de présenter une synthèse de l'étude, et en particulier de ses résultats. Il se veut pédagogique, facilement compréhensible et très synthétique. Il s'agit pour le rédacteur d'un réel exercice de vulgarisation. Il permet au lecteur d'avoir une compréhension du fonctionnement des ouvrages, et surtout de prendre connaissance des risques identifiés, et de leurs conséquences. Le lecteur sait alors dans quelle mesure il est concerné par les différents risques d'accident.

Les études de dangers sont consultables (dans un cadre restreint) sur demande auprès de l'autorité de contrôle. Il faut noter que la réglementation prévoit la possibilité pour l'exploitant de signaler les parties des études qu'il souhaite garder confidentielles (secret industriel ou à caractère sensible).

- **en interne** : un outil pour communiquer sur la sûreté des barrages auprès de l'ensemble des acteurs de la sûreté.

Il apparaît en interne que l'analyse des risques constitue une excellente opportunité de sensibiliser le personnel à la sûreté. Les personnes qui ont pu participer aux groupes de travail correspondant aux différentes étapes de l'analyse de risques sont de fait sensibilisées et ont une bonne appréhension des risques sur l'aménagement et donc de la sûreté. Par contre, le rendu de l'analyse de risques reste un document technique et relativement complexe qu'il est conseillé d'accompagner auprès des personnes qui n'ont pas été associées aux groupes de travail.

Le rendu de l'analyse de risques se révèle un excellent support pour les nouveaux arrivants sur un aménagement pour prise de connaissance du fonctionnement général d'un ouvrage, des risques associés et mesures de maîtrise des risques correspondantes. Il est néanmoins souhaitable d'adapter les présentations et les utilisations à la cible visée. Les exploitants apprécient également ces documents qui permettent d'avoir une vision synthétique des risques sur un aménagement. Cette vision synthétique des points sensibles des ouvrages permet de gérer les priorités de sûreté avec plus d'objectivité grâce à des éléments d'aide à la décision qui gagnent en rationalité et intègrent une hiérarchisation des risques fiabilisée. Les études alimentent ainsi des outils de gestion des investissements de rénovation et de modifications des ouvrages.

Enfin, les études de dangers peuvent donner du sens à certaines actions de maintenance ou d'auscultation, peuvent amener à revoir certaines pratiques pour mieux prendre en compte les risques, et aident fréquemment à mieux comprendre et donc accepter les contraintes de disponibilité des organes sûreté par exemple. L'analyse de risques réalisée dans le contexte des études de dangers devient alors un cadre de référence de l'exploitation des ouvrages pour tous les acteurs de l'exploitation et de la maintenance.

9.3 Appropriation des EDD par les différents acteurs évoluant sur le barrage

9.3.1 Pendant son élaboration

- Implication du personnel exploitant à différents niveaux dans l'analyse de risques

La bonne pratique, au risque de faillir à l'exercice, est la constitution d'un groupe de travail pluridisciplinaire comprenant des exploitants. Les exploitants constituent des sources d'informations techniques et leur présence est un gage de réussite et de bon déroulement de l'analyse de risques. Ils sont d'une aide précieuse dans la connaissance du fonctionnement et de l'état des ouvrages et matériels. Par ailleurs, l'exploitant qui a participé à l'analyse de risques pourra en porter les conclusions et s'impliquer dans les éventuelles mesures de réduction des risques.

- Implication d'experts de tous domaines

Intégrés au groupe de travail ou sollicités au besoin dans les différentes phases de l'étude, le recours à des experts internes ou externes est courant, principalement dans la phase d'analyse des modes de défaillance (APR ou AMDE). Ils peuvent apporter leur vision sur les dysfonctionnements possibles et leurs conséquences. Par leur connaissance de la conception et du fonctionnement des matériels, ils contribuent également à l'évaluation des événements initiateurs et du niveau de confiance des barrières de sécurité utilisées en apportant leur avis sur le niveau de maintenance et de contrôle de ces matériels. L'expertise en matière de méthodologie d'analyse de risques est portée par le chargé d'études qui pilote l'analyse.

- Implication du responsable de l'ouvrage

Le responsable de l'ouvrage participe à l'ensemble des phases de cette analyse car, au final, il portera les résultats de l'étude devant les autorités et s'engagera à mettre en place les mesures de réduction ou de maîtrise des risques.

9.3.2 Après son élaboration

Une fois l'analyse de risques finalisée et soumise à l'administration, l'exploitant s'assure, a minima, du maintien du niveau de sûreté affiché dans l'étude, voire même l'améliore par la mise en œuvre de mesures de maîtrise ou de réduction des risques proposées. En cas de scénario de criticité inacceptable ou intermédiaire, le responsable d'ouvrage s'engage à mettre en œuvre des mesures de réduction des risques dans un délai fixé. Elles peuvent consister par exemple en des travaux de modification des ouvrages, en l'ajout de dispositifs de prévention ou d'alerte, ou de modification de dispositions organisationnelles traduites dans des procédures.

Lors de l'analyse de risques, une liste de barrières de sécurité a été identifiée ; l'exploitant s'assurera du maintien du niveau de fiabilité de ces barrières pour répondre aux exigences de l'analyse de risques. Elles seront surveillées, maintenues et testées régulièrement dans cet objectif.

9.4 Intérêt pour le contrôle de la sûreté des barrages

Par l'introduction systématique des analyses de risques au travers des EDD sur les grands barrages, l'autorité de contrôle en France a souhaité que les risques des barrages soient affichés de manière à pouvoir les réduire.

L'autorité de contrôle a en charge d'instruire les études de dangers. Lors de la première génération d'EDD, de nombreux échanges avec les responsables de l'ouvrage et leurs chargés d'études ont été nécessaires, d'une part pour permettre l'application de la réglementation sur le contenu des EDD, et d'autre part sur les conclusions de l'étude relatives aux mesures de maîtrise et de réduction du risque. Sur ce dernier point, les mesures de réductions des risques proposées ont été tracées et assorties de délais dans des actes administratifs pour leurs mises en œuvre. Par ailleurs, l'autorité de contrôle s'assure régulièrement de la bonne réalisation des engagements du responsable d'ouvrage, en particulier lors des inspections périodiques.

En outre, l'Étude de Dangers est également un document de synthèse utile lors des inspections de l'ouvrage. En mettant en exergue les matériels et procédures technico-organisationnelles garantissant la sécurité de l'ouvrage en exploitation, le contrôle est en particulier axé sur ces éléments et permet de gagner en pertinence et efficacité.

Au final, ce sont près de 600 études de dangers qui ont été réalisées (une EDD pouvait concerner plusieurs ouvrages dans un contexte hydraulique pertinent). Ces analyses de risques ont soulevé de nombreuses questions sur le périmètre d'études et sur les méthodologies d'analyse, et elles ont pu comporter des défauts dans leur réalisation notamment les premières générations.

Au-delà de ces défauts dans leurs réalisations inhérents à chaque nouveau processus, l'autorité de contrôle a relevé que dans sa globalité le travail réalisé était plutôt pragmatique et opérationnel. Cet exercice aurait effectivement pu rester théorique, mais c'est l'approche multi-métiers, la participation de tous les acteurs évoluant sur le barrage, et le pilotage des études par des consultants compétents qui garantissent la réussite de l'exercice.

Bien sûr, si l'analyse de risques à travers les études de dangers constitue une démarche très efficace de maîtrise des risques, elle ne constitue pas une arme absolue contre les incidents et les accidents. Tous les acteurs œuvrant autour de la maîtrise des risques des barrages ont un rôle essentiel à accomplir dans leur sûreté : l'exploitant dans ses missions de surveillance, d'exploitation et de maintenance, les bureaux d'études qui assurent la qualité des diagnostics et des études, et l'autorité qui assure le contrôle des barrages.

Un nouvel arrêté consolide le plan et le contenu des EDD au travers de l'approfondissement des données d'entrées (un diagnostic exhaustif des ouvrages et équipements, un bilan de leurs états, de leurs comportements et de leurs conceptions sont désormais demandés explicitement en préalable de l'analyse de risques), des éléments plus précis sur la gestion de la sûreté du barrage (gestion de la sous-traitance, définition des responsabilités...) et une meilleure évaluation des risques lors des phases d'exploitation en situation courante mais aussi en situations accidentelles, avec dans ce dernier cas, si nécessaire, la fourniture des ondes de submersion au format 1/25000 sur des scénarios pouvant conduire à des conséquences graves.

L'Étude de Dangers est désormais, en France, un document essentiel, par lequel le responsable de l'ouvrage démontre la sûreté de son barrage en toutes situations d'exploitation. Il s'agit d'un document utile à tous les acteurs, y compris à l'autorité de contrôle, qui permet d'identifier les points saillants de la sûreté du barrage.

10 Références

- [AELBRECHT et al. 2016] AELBRECHT D., Vermeulen J., Laugier F. (2016). *Les barrages et les risques de crue : retour d'expérience ; modes de défaillance ; expérience d'EDF pour les solutions de confortement*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.
- [BAUMSTARK 2006] Baumstark L. (2016). L'usage de la valeur statistique de vie humaine. *Colloque IFSTAAR CEREMA « Analyse des coûts sociaux de l'insécurité routières et optimisation des politiques publiques »*, Paris, 9 novembre 2016.
- [BOURDAROT 2016] Bourdarot E. (2016). *Discussion sur les mécanismes de défaillance des barrages voutes : retour d'expérience de l'accidentologie et de l'incidentologie*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.
- [CEA 2000] CEA (2000). A guide to dam risk management. Canadian Electricity Association – Dam safety interest group, December 2000.
- [CFBR 2018] CFBR (2018). *Recommandations pour la justification du comportement des barrages voûtes (provisoire)*. Octobre 2018
- [CFBR 2017a] CFBR (2017). *Bulletin n°1 - Retour d'expérience sur la conduite automatique des vannes*. Janvier 2017
- [CFBR 2017b] CFBR (2017). *Bulletin n°2 - Les défaillances mécaniques des vannes de barrage*. Juin 2017
- [CFBR 2017c] CFBR (2017). *Dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage par les dommages incrémentaux ou différentiels : Recommandations pour la mise en œuvre d'une méthode applicable aux barrages en France*. Octobre 2017
- [CFBR 2013] CFBR (2013). *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage en France. Juin 2013*. Téléchargeable dans la rubrique « Documentation » du site internet du CFBR (<http://barrages-cfbr.eu>).
- [CFBR 2012] CFBR 2012. *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids*. Octobre 2012
- [CFBR 2017] CFBR 2017. *Dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage par les dommages incrémentaux ou différentiels : Recommandations pour la mise en œuvre d'une méthode applicable aux barrages en France*.
- [CREMONA 2002] Cremona C. Dir. (2002). *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. AFGC, mai 2003. Presse des Ponts et Chaussées.
- [CTGREF 1978] CTGREF (1978). Calcul d'onde de submersion due à la rupture d'un barrage. *Rapport n°25 – Etude*.
- [DEROO et al. 2016] Deroo L., Royet P., Poulard C. (2016). *Sûreté et efficacité des barrages écréteurs*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.
- [DIEUDONNE et al. 2016] Dieudonné S., Peyras L., Beullac B., Gastaud C., Prévot G., *Retour d'expérience de la première génération des études de dangers en France : analyse méthodologique et comparaisons à l'accidentologie*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.

- [GASTAUD et al. 2015] Gastaud, C. Gauthier, A. 2015. *Enseignements tirés des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) et éléments de retour d'expérience sur les organes hydromécaniques et de contrôle-commande des barrages*, Colloque "Vantellerie et contrôle-commande des barrages", Chambéry, 2-3 décembre 2015. CFBR: 353-367
- [ICOLD 2005] Commission Internationale des Grands Barrages – CIGB / ICOLD (2005). Bulletin n° 130 – Evaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage.
- [ICOLD 2005] Bulletin on risk assessment, n°130, 2005
- [ICOLD 1995] ICOLD (1995). Bulletin 99: Dam Failures – Statistical Analysis. Paris: ICOLD.
- [ICOLD 1993] ICOLD (1993). Bulletin 93: Ageing of dams and appurtenant works – Review and recommendations. Paris: ICOLD.
- [ICOLD 1983] ICOLD (1983). *Deterioration of Dams and Reservoirs – examples and their analysis*. Gap: Ed. Louis-Jean, décembre 1983. 367 p.
- [IDDIR 2008] Iddir O. (2008), *Le nœud papillon : une méthode de quantification du risque majeur*, Techniques de l'Ingénieur, Réf : SE4055 v1
- [INERIS 2016] Debray B. (2006), Rapport INERIS Ω 7 « *Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle* », n°46005, Octobre 2006
- [INERIS 2011] Bolvin C., Balouin T., Vallee A., Flauw Y. (2011). *Une méthode d'estimation de la probabilité des accidents majeurs de barrages : la méthode du noeud papillon*, Colloque technique CFBR / AFEID "Pratique des études de dangers des barrages", Nov 2011, Lyon, France. pp.33-40.
- [INERIS 2009] INERIS (2009). Maîtrise des Risque Accidentels sur les ouvrages hydrauliques – Opération B – État de l'art sur les méthodes existantes de cotation en gravité des accidents de barrages en termes de conséquences humaines – Programme 181-DRA91 – Rapport n°DRS-09-103165-05239A – 09/2009.
- [INERIS 2006] Debray B., Rapport INERIS Ω7 « *Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle* », N°46055, Octobre 2006
- [IRSTEA 2010] Peyras L., Boissier D., Carvajal C., Bacconnet C., Becue JP., Royet P. 2010, *Analyse de risques et Fiabilité des barrages – Application aux barrages-poids en béton*. Ed. Universitaires Européennes. Berlin. 201 p.
- [KAPLAN 1997] Kaplan S. (1997). The Words of Risk Analysis. Risk Analysis, Vol. 17, n°4.
- [LAROUZEE 2015] Larouzee J. (2015). *Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroélectriques: le cas des études de dangers de barrages d'EDF*. Thèse de doctorat. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01310768/document>
- [LEMIEUX et al. 2016] Lemieux M., Kingery R. (2016). Thirty Years of Spillway Reconstruction: Impacts of Moving to a Risk-Based Spillway Standard. ASDSO publications.
- [MEDDE 2007a] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2007). Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques. Journal officiel de la République Française (13/12/2007).

- [MEDDE 2007b] Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (2007). Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques. Journal officiel de la République Française (14/05/2015).
- [MORTUREUX 2002] Mortureux Y. (2002). *L'analyse préliminaire de risques*. Techniques de l'Ingénieur 2002. Réf : SE4010 v1
- [NF EN 31010 2010] Norme NF EN 31010 « *Gestion des risques - Techniques d'évaluation des risques* », Juillet 2010
- [QUEBEC 2002a] Loi sur la sécurité des barrages au Québec, S-3.1.01 (2002). Mise à jour au 01/01/2016 disponible sur : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_3_1_01/S3_1_01.htm
- [QUEBEC 2002b] Règlement sur la sécurité des barrages au Québec, S-3.1.01 R.1 (2002). Les mises à jour ultérieures intègrent des modifications concernant la définition de la crue de sécurité (articles 21, 21.1, 22 et 23). Mise à jour au 01/01/2016 disponible sur : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_3_1_01/S3_1_01R1.HTM
- [RENARD 2006] Renard B. (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de doctorat, INP-Grenoble. 361 p.
- [REVERCHON 2015] Reverchon B. et al. (2015). *Conception, exploitation et rénovation des évacuateurs de crue vannés des barrages exploités par ÉLECTRICITÉ DE FRANCE*. 25^{ème} congrès des grands barrages CIGB 2015, Stavanger
- [SIA 2004] S.I.A. (2004). Cahier Technique 2018. Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Société des Ingénieurs et Architectes (Suisse).
- [VILLEMEUR 1988] Villemeur A (1988). Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels – fiabilité – facteurs humains – informatisation. Paris : Eyrolles.
- [ZIELINSKI 2014] Zielinski A. (2014). Tolerability of societal risk criteria. *Hydropower & Dams*, Issue 4 (2014), p. 63-67
- [ZWINGELSTEIN 1996] Zwingelstein G. (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité – Guide pratique d'application de la RCM*. Paris : Hermes. 666 p.
- [ZWINGELSTEIN 1995] Zwingelstein G. (1995). *Diagnostic des défaillances – Théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Paris : Hermes. 601 p.

11 Terminologie – Glossaire

Acceptabilité du risque	Ensemble de critères sociétaux et économiques qui permet de fixer un seuil au-delà duquel le niveau de risque n'est plus toléré
Aléa	Phénomène d'occurrence (probabilité), de durée et cinétique, et d'intensité données ; aléa hydrologique : hydrogramme ; aléa hydraulique : hauteurs, niveaux et vitesses en fonction du temps.
AMC	(Analyse Multi-critères) : démarche de comparaison de plusieurs options (ne rien faire, projet, alternative, ...) selon des critères de natures différentes. Dans le domaine des inondations, l'AMC consiste à prolonger l'ACB avec des indicateurs non monétarisés (population, emplois, patrimoine, environnement, ...).
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). On suppose des défauts ou événements initiateurs pour analyser l'ensemble de leurs effets sur le système. L'AMDE peut être complétée par des considérations de criticité grâce à l'AMDEC - Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité. Dans une AMDEC, chaque mode de défaillance identifié est classifié selon l'influence combinée de sa probabilité et de la gravité des conséquences.
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 1997]
Analyse fonctionnelle	Démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions (NF X50-150).
Analyse par arbre de défaillances	Méthode d'ingénierie des systèmes pour représenter les combinaisons logiques de différents états d'un système et des causes possibles pouvant déclencher un événement spécifique (appelé événement de base).
Analyse par arbre d'évènements	Une analyse par arbre d'évènement est un processus inductif qui utilise une construction graphique arborescente pour représenter une séquence logique d'occurrence d'évènements ou d'états successifs d'un système à la suite d'un évènement initial.
Analyse qualitative de risques	Analyse sous forme textuelle, sous forme d'échelle descriptive ou sous forme numérique, décrivant l'ampleur des conséquences potentielles, et la probabilité que ces conséquences surviennent.
Analyse quantitative	Estimation de la probabilité d'occurrence des événements au moyen de calculs en utilisant des valeurs chiffrées de probabilité

Analyse semi-quantitative	Estimation de la probabilité d'occurrence des événements au moyen de calculs en utilisant des classes de probabilité
Approche déductive	Partant des effets pour remonter aux causes
Approche inductive	Débutant par l'analyse des causes du danger pour aboutir aux effets
APR	Analyse Préliminaire des Risques
Arbre d'évènements	L'arbre d'évènements est un outil qui permet d'étudier quelles sont les conséquences d'un évènement non souhaité suivant le fonctionnement des parades qui sont mises en place pour limiter la gravité des effets de cet évènement sur son environnement. L'enchaînement des actions et des évènements pouvant conduire ou non à un accident ainsi déterminé permet aussi de quantifier la probabilité des évènements.
Arbre de défaillances	L'arbre de défaillances permet de représenter de façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'évènements qui peuvent conduire à une défaillance (mise en évidence des relations de cause à effet), avec quantification possible de la probabilité d'occurrence de l'évènement indésirable
Barrière de sécurité	Ensemble d'éléments techniques et/ou organisationnels nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On peut distinguer : - les barrières de prévention : mesures visant à éviter ou limiter l'occurrence d'un évènement indésirable, en amont du phénomène dangereux ; - les barrières de limitation : mesures visant à limiter l'intensité des effets d'un phénomène dangereux ; - les barrières de protection : mesures visant à limiter les conséquences sur les cibles potentielles par diminution de la vulnérabilité.
CIGB	Commission Internationale des Grands Barrages - https://www.icold-cigb.org/
Cinétique de l'onde de rupture	Caractérisation de l'évolution dans le temps de la propagation de l'onde de rupture d'un ouvrage (délai d'arrivée à un point donné, vitesse de montée des eaux, durée de submersion...)
Cinétique de rupture	Caractérisation de l'évolution dans le temps de la rupture d'un ouvrage (délai, vitesse).
Classe d'un barrage	Les définitions de la classe d'un barrage (A, B, C) sont fixées par l'article R214 du code de l'environnement. Les barrages de classes A sont les plus importants en termes de risques et enjeux pour la sûreté publique
Coefficient de sécurité	Pour les systèmes structurels et autres systèmes techniques, le rapport de la résistance du système avec les contraintes de projet maximales, souvent calculées en accord avec des règles établies.
Composant	Éléments constitutif d'une partie de l'ouvrage ayant une fonction

Conséquences	Résultats d'une rupture totale ou partielle de barrage ou d'un de ses ouvrages annexes, à long ou court terme et de manière directe ou indirecte sur les biens, les personnes et les infrastructures touchée. Les conséquences peuvent être des victimes, des pertes économiques, des dégâts, des dommages environnementaux...
Conséquences incrémentales d'une rupture	Pertes ou dommages incrémentaux que la rupture du barrage peut entraîner sur les zones en amont, en aval, sur le barrage ou ailleurs, en supplément d'autres pertes qui seraient survenues pour le même événement ou les mêmes conditions naturelles si le barrage n'avait pas rompu.
Cote de danger	Cote au-delà de laquelle on ne sait plus garantir la stabilité de l'ouvrage. Elle peut être atteinte suite à une crue extrême ou à cause d'un dysfonctionnement des évacuateurs de crues. La notion de cote de danger peut être élargie à celle de situation ou d'évènement de danger (par exemple concomitance du chargement thermique et hydrostatique pour une voûte ou bien les différentes situations de chargement hydrostatique sur un barrage mobile en rivière).
Courbes F-N	Courbes donnant F (probabilité annuelle de provoquer N décès ou plus) en fonction de N. C'est la fonction de distribution cumulative complémentaire. De telles courbes peuvent être utilisées pour exprimer des critères de risques sociétaux et pour décrire les niveaux de sécurité d'installations spécifiques - l'approche ALARP s'appuie sur de telles courbes F-N
Criticité	Qualification du danger. Produit de la gravité et de l'occurrence du scénario dangereux considéré. Elle peut être représentée par l'intermédiaire d'une matrice
Criticité/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).
Crue	Augmentation du débit et/ou du niveau d'un cours d'eau qui provoque éventuellement un débordement de son lit mineur.
Danger	Menace ; condition, pouvant résulter soit d'une cause extérieure (par exemple tremblement de terre, crue, ou action humaine) soit d'une vulnérabilité interne, pouvant entraîner un mode de défaillance. Une source de nuisances potentielles, ou une situation pouvant entraîner des pertes.
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 entité)	L'état d'une entité présentant une perte de performance d'une de ses fonctions ou un sous-ensemble lui-même dégradé [ZWINGELSTEIN 1996].

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 2002].
Détérioration (des barrages)	Tout comportement défectueux du point de vue de la sécurité et des performances, y compris les accidents et les ruptures [ICOLD 1983].
Déterministe	Décrit un processus donnant un résultat qui reste toujours le même pour un jeu fixé de données en entrée. Ainsi, le résultat est « déterminé » par les données. Déterministe s'oppose à aléatoire, qui décrit un processus donnant un résultat pouvant varier même si les données restent les mêmes. Opposé à <i>probabiliste</i> (voir ce terme).
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).
Diagnostic d'état	Examens et investigations réalisés préalablement à l'EDD dans l'objectif de caractériser l'état des ouvrages et des matériels entrant dans le périmètre de l'analyse de risques. Il concerne également les parties immergées et difficilement accessibles du barrage. Avant 2015, on parlait d'Examen Technique Complet (ETC) et de Revue de Sûreté (RS).
Domage	Dégât matériel ou physique touchant un bien ou une personne (victime). On distingue les dommages corporels, matériels ou moraux.
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).
EDD	Étude de Dangers. Le terme « études de dangers » (EDD) vient de la terminologie employée en France dans les industries à risques. On les appelle « analyse de risques » dans la pratique internationale.

Effets	Dans le contexte de l'analyse des modes de défaillances (AMDE et AMDEC), ce terme se réfère aux conséquences sur le fonctionnement d'un système de type barrage, d'une défaillance au sein du système. Si les limites du système sont constituées par celles du barrage, on distinguera ces conséquences des conséquences éloignées, pouvant être également le résultat de la même défaillance, comme des pertes de vies humaines ou des dommages aux biens dus à l'onde de rupture en aval du barrage.
EI	Événement Initiateur ; événement en amont d'un Événement Redouté Central.
EISH	Événement Important pour la Sûreté Hydraulique.
Enjeu	Valeur matérielle ou morale que l'on risque dans une situation vis-à-vis d'un aléa. Au sens théorique des risques : personne, bien ou aménité dont la sécurité ou la valeur – morale, monétaire, patrimoniale ou environnementale – est modifiée lorsqu'il est exposé à un aléa.
Environnement	Ensemble qui interagit avec l'ouvrage en tant qu'agresseur ou enjeux potentiels
ERC	Événement Redouté Central. Événement conventionnellement défini, dans le cadre de l'analyse des risques, au centre de l'enchaînement accidentel. Il peut s'agir d'une perte de confinement de matière dangereuse, une perte d'intégrité physique pour les solides. Ces événements constituent les points d'entrée de l'analyse des risques
Evènement extrême	Évènement ayant une probabilité de dépassement annuelle (AEP) très faible. Quelquefois défini comme un évènement dépassant les <i>limites crédibles d'extrapolation</i> et donc dépendant des séries historiques et de la qualité des données disponibles
Expert/Expertise/Jugement expert	Expert : personne disposant d'un savoir et d'un savoir-faire [ZWINGELSTEIN 1995] 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
Facteur d'agression externe	Éléments extérieurs pouvant porter atteinte à la sécurité de l'ouvrage incluant les risques naturels et les risques liés aux activités humaines.

Facteurs humains	Les facteurs humains se réfèrent à des facteurs environnementaux, organisationnels et professionnels, et des caractéristiques humaines individuelles qui influencent sur le comportement professionnel d'une manière pouvant influencer la sécurité.
Fiabilité	Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné (NF X60-500). Probabilité de fonctionnement correct d'un composant spécifique d'un aménagement. Elle peut être mesurée sur une base annuelle ou pour toute période spécifiée, ou encore par exemple dans le cas des vannes d'évacuateurs, sur demande. D'un point de vue mathématique, fiabilité = 1 - probabilité de défaillance.
Fonction	Actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées exclusivement en termes de finalité (NF X50-150).
Fonction de sécurité	Fonction ayant pour but la réduction de la probabilité d'occurrence et/ou des effets et conséquences d'un événement non souhaité dans un système.
Fonction principale	fonction majeure d'un composant pour laquelle il a été conçu.
Fonction technologique	(ou fonction de contrainte) Fonction qu'un composant doit remplir pour maintenir sa performance.
Gestion des risques	Application systématique de politiques, de procédures et de pratiques de gestion aux tâches consistant à identifier, analyser, estimer, atténuer et contrôler les risques.
IC (anciennement ICPE)	Toute exploitation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances, notamment pour la sécurité et la santé des riverains est une installation classée.
IGN	Institut Géographique National.
Incertitude	Terme autrefois utilisé pour se référer aux situations pour lesquelles la vraisemblance de conséquences potentielles ne peut être décrite par des fonctions de densité de probabilité connues objectivement. Maintenant utilisé pour décrire toute situation sans certitude, décrite ou non par une distribution de probabilité. Dans le contexte de la sécurité des barrages, l'incertitude peut être attribuée à (i) la variabilité inhérente des propriétés et événements naturels, et (ii) une connaissance incomplète des paramètres et des relations entre les données en entrée et en sortie.
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques.
LIDAR	Light Detection And Ranging (ou Laser Detection And Ranging) : technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur.
Ligne d'eau	Ligne matérialisant l'altitude d'un plan d'eau (cours d'eau, retenue, brèche, etc.) dans le sens de l'écoulement.

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).
Matrices de criticité	Représentation dans un tableau double entrée (occurrence/gravité) avec (ou sans) les limites d'acceptabilité, dans lequel les scénarios sont représentés.
Mécanisme de défaillance	Mécanisme décrit par les processus qui doivent se produire et les états physiques successifs, en accord avec les lois naturelles, pour permettre au mode de défaillance de passer de l'initiation (cause) à la réalisation de l'effet ultime qui nous intéresse.
Mécanisme de vieillissement	Processus de vieillissement. Idem que « scénario de vieillissement ».
Mesures de maîtrise des risques	Moyens que le responsable d'ouvrage et son exploitant s'engagent à maintenir pour garantir un niveau de sûreté satisfaisant.
Mesures de réduction des risques	Engagements du responsable d'ouvrages et de son exploitant pour diminuer le niveau des risques considérés comme non acceptables.
Mode de défaillance	Non-aptitude d'un composant à assurer une fonction pour laquelle il a été conçu : perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive. Manière selon laquelle le système cesse de remplir ses fonctions.
Nœud papillon	La méthode appelée « nœud papillon », du fait de sa représentation schématique, est une approche d'analyse et de gestion probabiliste des risques. Cette approche, qui combine un arbre de défaillances à un arbre d'événements autour d'un événement redouté central, permet de visualiser concrètement les scénarios d'accidents. Cette démarche va notamment mettre en avant les combinaisons séquentielles d'événements en chaîne et ainsi permettre de vérifier les barrières de prévention et de protection en place.
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).
Onde de submersion	Dans le contexte : phénomène hydraulique d'inondation d'une vallée généré par une variation brusque des conditions à l'amont (météo, gestion, accident, ...).
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.
Périmètre d'étude	Ensemble de l'ouvrage et partie d'ouvrage contribuant directement à la fonction de sécurité.

PhD	Phénomène Dangereux.
PHE	Plus Hautes Eaux : Niveau de la retenue atteint lors de la crue de projet.
Phénomène dangereux	Libération d'énergie ou de substance produisant des effets susceptibles d'infliger un dommage à des cibles vivantes ou matérielles, sans préjuger l'existence de ces dernières.
Plan d'urgence	Document présentant des procédures d'action pour différents types d'alerte, ainsi que des répertoires de communication et des cartes montrant les niveaux d'eau en amont et en aval et le moment d'arrivée d'une onde de rupture d'un barrage ou des ouvrages annexes.
Potentiel de dangers	Système (naturel ou créé par l'homme) comportant un (ou plusieurs) danger(s). On entend par « danger » une propriété intrinsèque (énergie potentielle, toxicité, ...) à un système technique (retenue d'eau, élévation d'une charge, mise sous pression d'un liquide ou d'un gaz...), à une substance (matière constituant des sédiments, polluants...), etc., de nature à entraîner un dommage sur un « élément vulnérable ».
Prévention (mesures de)	Mesures permettant de réduire l'occurrence d'un événement redouté.
Propriétaire	Entité légale, personne, société, organisation, organisme gouvernemental, opérateur public, groupe ou autre entité, qui soit possède une licence gouvernementale pour exploiter le barrage, soit est propriétaire légal du site, du barrage et/ou du réservoir, et qui est responsable de la sécurité du barrage.
Rapport d'auscultation	Document technique périodique rédigé par un organisme agréé fournissant et analysant les résultats d'auscultation du barrage. Sa périodicité est de 2 ans pour les barrages de classe A et de 5 ans pour les barrages de classe B et C.
Rapport de surveillance	Rapport périodique synthétisant les principales actions de maintenance et de surveillance. Il est rédigé par l'Exploitant. Sa périodicité est de 1 an pour les barrages de classe A, 3 ans pour les classes B et 5 ans pour les classes C.
Registre du barrage	Journal traçant les faits et événements rencontrés en exploitation. Il est renseigné au fil de l'eau par l'Exploitant.
Risque résiduel	Niveau de risque restant avant, pendant et après un programme de mesures d'atténuation des risques.
Risque	Relation entre les conséquences résultant d'un événement et sa probabilité d'occurrence. Le risque inondation est défini par le produit des aléas de crue et des enjeux.
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 1988].

RN	Retenue Normale.
RS	Revue de Sûreté.
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 1995].
Scénario	Une combinaison unique d'états, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - événement initiateur ; - conditions de vent ; - remplissage préalable du réservoir ; - état de fonctionnement des vannes ; - mode de défaillance ; - débits actuels en aval, y compris affluents ; - facteurs déterminant la présence de population en aval d'un barrage au moment de la rupture. - Un scénario définit une suite de circonstances d'intérêt pour une évaluation des risques. Il existe donc des scénarios de mise en charge, des scénarios de rupture ou des scénarios de crues en aval.
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 1993].
Simulation de Monte Carlo	Procédure cherchant à simuler des processus stochastiques en sélectionnant aléatoirement des valeurs proportionnellement à leur fonction de densité de probabilité conjointe.
Sûreté	Il s'agit de l'ensemble des dispositions prises lors de la conception, de la gestion et de la maintenance des barrages pour assurer la protection des personnes et des biens contre les dangers liés à leur présence ou à leur fonctionnement.
Sûreté de fonctionnement	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 1988].
Surveillance	Suivi du comportement des ouvrages par observation visuelle ou par auscultation et destiné à détecter tout signe d'évolution.
Système	Ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction [VILLEMEUR 1988].
Variable aléatoire	Quantité dont la valeur n'est pas exactement fixée, mais qui peut prendre une quelconque valeur décrite par une distribution de probabilités.
Vidange de fond (vanne de)	Organe de restitution en bas du réservoir habituellement utilisé pour vider la retenue ou évacuer les sédiments et parfois pour permettre l'irrigation.

Vieillessement (des barrages)	Catégorie de détérioration due aux altérations au cours du temps des propriétés des matériaux et des structures [ICOLD 1993].
VTA	Visite Technique Approfondie.
Zone d'étude	Ensemble comprenant les ouvrages du périmètre de l'étude et son environnement.

French practices of dam safety review and risk assessment

Table of contents

1	RISK ANALYSIS APPROACH FOR DAMS IN FRANCE	113
1.1	THE ORIGINS OF THE PRACTICE OF RISK ASSESSMENT AND RISK CONTROL IN FRANCE	113
1.2	GENERAL FRAMEWORK OF THE RISK MANAGEMENT PROCESS FOR DAMS	114
1.3	THE FRAMEWORK OF SAFETY REVIEW RISK ASSESSMENTS FOR DAMS IN FRANCE	115
1.4	THE PROCEDURE AND THE STEPS OF DAM RISK ASSESSMENT IN FRANCE	117
1.5	POSITIONING FRENCH SAFETY REVIEW RISK ASSESSMENT PRACTICES RELATIVE TO INTERNATIONAL PRACTICES OF DAM RISK ANALYSIS	118
2	THE INPUT DATA FOR RISK ANALYSIS	120
2.1	INTRODUCTION	120
2.2	COLLECTING INPUT DATA	120
2.2.1	<i>Descriptive reference data for the structures and equipment</i>	120
2.2.2	<i>Operational, monitoring and maintenance data</i>	121
2.2.3	<i>Organizational documents and operational procedures</i>	122
2.2.4	<i>Summary of the collection of existing data</i>	123
2.3	IDENTIFYING AND CHARACTERIZING NATURAL HAZARDS	124
2.4	EXAMINATIONS AND DIAGNOSES FOR ASSESSING SAFETY	124
2.4.1	<i>The specific inspections</i>	125
2.4.2	<i>Diagnosis of the status, design and behavior of the civil engineering structures</i>	128
2.4.3	<i>Diagnosis of the condition and operation of the hydromechanical equipment</i>	129
2.4.4	<i>Diagnosis of the status and operation of the safety element control systems</i>	130
3	FUNCTIONAL ANALYSIS 131	
3.1	INTRODUCTION	131
3.2	DEFINITION OF THE SYSTEM STUDIED AND ITS ENVIRONMENT	132
3.2.1	<i>The analysis area</i>	132
3.2.2	<i>The analysis perimeter</i>	133
3.3	EXTERNAL FUNCTIONAL ANALYSIS	134
3.4	INTERNAL FUNCTIONAL ANALYSIS	136
3.4.1	<i>Principles of the internal functional analysis</i>	136
3.4.2	<i>Illustrations of practices for the internal functional analysis</i>	137
4	ANALYZING FAILURE MODES AND IDENTIFYING FEARED EVENTS	140
4.1	PRELIMINARY RISK ANALYSIS (PRA)	140
4.1.1	<i>Context - Use</i>	140
4.1.2	<i>Principles of the PRA</i>	140
4.1.3	<i>Using the PRA in Safety Review Risk Assessments – Examples</i>	141
4.2	FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) AND FAILURE MODES, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS (FMECA)	146
4.2.1	<i>Context – Standards – Uses</i>	146
4.2.2	<i>Principles of the FMEA/FMECA</i>	146
4.2.3	<i>Using the FMEA in Safety Review Risk Assessments – examples</i>	147
4.3	SUMMARY OF THE METHODS OF ANALYZING FAILURE MODES AND IDENTIFYING FEARED EVENTS	152
5	REPRESENTATION OF ACCIDENTAL SEQUENCES USING A TREE-BASED METHOD	153
5.1	INTRODUCTION	153
5.2	ANALYSIS USING AN EVENT TREE	154
5.3	ANALYSIS USING THE FAULT TREE METHOD	156
5.4	COMBINED ANALYSIS USING THE BOW TIE METHOD	158
5.5	SUMMARY OF THE REPRESENTATION OF ACCIDENTAL SEQUENCES USING TREE METHODS	164

6	RISK ASSESSMENT	165
6.1	INTRODUCTION	165
6.2	THE WORK OF THE PANEL OF EXPERTS	165
6.3	SAFETY BARRIERS	166
6.3.1	<i>The principles</i>	166
6.3.2	<i>Taking prevention barriers into account</i>	167
6.3.3	<i>Example – Prevention barrier: Bottom outlet</i>	169
6.4	TAKING THE HUMAN FACTOR INTO ACCOUNT	171
6.4.1	<i>Inappropriate actions</i>	171
6.4.2	<i>Human failure</i>	171
6.5	SEMI-QUANTITATIVE APPROACH TO RISK ASSESSMENT	172
6.5.1	<i>Assessment of the occurrences of initiating (IE) or intermediate events</i>	172
6.5.2	<i>Principles of aggregation in the bow tie or fault tree methods for determining the occurrence of feared events</i>	173
6.6	QUANTITATIVE APPROACH TO RISK ASSESSMENT	175
6.6.1	<i>Principle of the quantitative assessment of safety using an event tree</i>	175
6.6.2	<i>The different approaches to probability assessment</i>	175
6.6.3	<i>Example of a quantitative risk assessment using the event tree method</i>	176
6.7	SUMMARY OF THE RISK ASSESSMENT APPROACHES	177
7	ASSESSING THE SEVERITY OF SCENARIOS	178
7.1	THE HYDRAULIC PHENOMENA: MODELING AND MAPPING	178
7.1.1	<i>Modeling the failure wave</i>	178
7.1.2	<i>Mapping the dam break flood wave</i>	180
7.2	THE SOCIO-ECONOMIC STAKES: IDENTIFICATION, INDICATORS AND IMPACTS	181
7.2.1	<i>The issues at stake</i>	181
7.2.2	<i>The main sources of data used</i>	181
7.2.3	<i>The assumptions regarding the people exposed</i>	182
7.2.4	<i>Mapping the issues subject to failure scenarios</i>	182
7.2.5	<i>Assessment of impacts</i>	185
7.3	CRITICAL ANALYSIS OF THE RESULTS	187
8	ASSESSING THE CRITICALITY OF SCENARIOS, DISPLAYING RISKS AND MEASURES TO REDUCE THE RISKS	188
8.1	ASSESSING THE CRITICALITY OF SCENARIOS AND DISPLAYING RISKS	188
8.2	RISK CONTROL AND REDUCTION MEASURES	190
8.2.1	<i>Terminology</i>	190
8.2.2	<i>Risk control measures (RCM)</i>	191
8.2.3	<i>Risk reduction measures (RRM)</i>	191
8.2.4	<i>Example</i>	191
9	SUMMARY: THE CONTRIBUTION OF THE RISK ANALYSIS TO DAM SAFETY IN FRANCE	195
9.1	THE CONTRIBUTION OF THE RISK ANALYSIS TO DAM SAFETY IN FRANCE	195
9.1.1	<i>A new multi-skill functional approach</i>	195
9.1.2	<i>A better understanding of structures</i>	195
9.1.3	<i>Identification and inter-classification of risks</i>	196
9.1.4	<i>Risk reduction and control measures and the preventive stance</i>	197
9.2	SAFETY REVIEW RISK ASSESSMENT-RELATED COMMUNICATION	198
9.3	APPROPRIATION OF THE SAFETY REVIEW RISK ASSESSMENT BY THE DAM'S DIFFERENT STAKEHOLDERS	199
9.3.1	<i>During drafting</i>	199
9.3.2	<i>After it is drafted</i>	199
9.4	INTEREST FOR CONTROLLING DAM SAFETY	199
10	REFERENCES	201
11	TERMINOLOGY – GLOSSARY	204

List of Figures

Figure 1.1: Regulatory developments in the safety of industrial installations over the last few centuries.....	113
Figure 1.2: Regulatory developments in dam safety in France.....	114
Figure 1.3: Risk assessment process from ICOLD Bulletin 130 replaced in a normative context ISO/CEI 31010:2009.....	115
Figure 1.4: Mapping of the players involved in Safety Review Risk Assessments for dams in France (inspired by ISO 9001)	116
Figure 1.5: The risk assessment process in France.....	118
Figure 3.1: Illustration of the analysis area (perimeter and its environment).....	132
Figure 3.2: Illustration of the analysis perimeter	134
Figure 3.3: Illustration of a summarized external functional analysis in the Safety Review Risk Assessment.....	135
Figure 3.4: Illustration of a summary of an internal functional analysis for a river barrage dam	139
Figure 4.1: Distribution of methods for analyzing failure modes [DIEUDONNE et al. 2016]	140
Figure 5.1: Distribution of uses of tree methods by managers in risk analyses (French feedback) [DIEUDONNE et al. 2016]	153
Figure 5.2: Principle of the event tree method	154
Figure 5.3: Example of an event tree relating to the internal erosion mechanism of a rockfill embankment dam	155
Figure 6.1: Semi-quantitative approach - Example of prevention barriers for the IE “Unintentional closing of a flood gate”	169
Figure 6.2: Semi-quantitative approach using the bow tie method - Example showing the feared event “Dam failure” with the bottom outlet as the prevention barrier	170
Figure 6.3: Example of an assessment of the safety of an embankment dam relative to a scenario of overtopping linked to inadequate chute capacity	176
Figure 7.1: Examples of flood zone mapping	180
Figure 7.2: Example of flood zones mapping showing population density.....	183
Figure 7.3: Example of flood zones mapping using gridded INSEE population data.....	184
Figure 8.1: Example of a criticality matrix.....	188
Figure 8.2: Examples of criticality grids showing the limits of acceptability.....	189
Figure 8.3: Example of a criticality grid without limits of acceptability	190
Figure 8.4: Development of the criticality matrix after application of risk reduction measures.....	190
Figure 8.5: Distribution of RRM and RCM – Nouvelle Aquitaine	192
Figure 8.6: Distribution of RRM works – Nouvelle Aquitaine	193
Figure 8.7: Distribution of additional studies– Nouvelle Aquitaine	194

List of Tables

Table 3.1: Illustration of a summary of an internal functional analysis for a dam’s “embankment” component	137
Table 3.2: Illustration of summary of internal functional analysis of a gated spillway.....	138
Table 4.1: Extract of the PRA for an arch dam with a gated spillway	143
Table 4.2: Extract from the PRA for an embankment dam	145
Table 4.3: Example of application of the FMEA in a Safety Review Risk Assessment for a rockfill dam	147
Table 4.4: Example of application of the FMEA in the Safety Review Risk Assessment for an embankment dam	151
Table 5.1: The most frequently used logical links in fault trees.....	157
Table 5.2: Meaning of events figuring in a bow tie.....	159
Table 6.1: Example of justification and rating of barriers in Safety Review Risk Assessments.....	168
Table 6.2: Example of a semi-quantitative grid for event assessment	173
Table 6.3: Examples of transcription grids of expert opinions in the form of subjective probabilities	176
Table 7.1: example of classes of severity	182
Table 7.2: Example of counting of people potentially impacted by the dam break wave.....	186
N.B: the classes of probability shown in this grid example are given in table 8.1	188

FOREWORD

[Objectives of the report on “French Practices of dam Safety Review Risk Assessment”](#)

This report discusses French practices in the field of safety review and risk assessment for dams. It looks at the following points: a functional and structural analysis of dams, an analysis of the failure modes, modeling failure scenarios, risk assessment relative to the failure modes and scenarios, assessing the severity of the scenarios and assessing the criticality and the risks including displaying the risks.

The report describes the methods implemented in the practices and includes numerous illustrative examples. It aims to raise awareness of French practices outside France. To make the report easier to understand, a glossary of technical terms is provided at the end.

This document constitutes a summary of the feedback from the first generation of Safety Review Risk Assessments carried out in France between 2007 and 2018. It does not have the status of guidelines for carrying out Safety Review Risk Assessments in France.

[Authors of the report on “French Practices for dam safety review and risk assessment”](#)

This guide of French practices was drafted by a working group from the French Committee on Dams and Reservoirs (CFBR) which carried out the work between May 2017 and June 2020. This group was made up of people appointed on the basis of their skills and experience in the fields of dam safety, risk analysis and risk assessment:

Laurent PEYRAS – coordinator	INRAE
Michel POUPART – coordinator	Independent Expert
Thomas ADELIN	Consultant for ISL
Thibault BALOUIN	INERIS
Catherine CASTEIGTS	SCP
Benjamin DELARUELLE	ARTELIA
Thierry GUILLOTEAU	EDF
Frédéric LAUGIER	EDF
Jean-Charles PALACIOS	SAFEGE
Gladys PAVADAY	CNR
Guirec PREVOT	PoNSOH – Ministry of the Environment
Agnes VALLEE	INERIS
Eric VUILLERMET	BRLi

1 Risk analysis approach for dams in France

1.1 The origins of the practice of risk assessment and risk control in France

The rise of the industry in France has been accompanied for several centuries by a constant development of the regulations aimed at providing a framework for all activities of any kind that could present risks for populations or the environment. These regulations have had to take a number of parameters of all kinds into consideration over the past decades:

- the diversification of activities, processes or operating methods;
- the convergence of housing and industrial assets, which is gradually becoming inevitable as a direct consequence of increasingly intensive industrial development, which accelerated even more in the post-war period. It was particularly intense along certain waterways (processes, logistics, etc.);
- the awareness of populations and the culture of risk following accidents that have had disastrous consequences in terms of their impact on environmental, human and economic issues ...

The history of French regulations for dangerous installations and industrial hazards finds its origins at the end of the 18th century with an explosion in a powder factory at the Château de Grenelle in 1794. The timeline below parallels some major accidents with the main regulatory developments that have led over the years, to the setting up and improving of **risk management** on sites in France and Europe.



Figure 1.1: Regulatory developments in the safety of industrial installations over the last few centuries

The development of regulations and risk management in the field of dams is also linked to this industrial development and marked by the occurrence of two major accidents in France: the failure of Bouzey dam in 1895 and that of Malpasset dam in 1959. The latter catastrophic accident led to a marked strengthening of government control of dam safety, with the creation of the Permanent Technical Dam Committee in 1966 which rules on all projects to create or reinforce large dams, and the promulgation of ministerial regulations focusing on the inspection and monitoring of dams affecting public safety. More recently, since 2006, French legislation has undergone a significant evolution with a revision of the regulatory texts relating to the safety of hydraulic assets and the

introduction of risk analysis studies as for other high-risk fields of industry. The figure below shows the development of the regulations on dams in France linked to these two events.

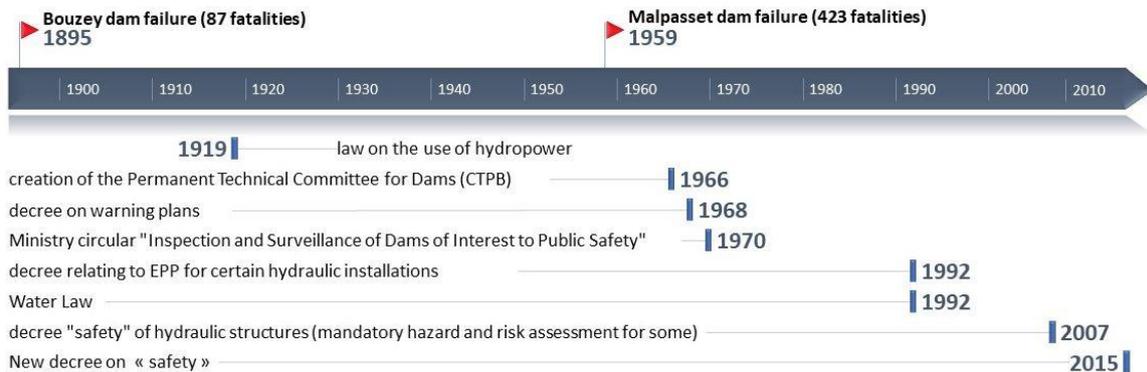


Figure 1.2: Regulatory developments in dam safety in France

1.2 General framework of the risk management process for dams

ICOLD Bulletin 130 "Risk assessment in dam safety management" sets the principles of risk management for dams, where the main objectives are:

- To identify all the configurations likely to jeopardize a structure's safety and integrity and therefore the safety of the human, economic and environmental issues located upstream or downstream of the structure;
- To analyze the performance of the technical, human and organizational provisions made by the operator to maintain an acceptable level of safety relative to the risk.

This procedure is part of the more general normative framework of the risk management process that stems from standard ISO/CEI 31010:2009 "Risk management – Risk assessment techniques".

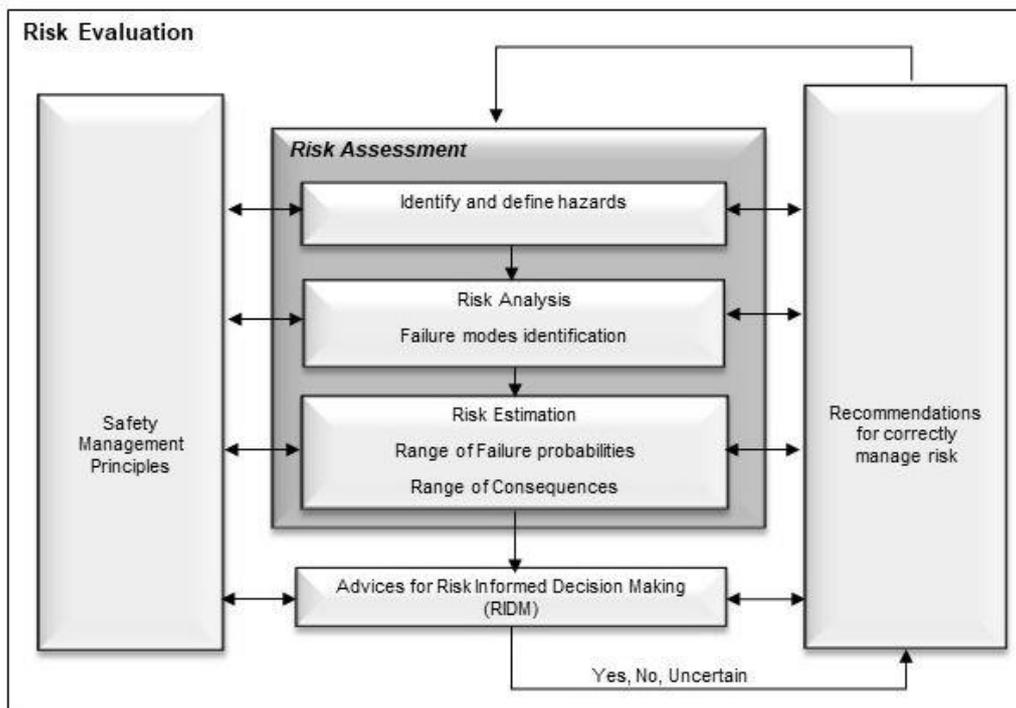


Figure 1.3: Risk assessment process from ICOLD Bulletin 130 replaced in a normative context ISO/CEI 31010:2009

The management and assessment of risks therefore constitutes an iterative process aimed at reducing risks to an acceptable level. This process is based on a **risk analysis** that consists of:

- Identifying the sources of hazards, i.e. the elements that are likely to cause significant damage in their environment;
- Identifying in detail the different conditions in which the hazards identified may materialize through failure modes;
- Offering a quantitative, semi-quantitative or qualitative characterization of the risks according to several criteria such as the severity of the consequences and the probability of occurrence;
- Proposing measures of control and/or risk reduction by prioritizing them, particularly if the risk is deemed to be uncontrolled. The risk reduction process then continues until it reaches a level that is as low as reasonably practicable (ALARP).

1.3 The framework of Safety Review Risk Assessments for dams in France

To meet these issues of dam risks identification, characterization and risk management, the French regulations introduced the obligation to carry out risk analyses through “Safety Review Risk Assessments”. At the heart of the risk prevention system, the Safety Review Risk Assessment constitutes an essential work basis for developing prevention strategies. Carried out under the responsibility of the entity responsible of the dam, it focuses mainly on explicitly demonstrating risk management and the control of the major accident risks associated with the dam and its appurtenant structures. Safety Review Risk Assessments are carried out by analysis managers - consultants or technical services of the owner – State-certified for their proven skills. They are subject to examination by the State supervisory authority.

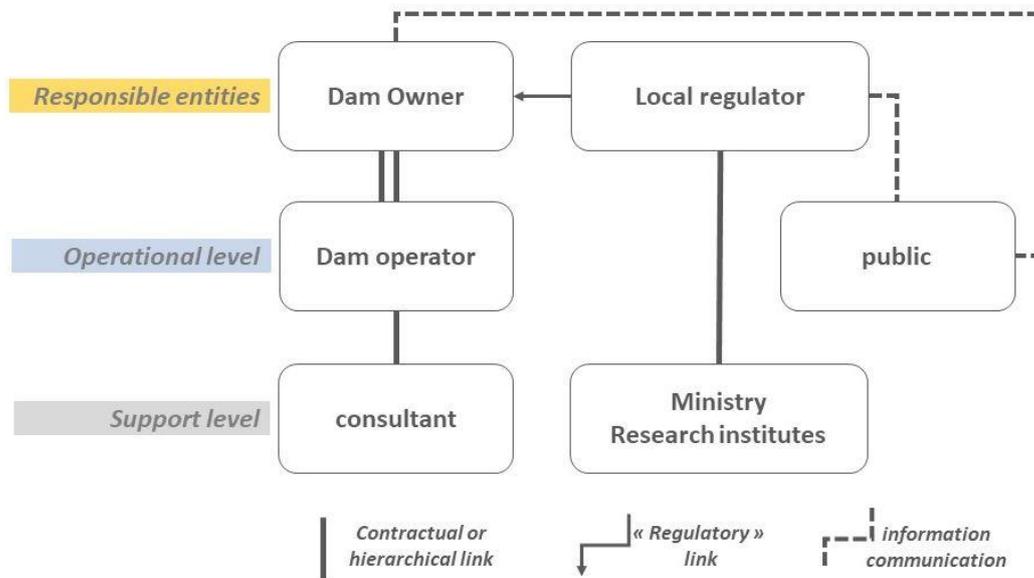


Figure 1.4: Mapping of the players involved in Safety Review Risk Assessments for dams in France (inspired by ISO 9001)

From 2007, the general framework for dam risk analysis in France was introduced into the environmental code which made the carrying out of Safety Review Risk Assessments mandatory for large dams (see inset n°1 below). The aim of dam Safety Review Risk Assessments is to assess the risks the structure presents for public safety, directly or indirectly, whether the cause be internal or external to the structure. The external causes are linked to natural hazards (floods, earthquakes, landslides, avalanches, etc.) or to the environment (failure of other structures); the terrorist risk and malice are not considered. The internal causes include the dam's condition and behavior, its performance relative to the stresses it is subjected to, as well as the operation of the safety structures such as spillways and bottom outlets, and organizational and human causes. The Safety Review Risk Assessments include less severe events but with a higher probability, like accidents and incidents linked to the scheme's ongoing operation. It also describes the organization of the dam's owner and operator, with a view to ensuring operational safety in a routine situation or during an exceptional event.

Dams in France are divided into 3 classes according to criteria of height and reservoir volume: class A concerns the 200 large dams, class B the 400 medium-sized dams and class C the 1500 small dams. The class A and B dams must undergo a Safety Review Risk Assessment. The periodicity of Safety Review Risk Assessments is 10 years for class A dams and 15 years for class B dams. Since the start of the regulations on Safety Review Risk Assessments, some 600 assessments have been carried out in France.

Risk assessment in the Safety Review Risk Assessments includes assessing the safety of the structures and their equipment and assessing the issues. It includes determining the probability of occurrence of failures and accidents and assessing the consequences of their effects characterized in terms of intensity, kinetics, and severity.

The regulations on Safety Review Risk Assessments date from 2007 with a further development in 2015. Safety Review Risk Assessments include an assessment of the dam's design and condition, including an analysis of its initial design, the construction and any significant further rehabilitation works, an analysis of the operating conditions, the monitoring and maintenance, an analysis of its behavior, particularly based on monitoring results and a report on dam condition drawn up on the basis of the various visual inspections and in-depth examinations carried out on the dam. The report covers all the structures that constitutes the dam, including the parts that are usually underwater or difficult to access and the safety appurtenant works. All these elements constitute the input data for the actual risk analysis itself.

The risk analysis concludes with a definition and justification of the measures required to reduce the probability of occurrence and the severity of the consequences of these accidents. Dam Safety Review Risk Assessments in France identify and propose different measures that can be considered for reducing the risks in the long term, or temporarily, scheduled in the short and medium term. The expected benefit of these risk reduction measures is indicated.

1.4 The procedure and the steps of dam risk assessment in France

The Safety Review Risk Assessments, as laid out in the French regulations, refer explicitly to a risk analysis and the associated methods of operational safety. The methods of analysis, including the assessment of safety and the stakes are selected by the dam owner and his risk analyst, according to the characteristics of the dam to be studied.

Initially, they include a functional analysis of the analyzed system, including an external functional analysis focusing on the interactions with the dam's environment and an internal functional analysis focusing on the system itself. This first step leads to a definition of the functions performed by the dam in its environment.

The second step is an analysis of the failure modes, which examines the causes and the effects of failures of the dam's functions.

The third step is to represent scenarios using tree methods, which consist of linking the failure modes according to a functional sequence until the occurrence of the accident.

The last step concerns the risk assessment. For each scenario, the Safety Review Risk Assessments determine the probability of occurrence, the intensity, the kinetics and the duration of its effects (released flows and volumes) and the severity of the consequences in the concerned areas. An analysis of the propagation of the dam break flood wave is provided at least for structural failure scenarios leading to an uncontrolled and damaging release of water. The different accident scenarios are positioned in relation to each other according to their probability of occurrence and the severity of the consequences, taking the impact on human and material issues into consideration.

The assessment of a scenario's probability of occurrence is often carried out semi-quantitatively based on classes of probability. Sometimes it is assessed quantitatively including probabilistic models, particularly to assess natural hazards. In the assessments, the expert's judgement is strongly present, particularly for assessing failures for which the statistical data is often insufficient.

The analysis of the criticality combines an assessment of the probability of occurrence and that of the severity of the consequences on the stakes for each accident scenario. It is usually produced using criticality grids. Tolerability criteria are not imposed in the French Environment Code and are left to

the appreciation of the owner and his risk analyst. The criticality therefore appears in French practices as a subjective notion for which the levels of acceptability are not defined in the regulations.

Risks analyses in France are carried out by multi-skilled teams, including different engineering specialties – risk engineering, civil engineering, geotechnics, hydrology, hydraulics, electromechanics, etc. – the dam owner and the dam operator, the different service providers (dam monitoring, etc.). This synergy is important for collecting all the information relative to the dam and its equipment, for assessing scenarios and for defining the risk reduction measures.

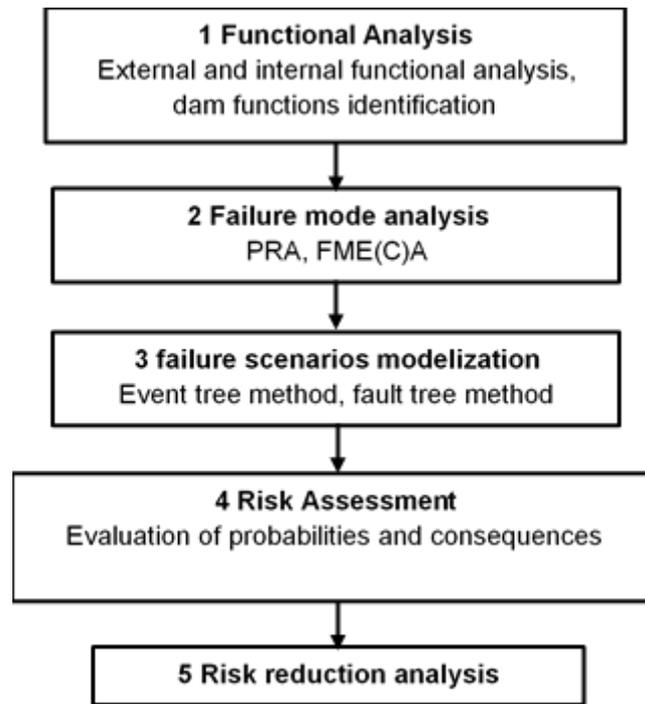


Figure 1.5: The risk assessment process in France

1.5 Positioning French Safety Review Risk Assessment practices relative to international practices of dam risk analysis

The French term *étude de dangers* (Safety Review Risk Assessments – SaRRA) comes from the terminology used in the high-risk industries in France. We would call them “risk assessments” in international practice, one component of which is the risk analysis.

On an international level, risk analyses emerged in the 1980s in the USA under the impulsion of federal agencies in the aftermath of the disasters in Teton and Kelly Barnes. In other countries, it was mainly Australia, Canada and Great Britain that developed methodologies in the 90s. All these players developed guides and tools to help practitioners to use risk analysis, with relatively frequent developments up to the last few years. However, apart from a few exceptions, there are no regulatory statements requiring the use of risk assessment, which is a significant difference compared to the context in France.

The risk analysis practices used abroad have differences, but we can find points in common and compare what is similar to, or different from, French practice.

The functional analysis is present everywhere and is distinguished only by the level of detail that some studies can go into. The analysis of failure modes is also often more detailed than the average French practice, with frequent use of FMECA.

However, there are differences as regards the representation of failure scenarios: international practice is focused on the structure's potential failure modes (PFMA) and seeks to quantify their probabilities. We thus find detailed analyses on the internal erosion processes, the stability of dams under normal or extreme loading cases, submersion during periods of flooding, etc. For some of these failure modes, the event tree method is used to model scenarios. French practice is different as it first identifies the damaging events through a Preliminary Risk Analysis (PRA) or, less frequently, through an FMEA, which include the cases of total or partial failure of the dam, as well as operating accidents where the consequences were deemed unacceptable. The scenarios are then modelled using a fault tree or, less frequently, an event tree, identifying the events and/or processes that could lead to these accidents. Both methods have their advantages and disadvantages. In theory, the French practice allows all the factors contributing to the damaging events to be taken into account more easily, in particular the organizational and human factors. It also allows "safety barriers" to be positioned on the branches of the fault tree so the effects of these barriers can be visualized on the propagation of events that could lead to a damaging event.

Another major difference is in the risk assessment and the assessment of the scenario's probability. They are essentially quantitative in international practice whilst French practice usually chooses a semi-quantitative assessment (determining a class of probability). International practice therefore usually uses FN type graphs and positions the different scenarios on them as precisely as possible. The assessment of the consequences on a dam's population is therefore very detailed, with models that can be very sophisticated for assessing the potential number of victims, whilst French practice consists of assessing the number of people exposed. There are two explanations for this major difference: in some countries, dam classification is based on the potential consequences of a failure and it is therefore relevant to evaluate them as accurately as possible. Also, the societal acceptability of a failure scenario is sometimes defined by its position in the zones of acceptance or not on FN type graphs. It can be noted, however, that currently the decision criteria are rarely based directly on the results of the risk analysis (approach called "risk-based decision making") but follow an "RIDM" (risk informed decision making) type process in which decisions are made taking risk estimates into account as well as numerous other contributing factors such as the uncertainty of the analysis itself, the results of the determinist studies, the regional and national contexts, etc.

In France, dam classification does not depend on the consequences of a failure, but on the dam's geometry and the reservoir volume. Nor are there formal rules regarding the societal acceptability of failure scenarios and, in this sense, we are closer to a RIDM approach. The consequences are assessed using the usual methods (1D or 2D flow models, quantification of impacted areas and populations). The results are used to position the accidents in a criticality matrix which facilitates their inter-comparison and the prioritizing of risk reduction decisions when that is deemed necessary.

2 The input data for risk analysis

2.1 Introduction

The aim of this chapter is to specify the nature of the data that is to be collected and produced to carry out the analyses.

French practice in Safety Review Risk Assessments provides for collecting data in the following form:

- The structure's general data, including the descriptive data and data on its operational organization;
- Data on the natural hazards;
- The data from specific inspections and diagnoses planned when carrying out of the Safety Review Risk Assessment. (Defining/introducing a diagnosis of the condition)

These points are developed in the next part of the chapter.

2.2 Collecting input data

2.2.1 Descriptive reference data for the structures and equipment

- Characteristics of the reservoir;
- Geological and geotechnical data: summary report of the geotechnical surveys, mechanical characteristics of the foundation soils and construction materials, acceptance report for the excavation bottom, reports on injection work and/or other sealing systems, stability study for the banks of the reservoir ...
- Design notes for the civil engineering and gates, with the assumptions used for the design: mechanical characteristics of the building materials, loading assumptions, calculation method used, the safety coefficients obtained for the overall stability and internal resistance...;
- Dimensioning plans for structures and equipment;
- Specific technical studies: hydrology, seismic hazard study, hydraulic study of the structures, conveyance of gates, sediment transport, etc.
- Single line diagram of the dam power supply,
- Diagrams and/or operating instructions:
 - For the gate control modes;
 - For the automatic monitoring systems (level measurements, development and distribution of alarms, etc.);
 - For the automatic control systems (Dam PLC, etc.).
- Reports on the filling;
- Reports and as-built files mentioning the acceptance and qualification tests of equipment and functions.

This data will have been updated and modified over time, for example, the hydrology or the seismic risk, the flood operating levels, the conveyance of the gates... the establishment of an up-to-date status of this reference data is essential.

During the collection phase, it is also necessary to focus on any maintenance and modification work on structures and equipment, with the associated drawings and studies that may have led to an alteration of their use, the dam's functions or the operating procedures. In particular, this means retrieving reports on substantial maintenance or repair work (repair of the dam sealing, etc.), modification work (addition of an emergency spillway, etc.) and experts' reports and reports on work carried out after an incident or a high-risk situation to improve safety (for example, repairing the gates or the operating system,...).

Descriptive data on the issues that may be impacted by the dam and its operation are also collected: people activities, how the region is occupied, strategic zones, etc. For example, it may be interesting to gather the regulations or decisions that impact the structures' operation, the conditions of access to the structures and the river, as well as any local decrees that generally define the activities on, or on the edge of, the reservoir and any prohibitions.

Lastly, it is useful to be critical during the collection phase: validating the information and checking its quality in order to set up a reliable database is an essential prerequisite.

2.2.2 Operational, monitoring and maintenance data

The assessment of structure safety is based on accurate knowledge of the structure's behavior and condition in operation in order to assess its performance and detect any anomalies or damage. This is also necessary for analyzing the adequacy of the operation, maintenance, monitoring and measures carried out to maintain and/or improve the level of safety.

The required documents can be divided into three categories according to their frequency of production:

- Standard documents filled in continuously;
- Summary and analysis documents issued at a predefined frequency (annual, biennial, every five years or ten years);
- Exceptional documents issued after exceptional events (floods, earthquakes, etc.) or relating to incidents.

2.2.2.1 The operational data

This combines:

- an operator's journal containing a brief description of monitoring actions, special events (flood, earthquake) and work carried out;
- management elements for the structure, particularly during floods.

This data is listed in a **register** that is kept at the disposal of the supervisory regulator.

In case of an incident or an accident or a key event, the supervisory regulator is informed through an initial declaration and, if necessary, an **events report**. For example, for significant hydrological events, the Operator prepares a flood report.

2.2.2.2 The monitoring data

The required data is:

- A collection of the reservoir's hydraulic operating conditions
- Reports on:
 - the routine visual inspections carried out by the Operator
 - detailed investigations for regular monitoring of the structures' condition;
- monitoring reports or behavioral analyses;
- incident reports.

In French practice, these documents take the following form:

- the **surveillance report** includes a summary of the scheduled routine inspections and detailed technical inspections;
- the **monitoring report** drafted by a state-certified "Monitoring" consultant;
- an exhaustive **technical examination** together with a **safety review** carried out by a consultant certified in "Dikes and dams- studies and diagnoses", specifying the status of each of the structure's components;
- the **incident or accident reports** relating to people's safety or damage to property and that are declared to the regulator in compliance with the regulatory requirements. These events may relate to an operational action, the structure's intrinsic behavior or the failure of one of its elements. Those that have consequences for people's safety or have caused damage to property are known as "EISH" in France (*événements importants pour la sûreté hydraulique* – important events for hydraulic safety). Precursor events or near accidents are also recorded.

2.2.2.3 The maintenance data

Maintenance work can have a preventive, corrective or urgent character. Scheduled maintenance programs particularly concern periodic interventions such as operational tests (gate operation), maintenance of components, sensor checks. The result of these interventions is tracked and allows the level of reliability of the operation of certain elements and the protection systems implemented to be assessed.

2.2.3 Organizational documents and operational procedures

2.2.3.1 Organization

The SMS (safety management system) describes the organization put in place to ensure the structure's operation, its maintenance and monitoring in all circumstances, the means of information and warning in natural hazard situations (floods, earthquakes). This document is essential for the Safety Review Risk Assessment.

In French practice, the dam owner produces this document, the elements of which are directly integrated into Safety Review Risk Assessments in a chapter focusing on the Safety Policy and the Safety Management System.

2.2.3.2 Operational Procedures

The documents relating to the operational and monitoring activities of structures describe:

- The monitoring operations;
- The conditions for organizing and sharing information and structure management in normal operation and during floods;
- The operating methods of the mobile elements (gates) during tests, during floods or when emptying the reservoir;
- The procedures to follow in the case of unusual events (earthquakes, accidents, etc.);
- Accident prevention.

In French practice, this information is collected in the **structure monitoring instructions** and the **operational instructions during flooding**.

2.2.4 Summary of the collection of existing data

The preliminary stage of information collection is an essential element in the process since the completeness and quality of the data conditions the pertinence of the safety review and risk assessment. Even if it is often a tedious and relatively expensive exercise that can sometimes resemble the work of a real historian or documentalist, it is essential to allow sufficient time and means for this phase, to obtain input data that is fully usable.

One of the main difficulties of this collection phase is in appreciating the pertinence and quality of the data. A critical analysis requiring skills in the different fields concerned (civil engineering, hydraulics, geotechnical aspects, gates, etc.) as well as in risk analysis methods, is essential for judging the interest and quality of the data and identifying any gaps. It is the conclusion of this critical analysis that will allow an engineer to recommend studies or even additional work to be carried out in a judicious manner: stability calculations, surveys, hydrological studies, etc...

For a recent dam, the collection and analysis will usually be easier: well-archived data, in sufficient quantity, that meets the recent criteria relative to structure design and safety.

In the case of an old dam, the reference data (design assumptions, project drawings) is often more problematic to obtain. It may have been lost over time (change of owner, archives moved or destroyed, etc.) and is often incomplete or not very precise. The original drawings and the archive documents rarely allow a precise definition of the characteristics of the structures, their constitution, the construction method, etc. For the extreme case of very old dams, this reference data never existed, as structure design at the time was carried out without any clearly established methodology or rules and with a minimum of traceability. Similarly, the data on operation, monitoring and maintenance is often heterogeneous, incomplete and difficult to use as it stands. The uncertainty is often too considerable then to carry out the risk analysis correctly.

If the primary goal of the collection is to inform the risk analysis, it is also an opportunity to gather, sort, classify, archive, update and complete all the existing data. This inventory is precious for the structure manager who, once the studies have been carried out, has a complete, precise and reliable description of the dam and its operation, which will allow him to improve the operation and maintenance of his structure. The investment put into data collection is therefore largely justified, if this is made permanent (e.g. by carefully digitizing and archiving all the recovered documents).

When the collected data is insufficient and it is difficult for the structure manager to launch the investigations rapidly, the risk analysis takes the corresponding uncertainties into account and recommends, if necessary, investigations to remove them.

2.3 Identifying and characterizing natural hazards

All the natural hazards present around the dam and in its environment are identified, without prejudging their sensitivity relative to the safety of the dam at this stage.

The characterization of each hazard is based on the existing studies available on the studied structure in application of the regulations, best practices and guidelines, and taking the most recent observations and manifestations of the hazard into account. Where there is no existing reference for defining the hazard's expected dimension, a specific study can be carried out to inform the Safety Review Risk Assessment.

The main natural hazards considered systematically are:

- The hydrology and flooding of the catchment area supplying the reservoir,
- Earthquake.

Other specific site hazards can be considered according to situations:

- Risks of ground movements and avalanches, particularly around the reservoir,
- Wind,
- Lightning,
- Forest fires,
- Ice,
- Snow,
- Silting,
- And, for embankments, erosion of the banks and the morphological evolutions of the bed.

2.4 Examinations and diagnoses for assessing safety

To reduce the uncertainties of assessing failure scenarios and their consequences, Safety Review Risk Assessments for dams in France specifically provide for:

- Inspections of parts of the structures and equipment that are not monitored regularly so as to have a full and up to date "picture" of the status of structures and their equipment;
- Diagnoses of the status, behavior and operation of the different technical units studied in the context of the risk analysis. These are based on existing studies and possibly on additional studies in order to clarify certain assumptions or results of calculations.

2.4.1 The specific inspections

The aim of these inspections is to provide additional or missing information relative to what is already produced by the monitoring activities that are carried out on an annual or infra-annual basis. These are therefore specific inspections:

- of the structures and equipment situated in submerged zones or ones that are difficult to access;
- requiring special inspection methods and tests, or that generate considerable constraints and impacts on the uses, operation and environment of the dam, local residents, and dam-related economic activity.

The conditions for the success of these inspections are in their preparation (around 1 year, or even up to 3 or 4 years if emptying is required), and the prior definition of:

- a detailed list of the structures and equipment to be inspected,
- the expectations and aims of the inspections in detail: for example, measuring the thickness of a metal pipe to assess its state of corrosion, characterizing the state of cracking of the membrane of an upstream face, assessing the evolution of a sliding surface on a reservoir slope, determining a concrete's mechanical characteristics through coring and laboratory analysis, etc.,
- the operational conditions and constraints,
- the technical means and skills required to carry them out,
- the expected results of the inspections: photographic supports, videos, detailed plans of cracking, numerical results of measurements, etc.

Figures 2.1 to 2.9 below illustrate different types of inspections that have been carried out on dams in the context of risk analyses.

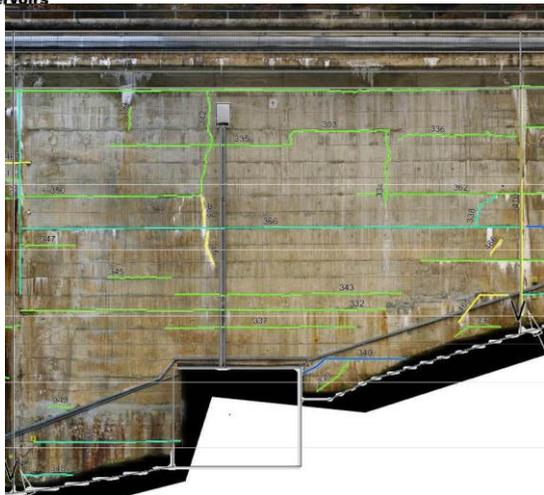


Figure 2.1 – Recording of state of cracking on an orthophotograph

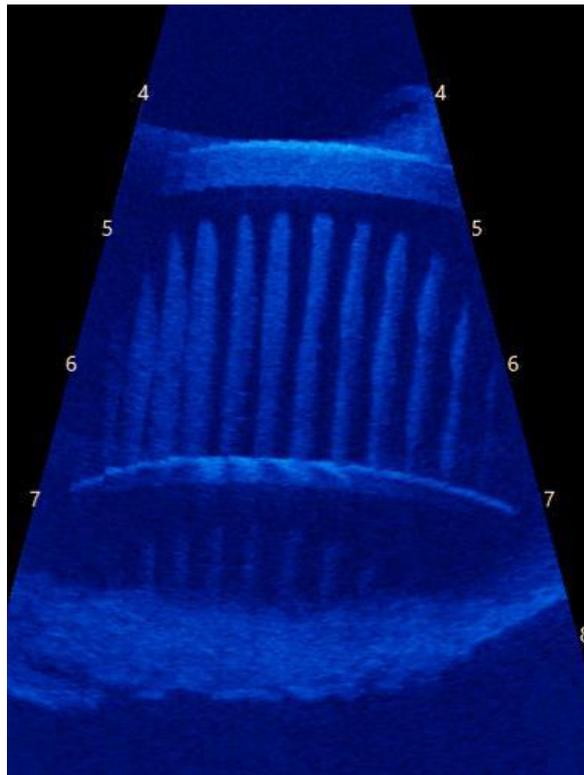


Figure 2.2 – Verification of clearance of the gratings of the water intake of a bottom outlet pipe using an acoustic camera



Figure 2.3 – Checking the position of water level alarm switches in a shaft



Figure 2.4 – Recording of damage to the sealant near an upstream joint using an underwater robot



Figure 2.5 – Camera Inspection of the condition of a drain



Figure 2.6 – Inspection of the state of the Galle chain of a spillway gate



Figure 2.7 – Inspection of the condition of the butterfly valve in a draw off pipe



Figure 2.8 – Inspection of the condition of the stainless steel connections between the jack and the oil-hydraulic plant



Figure 2.9 –Geological inspection of unstable blocks on one of the dam sides

2.4.2 Diagnosis of the status, design and behavior of the civil engineering structures

In the practice of risk analyses in France, the aim of these diagnoses is to assess:

- the structure's capacity to meet the expected loading cases: we naturally think of the dam itself, but this also concerns the civil engineering structures (including the fill structures) required for flood discharge (water intakes, weirs, chutes, guide walls, downstream basins, etc.) emptying, the gates supporting civil structures, etc.
- The evolution over time of their condition and performance, assessing the potential consequences of the damage, pathologies and abnormal phenomena.

This diagnosis focuses on the data collected and produced during the inspections:

- The study notes and reports on design and sizing, as well as the data describing the construction phase. The historical perspective is very important here for understanding the designer's initial choices, validating that the design assumptions are still acceptable, getting an idea of the care taken and the difficulties encountered during the construction and analyzing all the evolutions and modifications that occurred in the operational phase;
- The dam's current and past behavior, under the effect of ageing and the different stresses encountered since its impounding, characterizing the evolutions measured over time. This analysis is made using all the available monitoring data, particularly that acquired during the first impounding, or even during the works phase, if it can be recovered;
- Any defects and degradation of the structures noted during technical inspections and the losses of performance noted during specific inspections and analyses (for example, laboratory analyses of the characteristics of materials or soils, camera inspections of the condition of the drains, etc.), the evolutions of the characteristics and consequences of the threats present in the studied zone;
- The consequences observed following rare events or unusual stresses of the structures: after an earthquake, after floods, if an unusually high water level is reached, during a period of exceptional cold, during emptying, etc.

Additional studies may be necessary when the available data does not allow a diagnosis with an acceptable level of completeness and certainty to be established. For example:

- On the characterization of natural hazards: hydrology, earthquake;
- On the justification of structure safety factors relative to the different loading cases or potential failure modes;
- On the design of a concrete plug in an old gallery.

2.4.3 Diagnosis of the condition and operation of the hydromechanical equipment

This diagnosis concerns the mechanical components that carry out a safety function: gates, kinematic chains, jacks, etc. Its aim is to assess:

- Their capacity to resist the stresses and operate without damage in the different operational configurations envisaged;
- Their operational reliability in the different cases of use they are intended for;
- The evolution of their condition, assessing the potential consequences of the degradation observed (particularly phenomena of corrosion and fatigue).

For old structures, where equipment has been replaced or modified, the diagnosis is restricted to the equipment in service at the time of the analysis.

The diagnosis of the condition of the electromechanical equipment is based on the data collected and produced during the inspections, analyzing in particular:

- The study, design and sizing notes, as well as the production control and acceptance test reports. Knowledge of the workshops or production plants can provide useful information on the processes used and the quality of manufacture of the different elements;
- The defects and degradation observed during visual inspections, as well as the results from the periodic tests carried out by the operator. The drift of parameters measured during tests (opening/closing times, actuating forces of the jacks or current of the electric motors, filling level of the pressurizing chamber for opening a float operated gate) can make it possible to detect precursors of future incidents;
- Operating incidents and equipment failures encountered in normal operational: unintentional openings or closings, failure of a jack, a handling rod or a hydraulic circuit ... and the actions carried out afterwards;
- The assessment of the safety elements' operation in the event of rare events or unusual stresses: after an earthquake, after flooding, if an unusually high level is reached, during a period of severe cold or freezing, etc.

Additional studies may prove to be necessary when the available data does not allow a diagnosis with a level of acceptable completeness and certainty to be established. For example:

- Justification of the safety margins available for the strength of the gates and of the safety pipes following loss of thickness due to corrosion;
- Verification of the discharge capacity of a bottom outlet that has been modified.

2.4.4 Diagnosis of the status and operation of the safety element control systems

This diagnosis concerns the control system of safety equipment systems, with the aim of assessing:

- The operational robustness and reliability of the monitoring systems detecting and transmitting information to a PLC and/or the operator with a specific purpose, for example: gate operation, stopping pumping, etc.;
- The availability and possible redundancy of sources of energy needed to operate the dam's safety elements and systems. This concerns the electrical networks, the back-up electricity units, the batteries, etc.;
- The operational robustness and reliability of the control system and protection of safety equipment. This concerns the control rooms and cabinets, the notching to limit opening, the emergency stoppages, cabling and sensors (reservoir level, opening indicators, torque limiters, etc.).

All these systems have generally undergone numerous evolutions in design and technology (optic fiber or GPRS link transmissions), as well as modifications and replacements of software and components. Updated technical and functional diagrams of the systems and discussions with the operator are often useful for a good understanding of their operation in the different operational configurations envisaged.

The diagnosis is based on the data collected and produced during inspections, to analyze:

- The design of the different systems, with a careful eye on any redundancies and common modes that exist;
- The results of monitoring actions and periodic controls;
- The operating incidents and equipment failures encountered in normal operation where safety issues are at stake: a sensor's failure to detect an event, an error in water level measurement, a defective reservoir high-water level switch, a failure to transmit alerts, frequent losses of power supply to the safety equipment, a back-up generating unit that is not working, unexpected behavior of a dam PLC... and the actions carried out afterwards;
- The results of their operation following changes in operating instructions during rare events or unusual stresses: during flooding or when an unusually high-water level is reached, etc.

Additional studies are infrequent in this area, but may prove necessary, for example:

- To justify the correct power capacity of an electric motor;
- To check the operational autonomy of a generating unit.

3 Functional analysis

3.1 Introduction

The functional analysis is a procedure that consists of identifying, ordering, characterizing, prioritizing and/or valuing functions. It describes the uses of the studied dam – water storage, hydropower production, flood limitation, low flow support, etc. and it defines the functions of the different components as well as the interactions between the dam and its environment.

A functional analysis is generally carried out in three main steps that include:

- A description of the system studied and its environment;
- The internal functional analysis;
- The external functional analysis.

The aim of the functional analysis is therefore to obtain:

- A precise description of the dam, its components and sub-components, and the links between the structure's components and environment;
- a list of the main technological functions of each component and sub-component.

The information obtained through the functional analysis serves as a basis for the application of failure modes search methods (chapter 4) but also for appreciating the consequences of these failure modes.

The functional analysis uses the input data described in chapter 2, particularly the data relating to the description of the structures and their components, and that relative to the operation.

3.2 Definition of the system studied and its environment

3.2.1 The analysis area

A prerequisite for the functional analysis is a definition of the study area which includes the environmental elements of the reservoir and the dam that can act as stressors or potential issues:

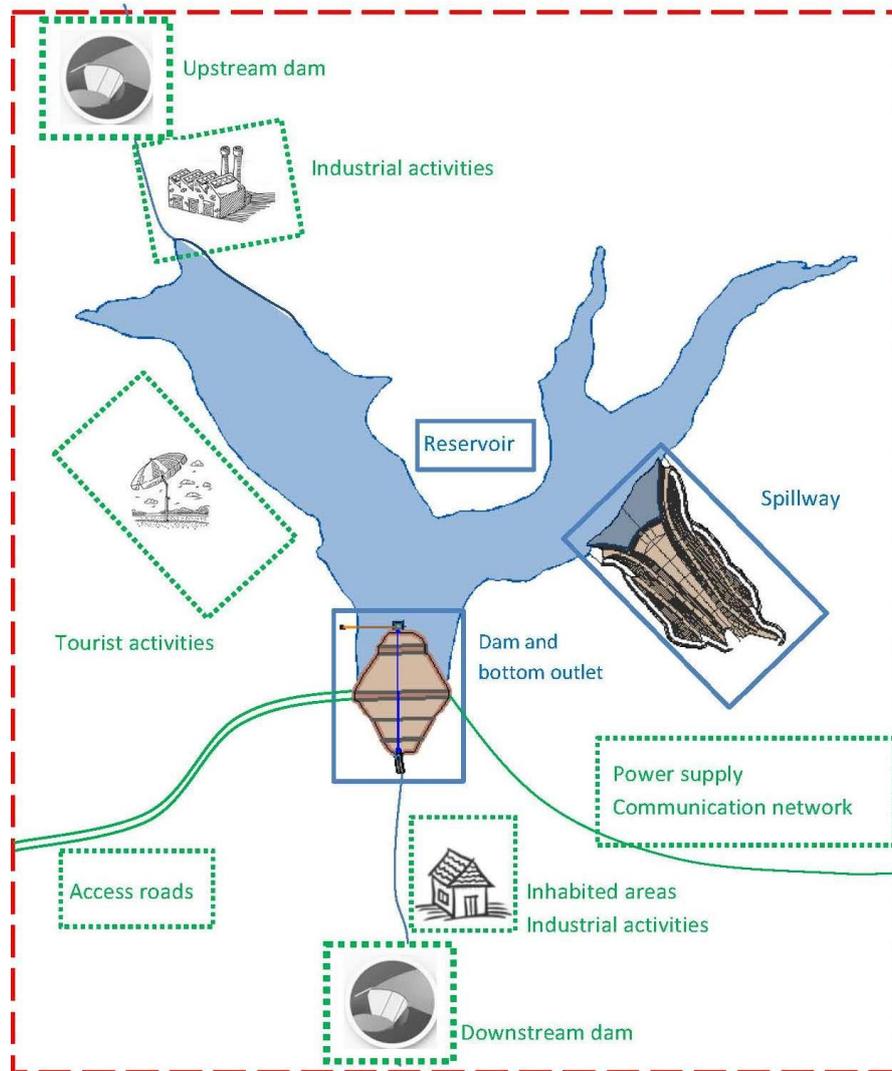


Figure 3.1: Illustration of the analysis area (perimeter and its environment)

- The areas in the environment of the dam and reservoir (mainly the bottom and banks of the reservoir and the foundations, supports and sides of the dam and the reservoir) which participate in or can influence the reservoir's functions, the passage of the water and the structures' stability;
- The downstream and upstream stakes that are likely to be impacted by an accidental event linked to the dam:
 - The inhabited areas and sensitive infrastructures (school, hospital, etc.);
 - The dams upstream and downstream;
 - The industrial and agricultural activities, with attention paid upstream to activities that could cause jams and downstream to classified installations;

- Tourist activities, fishing and hunting;
- Communication routes and transport infrastructures;
- The structures and equipment situated near the dam or the reservoir that are likely to influence the functions listed above. They can act unfavorably (as a stressor) or favorably (as a barrier);
 - The access roads: the cutting off of one of the access roads to the dam or the only access road can be a major issue (impossibility of getting to the structure rapidly to operate the flood gates, etc.);
 - The power supply: a supply defect could make it impossible to operate the safety elements normally;
 - Certain elements can also act as a safety barrier, like the backup supplies: secondary electric line, generating unit, possibility of operating the safety elements manually;
 - The monitoring systems and automatism and the dam's telecommunications links: the failure of this equipment could lead to a problem with detecting a defect or transmitting alarms to the operator;
 - The plant equipment attached to the structure's service function but not included in the perimeter of the internal functional analysis since it does not constitute a safety function.

3.2.2 The analysis perimeter

The analysis perimeter for the functional analysis includes:

- The dam and all the associated structures and equipment that contribute directly to the safety functions;
- The dam body, with its foundation and its abutments, as well as the structure's sealing and drainage systems. This can also include the structures right next to the dam:
 - That participate directly to the stability of the whole dam: a hydropower plant at the dam toe, for example,
 - Or that constitute a "dam" themselves: a hydropower plant right next to the dam that blocks the river.
- The spillway and bottom outlet, which can each be broken down into different sub-components:
 - The civil engineering structure, particularly in the case of structures offset from the dam,
 - The gates: tainter gates, fixed wheel gates, etc.,
 - The gate operation kinematic and energy chain: for example, a Galle chain winch, chain of rods or hydraulic jacks, etc.,
 - The gate control system: gates operation location (local and/or remote, with or without view of the gate) and control method (for example, action on push buttons of gate control cabinet).

- The pipes and structures crossing the dam, its foundation or its abutments or the sealing systems: this might be an old diversion tunnel that has been temporarily closed with a concrete plug or a metal bottom bulkhead or even an environmental discharge release system.

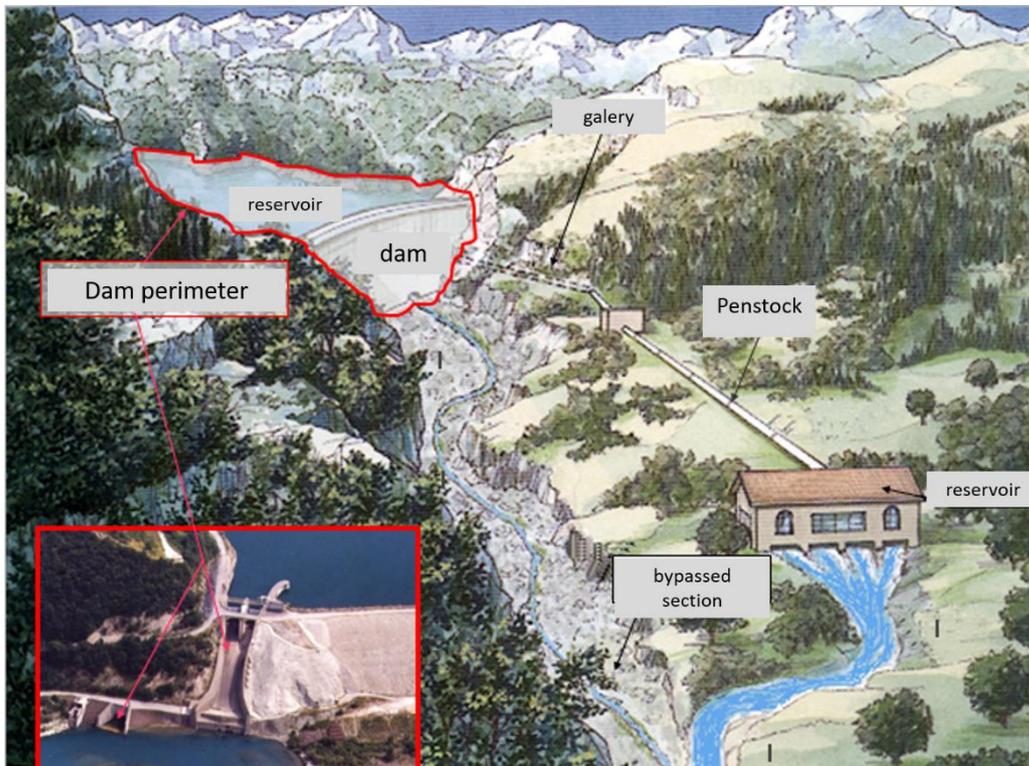


Figure 3.2: Illustration of the analysis perimeter

3.3 External functional analysis

The aim of the external functional analysis is to describe the interactions between the structure's environment and the dam itself in such a way as to determine the dam's functions. By 'environment of the structure', we mean all the elements situated upstream and downstream of the structure and with a link to the subject of the risk analysis. This link can be established according to two main themes:

- The factors of external aggression of the structure or the hazards;
- The potential safety issues.

The interactions between the environment and the dam are analyzed considering the following functions:

The principal functions linked to the safety of the dam:

- The dam holds the water;
- The flow downstream of the dam is controlled;
- The level upstream of the dam (in the reservoir) is controlled.

Other main functions exist without being generally studied:

- The dam carries out the function of “production”: hydropower, water supply for irrigation, low flow support, etc.
- The dam allows environmental discharge to be maintained just downstream of the dam.

Parallel to this, we can distinguish **the technological functions** (or *constraint functions*), which respond to an external constraint imposed by the environment. A certain number of these functions are listed below:

- The dam must resist the water’s actions (uplift, hydrostatic thrust, infiltration/seepage, releases from the dam upstream);
- The dam must resist earthquakes;
- The dam is monitored and maintained to ensure its safety;
- The dam is powered by electricity;
- The dam is accessible to the operating and maintenance staff in all circumstances and in perfect safety;
- The dam can be operated during unusual climatic events (fire, freezing, snow, wind);
- The reservoir’s emptying rate is controlled relative to the sliding risk of a structure upstream.

The collection of these elements is essential for the risk analysis and the assessment of the failure scenarios (chapter 6).

The rendering of the functional external analysis can be in the form of a Function block diagram, but some Safety Review Risk Assessments do not formalize the external functional analysis and give the main functions linked to the structure’s safety directly.

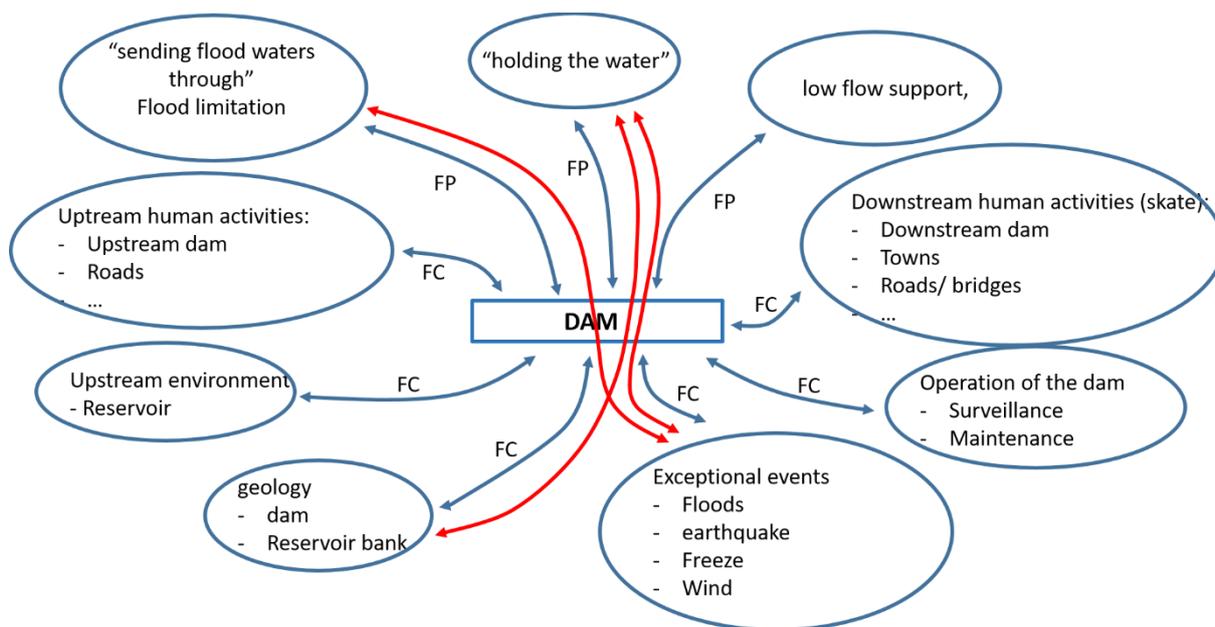


Figure 3.3: Illustration of a summarized external functional analysis in the Safety Review Risk Assessment

In this representation, we distinguish:

- The dam's **main functions** (FP), two of which ("holding the water" and "sending flood waters through") are related to the structure's safety level;
- the **technological functions** (FC) which interact with the structure either as constraints or as stakes.

Links are also established between the main functions and the technological functions: for example, the water retention capacity depends on the geological context through the watertightness both at the dam's foundation and just next to the reservoir.

3.4 Internal functional analysis

3.4.1 Principles of the internal functional analysis

The aim of the internal functional analysis is to identify the functions carried out by the components that make up the dam. It usually leads to two classes of functions being distinguished for a component:

- The **main functions** which represent the component's major function, the one it was designed for;
- The **technological functions** (also called **constraint functions**). They represent the functions that the component must fulfil to maintain its integrity and guarantee its performance. A degradation or failure of the technological functions often leads to a failure of the main functions. The technological functions mostly relate to the components' physical, mechanical or chemical characteristics, that have therefore been chosen or designed. They can therefore be classified into several categories according to their origin:
 - The mechanical stresses,
 - The hydraulic flows,
 - The intrinsic condition of the component.

Some Safety Review Risk Assessments do not distinguish this function typology and group them in a single category.

During the internal functional analysis, the level of detail of the study of the functions is on the scale of the dam component. However, it is sometimes necessary to study at a more detailed level, looking at the sub-components or the materials making up the components.

3.4.2 Illustrations of practices for the internal functional analysis

The result of the internal functional analysis is represented either in the form of a summary table, sometimes called the functional analysis table, or as a diagram. These summary elements include the functions of each component previously defined in the internal functional analysis.

Example 1:

This example shows an internal functional analysis for an embankment dam, including a breakdown on two levels together with a description of the technological functions.

Component	Sub-components	Technological function
Embankment	Rip-rap	Protection of the upstream embankment against external erosion (waves, etc.)
	Upstream embankment	Contributes to stability of the upstream embankment (particularly during rapid emptying)
	Core	Contributes to structure watertightness
	Downstream embankment	Contributes to stability of the downstream embankment
	Downstream embankment	Resists internal erosion
	Upstream and downstream embankment	Resists earthquakes (stability, liquefaction)
	Foundation	Resists internal erosion
	Foundation	Contributes to the stability of the downstream embankment
	Foundation	Contributes to structure watertightness
	Foundation	Resists weight of the embankment (load-bearing capacity)
	Draining materials: filter/ downstream blanket	Contribute to management of internal hydraulic flows / Resist internal erosion
	...	
...		

Table 3.1: Illustration of a summary of an internal functional analysis for a dam’s “embankment” component

For this type of structure, the breakdown to a single level of sub-component is sufficient. Each sub-component is easily identifiable as it constitutes elements from the structure’s design. For this approach, an internal functional analysis makes it possible to list the components that make up the structure and determine the interactions between components as well as between the components and the exterior environments.

Example 2:

For a dam equipped with a gated spillway, the internal functional analysis has adapted the level of breakdown into two or three rows, including the description of the sub-components' technological function.

In this example for the "gate" component, the level of detail has had to be refined, distinguishing the structure from the operating elements, particularly to break down the kinematic chain of the gate operation. This breakdown detail is necessary because it allows failures on different levels to be distinguished.

Main component	Sub-component	Sub-component	Sub-component	Technological function
Gated spillway	Tainter gate	Gate body	Apron	Holding the water
			Arms	Transferring stresses
			Axis	Allowing rotation Transferring stresses to civil works
		Operating elements	Jack	Allowing gate movement
			Hoses	Transferring actions
			Oil pressure accumulator	Allowing operating actions
			Control cabinet	Ordering actions
		Civil engineering structure	energy	Allowing operation
			Weir	Ensuring watertightness
			Upstream guide wall	Ensuring watertightness Guiding gates in operation
	Guide wall		Taking stresses on the axes	
	PLC	Chute/ski jump	Directing flows / dissipating energy	
		Level sensor	Measuring reservoir level	
		Gate position sensor	Showing gate opening status	

Table 3.2: Illustration of summary of internal functional analysis of a gated spillway

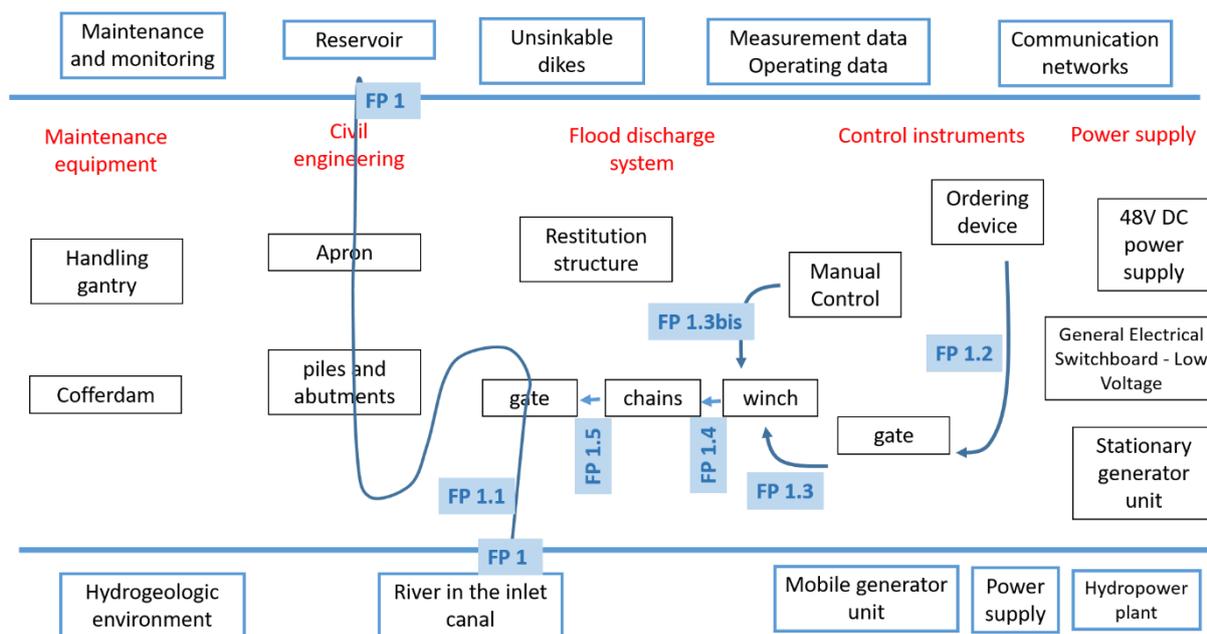
Example 3:

Diagram of summary of internal functional analysis

In this diagram, we note:

- At the top and bottom, the elements from the external functional analysis (blue box);
- The central part corresponds to the internal functional analysis with a breakdown into main components (in red) and sub-components.

Through this diagram, we can distinguish the different functions that link the sub-components to meet the main function of “holding the water”.



FP1	The reservoir dam diverts the water towards the power station
FP 1.1	The apron / piers / gates unit manage the flow of water
FP 1.2	The controllers control the 1 st level PLCs
FP 1.3	The 1 st level PLCs drive the winches
FP 1.3bis	The winches can be controlled manually
FP 1.4	The winches make the chains move
FP 1.5	The chains make the gates move

Figure 3.4: Illustration of a summary of an internal functional analysis for a river barrage dam

4 Analyzing failure modes and identifying feared events

The purpose of the methods presented in this chapter is to research and analyze failure modes and identify feared events. Two methods are practiced in France: the Preliminary Risk Analysis (PRA), which is the most frequently used method, and the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA).

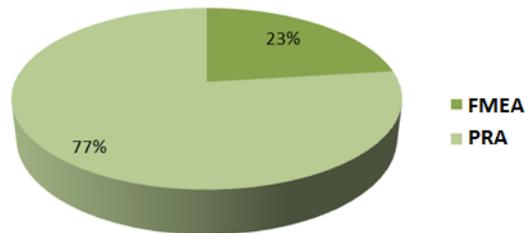


Figure 4.1: Distribution of methods for analyzing failure modes [DIEUDONNE et al. 2016]

4.1 Preliminary Risk Analysis (PRA)

4.1.1 Context - Use

The Preliminary Risk Analysis draws up an inventory that is as complete as possible of the failure modes of the dam and its safety equipment, for all conditions of operation. It is not a standardized method. The PRA is based on guidelines and on the available technical documentation, like [MORTUREUX 2002].

The PRA approach occurs prior to the construction of failure scenarios and is used as their input data. It constitutes a macroscopic analysis of the structure's risk situations and makes it possible to detect the feared events to be studied and the associated risks to be assessed. It also includes an initial assessment of the severity of the identified failures and a characterization of the events in terms of kinetics.

4.1.2 Principles of the PRA

The aim of the PRA is to identify all the dangerous phenomena likely to harm third parties. It is about making an initial sorting of events to retain or discard. The PRA therefore supplies the input data for the detailed modeling of failure scenarios but is not a substitute for that. Indeed, elements that are not identified in the PRA can be added during the construction of failure scenarios, which is a more detailed phase of the risk analysis.

The different stages when carrying out the PRA are the following:

- An expert identification of the failure modes of each element in the perimeter of the structure, in various given conditions of operation. This identification is based on the functional analysis of the perimeter elements;
- An estimation of the consequences of these failures, characterized by the kinetics and the extent of the effects of this failure. This estimation is qualitative. It is based on the experts' functional analysis of the structure;
- The choice of the failure modes to retain, regarding the severity of their consequences;

- An initial identification of the causes of the retained failure modes and the existing methods of prevention.

In practical terms, the PRA is put together in the form of a table that can take different forms according to the studies.

4.1.3 Using the PRA in Safety Review Risk Assessments – Examples

(1) Structure element concerned	(2) Operating conditions, condition, corresponding position	(3) Failure mode	(4) Dam function affected	(5) Consequences	(6) Post-accident kinetics	(7) Severity	(8) Type	(9) Pre-accident kinetics	(10) Remarks and justification for not taking CFE or EI into account	
						only for CFE minor, severe	CFE= Central Feared Event IE= Initiating Event for a CFE			
Dam	All conditions	Failure	Water retention	Dam break wave downstream. Sudden emptying of reservoir.	Rapid	Severe	CFE 1		<p>Earthquake has not been retained as a cause of dam failure. The dam is situated in a low seismic hazard zone (level 1) and feedback on the behavior of arch dams in earthquakes is overall very favorable. This element has therefore not been retained for the rest of the analysis.</p> <p>The failure of a penstock has not been selected either. The leak would be collected in the dam's drains and would be visible:</p> <ul style="list-style-type: none"> via the piezometers (inspected every two weeks, a sufficient period with the kinetics of the phenomenon of introduction of uplift following the loss of containment of one of the penstocks, which can lead to a dam failure); visually at the power station at the start of flooding. Also, 2 power station water level switches at the pump shaft generating an urgent alarm to bring down the head gate. <p>This element has therefore not been retained for the rest of the analysis.</p>	
Tainter gate, spillway	Normal / unsolicited closed	Failure	Water retention	550m ³ /s wave downstream. Lowering of the reservoir level	Rapid	Severe	CFE 2		<p>Flow of 550 m³/s (equivalent to the biggest known flood – before construction of the structure).</p> <p>Failure of the links (bearing support): inspections of the bearing supports are carried out every 10 years. The last technical inspection reports very good behavior (excellent condition).</p>	
		Unintentional opening	Control of flow variations downstream							Not selected because of the gate technology (tendency to close), power blocked (breaker open) (Inappropriate action: not retained because gate not solicited in normal operation).
		Failure to close	Control of flow variations downstream							Incoherent (gate already closed).
		Failure to open	Control of level variations in upstream reservoir							Incoherent (unsolicited gate).
		Unintentional closing	Control of level variations in upstream reservoir							Incoherent (gate already closed).

(1) Element of the structure concerned	(2) Conditions of operation, condition, corresponding position	(3) Failure mode	(4) Dam function affected	(5) Consequences	(6) Post-accident kinetic	(7) Severity	(8) Type	(9) Pre-accident kinetic	(10) Remarks and justification for not taking CFE or EI into account	
						Only for CFE minor, severe	CFE= Central Feared Event IE= Initiating Event for a CFE			
Tainter gate, Spillway	Flood / open on demand	Failure	Water retention	550 m ³ /s wave downstream. Lowering of reservoir level.	Rapid	Severe	CFE 2		(Flow: between 10 year flood and 100 year flood) Impacts from floating objects: presence of pontoons, leisure base, boats... which in flood could be carried rapidly with the flow to the gate and cause its failure.	
		Unintentional opening	Control of flow variations downstream	Maximum wave downstream of 550 m ³ /s. Lowering of reservoir level.	Slow	Severe	CFE 3		The loss of the power supply (opening of the breaker – for the failure of the automatic control system) has not been retained since, as the gate operation is done preferentially from the power station control room, the Operator would not be on site and the gate operation would be done with fast kinetics (also, as the lifts are not used during flooding it would take a very long time to reach the gallery at the crest).	
		Failure to close	Control of flow variations downstream	Upstream: lowering of the reservoir level. Downstream: no consequences (flow in river already established)				Not retained		
		Failure to open	Control of the upstream reservoir level	Heading up of reservoir level				IE2 of CFE 1 and CFE 2 (through heading up of reservoir (IE1))	Slow	IE that could, through rise of the water level of the reservoir, lead to failure of one of the gates or the dam by exceeding the gate's design levels or the dam's failure threshold water level.
		Unintentional closing	Control of the upstream reservoir level	Heading up of reservoir level				IE3 of CFE1 and CFE 2 (through heading up of reservoir (IE1))	Fast	IE that could, through rise of the water level of the reservoir, lead to failure of one of the gates or the dam by exceeding the gate's design levels or the dam's failure threshold water level. Human error possible (error of interpretation). The failure of both chains has not been studied (double failure) and the failure of a single chain would only cause the jamming of the gate. The loss of the power supply (opening of the breaker) has not been retained since, as the gate operation is done preferentially from the power station control room, the Operator would not be on site and the gate operation would be done with fast kinetics (also, as the lifts are not used during flooding it would take a very long time to reach the gallery at the crest).

Table 4.1: Extract of the PRA for an arch dam with a gated spillway

In this example, the elements of the analysis perimeter are listed first (column 1), with the conditions of operation (column 2). First of all, we note that the dam body is analyzed overall, without detailing the failures that could occur on the abutments, the arch or the structure of the gated structure.

The failure modes are then listed for each element and for each operational condition (column 3). These failure modes are defined by the panel of experts, based on their experience, the data collected and produced during the inspection of the structure and on a list of dangerous situations adapted to the dam. At this stage, the incoherent failure mode/ operational condition combinations are removed (see the combinations highlighted in red in the example above). Similarly, the combinations that do not present any particular consequences in terms of safety are not retained (see the combination highlighted in green in the example above).

The consequences of failures (column 5) and the kinetics (columns 6 and 9) are then identified on a macroscopic level. The direct and indirect consequences of the failures are described. For example, the failure of the dam would lead to a flood wave downstream: that is a direct consequence with post accidental kinetics that must be characterized. But the unintentional closing of the tainter gate during floods can lead to a reduction in the flood discharge capacity and therefore lead indirectly to a dangerous phenomenon: the rise of the reservoir level with a risk of overloading the gate and/or the dam. This is an indirect consequence for which the pre-accidental kinetics must be assessed. Two levels are generally distinguished for kinetics: fast or slow.

The severity of the consequences is then assessed (column 7) for failure modes with direct consequences. The initial approach is a binary scale, with "severe" consequences corresponding to a possible impact on third parties, or "minor" consequences corresponding to damage to equipment without any impact on third parties. If the severity of the consequences is deemed "minor", the corresponding failure mode is not retained in the rest of the study.

This approach means that only the most critical failure modes are retained (considering the intersection of severity and probability), which will then be studied in detail in the failure scenario modeling phase (column 8).

The failure modes with *severe direct consequences* are retained as Feared Events (FE). Failure modes with *indirect consequences* and fast pre-accidental kinetics are retained as Initiating Events (IE) of the feared event. When the pre-accidental kinetics are identified as slow at the PRA stage, the question of event frequency arises. So, in the case of a rare event presenting slow pre-accidental kinetics, the event is usually not retained for the rest of the study. This frequency is determined qualitatively and based on feedback on similar structures and equipment.

A second example of a PRA table is presented on the next page (Table 4.2).

Index des situations dangereuses sur un barrage en remblais				Estimation de la probabilité des scénarios							
	Organes / Éléments importants pour la sécurité	Situation dangereuse	Cause potentielle	Probabilité initiale		Justification	Barrières de sécurité existantes			Probabilité avec barrières	
				Fréquence	Niveau		N°	Intitulé	NC	Fréquence	Niveau
B A R R A G E E N R E M B L A I	Cavalier	Rupture du cavalier par surverse	Tassement point bas	x	x	Sans objet : le profil en long du barrage fait l'objet d'un suivi et d'un entretien régulier pour le rendre conforme au cahier des charges	x	x	x	x	x
	Talus amont	Rupture de l'ouvrage suite à un glissement du talus amont	Erosion du talus amont suite à une protection du talus insuffisante par rapport aux crues (blocométrie insuffisante suite au gel ou au vent - phénomène)	P=10 ⁻²	3	Probabilité de la crue à l'origine de l'accident potentiel	232	Surveillance courante et adaptée, analyse et actions	2	P=10 ⁻⁵	0
							202	Mise en œuvre d'une parade	1		
	Corps du barrage	Rupture par érosion interne	Formation de renards (anomalie géologique) (phénomène lent)	P=10-2	3	Probabilité de rupture en section courante sans les barrières de sécurité, Cf. calculs érosion interne	232	Surveillance courante et adaptée, analyse et actions	2	P=10-5	0
							202	Mise en œuvre d'une parade	1		
		Rupture par charge hydraulique excessive	Décolmatage du barrage lié à un entrainement de fines (suite à une onde de disjonction par ex.), associé à un mauvais drainage	x	x	Sans effet : Le barrage est stable y compris quand le parement amont n'est pas colmaté et donc pas étanche. Cf. calculs de stabilité	x	x	x	x	x
	Rupture suite à une agression externe	Animaux fouisseurs	x	x	Sans objet : Le barrage, par construction et par les matériaux présents, n'est pas sensible à ce genre d'agression	x	x	x	x	x	
	Talus aval	Rupture par érosion externe	Endommagement du parement aval suite à la présence de végétation	x	x	Sans objet : pas de végétation dans la partie inférieure du talus aval	x	x	x	x	x
		Rupture par perte de stabilité	Glissement du talus aval suite à un mauvais drainage	x	x	Sans objet : l'étude de stabilité des endiguements montre que le talus aval n'est pas sensible au glissement même en cas de drainage défavorable	x	x	x	x	x
		Rupture par surcharge physique combinée à un défaut de drainage	Passage sur le barrage d'engins de transport trop lourd sur la piste de risberme	P=10 ⁻²	3	Probabilité de rupture du barrage en section courante sans les barrières de sécurité	232	Surveillance courante et adaptée, analyse et actions	2	P=10 ⁻⁵	0
	202	Mise en œuvre d'une parade	1								

Table 4.2: Extract from the PRA for an embankment dam

In this second example concerning an embankment dam, the dam is divided into components that are studied independently (upstream rockfill toe, upstream slope, dam body and downstream slope). Then come the dangerous situation and the potential cause described briefly, which serve to determine the Feared Events. The explanatory elements retained for the rest of the analysis also appear in the “Justification” column according to their pertinence; there is particular reference to the elements that appear in the description of the structures, or in the studies associated with the Safety Review Risk Assessments to support the justification. Lastly, for the sake of convenience, the analyst has chosen to show the probabilities of the selected initiating events, which are studied at a later stage, as well as the selected safety barriers, on the same table.

To conclude, the PRA table can have different forms and levels of detail. The first example (Table 4.1) which concerns a gated arch dam, is a simplified PRA where the preliminary analysis is carried out on the scale of the analysis perimeter. The second example (Table 4.2), which concerns an embankment dam, corresponds to a full PRA where the analysis is done on the scale of the dam’s components. However, if the information shown and the level of detail can vary, the PRA always includes, for each component identified, the dangerous situations or consequences and their potential cause or failure mode, as well as the argument on whether or not to retain these initiating events for the rest of the study.

4.2 Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) and Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA)

4.2.1 Context – Standards – Uses

The FMEA method (Failure modes and Effects Analysis) constitutes a detailed method of analyzing the failure modes of a system’s components. It is sometimes carried out in the form of a FMECA analysis which consists of a FMEA analysis to which a specific analysis of the criticality is added. The FMEA method is widely used in the mechanical industry (spatial, nuclear, automobile, etc.). It is the subject of several standards in France, Europe and worldwide (NF X 60-510, CEI 812-1985, MIL-STD-1269 A).

4.2.2 Principles of the FMEA/FMECA

The FMEA method consists of a systematic analysis of a system’s components in the form of a table, to research the failure modes and their causes and effects. The failure modes constitute the failure of the system’s components to carry out their functions or their degraded or partial realizations, and the search for them is based on the results of the functional analysis carried out prior to implementing the FMEA. Through its systematic character, the FMEA guarantees the completeness of the analysis of the failure modes, as long as the functional analysis has been carried out fully. The implementation of the FMEA is produced in the form of a table showing:

- The system’s components;
- The components’ main and technical functions;
- The failure modes: non-realization or partial realization of function;

- The possible causes of the failure modes:
 - Linked to the contacts between the environment and the components,
 - Linked to the hydraulic interactions or constraints with the environment and the components,
 - Linked to the component's intrinsic condition.
- The possible effects of the failure modes:
 - On the contacts between the environment and the components,
 - On the hydraulic interactions or constraints with the environment and the components,
 - On the component's intrinsic condition.

4.2.3 Using the FMEA in Safety Review Risk Assessments – examples

In the field of dams, the FMEA method is cited amongst the reference methods for searching the failure modes with, in particular, the following references: [CEA, 2000], [ICOLD 2005], [IRSTEA 2010]. A few examples of using the FMEA in Safety Review Risk Assessments for dams in France are given below:

N°	Functional analysis (rank 1)			FMEA (rank 1)		
	Component rank 1	Main functions	Technical functions	Failure modes	Causes	Effects
1	Upstream shoulder	Ensuring upstream and core stability. Resisting mechanical stresses. Not sliding.	Resisting the hydrodynamic stresses (waves).	Sliding of the upstream shoulder – Overall failure.	Excessive seismic stresses, excessive horizontal or vertical displacement of the foundation and / or the interface.	Sliding of the upstream slope and the core.
				Erosion of the upstream slope.	Excessive wave action, excessive degradation of the rip rap on the tidal zone, loss of materials.	Erosion in the tidal zone.
2	Upstream drain-filter	Draining the water that has come through the core.	Ensuring the transition between the upstream shoulder and the core. Filtering the fines from the core.	Defective filtration (insufficient filtration).	Insufficient filtration.	Erosion or suffusion of the core.
				Failure of the drainage system (excessive filtration).	Clogging of the drain. Excessive water circulation, exceeding the drainage capacity of the upstream drain-filter	Reduction of the core's capacity to lower its interstitial pressures on emptying the reservoir.

Table 4.3: Example of application of the FMEA in a Safety Review Risk Assessment for a rockfill dam

This example (Table 4.3) shows how the FMEA method is applied to a rockfill dam with a clay core and presents an extract for two components: *upstream shoulder* and *upstream drain-filter*. In this example, the results of the earlier functional analysis are presented in the same table showing the main and technological functions. The failure modes are then obtained directly considering the non-realizations or degraded functions obtained in the functional analysis. Therefore, if the functional analysis is complete, there is no possibility of omitting failure modes, as the analysis is systematic. The causes

and effects of the failure modes are sought in the components themselves and in their contacts with other components and their environment. There too, the methodology of the search for the causes and effects of failure modes guarantees that no elements are omitted.

The FMEA is carried out by an Engineer who is a specialist in risk analysis, accompanied by a group of specialist Experts. This collective work makes it possible to produce simplifications in the analysis and only keep the realistic causes and effects for the dam studied in the FMEA tables, eliminating any unrealistic ones.

N°	Component	Functional Analysis		FMEA		
		Main function	Technological function / Constraint	Failure mode	Cause	Effect
3	Dam foundations					
3.1	<i>Dam foundations</i>	Transferring stresses to the ground Limiting water infiltration	Resisting mechanical stresses (deformation, punching, liquefaction) Resisting hydraulic stresses (internal erosion, infiltrations)	Deformation/Failure	Differential settlement Internal erosion Seismic stresses (liquefaction)	Loss of capacity to take up the mechanical stresses of the dam
3.2	<i>Sealing works (grout curtain)</i>	Improving watertightness in the foundation	Resisting hydraulic stresses	Excessive water infiltration	Displacement or deformation of foundations Dissolution, degradation of grout curtain	Infiltration towards downstream foundation
4	Water intake and outlet system					
4.1	<i>Upstream water intake structure</i>	Taking water from the bottom of the reservoir	Resisting the risk of obstruction	Impossible to transfer water	Logjams, silting	Impossible to empty the reservoir
4.2	<i>Upstream cofferdam</i>	Ensuring cutoff of the release flow Allowing passage of intake, outlet and emptying water	Resisting hydraulic and mechanical stresses	Gate blocked in open position Gate blocked in closed position	Lack of operation tests Failure of hydraulic operation system Deformation (earthquake) Advanced corrosion Lack of operation tests Failure of hydraulic operation system Deformation (earthquake) Advanced corrosion	Impossible to carry out work on the gates Impossible to empty the reservoir for emergency work or inspections
4.3	<i>Intake and outlet tower</i>	Houses the hydraulic equipment and the gate operating components	Resisting the mechanical constraints (deformation, failure)	Collapse of the tower and/or the footbridge	Degradation of the concrete / excessive seismic stress	Excessive deformation of the dam body

		Functional Analysis		FMEA		
N°	Component	Main function	Technological function / Constraint	Failure mode	Cause	Effect
4.4	DN700 butterfly valve	Allows passage of outlet water	Resisting hydraulic and mechanical stresses	Unintentional withdrawal of the valve	Failure of a component Operational defect (hydro control system failure)	Uncontrolled release of hydraulic flows downstream
				Gate blocked in closed position	Incorrect operation / malice Advanced corrosion Lack of operation tests Failure of hydraulic operation system Deformation (earthquake)	Impossible to empty the reservoir for emergency work or inspections
4.5	Outlet conduit	Allows passage of water to area downstream of dam	Resisting hydraulic and mechanical stresses	Obstruction of the outlet conduit Cracking, deformation or pullout of the outlet conduit, loss of watertightness	Logjams, sediment Mechanical stresses (earthquake) Degradation of joints, corrosion	Reduction of reservoir emptying capacity
4.6	DN500 Monovar valve	Regulation of the environment flow	Resisting hydraulic and mechanical stresses	Unintentional opening of the valve Valve blocked in closed position and/or regulation impossible	Failure of a component Operational defect (hydro control system failure) Incorrect operation / malice Advanced corrosion Lack of operation tests Failure of hydraulic operation system Deformation (earthquake)	Uncontrolled release of hydraulic flows downstream Impact on the aquatic environment downstream of the dam
4.7	Stilling basin	Dissipating the energy of the hydraulic flows	Resisting the hydrodynamic stresses	Unable to dissipate the energy of the hydraulic flows	Stilling basin undersized	Uncontrolled runoff downstream

		Functional Analysis		FMEA		
N°	Component	Main function	Technological function / Constraint	Failure mode	Cause	Effect
					Obstruction of the stilling basin	Reduction of outlet capacity
4.8	<i>Manual gate control system</i>	Ensure manual opening and closing of gates	Resisting exterior constraints (physicochemical stressors, freezing, etc.)	Defective control	Advanced corrosion Lack of maintenance of operating system Lack of operation tests	Impossible to operate gates

Table 4.4: Example of application of the FMEA in the Safety Review Risk Assessment for an embankment dam

In this second example (Tableau 4.4), the 15 m-high dam consists of a homogeneous embankment with a central chimney drain. The foundation's watertightness is ensured by a cut off trench and a grout curtain. The intake, spillway and outlet structures are grouped in a single tower-like structure made of reinforced concrete. Lastly, the spillway is a semi-circular morning glory. The FMEA method is implemented for each of the components identified in the functional analysis. The second example is proposed for two of these components (Tableau 4.4): *dam foundations* and *water intake and outlet system*. In this second example, we find the same principles of analysis: identification of the failure modes taken directly from the functions in the functional analysis, identification of the causes and effects in the components themselves and in their contacts with other components and their environment, using Expert judgement to keep only the information that is relevant to the dam being studied.

4.3 Summary of the methods of analyzing failure modes and identifying feared events

The two main methods applied in Safety Review Risk Assessments on dams in France are: i) the PRA method (Preliminary Risk Analysis – 77% of studies) which is based on a simple risk analysis based on expertise, ii) the FMEA method (Failure Modes and Effects Analysis– 23% of studies) which constitutes a more complete analysis of the failure modes. [Dieudonné et al. 2016]

The application of the PRA method is largely based on an expert assessment: the identification of the hazards is carried out using the experience and knowledge of a panel of Experts. We note that PRAs are generally based on a summary internal functional analysis and they then expose a first order of magnitude analysis by highlighting only the major failure modes likely to be encountered on the dams. In terms of practical feedback, one of the advantages of the PRA method is that they examine the risk situations. The method is pertinent for dams, insofar as the expert's judgement remains highly significant in determining a certain number of degradations and failures. It should be noted that, as there is no standardization of the method, PRA practices in Safety Review Risk Assessments in France show a great variability in the tables used and, therefore, the analysis produced. Some PRAs therefore appear very complete in their analysis of the failure modes and in the end are more like FMEA.

The FMEA method makes it possible to obtain a detailed analysis of a dam's failure modes. In a standardized context, its main advantage is the precision and quality of the analysis: indeed, the FMEA method constitutes a complete analysis of the failure modes of the dam's components after a quality functional analysis. It is therefore well adapted to a later complete or even quantitative analysis. The expertise serves during the implementation of the FMEA method, when simplifying unrealistic causes and effects for the dam studied. Its application is conditioned by the structural and functional knowledge of the dam and therefore depends on the quality of the functional analysis. Consequently, we note that this method is mainly developed in studies that present a complete and detailed functional analysis. Care must be taken to ensure that the functional analysis and the FMEA remain coherent, otherwise this can result in a loss of information and the omission of failure modes.

5 Representation of accidental sequences using a tree-based method

5.1 Introduction

The failure mode analysis methods described in the previous chapter (PRA and FMEA(C)) consider simple and independent failures of an element or a component of the system analyzed. Their implementation is based on tables identifying accidental sequences based on the causes. These methods are not adapted to taking combinations of several components or events in a failure scenario into account (technical, human or organizational). Other methods are available for taking these different types of failures and their combinations into account. They are based on a graphic visualization of the accidental sequences likely to occur on the structure. We call this a tree-based approach. In French practice, the methods considered are:

- The event tree method;
- The fault tree method;
- The bow tie method.

Using tree methods allows us to take into account a succession of failures or the simultaneous failure of several elements that can be independent or not, leading to an accident.

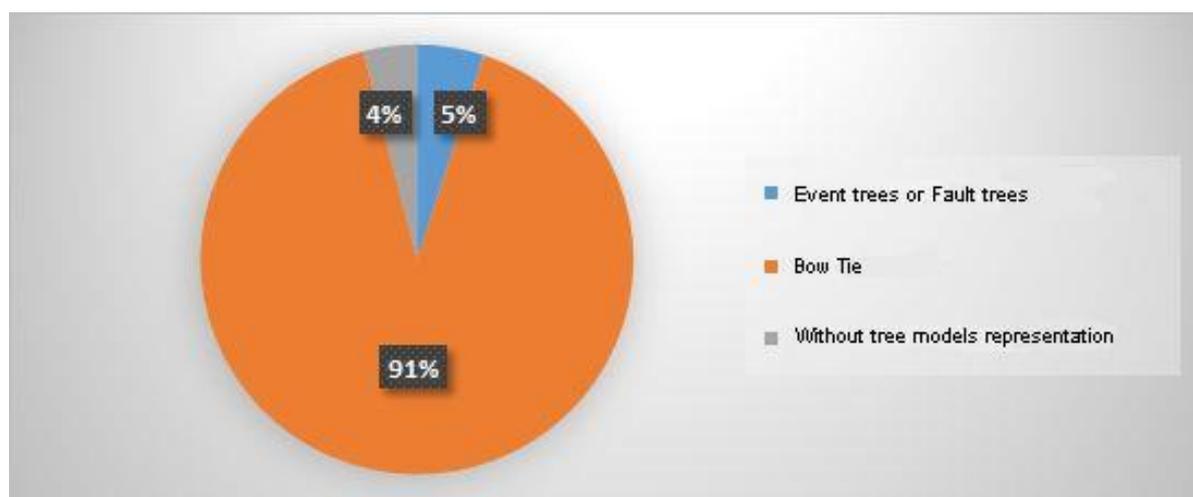


Figure 5.1: Distribution of uses of tree methods by managers in risk analyses (French feedback) [DIEUDONNE et al. 2016]

In France, nearly 91% of owners implement a bow tie type approach whose basic part is the fault tree. These bow ties are established on the basis of risk analysis tables that are carried out first by a work group (according to the methods described earlier: PRA, FMEA(C)).

5.2 Analysis using an event tree

The event tree method (sometimes called the cause-consequence method) was developed in the early 1970s to assess the risks linked to nuclear plants. It was then extended to other sectors of activity and finds its applications in the risk assessment of systems with approximately binary or discrete process and whose evolution depends on time. The sequence of the tree's events is inductive, from the initiating event to the final feared events (FE). It allows the processing of systems with a number of safety barriers. The goal of this method is to describe system operation scenarios based on an initiating event and to suppose the failure of a component or a part of the system to determine the resulting events. In this way, we determine the system's drift by envisaging the chain of failure modes through to the occurrence of a potential accident.

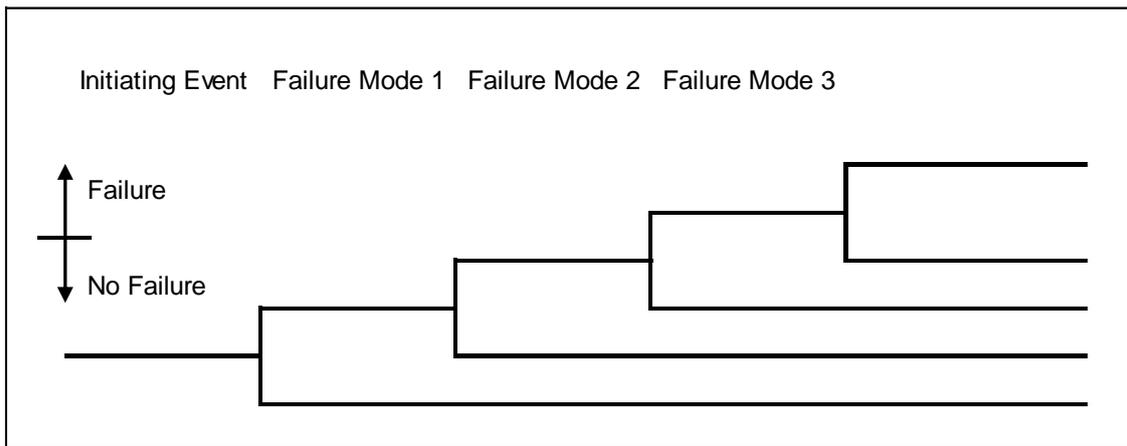


Figure 5.2: Principle of the event tree method

The quality of the scenarios obtained using an event tree depends on the quality of the identification of the safety functions planned to cope with the event. In practice, we note that the implementation of the event tree method is preceded by an FMEA(C) type analysis in order to ensure a complete list of failures.

The event tree method presents the interest of allowing an assessment of the probabilities of occurrence of the different scenarios through a semi-quantitative, as well as quantitative analysis, where the event tree actually constitutes a probability tree: it thereby allows the probability of a scenario occurring to be assessed using the product of the probability of occurrence of events and the probability of failure or operation of the identified security functions. In principle, using the FMEA method prior to applying the event tree method guarantees the independence of the successive events. The event tree method thereby makes it possible to follow a scenario's functional and chronological development and assess the influence of the barriers implemented on the scenario's frequency of occurrence.

In the field of dams, the event tree method is cited amongst the failure scenario modeling reference methods. We find the following references in particular: [CEA 2000], [ICOLD 2005], [IRSTEA 2010].

Example 1:

In this example applied to a rockfill embankment dam, the failure scenario linked to internal erosion in the dam core (insufficient filtration) has been modelled in the form of an event tree. Based on the initiating event, which is the presence of a hydrostatic load, this links the failure modes of the safety functions linked to the core's drain-filter system's capacity to the erosion resistance of the core and the downstream embankment. The safety barrier associated with monitoring drainage and visual surveillance was introduced into the tree, after checking that the operator had an adequate safety management system for analyzing, interpreting and intervening rapidly to make this barrier effectively efficient.

Initiating event	Spillway route a flood Ti	Dam crest withstand overtopping	Core : Withstand external erosion in case of overtopping	Probabilities Consequences
------------------	---------------------------	---------------------------------	----------------------------------------------------------	----------------------------

Probability : $p = x$
 break wave : $x \text{ m}^3/\text{s}$

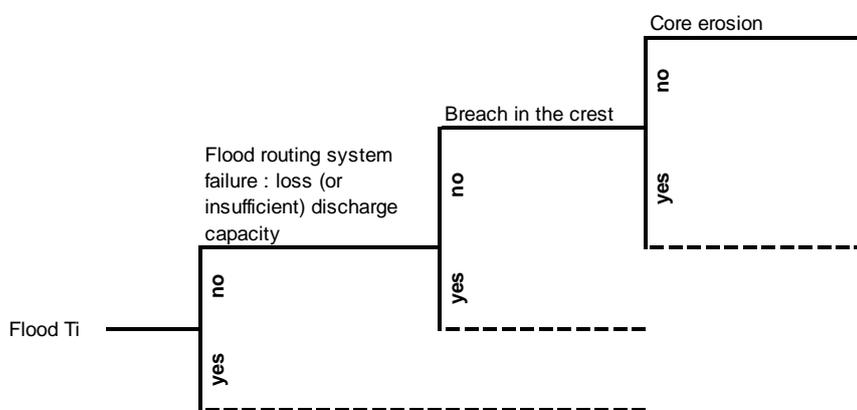


Figure 5.3: Example of an event tree relating to the internal erosion mechanism of a rockfill embankment dam

Example 2:

In this other example applied to an embankment dam, the failure scenario linked to internal erosion in the dam core was modelled in the form of an event tree. Starting from the initiating event, which is the occurrence of an exceptional flood, this links the safety function failure modes of the spillway system's capacity to the resistance to erosion by overtopping and the core's resistance.

Initiating event	Downstream Drain-filters : Filter fine materials passing through the core	Core : Withstand internal erosion		Downstream shell : Withstand internal erosion	Probabilities Consequences
					Probability : $p = x \text{ break wave} : x m^3/S$

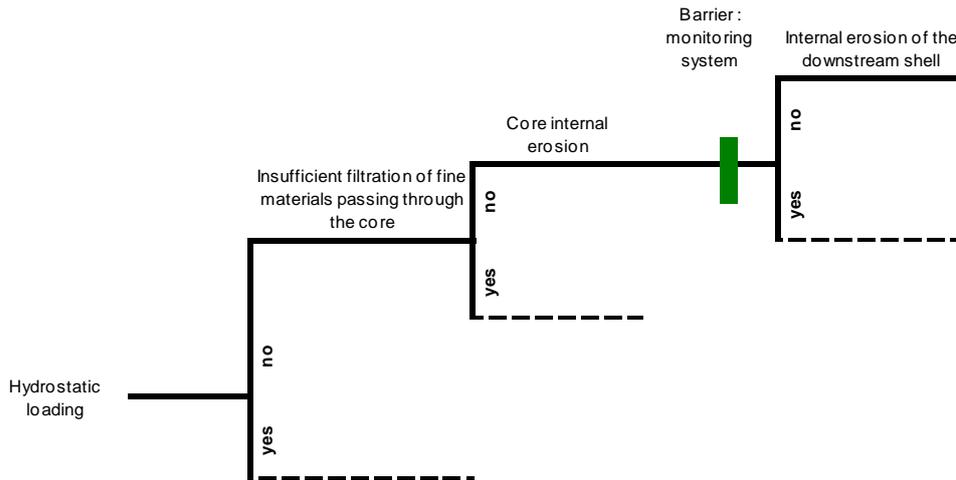


Figure 5.4: Example of an event tree relative to the “Exceptional flood” initiating event

To sum up, the event tree method presents the following advantages for applications to dams:

- based on a high standard FMEA, it is simple and intuitive to implement, following a functional logic;
- it guarantees a full list of failures, ensuring the completeness of the scenarios and their failure modes;
- it is well adapted to a semi-quantitative, as well as a quantitative analysis of the scenarios.

The potential disadvantages of this method are linked to its processing and the assessment of a large number of trees when the system to be studied has several components, to account for the different scenarios that could occur. Thus, the analysis may appear less synthetic than through a deductive approach to constructing scenarios.

5.3 Analysis using the fault tree method

The fault tree method (sometimes called the cause-consequence method) is a deductive analysis method. This approach appeared in the 1960s in the United States, particularly in the military and aeronautic field, then in the nuclear field.

It is a graphic representation of the possible combinations of events that lead to the occurrence of a *feared event (FE)* that has been earlier defined in a failure mode analysis (PRA or FMEA). The starting point of the construction of each tree is therefore the feared event itself. The principle is to then define successive levels of events in such a way that each one is a consequence of one or several events from

the previous level. The deductive process continues level by level until the detail of the analysis is deemed sufficient by the work group responsible for the analysis. These non-broken down events of the tree are called initiating events.

This type of graphic representation therefore highlights the relations of cause and effect. Logical operators (or doors) offer a precise definition of the links between events on different levels.

Function	Symbol	Description
“OR” DOOR		The output event only occurs if at least one of the input events is present.
“AND” DOOR		The output event occurs if all the input events occur simultaneously.

Table 5.1: The most frequently used logical links in fault trees

This technique is completed by a mathematical processing that allows combinations of failures and thereby quantifies or qualifies the occurrence of the feared event (see § 6.5.2).

When implementing the fault tree method, the elementary events must be independent from each other. This is not always the case, for example, with frequently encountered initiating events: the occurrence of a flood and an operator’s access issues to operate the opening of a spillway. Indeed, we can easily imagine that a flood will not only cause difficulties on the structure but on its whole environment as well.

In Safety Review Risk Assessments in France, this method is not often used alone. One example of fault tree (Figure 5-5) below illustrates a fault tree (in French) modeling the gradual total failure of an earth fill dam with all potential causes (disfunction of spillway, internal erosion, etc.)

The fault tree method has the advantage of offering an overall vision of the different failure scenarios, highlighting their causes and the logical links that exist between them and the safety systems. It is a simple method to carry out and implement, based on considerable in-field expertise.

The method’s difficulties are in the completeness and independence of the events included on the tree, as well as the risk of combining failures defined with different levels of details. For this reason, the method lends itself to a semi-quantitative analysis of scenarios involving considerable expertise and is not adapted to a probabilistic quantitative analysis.

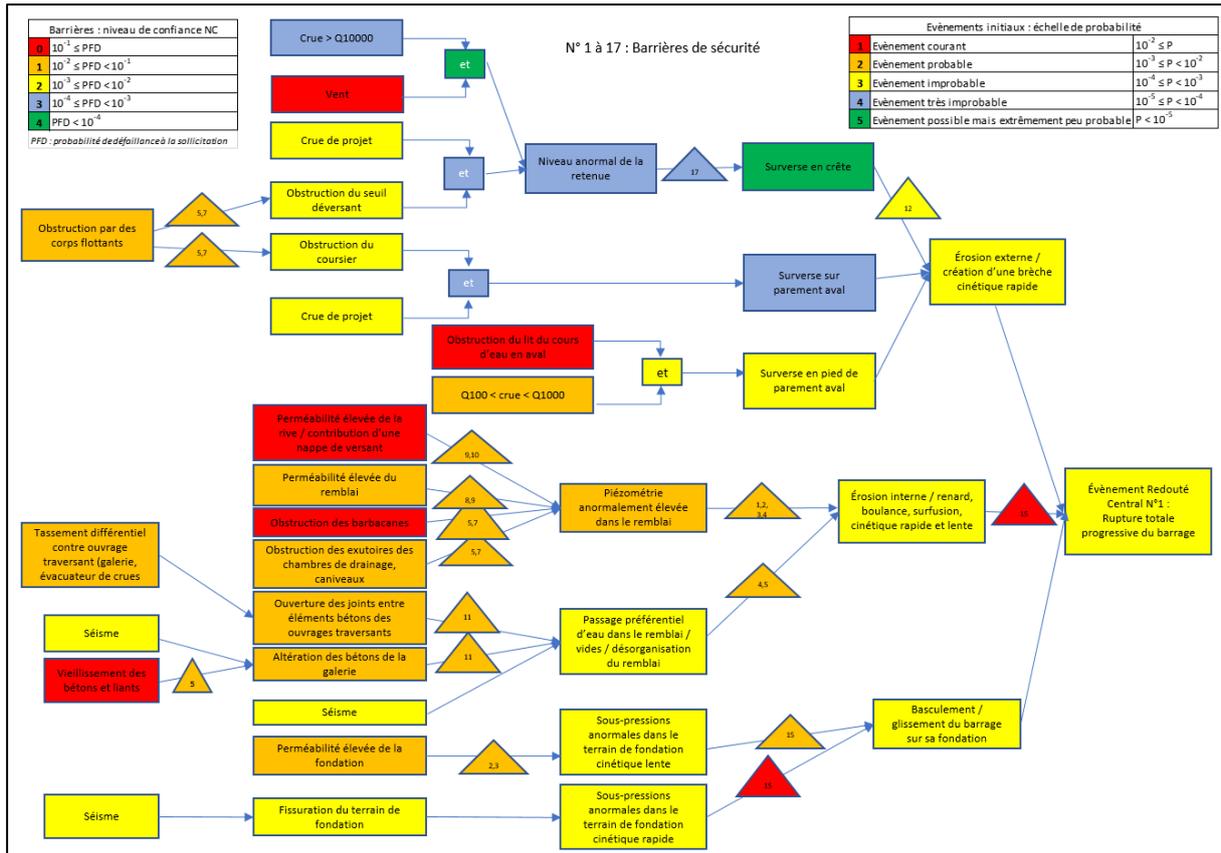


Figure 5.5: Example of a fault tree relating to the gradual total failure of the dam

5.4 Combined analysis using the bow tie method

The bow tie method was initiated and developed in the oil industry and is used in the European countries that have a probabilistic approach to risk management. [INERIS 2006, 2011, 2016; IDDIR 2008]

This type of graphic tool combines a fault tree and an event tree for the same Central Feared Event (CFE). In the bow tie method, CFEs are dangerous situations that mainly lead to a partial or total loss of physical integrity, or the dysfunction of the structure or one of its elements (for example the failure of a bottom or surface gate, the failure of a gallery plug, etc.). The CFEs are obtained by analyzing the failure modes (PRA or FMEA).

The representation of the fault and event trees has been adapted for the bow tie tool, their forms being slightly different from those described in the paragraphs above. The bow tie offers a global vision of the different accident scenarios by highlighting their causes and the logical links that exist between them and the safety systems.

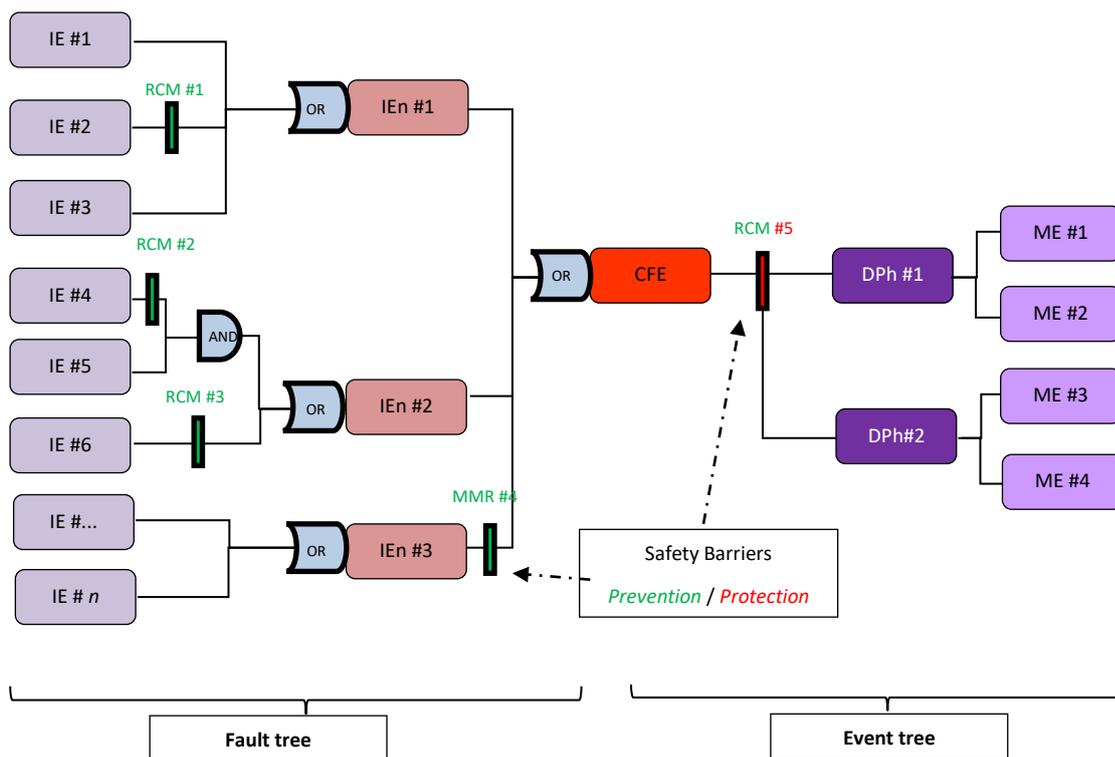


Figure 5.6: Principle of representation of accident scenarios using the bow tie method

The table below lists the elements identified in the figure above.

Designation	Meaning	Definition / Examples
IE	Initiating event	Initiating events can be primary failures of the system analyzed. For example, the ageing of materials, blows from debris, human operating failure, leaks on the hydraulic control systems, losses of power supply or transmission, or external aggressions such as floods, earthquakes, lightning or avalanches, etc.
IEn	Intermediate event	Intermediate events correspond to groups of several initiating events within the same family. Several examples can be given: external aggressions, equipment failures, human errors, etc.
CFE	Central Feared Event	This is the failure (or dysfunction) of the system analyzed (the structure itself or one of its elements: bottom gate, flood gate, gallery plug, etc.). In everyday language, the CFE can be called the "accident" (dam failure, failure of a gate, etc.).
DPh	Dangerous Phenomenon	A dangerous phenomenon is the direct consequence of the loss of confinement of the system. In the vast majority of cases for dams, it concerns the formation of a dam break flood wave of greater or lesser intensity
ME	Major Effects	This is about identifying: <ul style="list-style-type: none"> - The human stakes impacted (homes, establishments receiving the public, etc.); - The environmental stakes impacted (secondary intake, etc.); - The economic stakes impacted (dams downstream, industries, roads, etc.). <i>Note: the presentation of these types of effects on a bow tie is not systematic. These elements can be determined later (see, 7.2).</i>
RCM	Risk Control Measures	These are the safety barriers identified as contributing to reducing the occurrence of a CFE (prevention barrier) or limiting the effects of an accident (protection barrier). The safety barriers identified upstream and downstream of the CFE can be both technical and/or human measures based on a more or less robust organization of safety management.

Table 5.2: Meaning of events figuring in a bow tie

Bow ties use the principles of fault trees and event trees: failures in the dam are included in a fault tree and the consequences of CFEs in the dam's environment are included in an event tree. Thus, the left branch of the bow tie (fault tree) which processes the modeling of failures in the dam is considerably larger than the right branch (event tree) which processes the consequences.

Their elaboration requires considerable expertise in the field and they are built by a multidisciplinary work group. They make it possible to visualize:

- the scenarios likely to lead to accidents;
- the risk control measures or safety barriers identified as contributing to reducing the occurrence of accidents or limiting their consequences;
- and, as a direct consequence of the two points above, the critical paths with insufficient risk control measures

As a general rule, these representations are developed following an initial risk analysis carried out using the PRA and FMEA(C) methods. The task consists of taking the accidental sequences that contribute to the same CFE and positioning / grouping the different elements in relation to each other using logical connectors.

The following examples are representations used in the context of Safety Review Risk Assessments for dams in France. In certain cases, some initiating events (IE) of a CFE are qualified as "complex". They are then detailed on another graph (particularly on a fault tree), so as to keep a good readability of the CFE concerned. This is the case for the example shown in Figures 5.7 and 5.8 below.

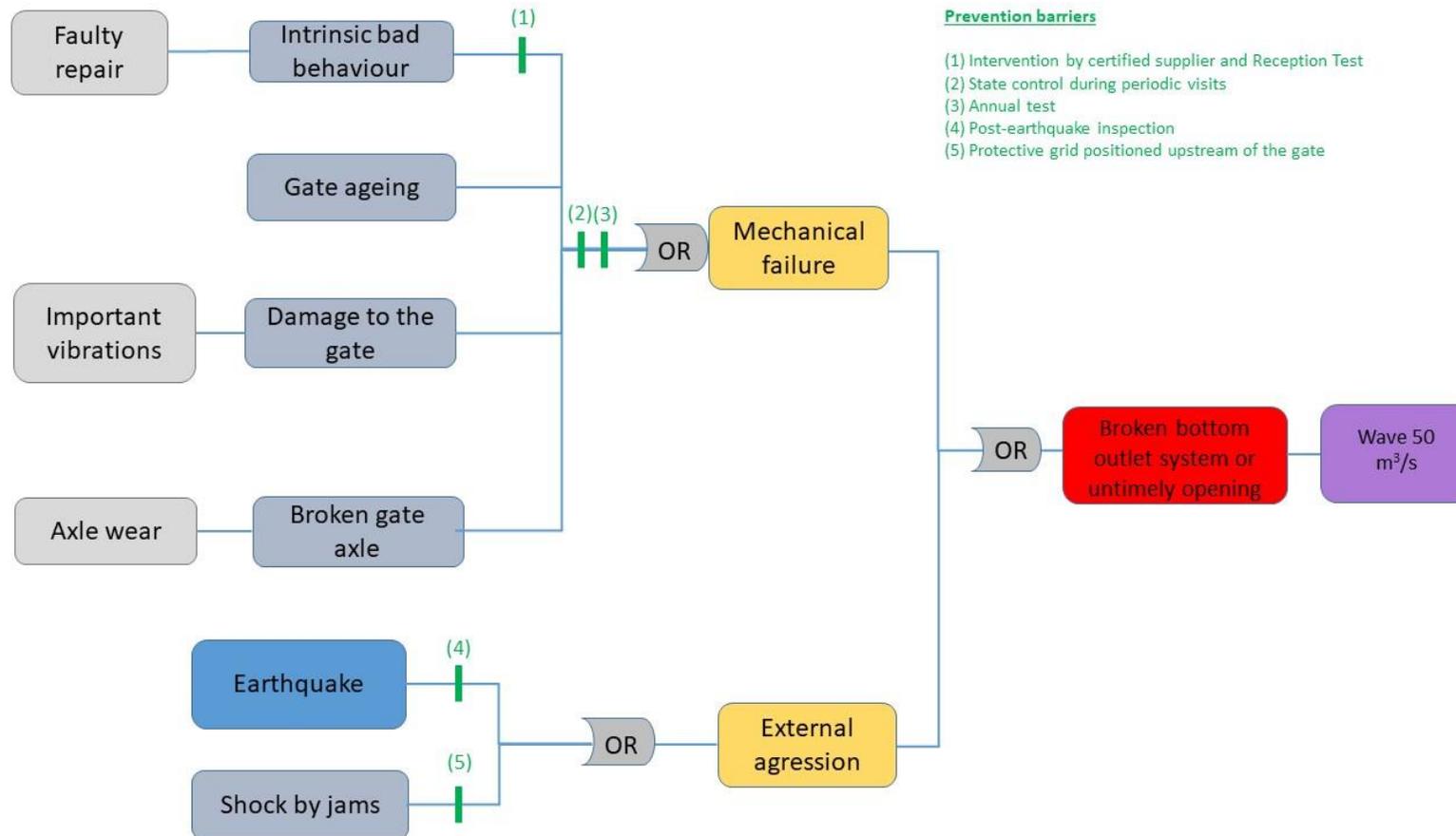


Figure 5.7: Example of a bow tie showing the loss of integrity of a bottom gate on an arch dam

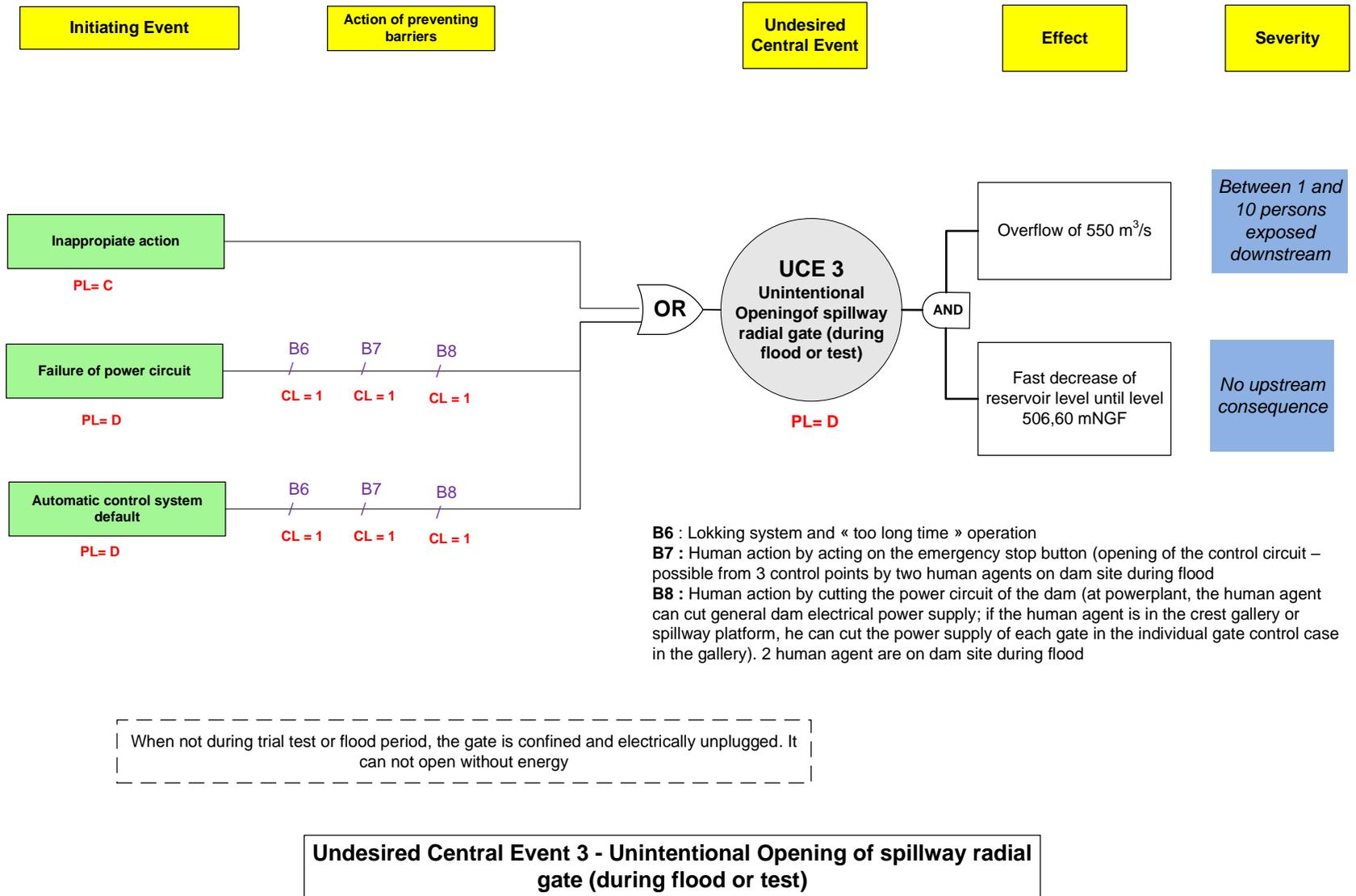


Figure 5.8: Example of a bow tie associated with the unintentional opening of a tainter gate

Bow ties offer a complete visualization of the accident scenarios that could occur, from the initial causes of the accident to the consequences for the vulnerable elements identified. They also highlight the action of the safety barriers that prevent these accident scenarios and offer an enhanced demonstration of risk control by the structure's manager.

Representation using the bow tie method has several advantages:

- A structuring methodology for thinking allowing rapid appropriation;
- Coherence of presentation and reasoning. It facilitates inter-comparison, not just between bow ties from the same Safety Review Risk Assessment, but also between Safety Review Risk Assessments for different dams;
- An overall representation from the initiating events upstream through to the consequences downstream. Dams generally have a simple level of functional complexity relative to other industrial facilities. Most bow ties for dams are therefore easy to read and understand overall;
- Bow ties back up functional reasoning, allowing the aggregation of events or barriers of all kinds and facilitating the development of multi-engineering domains approaches.

Their use is generally reserved for events deemed critical for the structure's safety and/or for the identified stakes and for which a demonstration of risk control is essential.

The main risks linked to their use could be:

- An over-rapid temptation to "Copy/Paste" bow ties that seem similar from one dam to another;
- To take advantage of the apparent ease offered by the rapid structuring offered by the bow tie and not carry out the risk analysis in sufficient detail. Behind the graphic representation of a bow tie, an essential part is constituted by the text describing and justifying the IEs and the CFEs. The bow tie is still only the transcription of a pertinent analysis and a global functional reasoning;
- That a representation does not always allow the realization of the specificity of the safety barriers relative to each of the identified paths that lead to the accident and for which the barrier is meant to function (for example, 100 % effectiveness of a barrier on one path but 50 % on another...);
- The risk of non-completeness, non-exhaustiveness and non-independence of the events in the tree.

Lastly, as in the case of the fault tree method, the method is not well adapted to a probabilistic quantitative analysis.

5.5 Summary of the representation of accidental sequences using tree methods

The tree methods described in this chapter represent modeling methods for accidental sequences leading to an accident. French practice uses the three tree methods: fault trees, event trees and bow ties.

The bow tie method, which combines the fault tree method for failures on the dam and the event tree method for the consequences on the environment, is used most frequently in Safety Review Risk Assessments for dams and is implemented by the main dam owners and consulting firms in France. In practice, its use in dam Safety Review Risk Assessments is essentially similar to the fault tree method which processes dam failure modes. Its main interest lies in its synthetic and simplified representation of the failure scenarios, which is well adapted to dams as structures with simple structuration and operation. The setting up of the bow tie method (or event tree) requires prior research of the failure modes using a PRA or FMEA type method which will make it possible to determine the feared events and initiators. Considerable expertise in the field must accompany the application of these methods.

The event tree method is used less frequently in Safety Review Risk Assessments in France than the two preceding methods. It is based on an exhaustive analysis of the failure modes obtained through the FMEA method. The event tree method guarantees in principle the independence of successive events and makes it possible to monitor the functional and chronological development of a scenario and assess the influence of the barriers implemented on the scenario's frequency of occurrence. The disadvantages of this method are linked to the assessment of a potentially large number of trees when the system to be studied is complex.

6 Risk assessment

6.1 Introduction

The principle consists of assessing the probabilities of scenario's failures or elementary events individually, then aggregating them using mathematic rules adapted to the method selected, which finally allows the scenario's overall probability to be obtained. Thus, the complex problem of assessing a scenario's probability is reduced to an evaluation of a succession of failures or elementary events, which is easier to assess.

In dam risk analysis practice in France, we note two practices for assessing the probabilities of failures or elementary events:

- a semi-quantitative approach for assessing safety, in which the assessments are obtained using analysis grids that match expert opinions to intervals of probability. This is the most frequently used approach in Safety Review Risk Assessments in France;
- a quantitative probabilistic approach to risk assessment, in which the assessments are made using probabilistic models or statistical analyses, or, failing that, by expert judgment. This second approach is used less frequently.

6.2 The work of the panel of experts

Whichever approach is adopted, the risk assessment is produced by a working group made up of a panel of experts and operators, whose role will be to:

- Control and validate the modeling of scenarios in the form of a succession of failures or elementary events;
- Assess probabilities of failures or elementary events, in the form of a probability interval or a unique probability;
- Control and validate the assessment of the probability of the scenario overall, particularly through an intercomparison of the assessments of the different scenarios and their prioritization.

The working group includes the different engineering and operational entities required for these analyses. Typically, the panels of experts include: a panel leader who is a specialist in risk analysis methods, one or several civil engineers specializing in dams and with a good understanding of the structure to be assessed, and the dam operator. As needed, and according to the assessments to be produced for the scenarios, the panel can be extended to include a hydraulic engineer, a hydrologist, a specialist engineer in electromechanics and control systems, etc., with the group being adapted to needs according to the dam's complexity. The role of the dam operator's representatives is fundamental to the success of the exercise. He is the one who has the best concrete knowledge of the dam and its equipment in practice, as well as feedback from the field on its operation, which includes an understanding of the correct performance of maintenance and tests and knowledge of incidents and failures that have affected the dam. When making up the group, it is advisable to ensure that the dam operator appoints one or more people who actually have this operational knowledge of the dam and its components.

Different techniques for collecting expert judgment can be used within the panel: role-playing by the experts, guided interview techniques, individual and then group interviews, a search for consensus within the panel.

In order to objectivize and homogenize expert assessments, reference is made to rating guides from the profession or based on the operator's internal and external feedback. These elements may come from databases of dam incidentology, which may come from databases or reports/ studies shared by the profession, or from exploiting the available feedback on events that have occurred abroad or on other operators' facilities.

6.3 Safety barriers

6.3.1 The principles

The safety barriers constitute all the technical and/or organizational elements that are necessary and sufficient to ensure a safety function. They thus allow the scenarios studied to attain an acceptable criticality. In general, there are two types of safety barriers:

- **prevention barriers:** these include the measures intended to cancel or diminish the probability of an undesirable event, ahead of the dangerous phenomenon;
- **protection barriers:** these include the measures intended to limit the consequences for the potential targets by reducing their vulnerability. Until now in Safety Review Risk Assessments, only prevention barriers have been taken into account and the protection barriers linked to emergency plans are not included, since the implementation of emergency plans does not only depend on the dam owner.

To be selected as a barrier and allow a reduction in occurrence, the following criteria are examined:

- **Independence** with the event and with the other barriers carrying out the same safety function.
Example: if the event under assessment is "operator error", the operator cannot be a barrier. On the other hand, a second operator acting as a controller (= control task) would be able to catch the drift and be considered as a barrier;
- **Effectiveness** of the barrier. The effectiveness of a barrier depends on many parameters and to assess it, we study its design, availability, accessibility and resistance to specific constraints, etc.;
- **Response time**, when this is relevant (for example, it takes into account gate opening times, the time it takes an operator to reach the site, etc.). It must match the kinetics of the event on which the barrier is meant to act;
- **Testability/maintainability** for technical barriers, including training/audit/exercises for human barriers.

These four criteria allow the **Level of confidence (LC)** to be determined: it is assessed by the working group according to the barrier's probability of failure. It allows the event's occurrence to be reduced by one or more levels or orders of magnitude. In practice, feedback on Safety Review Risk Assessments show that most barriers have a level of confidence of 0, 1 or, exceptionally, 2. In terms of quantitative order of magnitude, a level of confidence of 0 corresponds to a barrier that does not change the

assessment of the scenario, and a level of confidence of 1 for a barrier means that it is effective about 9 times out of 10.

6.3.2 Taking prevention barriers into account

A barrier generally includes: a sensor (detector), a chain of transmission and processing of the signal, and one (or more) actuator(s).

3 categories of prevention barriers can be distinguished: technical, human and combined. In the case of a human barrier (based on the organization and procedures), all or only some of the elements of the safety chain involve the human factor.

Example of action following the detection of an anomaly: an outlet gate operated manually following the detection of a supply problem; lowering of the reservoir level following the detection through monitoring of leakage or piezometric measurements deemed abnormal (the chain of transmission and processing of the signal can be human and the actuator corresponds to the operator's decision making and action).

A barrier is called **passive** if it does not require energy to be actioned or if it is an intrinsic constructive provision (e.g. a passive lock). In the opposite case, the barrier is called **active** (e.g. an incident detected through monitoring, the intervention of an agent, implementation of actions in the internal plan that can go as far as the decision to empty the reservoir and actuate the outlet gate, its source of energy can be electric, hydraulic or human).

Generally speaking, the barrier reduces the occurrence of an event. The reduction of 0 to 2 levels is a function of the level of confidence attributed to the barrier and corresponds, approximately, to the probability of failure when the barrier is solicited.

Example: in the context of a semi-quantitative risk assessment and if the occurrence of the IE is class B (see rating according to the semi-quantitative approach below, example: internal erosion) and there is a prevention barrier relative to this event with an estimated LC of 2 (e.g. monitoring system, trigger threshold and operator action), then the occurrence of the resulting feared event (FE) is class D.

Example of a non-barrier: the design, sizing, construction, training, operator's organization document, ongoing maintenance, etc., are not barriers in themselves. These elements may contribute to reducing the frequency of an event and to guaranteeing the LC of barriers but are not sufficient to prevent an accidental occurrence. They are not included on bow ties, but in the arguments on the rating of barriers or initiating events.

Ref	Name of Barrier	Criteria	Validity	Justification
B3	Lokking System	Independance	YES	No need of human operation and independant of dam gate automaton
		Effectiveness	YES	Two independant systems act on the first rank : - Mechanical lokking systel : stops the action after 25 cm - Surveillance by delay time system : stops the operation after a too long continuous time This barrier enables to stop the continuous operation of a gate
		Response time	YES	Immediate response compatible with gate opening time
		Testability, maintainability	YES	Frequent tests without feedback of particular defaults
		Level of Confidence	1	
B11	Manual closure of gate	Independance	YES	Independant barrier from gate automaton and from B3 barrier
		Effectiveness	YES	Immediate stop of the gate operation in case of first rank default
		Response time	YES	Gate is totally opened in 85 min. If there is not operator on site, the hotline operator can arrive on site in less than 20 min, as planed in the organization procedure. The alarm will be triggered by the automaton following inconsistency between upstream and downstream parameters
		Testability, maintainability	YES	Frequent tests without feedback of particular defaults
		Level of Confidence	1	

Table 6.1: Example of justification and rating of barriers in Safety Review Risk Assessments

(*) The level of confidence in this example has been set at 1 insofar as the 4 criteria (independence, effectiveness, response time, test-maintenance) are satisfied.

Specialized maintenance can be considered as a prevention barrier, subject to the necessary works being perfectly identified and prepared and a specific monitoring system being in place to trigger the operation and carrying out the work in a period that is compatible with the kinetics of the feared event (e.g: bathymetric check and possible reinforcement downstream after a flood).

If there are several independent barriers (i.e. independent of all the elements that constitute the safety chain and with no common breakdown mode), the reductions of these barriers can be added up.

Example of non-independent barriers (common modes):

- *the existence of a second access path does not necessarily constitute a barrier relative to the event "impossibility of getting access to the dam because of a road blocked by fallen trees" since this second path will almost certainly also be blocked by fallen trees in a storm situation.*
- *gates using the same energy source cannot be considered to be completely redundant.*

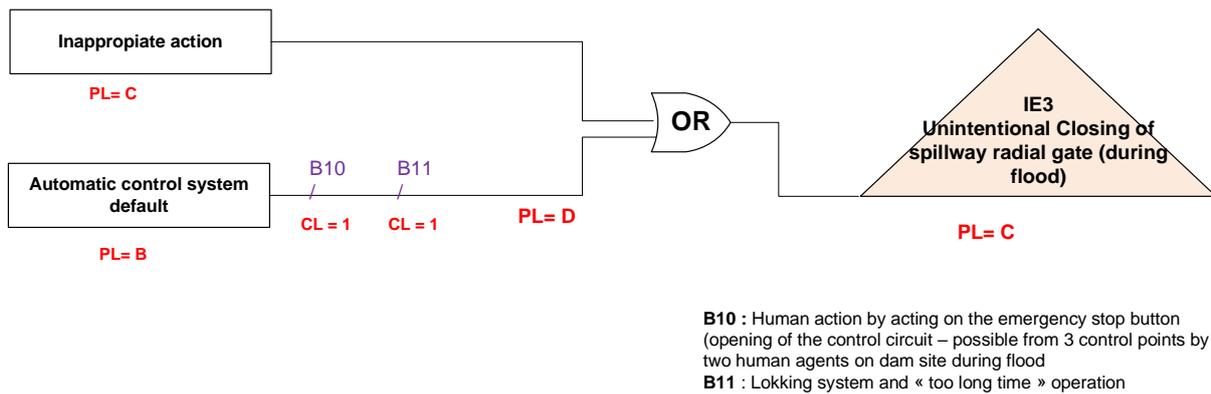


Figure 6.1: Semi-quantitative approach - Example of prevention barriers for the IE “Unintentional closing of a flood gate”

6.3.3 Example – Prevention barrier: Bottom outlet

In France, the bottom outlet can be used as a prevention barrier for the risk of dam failure outside of a flood situation and the practice of Safety Review Risk Assessment shows that it is often used for this purpose. It therefore allows the dam to be made safe following the detection of an anomaly. This would be the case if one of the dam’s essential safety components was defective, due to ageing or a post-earthquake or other accidental situation: it could concern the drainage, for example, or the watertightness or characteristics of the materials.

This barrier can only be used if the monitoring and effective activation of this barrier are compatible with the kinetics of appearance of the feared event. The level of confidence for this barrier can vary according to its intrinsic sensitivity and the hydraulic design of the bottom outlet. The level of confidence can be further increased if the dam has two independent bottom gates.

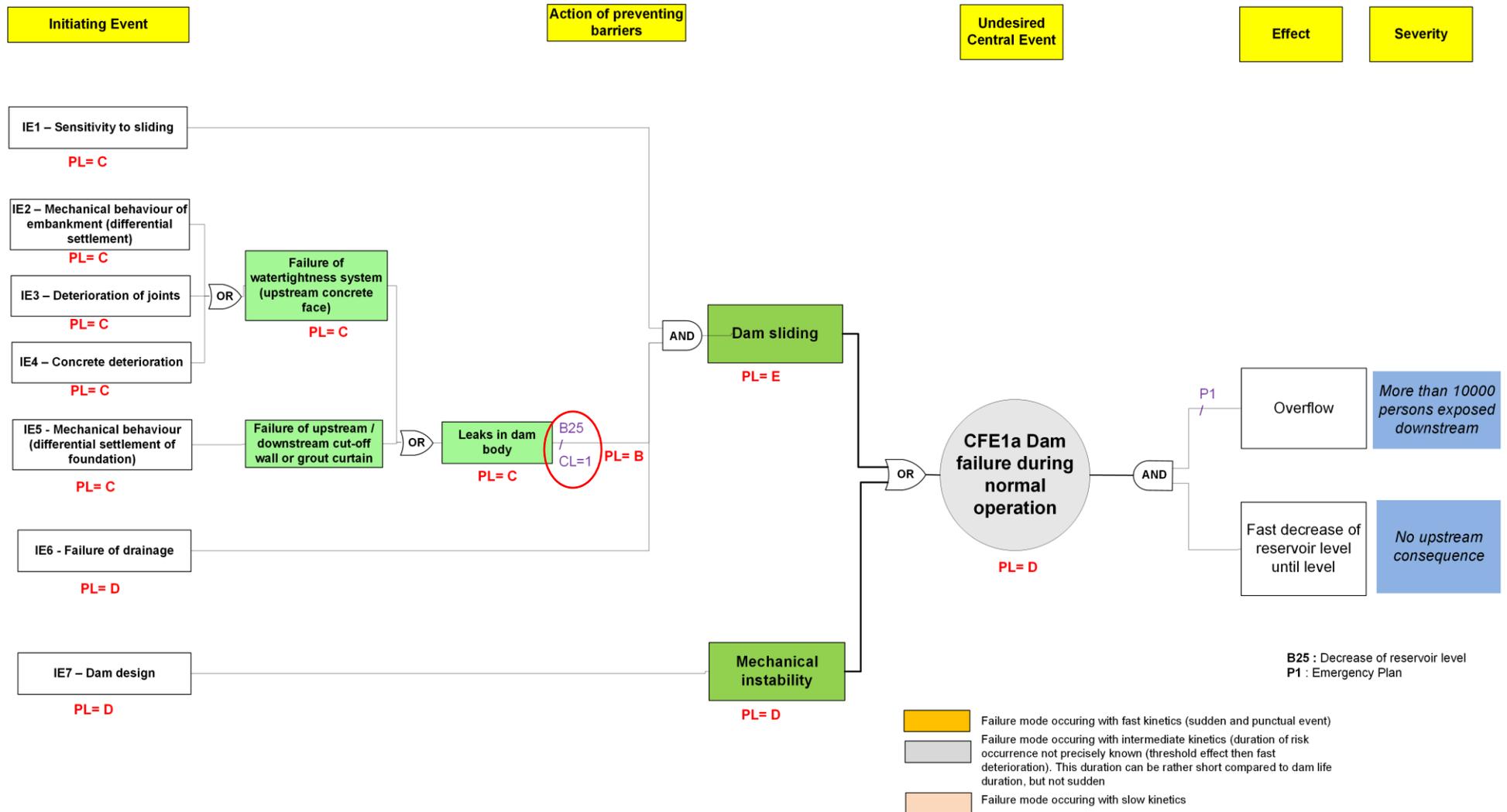


Figure 6.2: Semi-quantitative approach using the bow tie method - Example showing the feared event “Dam failure” with the bottom outlet as the prevention barrier

6.4 Taking the human factor into account

A failure linked to the human factor can be the result of several factors (lack of clarity on procedures, stress, lack of skill on a complex operation, etc.). Evaluating the risks of human error amounts to questioning the reliability of the socio-organizational system that can produce these errors. Failures linked to the “human factor” are explicitly labelled, adapted and justified (argued) with regard to the failure scenario they initiate. We can distinguish 2 families of events linked to the “human factor”:

- “Inappropriate actions”;
- “Human failure”.

6.4.1 Inappropriate actions

This family of failures relates to professional actions, an activity to carry out. This “action” that we then qualify as “inappropriate” may be a clearly identified deviation, error of interpretation or execution, or an omission on the part of an individual (or a team) that occurs in the context of an activity and a given work situation, or even due to a failure of the organizational system. The term “action” should be considered in a broad sense (not just an operation, but also a transfer of information or the preparation of a task, for example).

The occurrence of this failure refers to the assessment of a dysfunction in the organizational and human fields in carrying out a given activity linked to the feared event and in line with its kinetics. What is assessed and rated is not the occurrence of the action itself, but the occurrence of the factors that have an influence on this action. The procedure adopted pertains to a systemic approach insofar as we seek to assess different non-technical factors (organizational, social, human, contextual, individual or collective) which, when combined, potentially produce an action that is appropriate or not.

The assessment of the occurrence of an “inappropriate action” type event can be constructed by examining and assessing of 4 criteria that are questioned separately: [LAROUZEE 2015]

- The operators’ skill (a team’s level of knowledge and expertise and the conditions for the transmission of knowledge within the organization);
- The complexity of the task to be accomplished (relative to the system to be actioned);
- The work situation in the sense of the conditions for carrying out an operation (as an influence on the operator’s context);
- The capacity for auto-correction (ergonomics and reversibility acting to reduce the risk of initiating the inappropriate action).

6.4.2 Human failure

This family of events is relative to a notion of the unintentional interruption of an activity that is in progress or expected, linked to the “intrinsic reliability” of one or several participants. Its cause is generally considered as an event that is suffered and independent of the organization (for example: fainting, falling on a level surface, traffic accident).

The relevance of this failure is to be appreciated, on the one hand, with a certain realism on the situation in which it can generate the feared scenario (particularly in connection with the scenario’s

kinetics) and, on the other hand, according to the technical and organizational provisions implemented (the operator's expected action must only depend on him and him alone in the kinetics of the scenario of the feared event).

In order to avoid any ambiguity regarding the event initiated by the "organizational and human factor", the professional gesture that is the object of the feared dysfunction should be clearly identified at the level of the event. It is therefore a question of favoring the designation of the event in terms specifying the work situation, for example:

- "Operating error during periodic tests" that could lead to a feared event of the unintentional, total opening of a gate;
- "Operating error during flood operation" that could lead to a feared event of the unintentional, total opening of a gate or lead to the partial or total closing of a dam's discharge components;
- "Inappropriate positioning of the intake/outlet gate during a maintenance operation" that could lead to a feared event of unintentional opening or a complex non-opening event;
- "Failure to detect the arrival of a flood" that could lead to a scenario with a lack of staff to operate the flood devices.

The relevance of this event requires ensuring that the expected task depends on the sole intervention of the agent in the kinetics of the failure mode scenario leading to the feared event (before the application of technical or organizational barriers).

6.5 Semi-quantitative approach to risk assessment

6.5.1 Assessment of the occurrences of initiating (IE) or intermediate events

Some IEs are associated with the occurrence of a natural hazard, the two main ones being floods and earthquakes. For these events, the occurrences are assessed using knowledge of the frequency or design period associated with the intensity of the hazard considered in the scenario, which gives direct information on the annual probability of occurrence of the IE and therefore its semi-quantitative class.

For initiating or intermediate events that correspond to a failure intrinsic to the structure, the occurrences of these events are assessed by the panel of experts on a semi-quantitative base. They are ideally specified in a methodological rating guide that ensures the coherence of the different ratings within the components of a same structure.

For Safety Review Risk Assessments in France, the values of occurrence are usually expressed in classes or levels of frequency. The table below constitutes an example of the type of grid used for the semi-quantitative assessment, with 5 classes [A to E]:

Probability Scale	E	D	C	B	A
Qualitative (if number of installations and feedback are sufficient)	"Possible event, but extremely improbable : is not impossible considering current knowledge, but not experienced worldwide during a large number of installation.years	"very improbable event": already occured in the industry sector, but corrective actions were taken which significantly reduced the probability of occurrence	"improbables event": similar event already occured in the industry sector or in this type or organization worldwide, but no corrective actions were taken which significantly reduced the probability of occurrence	"probables event": already occured or can occur during life duration of the installation	"current event": already occured or can occur several times during life duration of the installation, in spite of risk reduction measures
Semi-quantitative	This scale is intermediate between qualitative and quantitative scales, and enables to take into account risk reduction measures				
Quantitative (by unit and by year)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	

Table 6.2: Example of a semi-quantitative grid for event assessment

For facilities, components and equipment, the occurrence values of initiating or intermediate events integrate the design, sizing, construction and condition of the equipment at the time of the analysis, as well as the constraints to which it is subjected (e.g. the acidity of the water that would accentuate the phenomenon of corrosion). The rating of these events implicitly includes the ongoing maintenance and monitoring.

We should also underline the difficulty of rating certain external IEs linked to natural hazards which pose methodological and scientific questions (landslide, avalanche, ice, etc.).

For each of the assessments of the events of the tree method used, the Safety Review Risk Assessment carefully justifies the classes of occurrence selected for these events.

6.5.2 Principles of aggregation in the bow tie or fault tree methods for determining the occurrence of feared events

The occurrence of feared events is determined using the occurrences of initiating or intermediate events and takes into account the LCs (levels of confidence) assigned to the prevention barriers identified. In the bow tie or fault tree methods, the logical operators "AND" and "OR" are used and allow the aggregation of initiating or intermediate events. There are no standardized principles of aggregation for these operators and the principles stated below constitute an example of principles used for certain dam Safety Review Risk Assessments in France.

“AND” gate:

The occurrences of initiating or intermediate events are “added” according to the matrix below:

AND	A	B	C	D	E
A	B	C	D	E	E
B	C	C	D	E	E
C	D	D	D	E	E
D	E	E	E	E	E
E	E	E	E	E	E

For example, if the occurrence of IE1 = B and the occurrence of IE2 = C then the occurrence of intermediate event IE1 **AND** IE2 equals D.

Warning when using AND gates:

- Since occurrence class A can represent probabilities close to 1, the combination of an event in occurrence class “A” AND another event can result in keeping, as an exception to the table above, the occurrence of this other event, according to the level given to the event with occurrence class “A”;
- The principles above apply when both input events for the AND gate are independent. This is not necessarily the case when a flood and a spillway dysfunction are combined. In this combination, we therefore check that the rating of the event resulting from the AND gate is coherent with the qualitative scale and, if necessary, rate the combination as an exception to the table above.

“OR” gate:

The lowest occurrence prevails according to the following matrix:

OR	A	B	C	D	E
A	A	A	A	A	A
B	A	B	B	B	B
C	A	B	C	C	C
D	A	B	C	D	D
E	A	B	C	D	E

For example, if the occurrence of IE1 = B and the occurrence of IE2 = C, then the occurrence of the intermediate event IE1 **OR** IE2 equals B.

In the special case where there are many IEs before an “OR” gate, it is prudent to consider that the resulting occurrence is lower than the one that results from the strict application of these principles. For example, if we have 6 IEs with occurrence class “C” leading to the feared event, then the occurrence of the feared event can be assessed in class “B”. These rules are indicative. Generally speaking, the working group can decide a difference of one class from the reference given by the tables above, provided that this decision is explicitly stated, justified and argued for in the Safety Review Risk Assessment.

6.6 Quantitative approach to risk assessment

6.6.1 Principle of the quantitative assessment of safety using an event tree

The quantitative risk assessment is produced in Safety Review Risk Assessments in France using an event tree. This describes the scenarios starting with an initiating event, with the tree being developed chronologically in an inductive manner, showing the chain of events through to the end feared events, some of which correspond to failures.

In a quantitative risk assessment based on an event tree, we assess the probability of appearance of each of the tree's elementary events: the natural hazards, the failure modes, the safety barriers. A scenario's probability of appearance is then equal to the product of the probabilities of appearance of the events leading to this scenario. The tree event method makes it possible to follow the development of a scenario and assess the influence of the prevention barriers implemented on the scenario's frequency of appearance.

6.6.2 The different approaches to probability assessment

We find different approaches to the quantitative assessment of the probability of events on the event tree in Safety Review Risk Assessments carried out in France:

6.6.2.1 Probabilistic approaches

These are implemented to assess exterior hazards such as floods and earthquakes. These hazards are characterized in French practice in a probabilistic context which associates an event's intensity with a probability of occurrence or a given design period.

Example 1: Probabilistic hydrological model associating floods to an annual probability of occurrence

Example 2: Probabilistic model for seismic stress associating earthquakes to an annual probability of occurrence

Since this approach is often part of research and development and is used in some Safety Review Risk Assessments, certain failures may be subject to a mechanical-probabilistic failure assessment. Failure modes pertaining to ultimate limit states such as the shear limit state of a gravity dam or the landslide limit state of an embankment dam are concerned. In the assessments of these failure modes, stresses and resistance properties of the materials are modeled using random variables, then Monte Carlo type simulations are used to determine the probability associated with the failure modes.

6.6.2.2 Frequency approaches

These are to determine the frequency of failure of a dam component based on feedback. This approach is relevant if there is sufficient feedback on the failure mode concerned to carry out a statistical analysis, with the failure rate then being obtained from the ratio between the number of breakdowns to the number of uses. Dam incident/accident databases can back these assessments.

Example: this assessment approach can be relevant for components such as the electromechanical systems: gates, valves, electrical controls, back-up controls or electrical generators, or certain safety barriers such as the monitoring systems, the organization systems and some human failures: lack of surveillance, lack of monitoring, lack of warning, lack of control.

6.6.2.3 Approaches based on experts' declarations

Some failures cannot be subjected to a probabilistic or frequency analysis because the available data is not sufficient. These situations lead to using expert judgement for carrying out expert declarative analyses of the probability of occurrence of the failure.

These assessments are produced by a panel of experts according to the principles presented above. Specific grids processing expert judgement are used, allowing the transcription of a qualitative statement of probability of occurrence:

Verbal Description	Probability Equivalent	Low	High	Expert opinion of probability level	Quantitative treatment of expert opinion
virtually impossible	0.01	0.00	0.05		
very unlikely	0.10	0.02	0.15	"very likely"	0,6
unlikely	0.15	0.04	0.45	"likely"	0,4
fairly unlikely, rather unlikely	0.25	0.02	0.75	"intermediately likely"	0,2
fair chance, toss-up	0.50	0.25	0.85	"unlikely"	0,1
usually, good chance, probable, likely	0.75	0.25	0.95	"very unlikely"	0,01
quite likely	0.80	0.30	0.99	"extremely unlikely"	0,001
very likely, very probably	0.90	0.75	0.99		
virtually certain	0.99	0.90	1.00		

Table 6.3: Examples of transcription grids of expert opinions in the form of subjective probabilities

6.6.3 Example of a quantitative risk assessment using the event tree method

The example considers the assessment of the safety of an embankment dam relative to the scenario of overtopping linked to inadequate chute capacity.

Initiating Event	Spillway : Pass the flood Ti	Downstream fill : Resist external erosion	Probabilities Consequences
			Probability : $p=10^{-6}$ Flood wave : 2 500 m ³ /s
			1/10
		Erosion of downstream fill : Creation of breach around spillway chute	
		1/10	
	Failure of spillway system : loss (or insufficiency) of spillway capacity		
1/10 000			
Flood Ti			

Figure 6.3: Example of an assessment of the safety of an embankment dam relative to a scenario of overtopping linked to inadequate chute capacity

This scenario includes a succession of three failure modes with a functional modeling of the overtopping mechanism linked to inadequate chute capacity of an embankment dam: 1) initiating event: the hydrological hazard, 2) the failure of the spillway through overflow from the chute, 3) the failure of the downstream embankment's external erosion resistance function along the chute.

The events' risk assessments are produced using a hydrological probabilistic model for the initiating event and expert judgement in the form of subjective probability for the failure modes (2) and (3). The global assessment of the internal erosion scenario is obtained by multiplying the elementary probabilities, the event tree being in fact a probability tree.

6.7 Summary of the risk assessment approaches

The semi-quantitative risk assessment approaches have certain advantages:

- Relative simplicity of implementation;
- They can be understood by those who are not risk analysis specialists;
- An approach based on expert opinions for the rating of events / barriers / level of confidence ;
- A tool that is well adapted to the reality of the field of dams where structures have unique characters;
- A semi-quantitative risk assessment approach that can be implemented with the different risk analysis methodologies, bearing in mind that feedback of semi-quantitative approaches in France mainly shows the implementation of a risk analysis including PRA/FMEA then the bow tie method.

Among the limits of semi-quantitative assessments, we can cite a macroscopic simplified modeling of the constructed bow ties or fault trees, compared to other constructions of complex probabilistic analyses that exist for other industrial processes. The AND / OR rules are not very precise and do not always reflect the intermediate dependencies of events.

The quantitative risk assessment presents the advantages of a rigorous mathematical assessment, with the event tree method constituting a probability tree that allows the scenario's overall probability to be obtained by multiplying the probabilities of the elementary events. This approach requires rigorous modeling of the scenarios to ensure the independence of the tree's events. That therefore supposes a quality functional analysis, followed by the implementation of a precise failure mode analysis method like the FMEA.

Amongst the limits of quantitative assessments and, as with the semi-quantitative approach, expert opinion intervenes in the assessment of failure modes for which there is insufficient feedback or knowledge of the hazard to use a probabilistic or statistical approach, which is often the case for dam failure modes. Finally, the probability of the scenario obtained therefore constitutes a subjective probability, combining both an expert, as well as a statistical or probabilistic approach. In practical terms in the field of dams, failure mode assessments could be carried out in a probabilistic framework for natural hazards associated with a probabilistic model (flood and earthquake) or sometimes for certain ultimate limit-states with mechanical-probabilistic calculations. The other limits are linked to the number of trees that may be required to model all of the scenarios, particularly in the case of complex systems.

7 Assessing the severity of scenarios

The consequences of each failure scenario on human, material, organizational and environmental issues are assessed to measure their level of severity. The means implemented here are adapted to the importance of the issues at stake for the safety of people and property. The consequences of each potential accident are characterized by the flows and volumes released from the structure, the intensity, the kinetics and the duration of these effects, which then allow an assessment of the severity of the consequences for the affected zone, particularly just next to the important elements.

We would remind the reader that the CFBR published a guide in 2017 entitled “Design of spillways according to incremental or differential damage: Recommendations for implementing a method applicable to dams in France” [CFBR 2017c], which presents complementary approaches to the ones we develop in the next part of this section. These methods have not been implemented to date in Safety Review Risk Assessments.

7.1 The hydraulic phenomena: modeling and mapping

A failure wave propagation study is provided for structure failure scenarios leading to the release of an uncontrolled and damaging quantity of water. The extent of the submerged zones when putting together an accidental scenario is mapped on a scale adapted to each of the accidents studied.

There are normally three types of phenomena considered:

- Dam break flood waves (partial failure, total failure, overtopping wave);
- Unintentional releases (mechanical, electrical or control failures, operational defects, etc.);
- The elevation of the water level in the reservoir and the backwater slope upstream (upstream flooding).

The main characteristics of the phenomena that are useful to the analysis are:

- The boundary (generally the downstream limit of the phenomenon);
- The height of submersion (in classes);
- The kinetics (arrival time, vertical rising speed, current speed...).

The choice of tools and hydraulic models is made according to the characteristics of the phenomena themselves and the estimated importance of the affected issues.

The mapping is done very carefully: the mapping of the phenomena presenting a danger upstream or downstream of dams offers a graphic understanding of the extent of the danger, at least in qualitative terms.

7.1.1 Modeling the failure wave

In France, the dam failure wave is modeled in every Safety Review Risk Assessment. This is to study the propagation of the flood wave caused by the dam’s failure, which represents a sudden rise in the water level downstream. The aim is to be able to define an order of magnitude for the arrival time of the wave and the number of people that will potentially be impacted.

To obtain a sufficient assessment of the severity of the consequences, studies of the propagation of the failure wave can be carried out for other failure scenarios (failure of a flood gate, etc.).

The modeling of the failure wave requires the following parameters to be defined:

- The reservoir's geometry: a series of bathymetric data (or topographic data when the dam is being emptied) allows the reservoir and its volume to be modeled; a comparison of the modeled volumes and the real volumes measured on site makes it possible to calibrate the model;
- The definition of the valley's geometry: the main sources of information are the National Geographic Institute's 1/25 000 scale maps (topographic data precise to 1 m in altitude), which constitute flood maps, as well as the longitudinal sections surveyed by the "Nivellement Général de la France" department (General Levelling of France) at the start of the 20th century. This data can be completed by specific topographical surveys (cross-section just downstream of the structure, LIDAR survey of the analysis area, etc.);
- The hydraulic characteristics of the analysis area: the friction coefficients of the terrain (Strickler or Manning) and the flow coefficients of any special sections are usually based on an expert's opinion;
- The initial hydraulic state of the analysis area: the assumptions are discussed and the most likely scenario is chosen. For many of the studies carried out and in the continuity of the preparedness plans, reservoirs were initially considered at the Maximum Water Level and the valleys downstream "dry". In some cases, greater propagation speeds were selected with other assumptions (for example a propagation on a flooded valley). For special dams, like flood mitigation dams for example, the dam break flood wave can only occur in an exceptional flood situation: the assumptions for the reservoir at the time of failure and for the input from tributaries downstream are then considered on a case-by-case basis;
- The dam failure mode: two major types of dams are distinguished: "rigid" dams made of concrete, stone or other masonry and embankment dams made of earth or rocks. Initially, rigid dams are supposed to break totally and instantly, whilst embankment dams are supposed to break gradually, through internal or external erosion. For rigid dams, other failure diagrams are possible on the basis of justification, particularly for gravity dams;
- The behavior of dams situated downstream when the wave arrives: in French practice, two main methods are used to model dams downstream. The first method consists of modeling the reservoir downstream by an initial liquid surface profile. The volume of the reservoir downstream is then only mobilized when the dam break flood wave reaches this downstream reservoir. This amounts to considering that there is a total, instantaneous failure of the dam downstream. This method can be used in the case of downstream dams where there is no doubt about their instantaneous failure on arrival of the wave. The second method consists of modeling the downstream dam by an initial liquid surface profile and a weir. The modeling of a weir makes it possible to define a failure elevation for the downstream dam: as soon as the water reaches this failure elevation, the weir disappears;
- The behavior of structures such as bridges, weirs and embankments downstream when the wave arrives: apart from the downstream dams, presented above, only the structures that partially or totally resist the passage of the wave and that have an impact on the water surface profile are integrated in the model. These may be bridges or weirs, or railway or road embankments... The geometry of these structures can be determined by using data from local authorities or following a specific survey.

Specific inspections of the terrain with surveys can be carried out in the case of structures with major impacts (geometry of a bridge, the level of a weir, etc.) if this is considered to be essential for the quality of the results, in particulier for estimating the number of people that could be impacted;

- The wave's stopping point: for storage dams intended for power generation or drinking water, for example, with valleys that are usually dry downstream, supplied mainly by riparian release from these dams, studies carried out in France usually stop when the maximum flow becomes lower than the 10-year flood. For other types of dams, like flood mitigation dams with large reservoir volumes, for example, the dam break flood wave caused by the failure stops when the water level reached without failure is equivalent, i.e. when the difference in levels with and without failure is deemed to be negligible.

7.1.2 Mapping the dam break flood wave

The results of the dam break flood wave are presented in the form of a mapping of the flooded areas. Two examples are presented below. The information available are: the hydraulic axis, the position of the cross-sections and the Kilometric Points, an indication of the wave arrival time and the contour and surface of the flood zone.

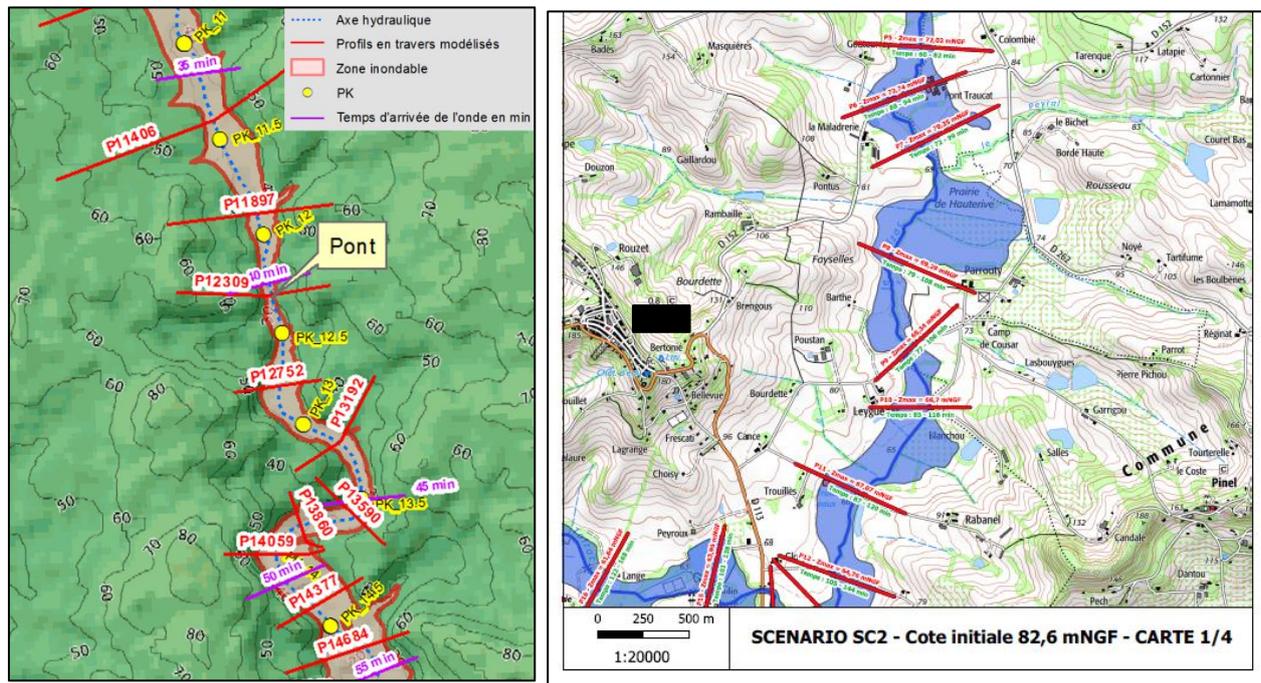


Figure 7.1: Examples of flood zone mapping

The practice of Safety Review Risk Assessments has often adopted the regulations of warning plans, which are as follows:

- Reduction of wave arrival times by around 10 to 15%;
- Increase of maximum water height by around 15% with a minimum of 1 m for heights over or equal to one meter. Heights under one meter are doubled;

The speed and flow values are not modified.

7.2 The socio-economic stakes: identification, indicators and impacts

7.2.1 The issues at stake

The level of exposure for the populations downstream of dams constitutes the main concern in assessing the severity of potential dam accidents. Assessing the severity focuses initially on an order of magnitude for the number of people exposed. To assess the number of people exposed, we look first at characterizing an order of magnitude rather than obtaining an exact number.

The main indicator corresponds to “People at Risk”. In theory, other indicators can be used to add to the severity assessment (number of people injured, number of deaths, total cost of the damage, etc.). In practice, these additional indicators are often difficult to calculate and are not used in Safety Review Risk Assessments in France.

According to different cases, the studies can develop a more complete approach to the issues in accordance with the 4 main targets below:

- sensitive buildings (hospitals, old people’s homes, schools, etc.) and establishments that are useful in crisis management (town halls, fire stations, etc.);
- the economic issues (accommodation, public establishments, businesses, agriculture, networks, transport, installations and infrastructures, jobs);
- the environmental issues (pollution of drinking water, waste, classified sites);
- the heritage issues (sites of interest or classified sites).

This more complete mapping of the elements exposed is inspired by the national methodological framework linked to the policy of flood risk prevention (see [CGDD 2014]).

The population, and possibly the other issues, are sought within the scope of impact of the failure scenarios: on the banks of the reservoir (risk of landslide and risk of the reservoir rising) and in the valleys downstream (risk of release through failure or an unintentional operation).

7.2.2 The main sources of data used

There are simplified methods based on a breakdown of the space into homogeneous units that can be seen on a plan, for which the surface or the length can be determined (establishments receiving the public, inhabited zones, industrial zones, retail areas, campsites, undeveloped land, roads, etc.) and an increased estimate of the number of people per hectare according to the zone type (breaking the units down according to type, for example “rural/very low-density habitat”, “semi-rural”, “urban”, “dense urban”). For industrial zones, employee numbers for the different businesses present in the zone are sought with an indication of the nature of the activities.

The Corine Land Cover (CLC) database offers an overall presentation of the environment, particularly downstream of the structures. This database shows the occupation of the land according to a standard hierarchical nomenclature with 3 levels and 44 positions distributed according to 5 main types of occupation of the territory, including, in particular: the continuous urban fabric, the discontinuous urban fabric, the industrial and commercial areas, road and rail networks and associated areas, port areas, airports, material extraction, landfills, construction sites, etc.

Other methods can also be used and adapted to hydraulic structures, like, for example, the “Elements for determining the severity of accidents” from circular DPPR/SEI2/CB-06-0388 dated December 28th, 2006 from risk analyses on classified industrial installations.

In France, the INSEE (French National Institute of Statistics and Economic Studies) provides geo-localized population data by 200 m square tiles. This makes it possible to rapidly obtain a reasonable order of magnitude for the population exposed to the dam failure scenario.

7.2.3 The assumptions regarding the people exposed

The construction provisions aimed at protecting people against certain effects are taken into account, as well as the possibility of sheltering people in the case of an accident, if the kinetics of the accident allow it.

It is not always possible to predict the environmental conditions for the day the accident occurs (school holidays, rush-hour traffic, etc.), or to assess the possibilities of sheltering people. We therefore seek an approach for the context of the accident that presents the severity of the consequences in a realistic and representative manner.

This assessment per accident can then be classified according to severity. For example, a reference grid is constructed in the following way, differentiating the people exposed in a zone with rapid kinetics to those in a zone with slow kinetics (having more time to reach shelter). A severity classification is then attributed on the basis of the most realistic scenario.

	CLASSES OF SEVERITY OF CONSEQUENCES (in decreasing order)	NUMBER OF PEOPLE exposed in a zone with rapid kinetics	NUMBER OF PEOPLE exposed in a zone with slow kinetics
5	Disastrous	over 1 000	over 10 000
4	Catastrophic	100 to 999	1 000 to 9 999
3	Important	10 to 99	100 to 999
2	Serious	1 to 9	10 to 99
1	Moderate		1 to 9

Table 7.1: example of classes of severity

7.2.4 Mapping the issues subject to failure scenarios

In addition to the flood zones mapping as mentioned in §. 7.1.2, some dam owners have taken the decision to provide a map of municipalities according to the class of population density, on which the following information can be found: the axis of the river and the Kilometric Points, the wave boundary zone, the urbanized zones (>25 ha), the industrial and commercial zones, as well as labels indicating the wave arrival time, the maximum elevation reached and the flow speed at the maximum elevation.

These maps can be used as a means of communication in municipalities likely to be impacted by a dam failure.

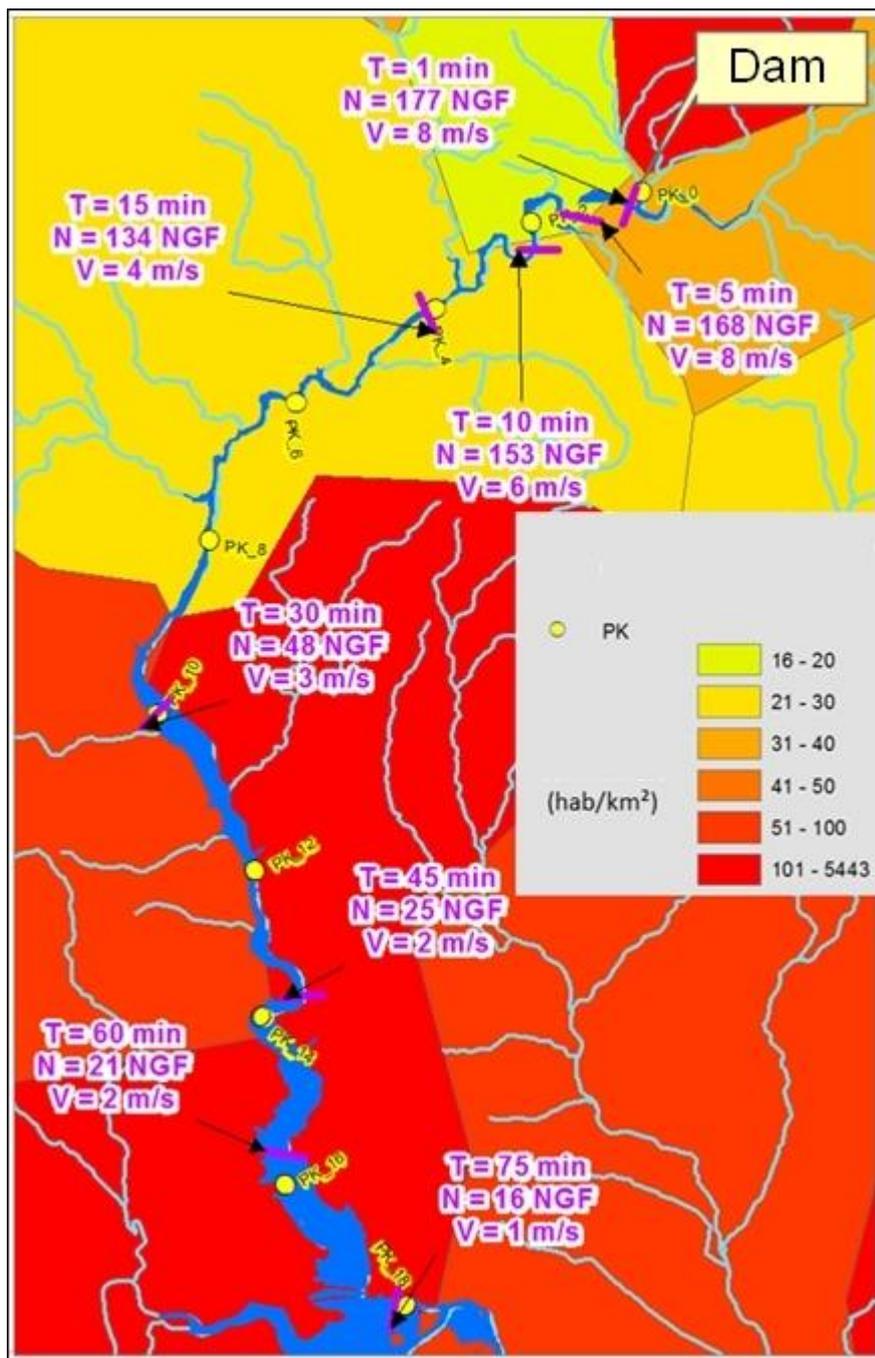


Figure 7.2: Example of flood zones mapping showing population density

Other dam owners prefer to provide complementary mapping based on INSEE population data on a 500 m x 500 m grid.

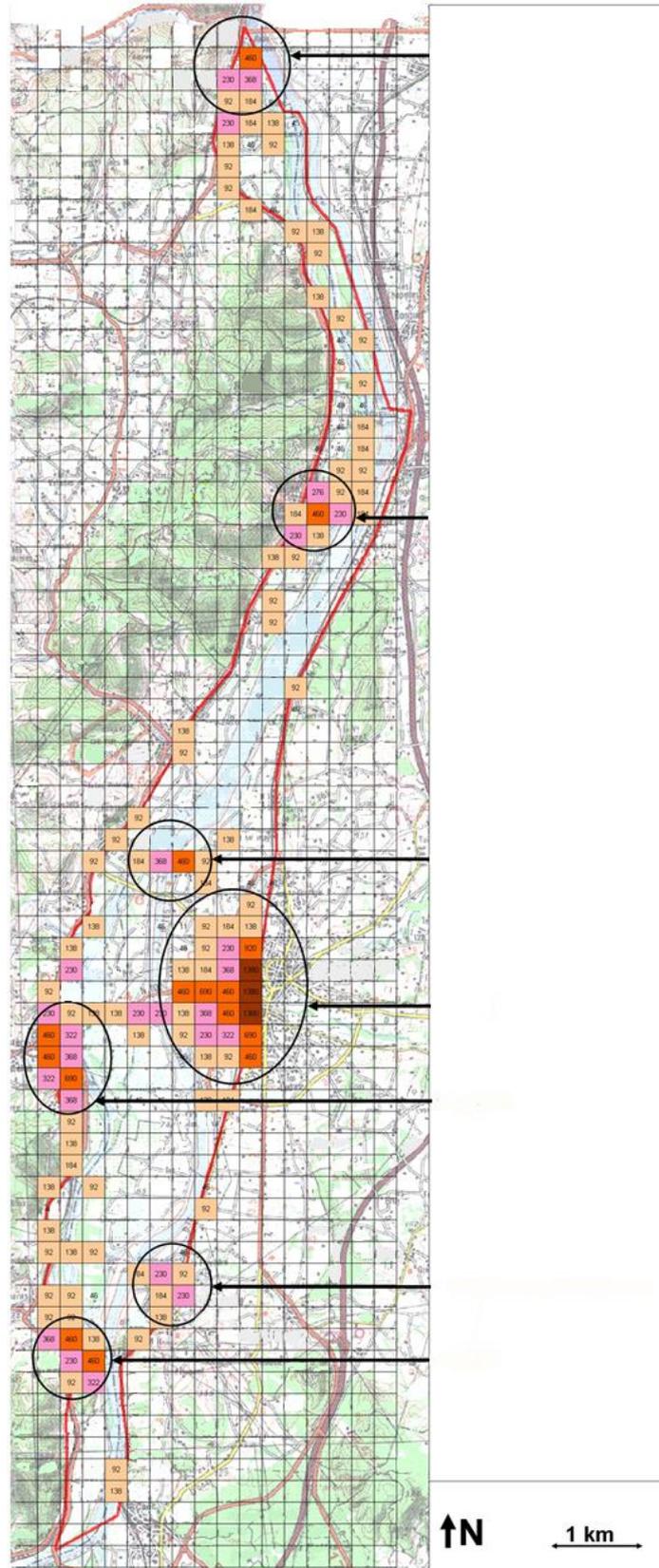


Figure 7.3: Example of flood zones mapping using gridded INSEE population data

7.2.5 Assessment of impacts

A simplified assessment of the number of people exposed is first done per municipality, based on the results of the study of the dam break wave propagation. More precision can be added for dense agglomerations where a more detailed assessment is considered necessary. In the studies carried out, French practice generally distinguishes three types of situations:

- When the wave covers the whole of a municipality, the number of people exposed is considered to be equal to the total population of the municipality;
- When the wave covers a considerable proportion of a municipality, an estimate of the proportion of buildings impacted is made on a map (using GIS), allowing a percentage of the population affected to be obtained;
- Lastly, when the wave only affects a few dispersed buildings, the number of dwellings is counted and multiplied by a rate of occupancy (usually 2.5 in France according to the INSEE - The French National Institute of Statistics and Economic Studies) to get an estimate of the corresponding number of people.

The assessment of the built area impacted is usually based on the IGN's SCAN25 data repository. Greater precision is sometimes required. In this case, cadastral data offers more detailed georeferenced information on the buildings (dwellings per plot, dwellings per floor, etc.).

According to interest, Safety Review Risk Assessments take into account special issues, such as:

- Campsites;
- Shopping centers;
- Other establishments that receive the public (ERP), like stations and airports, hospitals, schools, stadiums, etc. The local authorities (town hall, prefecture) can offer information on capacity, or it can be found on site;

A more detailed count, but less frequently used in French practice, consists of proposing two scenarios:

- A daytime scenario, with people at work, at school or in the shops and other ERPs (establishments that receive the public);
- A night-time scenario, when people are at home, with businesses and ERPs mostly closed.

Finally, the assessment of the impacts can also take into account occasional presence linked to leisure activities: this would concern fishing and hiking which can take place near river bed.

The results are then presented in a table indicating the number of people per municipality potentially impacted (see example on the next page).

Name of the municipality impacted by the dam break wave	Department	Total population (INSEE 2006)	Total surface (in km²)	Population density of municipality (people/Km²)	Additional surface submerged by wave (in ha)	No. of people exposed according to classification of the zone concerned										Total of municipality population impacted	% of municipality population impacted	TOTAL no. people exposed	Remark	
						Constructed land				Non-constructed land										Sensitive zones (hospitals, schools, swimming areas, etc.)
						By assessment of percentage of buildings affected		By assessment of no. of buildings impacted		Undeveloped and very little frequented (forests, fields, etc.)	Developed and little frequented (fishing, etc)	Developed and potentially frequented or highly frequented	Campsites							
						% built area impacted	No. people exposed	No. constructions	2.5 pers per construction				1 pers/100 ha	1 pers/10 ha	10 pers/1 ha					
Municipality A	123	9345	67	140	214			13	33		21				150	33	0.35	324	Hiking trail	
																			20	Forestry Commission
																			100	Lake with leisure base
Municipality B	123	1860	49	38	30						3				0	0.00	3			
Municipality C	123	2996	29	104	40						4				15	0	0.00	44	Golf	
															25				Lake with leisure lake	
Municipality D	123	1717	21	84	11						1				0	0.00	1			
Municipality E	123	13125	107	122	32						3				0	0.00	3			
Municipality F	123	2555	89	29	13						1				0	0.00	1			
Total for all municipalities		31598	362	87	340			13	33		33				33	0.10	376			

Table 7.2: Example of counting of people potentially impacted by the dam break wave

7.3 Critical analysis of the results

The study of the dam break wave allows an order of magnitude of the number of people likely to be impacted by a dam failure. It is not possible to reproduce a dam break wave phenomenon in full detail, considering the complexity of the failure modes or dam failure and the significant uncertainty on the behavior of floating elements, sediment transport and the structures downstream (bridges, weirs, dams, etc.). An overall count of the people likely to be impacted is therefore sufficient.

The most important element remains the time of arrival of the wave, which allows the local authorities to make Emergency and Preparedness Plans accordingly. The water level values calculated are corrected and increased to take into account uncertainties linked to the imprecision of the model, the data and the imperfect knowledge of how the phenomenon will progress.

In the end, the quality of a dam break wave study depends on the assumptions used that encompass all the plausible phenomena, in order to be able to define a coherent order of magnitude of impacts.

8 Assessing the criticality of scenarios, displaying risks and measures to reduce the risks

8.1 Assessing the criticality of scenarios and displaying risks

Once the severity of the consequences and the occurrence of the scenarios have been determined, the crossing of these two elements allows the criticality of the scenarios to be established. Considering the difficulty of obtaining quantitative results, particularly a quantification of occurrence, French practice uses criticality matrices consisting of displaying and prioritizing the different scenarios on a summary table. On it, we find the two entries “severity” and “occurrence” for the potential scenarios, as shown in the figure below.

Gravité	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
	E	D	C	B	A
Désastreux		1			
Catastrophique					
Important	7				
Sérieux	5, 6, 8, 9, 10	2	3		
Modéré	4				

Figure 8.1: Example of a criticality matrix

Vertically: Severity; *top to bottom*: Disastrous; Catastrophic; Important; Serious; Moderate / Horizontally: Probability of occurrence of potential accidents occurrence

N.B: the classes of probability shown in this grid example are given in table 8.1

NB: accident n°1 corresponds to the failure of the dam. This is the most severe accident assessed in a dam Safety Review Risk Assessment

The criticality matrix can be completed with the limits of tolerability. These limits are usually represented by a color gradient from unacceptable risk (red) to acceptable risk (white), like the first example in the figure below. The second example, more frequently used, uses color coding with red (inacceptable), yellow (tolerable), green (acceptable).

Gravité	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
	E	D	C	B	A
V. Désastreux	1	1	1	1	1
IV. Catastrophique	1	1	1	1	1
III. Important	7	1	1	1	1
II. Sérieux	5, 6, 8, 9, 10	2	3	1	1
I. Modéré	4	1	1	1	1

Probabilité	Fréquent	A	1	1	1	1	1
	Probable	B	1	1	1	ERC 1	1
	Peu probable	C	1	1	ERC 2 ERC 3	1	1
	Rare	D	1	1	ERC 4	1	1
	Extrêmement rare	E	1	1	1	1	1
			Mineure	Significative	Sévère	Critique	Catastrophique
			Gravité				

1	Risque inacceptable
1	Risque à surveiller
1	Risque acceptable

Figure 8.2: Examples of criticality grids showing the limits of acceptability

First Matrix: Vertically: Severity; *top to bottom*: Disastrous; Catastrophic; Important; Serious; Moderate / Horizontally: Probability of occurrence of potential accidents occurrence;

Second Matrix: Vertically: Probability; *top to bottom*: Ordinary; Unlikely; Very Unlikely; Rare; Extremely Rare Horizontally: Severity; *left to right* : Minor; Significant; Severe, Critical, Catastrophic/ ERC = feared event

Legend : red = unacceptable Risk/Yellow = Risk to watch/ Green = Acceptable Risk

As we can see in the examples in Figure 8.1 and Figure 8.2, Safety Review Risk Assessments do not systematically consider the same scales for the “occurrence” and “severity” variables. In fact, in the context of the French regulations, **the legislator has not imposed a definition of these limits, leaving the choice to the Entity responsible of the dam.** Some managers have preferred not to decide and therefore the criticality matrix does not show any limits of acceptability (see illustration below).

Occurrence Personnes impactées	E Possible mais extrêmement peu probable	D Très improbable	C Improbable	B Probable	A Courant
> 10 000		ERC01			
1 000 – 10 000			ERC-02		
100 – 1 000					
10 – 100		ERC-04	ERC-03		
< 10		ERC-08 (80 m ³ /s)	ERC-06 (60 m ³ /s) ERC-07 (80 m ³ /s) ERC-09 (76 m ³ /s)	ERC-05 (60 m ³ /s) ERC-10 (60 m ³ /s)	

Figure 8.3: Example of a criticality grid without limits of acceptability

Vertically: Impacted people / Horizontally: occurrence; E = possible but extremely unlikely; D = very unlikely; C = unlikely; B = likely; A = ordinary / ERC = feared event

In the end, this task allows the entity responsible of the dam to propose measures that make it possible to control and/or reduce the risks as reasonably as possible (ALARP principle: As Low As Reasonably Practicable).

Some entities responsible of the dam display the goals to attain in terms of improving the safety of their dam. This consists of assessing the contribution of the different measures to reducing risks (Figure 8.4 below) in a residual criticality matrix after their implementation.

Gravité	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
	E	D	C	B	A
V. Déastreux	1				
IV. Catastrophique					
III. Important	7				
II. Sérieux	5, 6, 8, 9, 10,	2	3		
I. Modéré	4				

Gravité	Probabilité d'occurrence des accidents potentiels				
	E	D	C	B	A
V. Déastreux	1				
IV. Catastrophique					
III. Important	7				
II. Sérieux	2, 5, 6, 8, 9, 10,	3			
I. Modéré	4				

Figure 8.4: Development of the criticality matrix after application of risk reduction measures.

Vertically: Severity; top to bottom: Disastrous; Catastrophic; Important; Serious; Moderate / Horizontally: Probability of occurrence of potential accidents occurrence

8.2 Risk control and reduction measures

8.2.1 Terminology

Risk control measures are procedures that the entity responsible of the dam and his operator undertake to maintain a satisfactory level of safety over time (for example, maintaining a policy of equipment maintenance ...). This does not modify the criticality of the scenario identified.

Risk reduction measures are commitments by the entity responsible of the dam and his operator to reduce the level of risks considered to be unacceptable. The implementation of these measures will lead to a revision of the criticality of the scenario on which the measure will focus.

Moreover, the need for additional studies offering a deeper understanding of the dam and the hazards and risks it can cause, were necessary on several dams (in particular the smallest ones about which little is known). These additional studies, which are not risk reduction measures in themselves, have contributed to reducing the uncertainty in assessing the level of risk in the Safety Review Risk Assessment.

8.2.2 Risk control measures (RCM)

The risk control measures are reflected in:

- Less uncertainty in assessing initiating incidents or the level of confidence accorded to safety barriers (for example measuring the thickness of a pipe running through the dam and estimating its strength);
- Maintaining structures and equipment in a good condition of operation and reliability (for example, continuing a policy of gate maintenance);
- Optimizing and improving the relevance of monitoring actions (for example, frequent measurements of a leakage rate).

8.2.3 Risk reduction measures (RRM)

Risk reduction measures are reflected in the implementation of different safety barriers or work on the structure and its equipment that reduces risks. This can be technical (e.g. adding a mechanical lock to prevent the unintentional opening of a gate) or organizational (modifying the operator's organization and procedures to guarantee that a gate opens when required). These measures can also be more serious, including structural modifications on the dam or on safety elements when the safety level is proven to be low. In this latter case, temporary measures are proposed to guarantee an acceptable safety level for the dam before the work is carried out (for example lowering the reservoir level, tag-out more personnel present...).

When implementing risk reduction measures, the other risks must be kept at an acceptable level (e.g., a float operated gate that is incorrectly balanced with a tendency to unintentional opening: the gate control float that has been (over) lightened. Making it (too) heavy could induce a risk of not opening during a flood event).

Feedback on French Safety Review Risk Assessments has shown that the risk reduction measures proposed only concerned a reduction of the occurrence of an accident rather than its severity.

8.2.4 Example

The dam safety regulatory authority has produced a summary of the risk reduction measures produced on Safety Review Risk Assessments in one region of France (Nouvelle Aquitaine). These are risk reduction measures identified by the structure managers following the completion of Safety Review Risk Assessments that were sometimes carried out on demand by the dam safety authority. So, for 111 dams with different uses and a wide range of operators, 298 risk reduction measures were proposed, shown in the figures below.

These figures show that many of the risk reduction measures proposed reflect a lack of knowledge about the structures: 44% of the risk reduction measures are commitments to carrying out surveys and additional studies to confirm/revise the rating of an event or the stability of different structures (Figure 8.5). Moreover, 12% of the risk reduction measures concern an improvement in monitoring and therefore the understanding of the structure's behavior.

44% of the measures concern actual risk reduction measures (Figure 8.5) by carrying out civil works on the dam (29%) and on the safety elements (29%) (Figure 8.6). The Safety Review Risk Assessments also allowed an improvement of the control systems (15%) and the operators' organization (27%) (Figure 8.6). These last figures show that an improvement in structure safety is not only reflected in structural work on the structures.

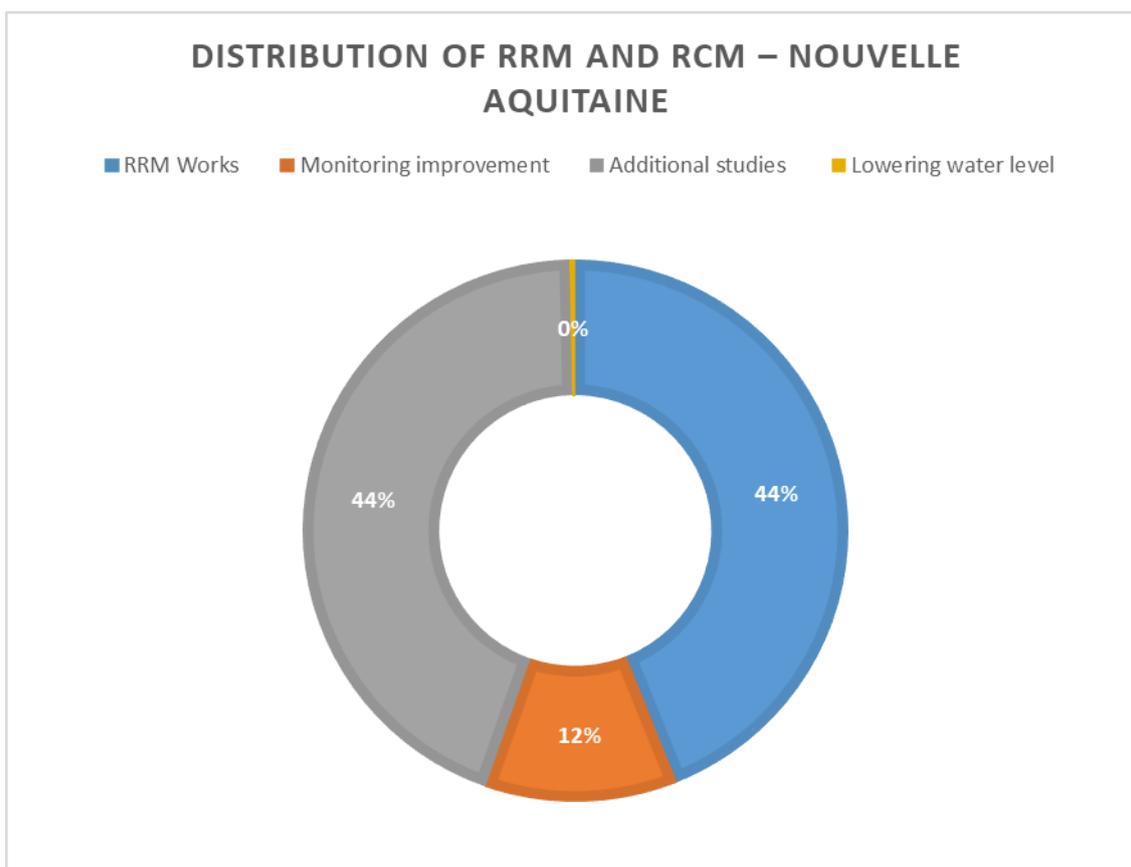


Figure 8.5: Distribution of RRM and RCM – Nouvelle Aquitaine

DISTRIBUTION OF RRM (WORKS) – NOUVELLE AQUITAINE

- Civil engineering works on spillway
- Hydromechanical works on spillway
- Works on bottom outlet
- Control system improvement
- Operators' organization measures
- Others works on safety elements

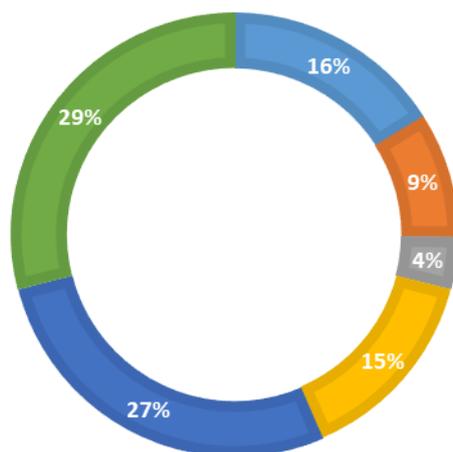


Figure 8.6: Distribution of RRM works – Nouvelle Aquitaine

DISTRIBUTION OF ADDITIONAL STUDIES – NOUVELLE AQUITAINE

- Studies and Surveys for the dam stability
- Hydrological and Hydraulic studies
- Control System improvement studies
- Hydromechanical studies

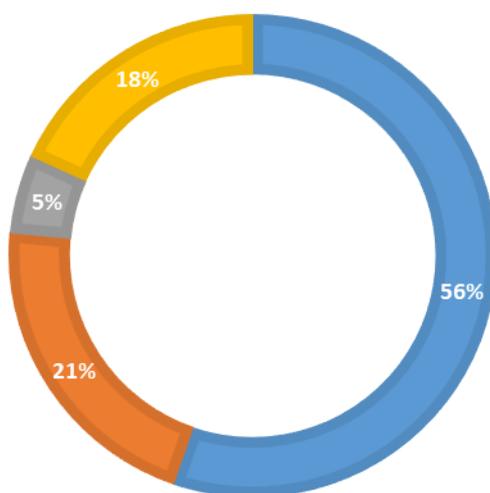


Figure 8.7: Distribution of additional studies– Nouvelle Aquitaine

Examples of risk reduction measures:

Type of RRM	Examples
Civil work on spillway	Work to recalibrate the spillway for the design flood
Work on spillway gates	Treatment of spillway gates (sandblasting and repainting)
Work on bottom outlet	Neutralizing an old bottom outlet no longer required
Improvement of the control system	Work to ensure reliability of back-up engine of spillways
Organizational measures	Organizing formalized follow-up of agent training in monitoring and in gate operation during a flood
Work on the dam	Repairs to the deteriorated zone on the upstream facing

9 Summary: the contribution of the risk analysis to dam safety in France

9.1 The contribution of the risk analysis to dam safety in France

The practice of dam risk analysis in France is illustrated through dam Safety Review Risk Assessments, an essential requirement of the regulations for all large dams. When risk analyses started in 2007, and for the first generation of Safety Review Risk Assessments, engineers had to be trained in risk analysis methodologies. The field is now well in place in the practices of risk analysis and the procedures presented in the preceding chapters applying to dams without any major methodological difficulties.

In the opinion of all the stakeholders, risk analyses carried out through Safety Review Risk Assessments in France have had major positive impacts on dam safety. Among the main contributions, we can cite:

- A new multi-skill functional approach that goes beyond the traditional “Civil engineering” approach;
- A notable improvement in the general and exhaustive knowledge of structures;
- An identification and inter-classification of the major failure scenarios and safety risks;
- An effective reduction of these risks by implementing actions that might be undertaken following a Safety Review Risk Assessment, with the adoption of a preventive posture.

9.1.1 A new multi-skill functional approach

Generically, Safety Review Risk Assessments have instituted a multi-skill functional approach as opposed to the compartmentalization that may have existed between each professional skill. For a long time, dam safety was mainly examined from the “civil engineering” aspect. The question of controlling uncontrolled flow releases downstream had also become an important issue in France, particularly following the accident at La Croux dam in 1984 [REVERCHON 2015]. However, the multi-professional skills functional approach has certainly allowed the definition of a new paradigm in the way the safety of dams in their environment is approached globally (taking into consideration the risks of fire, avalanche, landslide, ice, etc.).

9.1.2 A better understanding of structures

The main difficulty of a risk analysis certainly resides in the existence, quality and exhaustivity of the input data used in the different steps to justify the assumptions and choices made to carry out the methodology. The understanding of the operation of dams and their equipment, as well as their design and their condition, is therefore an essential element for the success of a Safety Review Risk Assessment.

Through this effort, one of the initial benefits of the risk analysis was a much better understanding of the structures, both from the point of view of their technical design as from the point of view of their operation. As such, the Safety Review Risk Assessment constitutes an excellent documentary and descriptive summary of what is known about the dam. The data in it has been formally critiqued and validated. The risk analysis has also led to a relative completeness of this knowledge by exploring aspects which may appear to be mere detail, but which play an important role in the functional chain. As an example of this, we could cite certain parts of structures that had been neglected, like concrete

plugs or bottom bulkheads of diversion tunnels, civil engineering pathologies with very slow kinetics or like water level sensors that play a role in the dam's warning and information system.

The carrying out of Safety Review Risk Assessments has thus led the different engineering or operational technical departments to share their respective knowledge of a part of the dam in order to contribute to the overall understanding of the structure and the carrying out of the risk analysis. The aggregation of this knowledge and its summary in the risk analysis constitute a common deliverable that can be shared at all the structure manager's levels.

Structures of medium importance (class B under the French regulations) that did not always benefit from the history of the larger dams, were less well known and documented. Knowledge of these dams has therefore progressed considerably. Moreover, Safety Review Risk Assessments have been especially interesting for all structures equipped with numerous gates and control systems. Risk analyses have highlighted complex scenarios combining hydromechanical or control failures with hydrological scenarios, leading to feared events.

9.1.3 Identification and inter-classification of risks

Identification of new risks

Risk analysis tools have allowed the emergence of failure scenarios that would not have been easily identifiable without a multi-disciplinary methodological risk analysis approach. Potential faults that would not necessarily have been understood by the dam operator have sometimes been shown up. Following the risk analysis exercise, operators' attention has been considerably widened in terms of structure safety risks. Attention usually given to civil engineering has been extended to the hydro-mechanical and control system aspects.

A new prioritization of risks

The quantification of initiating events has shown up the main trends. Even if we should remain prudent regarding the individual quantification of the probability of initiating events, the different methods, notwithstanding their intrinsic qualities, have provided a tool to inter-compare and, finally, inter-classify the structure's main safety risks as objectively as possible. Certain issues that were more or less known or treated have thus been highlighted and weighed in importance.

Assistance with operating or modification decisions

This is an important result which offers a global vision of a dam's risks, with a proposal of how they should be prioritized, thereby constituting a valuable decision aid tool. This can be the case, for example, in the context of placing a prop to temporarily block an automatic float operated gate, in balancing between a risk such as the control of downstream flow variations and the risks of structural failure posed by floods.

Notions of danger levels or situations

The notion of a failure threshold water level has also been strengthened by the appearance of Safety Review Risk Assessments and has become an essential indicator of dam safety. However, determining this remains an open technical question for many structures and must be looked into further in the future. The actual exercise of the risk analysis has extended the failure threshold water level to that of

a danger situation or event (for example, the concomitance of the thermal and hydrostatic loading for an arch dam or the different hydrostatic loading situations on a gate structure dam).

An effort to identify incidents and accidents to be continued

The carrying out of this exercise has also led to greater knowledge of feedback on dam-related incidentology and accidentology. These efforts lead to both a better quantitative appreciation of certain risks and to re-questioning the main failure modes of structures and components. Since the start of Safety Review Risk Assessments, a certain number of publications and works [GASTAUD et al. 2015, DIEUDONNE et al. 2016, ALBRECHT et al. 2016, DEROO et al. 2016, BOURDAROT 2016] looking into this have been produced, particularly in France, even if this aspect still needs to be explored further. The carrying out of Safety Review Risk Assessments has therefore highlighted the need to collect information on accidentology. To do this, the CFBR has set up a working group, which publishes bulletins on the themes of incidentology and accidentology. Since control systems and hydromechanics are once again fields where progresses are collectively felt the most, these subjects were discussed in the first two bulletins [CFBR 2017a and b].

9.1.4 Risk reduction and control measures and the preventive stance

The identifying and prioritizing of risks carried out in Safety Review Risk Assessments have led to a series of measures to reduce or control risks. Their execution date is proposed in the shorter or longer term according to the stakes identified. Safety Review Risk Assessments therefore allow a real road map to be established for the dam owner between now and the next version of the Safety Review Risk Assessments.

Moreover, the participation of the operational teams throughout the drafting of Safety Review Risk Assessments allows the operator to be rapidly aware of certain measures that rapidly and concretely reduce the risk of a failure scenario at a low cost (for example, the addition of a gate opening emergency stop button or the modification of an operational instruction to take the risk of freezing into account).

The carrying out of Safety Review Risk Assessments and their revisable character place the dam owner's actions within the logic of the Safety Review Risk Assessment. With hindsight, the risk reduction measures proposed are assessed more in terms of their impact on the initiating events and feared events identified in the Safety Review Risk Assessments. Safety Review Risk Assessments constitute backing not only for drafting specifications, but sometimes for defining the most effective solutions to implement. Safety Review Risk Assessments have largely contributed to the reinforcing of dam safety being a constant preoccupation at all the hierarchical levels of the dam owner and operator.

9.2 Safety Review Risk Assessment-related communication

- **externally:** new popularization of dam risk analysis

For the public, dam Safety Review Risk Assessments are a new approach. Before Safety Review Risk Assessments were introduced, the only risk-related elements known by the public came from the emergency and preparedness plans in place for the risks of failure of the largest dams. Contrary to EPP which are part of an approach designed for crisis management, Safety Review Risk Assessments do not include provisions for evacuating the local populations. Consequently, Safety Review Risk Assessments significantly add to the knowledge of the major risks and other risks related to dam operation.

The regulations include in the standardized content of Safety Review Risk Assessments a non-technical summary intended for external communication. Its purpose is to present a summary of the study, in particular its results. It is intended to be educational, easy to understand and highly synthetic. For the person writing it, it is a real exercise in popularization. It allows the reader to understand the operation of structures and, in particular, to be aware of the risks identified and their consequences. The reader then knows to what extent he is concerned by the different risks of accidents.

Safety Review Risk Assessments can be consulted (in a limited context) on request to the regional authority of the State (Préfet). It should be noted that the regulations include the possibility for the operator to indicate the parts of the studies that he wants to keep confidential (industrial secret or of a sensitive nature).

- **internally:** a tool for communicating to all the stakeholders concerned on the safety of dams.

It seems that, internally, the risk analysis constitutes an excellent opportunity to raise awareness among the safety-related personnel. People who have been able to participate in working groups corresponding to the different stages of the risk analysis are made aware, and have a good understanding of, the risks on the scheme and therefore to safety. However, the risk analysis report remains a technical and relatively complex document and it is advised that people who are not associated with the working groups should be accompanied through it.

The risk analysis report is an excellent aid for new employees arriving on the scheme for understanding the general operation of a structure, the associated risks and the corresponding risk control measures. It is, nonetheless, preferable to adapt presentations and uses of it to the target. Operators also appreciate these documents which offer a summarized view of a scheme's risks. This summarized view of the sensitive points of the dam allows safety priorities to be managed with greater objectivity thanks to the decision aid elements that are more rational and include a reliable prioritization of the risks. In this way, the studies add to the management tools for renovation investments and structure modifications.

Lastly, Safety Review Risk Assessments can give a sense to certain maintenance or monitoring actions, lead to reviewing certain practices that take the risks into account better and frequently add to the understanding and acceptance of the constraints of availability of the safety equipment, for example. The risk analysis carried out in the context of the Safety Review Risk Assessments then becomes a reference for the operation of structures for all those involved in operations and maintenance.

9.3 Appropriation of the Safety Review Risk Assessment by the dam's different stakeholders

9.3.1 During drafting

- Involvement of the operating personnel at different levels in the risk analysis

Good practice, and at the risk of failing this exercise if this is not done, is to put together a multidisciplinary working group, including operators. Operators constitute sources of technical information and their presence is a guarantee of the success and smooth running of the risk analysis. They are of valuable help with their knowledge of the operation and the condition of the structures and equipment. Moreover, an operator who has taken part in the risk analysis will be able to report its findings and become involved in possible risk reduction measures.

- Involvement of experts from all fields

As part of the work group or brought in according to the requirements of the different phases of the study, the use of internal or external experts is common, mainly in the failure mode analysis phase (PRA or FMEA). They can offer their view on the possible dysfunctions and their consequences. Through their knowledge of the design and operation of the equipment, they also contribute to the assessment of the initiating events and the level of confidence of the safety barriers used, giving their opinion on the level of maintenance and control of this equipment. Expertise on the risk analysis methodology is provided by the study manager who is conducting the analysis.

- Involvement of the entity responsible of the dam

The entity responsible of the dam participates in all the phases of the analysis since, in the end, he will take the results of the study to the authorities and commit to putting in place the measures to reduce or control the risks.

9.3.2 After it is drafted

Once the risk analysis is finalized and has been submitted to the dam safety authority, the operator ensures, as a minimum, that the safety level shown in the study is maintained or even seeks to improve it by implementing the proposed to risk control or reduction measures. In the case of an unacceptable or intermediate criticality scenario, the entity responsible of the dam undertakes to implement the risk reduction measures within a fixed deadline. These may consist of work to modify the dam by adding prevention or warning systems, for example, or modifying the organizational provisions reflected in the procedures.

During the risk analysis, a list of safety barriers has been identified; the operator will make sure that the level of reliability is maintained to meet the requirements of the risk analysis. They will be monitored, maintained and tested regularly for this purpose.

9.4 Interest for controlling dam safety

Though the systematic introduction of risk analyses through Safety Review Risk Assessments on large dams, the supervisory authority in France wanted dam risks to be highlighted so that they could be reduced.

The dam safety authority is responsible for controlling the Safety Review Risk Assessments. During the first generation of Safety Review Risk Assessments, numerous exchanges with dam owners and their

consultants were required, firstly to ensure the application of the regulations on the contents of the Safety Review Risk Assessments, and secondly, on the conclusions of the study relative to the risk control and reduction measures. On this last point, the risk reduction measures proposed have been set out and given deadlines in administrative acts on their implementation. Moreover, the supervisory authority regularly checks that the entity responsible of the dam is carrying out his commitments correctly, particularly during the periodic inspections.

The Safety Review Risk Assessment is a useful summary document for administrative dam inspections. By highlighting the technical-organizational equipment and procedures that guarantee the safety of the structure in operation, the inspection focuses in particular on these elements and thereby has greater pertinence and effectiveness.

In the end, close to 600 Safety Review Risk Assessments have been carried out (one Safety Review Risk Assessment can concern several structures in a relevant hydraulic context). These risk analyses have raised many questions on the scope of the studies and the analysis methodologies and there may have been defects in their execution, particularly the first generations.

Over and above these defects in execution that are inherent to any new process, the dam safety authority has noted that, overall, the work carried out was mainly pragmatic and operational. This exercise could certainly have remained theoretical, but it is the multi-trade approach, the participation of all the stakeholders involved in the dam, and the steering of the studies by skilled consultants that guarantees the success of the exercise.

Of course, if risk analysis, through Safety Review Risk Assessments, constitutes a highly effective approach to risk management, it is not a “zero risk tool” against incidents and accidents. All those involved in dam risk control have an essential role to play in achieving their safety: the dam owner that is responsible of managing Safety Review Risk Assessment and commits to apply risk reduction actions, the operator through his monitoring, operating and maintenance missions, the consultants that guarantee the quality of the diagnoses and studies, and the dam supervisory authority.

A new decree consolidates the plan and contents of Safety Review Risk Assessments by going into the input data in depth (a full diagnosis of the structures and equipment and a report on their condition, behavior and design are now explicitly requested prior to the risk analysis), by adding more specific elements on the dam safety management (managing sub-contractors, defining responsibilities, etc.) and a better assessment of the risks during the operational phases in normal situations as well as in accidental situations with, if necessary in this latter case, the provision of flood waves in a 1/25000 format for scenarios that could lead to serious consequences.

The Safety Review Risk Assessment is now an essential document in France that the structure manager uses to demonstrate the safety of his dam in all operational situations. It is a useful document for all the stakeholders, including the supervisory authority, allowing them to identify the main points of dam safety.

10 References

- [AELBRECHT et al. 2016] AELBRECHT D., Vermeulen J., Laugier F. (2016). *Les barrages et les risques de crue : retour d'expérience ; modes de défaillance ; expérience d'EDF pour les solutions de confortement*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.
- [BAUMSTARK 2006] Baumstark L. (2016). L'usage de la valeur statistique de vie humaine. *Colloque IFSTAAR CEREMA « Analyse des coûts sociaux de l'insécurité routières et optimisation des politiques publiques »*, Paris, 9 novembre 2016.
- [BOURDAROT 2016] Bourdarot E. (2016). *Discussion sur les mécanismes de défaillance des barrages voutes : retour d'expérience de l'accidentologie et de l'incidentologie*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.
- [CEA 2000] CEA (2000). A guide to dam risk management. Canadian Electricity Association – Dam safety interest group, December 2000.
- [CFBR 2018] CFBR (2018). *Recommandations pour la justification du comportement des barrages voûtes (provisoire)*. Octobre 2018
- [CFBR 2017a] CFBR (2017). *Bulletin n°1 - Retour d'expérience sur la conduite automatique des vannes*. Janvier 2017
- [CFBR 2017b] CFBR (2017). *Bulletin n°2 - Les défaillances mécaniques des vannes de barrage*. Juin 2017
- [CFBR 2017c] CFBR (2017). *Dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage par les dommages incrémentaux ou différentiels : Recommandations pour la mise en œuvre d'une méthode applicable aux barrages en France*. Octobre 2017
- [CFBR 2013] CFBR (2013). *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage en France. Juin 2013*. Téléchargeable dans la rubrique « Documentation » du site internet du CFBR (<http://barrages-cfbr.eu>).
- [CFBR 2012] CFBR 2012. *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids*. Octobre 2012
- [CFBR 2017] CFBR 2017. *Dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage par les dommages incrémentaux ou différentiels : Recommandations pour la mise en œuvre d'une méthode applicable aux barrages en France*.
- [CREMONA 2002] Cremona C. Dir. (2002). *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. AFGC, mai 2003. Presse des Ponts et Chaussées.
- [CTGREF 1978] CTGREF (1978). Calcul d'onde de submersion due à la rupture d'un barrage. *Rapport n°25 – Etude*.
- [DEROO et al. 2016] Deroo L., Royet P., Poulard C. (2016). *Sûreté et efficacité des barrages écréteurs*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.
- [DIEUDONNE et al. 2016] Dieudonné S., Peyras L., Beullac B., Gastaud C., Prévot G., *Retour d'expérience de la première génération des études de dangers en France : analyse méthodologique et comparaisons à l'accidentologie*. Colloque CFBR 2016 "Sûreté des barrages et enjeux.

- [GASTAUD et al. 2015] Gastaud, C. Gauthier, A. 2015. *Enseignements tirés des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) et éléments de retour d'expérience sur les organes hydromécaniques et de contrôle-commande des barrages*, Colloque "Vantellerie et contrôle-commande des barrages", Chambéry, 2-3 décembre 2015. CFBR : 353-367
- [ICOLD 2005] Commission Internationale des Grands Barrages – CIGB / ICOLD (2005). Bulletin n° 130 – Evaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage.
- [ICOLD 2005] Bulletin on risk assessment, n°130, 2005
- [ICOLD 1995] ICOLD (1995). Bulletin 99: Dam Failures – Statistical Analysis. Paris: ICOLD.
- [ICOLD 1993] ICOLD (1993). Bulletin 93: Ageing of dams and appurtenant works – Review and recommendations. Paris: ICOLD.
- [ICOLD 1983] ICOLD (1983). *Deterioration of Dams and Reservoirs – examples and their analysis*. Gap : Ed. Louis-Jean, décembre 1983. 367 p.
- [IDDIR 2008] Iddir O. (2008), *Le nœud papillon : une méthode de quantification du risque majeur*, Techniques de l'Ingénieur, Réf : SE4055 v1
- [INERIS 2016] Debray B. (2006), Rapport INERIS Ω 7 « *Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle* », n°46005, Octobre 2006
- [INERIS 2011] Bolvin C., Balouin T., Vallee A., Flauw Y. (2011). *Une méthode d'estimation de la probabilité des accidents majeurs de barrages : la méthode du noeud papillon*, Colloque technique CFBR / AFEID "Pratique des études de dangers des barrages", Nov 2011, Lyon, France. pp.33-40.
- [INERIS 2009] INERIS (2009). Maîtrise des Risque Accidentels sur les ouvrages hydrauliques – Opération B – État de l'art sur les méthodes existantes de cotation en gravité des accidents de barrages en termes de conséquences humaines – Programme 181-DRA91 – Rapport n°DRS-09-103165-05239A – 09/2009.
- [INERIS 2006] Debray B., Rapport INERIS Ω7 « *Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle* », N°46055, Octobre 2006
- [IRSTEA 2010] Peyras L., Boissier D., Carvajal C., Bacconnet C., Becue JP., Royet P. 2010, *Analyse de risques et Fiabilité des barrages – Application aux barrages-poids en béton*. Ed. Universitaires Européennes. Berlin. 201 p.
- [KAPLAN 1997] Kaplan S. (1997). The Words of Risk Analysis. Risk Analysis, Vol. 17, n°4.
- [LAROUZEE 2015] Larouzee J. (2015). *Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroélectriques : le cas des études de dangers de barrages d'EDF*. Thèse de doctorat. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01310768/document>
- [LEMIEUX et al. 2016] Lemieux M., Kingery R. (2016). Thirty Years of Spillway Reconstruction: Impacts of Moving to a Risk-Based Spillway Standard. ASDSO publications.
- [MEDDE 2007a] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2007). Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques. Journal officiel de la République Française (13/12/2007).

- [MEDDE 2007b] Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (2007). Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques. Journal officiel de la République Française (14/05/2015).
- [MORTUREUX 2002] Mortureux Y. (2002). *L'analyse préliminaire de risques*. Techniques de l'Ingénieur 2002. Réf : SE4010 v1
- [NF EN 31010 2010] Norme NF EN 31010 « *Gestion des risques - Techniques d'évaluation des risques* », Juillet 2010
- [QUEBEC 2002a] Loi sur la sécurité des barrages au Québec, S-3.1.01 (2002). Mise à jour au 01/01/2016 disponible sur : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_3_1_01/S3_1_01.htm
- [QUEBEC 2002b] Règlement sur la sécurité des barrages au Québec, S-3.1.01 R.1 (2002). Les mises à jour ultérieures intègrent des modifications concernant la définition de la crue de sécurité (articles 21, 21.1, 22 et 23). Mise à jour au 01/01/2016 disponible sur : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_3_1_01/S3_1_01R1.HTM
- [RENARD 2006] Renard B. (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de doctorat, INP-Grenoble. 361 p.
- [REVERCHON 2015] Reverchon B. et al. (2015). *Conception, exploitation et rénovation des évacuateurs de crue vannés des barrages exploités par ÉLECTRICITÉ DE FRANCE*. 25^{ème} congrès des grands barrages CIGB 2015, Stavanger
- [SIA 2004] S.I.A. (2004). Cahier Technique 2018. Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Société des Ingénieurs et Architectes (Suisse).
- [VILLEMEUR 1988] Villemeur A (1988). Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels – fiabilité – facteurs humains – informatisation. Paris : Eyrolles.
- [ZIELINSKI 2014] Zielinski A. (2014). Tolerability of societal risk criteria. *Hydropower & Dams*, Issue 4 (2014), p. 63-67
- [ZWINGELSTEIN 1996] Zwingelstein G. (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité – Guide pratique d'application de la RCM*. Paris : Hermes. 666 p.
- [ZWINGELSTEIN 1995] Zwingelstein G. (1995). *Diagnostic des défaillances – Théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Paris : Hermes. 601 p.

11 Terminology – Glossary

Ageing mechanism	Ageing process. Same as the “ageing scenario”.
Ageing scenario (for dams)	Series of causes and effects that lead to the degradation of the characteristics and properties of dams and their appurtenant structures [ICOLD 1993].
Analysis area	Area including the analysis perimeter and all its environment, upstream and downstream.
Analysis perimeter	The dam and all appurtenant structures contributing directly to the safety functions.
Bottom outlet (gate)	Outlet component at the bottom of the reservoir usually used to empty the reservoir or evacuate sediment and sometimes to allow irrigation.
Bow tie	The method called the “bow tie” method because of its diagrammatic representation, is a probabilistic risk analysis and management approach. This approach, which combines a fault tree and an event tree based on a central feared event, offers a concrete vision of accident scenarios. In particular, this procedure highlights the sequential combinations of chain events and thereby makes it possible to check the prevention and protection barriers that are in place.
Central Feared Event Or Undesirable Central Event	Event conventionally defined, in the context of the risk analysis, at the center of the accidental chain in a Bow Tie diagram. In an industrial context this may be the loss of confinement of a dangerous matter, or a loss of physical integrity for solids. These events constitute the input points of a risk analysis.
Component	Elements that make up a part of the structure with a function
Condition diagnosis	Examinations and investigations carried out prior to Safety Review Risk Assessments with the aim of characterizing the status of the structures and equipment that fall within the scope of the risk analysis. It also concerns the parts of the dam that are submerged and difficult to access. Before 2015, we called this a Full Technical Review or a Safety Review.
Consequences	Results of a total or partial failure of a dam or one of its appurtenant structures, in the long or short term, directly or indirectly on the property, people and infrastructures affected. The consequences can be victims, economic losses, damage or environmental damage ...
Criticality	Qualification of the hazard. Product of the severity and the occurrence of the dangerous scenario considered. It can be represented on a matrix

Criticality analysis	Activity that consists of ranking each failure mode by simultaneously considering the influence of its severity classification and its probability of occurrence (MIL-STD-1269A).
Criticality matrices	Representation on a double entry table (occurrence/severity) with (or without) limits of acceptability, on which scenarios are represented.
Dam Ageing	Category of deterioration due to alterations over time of the properties of materials and structures [ICOLD 1993].
Dam break flood wave	In this context: hydraulic phenomenon of the flooding of a valley caused by a sudden variation in the conditions upstream (weather, management, accident, etc.).
Dam classification	The definitions of dam classes (A, B, C) are set in article R214 of the code of the environment. Class A dams are the most important in terms of risks and issues of public safety
Dam register	Journal tracing the facts and events encountered during operation. It is filled in on an ongoing basis by the Operator.
Damage	Material or physical damage affecting property or people (victims). We distinguish bodily, material and moral damage.
Dangerous Phenomenon	Release of energy or substance producing effects that are likely to inflict damage on living or material targets, without prejudging their existence.
Deductive approach	Starting from effects to find the causes
Degradation (of a function)	Category of loss of performance, corresponding to a reduction in performance of a function that still remains above the functional threshold [CREMONA 2002].
Degradation (of a system)	The condition of a system showing a loss of performance of one of its functions or a subset that is itself degraded [ZWINGELSTEIN 1996].
Deterioration (of dams)	Any defective behavior from the point of view of safety and performances, including accidents and failures [ICOLD 1983].
Determinist	Describes a process that gives a result that remains the same for a fixed set of input data. The result is therefore “determined” by the data. Determinist is the opposite of probabilistic, which describes a process where the result can vary even if the data stays the same. Opposed to <i>probabilistic</i> (see this term).
Diagnosis	Identification of the probable cause of the failure(s) using a logical reasoning based on a set of information coming from an inspection, a control or a test.

Durability	A system's aptitude to accomplish the function(s) required in the given conditions of use and maintenance, until a limit state is reached (NF X60-500).
Effects	In the context of the analysis of failure modes (FMEA and FMECA), this term refers to the consequences on the operation of a failure within the system of a dam-type system. If the system's limits are constituted by those of the dam, we distinguish these consequences from the distant consequences that may also result from the same failure, such as the loss of human lives or damage to property due to the dam break wave downstream.
EISH (French acronym)	Important Event for Hydraulic Safety (to be identified and reported to the Authority).
Emergency preparedness plan	Document presenting action procedures for different types of alerts, as well as communication directories and maps showing water levels upstream and downstream and the arrival moment of a break wave from dam or appurtenant structures failure or dysfunction.
Environment	Set of elements that interacts with the structure as a potential aggressor or issue; (different of the usual "environmental" meaning)
Event tree	The event tree is a tool that makes it possible to study the consequences of an undesired event according to the operation of protective measures that are put in place to limit the severity of the effects of this event on its environment. The sequence of actions and events that may or may not lead to an accident can also be used to quantify the probability of events.
Event tree analysis	An event tree analysis is an inductive process which uses a tree graph to represent a logical sequence of occurrence of successive events or statuses of a system following an initial event.
Expert/Expertise/ Expert judgement	Expert: a person with knowledge and expertise [ZWINGELSTEIN 1995]
Expert/Expertise/ Expert judgement	Expertise: all the activities aimed at providing a client, in response to a question, with an interpretation, an opinion or a recommendation that is as objective as possible, elaborated from the available knowledge and demonstrations, together with a professional judgement (standard x50-110).
Expert/Expertise/ Expert judgement	Expert judgement: an intellectual process of appreciation, assessment, estimation or explanation leading to the pronouncing of an opinion
External factor of aggression	Exterior elements that can put the dam's safety at risk, including the natural risks and the risks linked to human activities.
Extreme event	Event that has a very low annual exceedance probability (AEP). Sometimes defined as an event that exceeds the <i>credible limits of extrapolation</i> and therefore depends on historical series and the quality of data available

Failure	Alteration or cessation of a system's aptitude to carry out its required function(s) with the performances defined in the technical specifications (NF X60-010).
Failure (of a dam)	Failure or movement of part of a dam or its foundation, such that the structure can no longer hold the water. In general, the result will be a "release" of a considerable volume of water [ICOLD 1995].
Failure kinetics	Characterization of the evolution over time of the failure of a dam (delay, speed).
Failure mechanism	Mechanism described by the processes that must occur and the successive physical steps, in accordance with physical laws, that allow the failure mode to go from initiation (cause) to the realization of the ultimate effect that interests us.
Failure mode	A component's lack of aptitude to carry out a function for which it was designed: loss or degradation of a function, untimely or unwanted function. Ways by which the system ceases to fulfil its functions.
Failure threshold water level	Water level over which the dam's stability can no longer be guaranteed. It can be reached following an extreme flood or a spillway dysfunction. The notion of the danger water level can be extended to that of a danger situation or event (for example concomitance of thermal and hydrostatic loading for an arch dam or the different situations of hydrostatic loading on a barrage-type dam in a river).
Failure wave kinetics	Characterization of the evolution over time of the propagation of a dam's failure wave (time it takes to reach a given point, speed of rising of the water, duration of submersion, etc.)
Fault tree	The fault tree represents a summarized version of all the combinations of events that may lead to a failure (highlighting the relationships of cause and effect), with a possible quantification of the probability of occurrence of the undesired event
Fault tree analysis	System engineering method to represent logical combinations of different system statuses and possible causes that may trigger a specific event (called the base event).
Flood	Increase in flow and/or level of a waterway that eventually causes an overflow of its streambed.
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis. Inductive method of system analysis of the causes and effects of failures that can affect the components of the system (NF X60-510, CEI 812-1985, standard MIL-STD 1629A). We suppose faults or initiating events to analyze all their effects on the system. An FMEA can be completed by considerations of criticality through an FMECA - Failure mode, Effects and Criticality Analysis. In an FMECA, each failure mode identified is classified according to the combined influence of its probability and the severity of the consequences.

FN curves	Curves showing F (annual probability of causing N or more deaths) as a function of N. This is the additional cumulative distribution function. These curves can be used to express societal risk criteria and to describe the safety levels of specific installations – the ALARP approach uses this type of FN curve
Function	Actions of a product or one of its components expressed exclusively in terms of purpose (NF X50-150).
Functional analysis	Procedure that consists of identifying, ordering, characterizing, prioritizing and/or valorizing functions (NF X50-150).
Hazard	Phenomenon of occurrence (probability), of a given duration and kinetics, and intensity; hydrological hazard: hydrograph; hydraulic hazard: water levels and velocities over time.
Hazard	Threat or condition that can occur either because of an exterior cause (e.g. earthquake, flood or human action) or due to an internal vulnerability, resulting in a failure mode. A source of potential damage or a situation that can give rise to losses.
Hazard potential	System (natural or manmade) with one or several hazard(s). By “hazard”, we mean an intrinsic property (potential energy, toxicity, etc.) of a technical system (water reservoir, elevation of a load, pressurizing of a liquid or a gas, etc.), a substance (material making up of sediments, pollutants, etc.), that may cause damage to a “vulnerable element”.
Human factors	The human factors refer to environmental, organizational and professional factors, as well as individual human characteristics that have an influence on professional behavior in a way that can influence safety.
ICOLD	International Commission on Large Dams - https://www.icold-cigb.org/
ICPE	Any industrial or agricultural asset likely to create risks or cause pollution or harm, particularly for the safety and health of residents, is a classified facility.
IGN	(French) National Geographic Institute.
Incremental consequences of a failure	Incremental losses or damage that the failure of the dam can cause on the areas upstream, downstream, on the dam or elsewhere, in addition to other losses that occur during the same event or the same natural conditions if the dam had not failed.
Inductive approach	Starting with an analysis of the causes of the danger to find the effects
Initiating Event (IE)	Initiating event; event that occurs ahead of a Central Feared Event.
INSEE	The (French) National Institute for Statistics and Economic Studies.

LIDAR	Light Detection and Ranging (or Laser Detection and Ranging): distance measurement technique based on an analysis of the properties of a beam of light sent back to its source.
Main function	Major function of a component for which it was designed.
Maintenance	All activities intended to maintain or restore a system in a given state or under given conditions of operational safety, in order to perform a required function. These activities are a combination of technical, administrative and management activities (NF X60-010).
MCA	(Multi-criteria analysis): approach that compares several options (doing nothing, project, alternative, etc.) according to different types of criteria. In the field of floods, the MCA consists of continuing the Cost Benefice Analysis using non-monetary indicators (population, jobs, heritage, environment, etc.).
Monitoring report	Periodic technical document drafted by a certified consultant providing and analyzing the monitoring results of the dam. Its periodicity is every 2 years for class A dams and every 5 years for class B and C dams.
Monte Carlo simulation	Procedure seeking to simulate stochastic processes by randomly selecting values in proportion to their joint probability density function.
MWL	Maximum Water Level: reservoir level reached during the design flood.
NWL	Normal Water Level.
Occurrence/Measurement of occurrence	Measurement of occurrence of an event: assessment of an event's appearance (probability or time delay of occurrence of the event).
Operational safety	Operational safety is the aptitude of a system to carry out one or several required functions in given conditions. Operational safety is characterized by different concepts, particularly reliability and durability [VILLEMEUR 1988].
Owner	Legal entity, person, company, organization, governmental body, public operator, consortium or other entity, that either has a governmental authorization to operate the dam, or is the legal owner or the site, the dam and/or the reservoir, and who is responsible for the dam's safety.
Performance	Aptitude of a structure to fulfil the functions for which it was designed. By extension, we speak of the performance of a function to indicate its execution status.
PRA	Preliminary Risk Analysis
Prevention (measures)	Measures that reduce the occurrence of a feared event.

Qualitative risk analysis	Analysis in text form, on a descriptive scale or in numerical form, describing the magnitude of the potential consequences, and the likelihood that these consequences will occur.
Quantitative analysis	Estimation of the probability of occurrence of events using calculations based on the numerical values of probability
Random variable	Quantity whose value is not exactly fixed, but which can take any value described by a probability distribution.
Reliability	Aptitude of a system to perform a required function, in given conditions, over a given time period (NF X60-500). Probability of correct operation of a scheme's specific component. It can be measured on an annual basis or for any specified period or, in the case of spillway gates, for example, on demand. From a mathematical point of view, reliability = 1 – probability of failure.
Residual risk	Level of risk remaining before, during and after a program of risk attenuation measures.
Risk acceptance	All the societal and economic criteria that make it possible to set a threshold beyond which the risk level is no longer tolerated
Risk analysis	Activity that consists of answering the three following questions: <ul style="list-style-type: none"> - what can lead to dangerous situations? - what are the chances that these situations occur? - if they occur, what consequences must we expect? [KAPLAN 1997]
Risk control measures	Measures that the dam owner and his operator commit themselves to maintain to guarantee a satisfactory safety level.
Risk management	Systematic application of management policies, procedures and practices consisting of identifying, analyzing, estimating, attenuating and controlling risks.
Risk reduction measures	The dam owner's and his operator's commitments to reduce the level of risks considered as unacceptable.
Risk	Relation between the consequences of an event and its probability of occurrence. The flood risk is defined by the product of flood hazards and the issues.
Risk/ Risk analysis	Risk: measure of a danger associating a measurement of the occurrence of an undesirable event and a measurement of its effects or consequences [VILLEMEUR 1988].

Safety	All the provisions made during the design, operation and maintenance of dams to ensure the protection of people and property against the dangers related to their presence or their operation.
Safety Review Risk Assessments (étude de dangers)	The French term “étude de dangers” comes from the terminology used in France in the high-risk industries. They are called “risk analyses” in international practice.
Safety barrier	All the technical and/or organizational elements that are required and sufficient to perform a safety function. We can distinguish: <ul style="list-style-type: none"> - barriers of prevention: measures aimed at preventing or limiting the occurrence of an undesirable event, ahead of the dangerous phenomenon; - barriers of limitation: measures aimed at limiting the intensity of the effects of a dangerous phenomenon; - barriers of protection: measures aimed at limiting consequences on potential targets by reducing vulnerability.
Safety factor	For structural and other technical systems, the ratio of the system’s resistance to the maximum design stresses, often calculated using established rules.
Safety function	Function whose purpose is to reduce the probability of occurrence and/or the effects and consequences of an undesired event in a system.
Scenario	A unique combination of several conditions, for example: <ul style="list-style-type: none"> - initiating event; - wind conditions; - initial filling of the reservoir; - gate operating condition; - failure mode; - current flow downstream, including tributaries; - factors determining the presence of populations downstream of a dam at the moment of the failure. <p>A scenario defines a set of circumstances of interest for an assessment of the risks. There are therefore loading scenarios, failure scenarios or downstream flood scenarios.</p>
Semi-quantitative analysis	Estimation of the probability of occurrence of events using calculations based on classes of probability
SR	Safety review.

Stake	Material or moral value that is risked in a situation relative to a hazard. In the theoretical sense of risks: person, property or amenity whose safety or value – moral, monetary, patrimonial or environmental – is altered when it is exposed to a hazard.
Surveillance	Monitoring of structure behavior through visual observation or sensor readings and their analysis, used to detect any trends.
Surveillance report	Periodic report summarizing the main maintenance and surveillance actions. It is drafted by the operator. Its periodicity is annually for class A dams and every 3 years for class B and C dams.
System	Determined set of discrete elements (or components) that are interconnected or that interact [VILLEMEUR 1988].
Technological function	(or constraint function) Function that a component must fulfil to maintain its performance.
Uncertainty	Term that used to be used to refer to situations for which the likelihood of potential consequences cannot be described by objectively known probability density functions. Now used to describe any situation without certitude, described or not by a probability distribution. In the context of dam safety, uncertainty can be attributed to (i) the inherent variability of properties and natural events, and (ii) incomplete knowledge of the parameters and the relations between the input and output data.
VTA (Thorough Technical Visit)	Detailed Technical Inspection.
Water level profile	Line showing the altitude of a reservoir (river, reservoir, breach, etc.) in the direction of the flow.

Comité Français des Barrages et Réservoirs

Le comité français des **barrages et réservoirs** (CFBR), anciennement comité français des grands barrages (CFGB), est une association scientifique et technique créée en 1926. Il constitue la branche française de la commission internationale des grands barrages (CIGB).

L'association a pour objet de provoquer des progrès dans la **conception**, la **construction**, l'**entretien** et les **méthodes d'exploitation** des barrages, des réservoirs et des digues, en rassemblant la documentation, en étudiant les questions qui s'y rapportent, notamment d'ordre technique, économique, sociétal et écologique, et en contribuant à la diffusion des connaissances.

A ce jour, le CFBR comprend 520 membres, représentant des **administrations**, des **maîtres d'ouvrages**, des **ingénieurs-conseils**, des **entrepreneurs**, des **experts individuels**, des **chercheurs** et des **enseignants**, tous désignés en raison de leurs compétences.

Au niveau national, le CFBR organise principalement des colloques techniques réguliers, anime plusieurs groupes de travail nationaux et propose une journée de visite annuelle pour les étudiants d'écoles d'ingénieurs.

Au niveau international, le CFBR participe activement aux travaux de la CIGB et notamment à la rédaction des **bulletins des comités techniques** qui constituent la référence internationale dans la profession. Le CFBR présente également des **rapports et communications** lors des Assemblées Générales et des Congrès.

Comité Français des Barrages et Réservoirs

Savoie Technolac

4, allée du Lac de Tignes

73290 La Motte-Servolex

Tél. : 04.79.60.64.45

- <http://www.barrages-cfbr.eu>

ISBN : 979-10-96371-20-4



9 791096 371204

