

# Pratiques des Etudes De Dangers des barrages



Colloque organisé par le CFBR et l'AFEID.



*Editions du CFBR*

*Colloque*

*CFBR / AFEID*

**Lyon**

**Les 28 et 29  
novembre 2011**





# ***Pratiques des Etudes de Dangers des Barrages***

Lyon, 28 et 29 Novembre 2011

INSA LYON

- **Méthodologie des Etudes De Dangers**
- **Accidentologie et incidentologie**
- **Etudes de cas**
- **Apports et bilan des Etudes De Dangers**

COMITE FRANÇAIS DES BARRAGES ET RESERVOIRS

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'EAU, L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE





**Comité d'organisation :**

J. Boulet (EDF/CFBR), Président du comité d'organisation

P. Le Delliou (Chef du BETCGB/CFBR)

B. Houdant (EDF/Secrétaire Général du CFBR)

M. Lino (ISL)

F. Laugier (EDF/CFBR)

B. Grawitz (SCP/AFEID)

D. Boubée (CACG/CFBR)

G. Rat (STEEGBH /CFBR)

J-M Tinland (EDF/CFBR)

B. Barthélémy (CNR)

L. Peyras (Cemagref)

**CFBR :**

Savoie Technolac

73373 LE BOURGET DU LAC

Tél : 04 79 60 64 45-Fax : 04 79 60 62 98

[www.barrages-cfbr.eu](http://www.barrages-cfbr.eu)

[barragescfbr@yahoo.fr](mailto:barragescfbr@yahoo.fr)

**AFEID :**

361, rue Jean-François Breton

BP 5095

34196 MONTPELLIER

<http://afeid.montpellier.cemagref.fr>

[afeid@cemagref.fr](mailto:afeid@cemagref.fr)



## SOMMAIRE

---

### Thème 1 : Méthodologie

#### Thème 1.1

Analyse de risques et barrages éléments de contexte international 3  
*Michel Poupart*

#### Thème 1.2

L'utilisation des méthodes de l'analyse de risques issues de l'industrie dans le domaine des barrages 17  
*Nicholas Bukowski, Benjamin Delaruelle*

#### Thème 1.3

Une méthode d'estimation de la probabilité des accidents majeurs de barrages : la méthode du nœud papillon 33  
*Christophe Bolvin, Thibault Balouin, Agnès Vallée, Yann, Flauw*

#### Thème 1.4

Apport des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement et de la fiabilité dans le cadre des études de dangers : exemple d'application sur le barrage du Xoldocogaina 41  
*Claudio Carvajal, Gwenaëlle Philip, Jean-Pierre Bécue, Laurent Peyras, Huguette Félix, Paul Royet*

#### Thème 1.5

Analyse de risques : comment faire quand la statistique ne suffit plus 53  
*Solène Laloux, Yves Castel, Daniel Boubée*

#### Thème 1.6

Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire 71  
*Huguette Félix, Bruno Beullac, Rémy Tourment, Patrice Meriaux, Laurent Peyras*

#### Thème 1.7

Modélisation des conséquences des événements retenus dans les études de dangers et expression des gravités 91  
*Benjamin Videment, Nicole Goutal, Gilbert Duvivier*



## **Thème 2 : Accidentologie et incidentologie**

### **Thème 2.1**

Conséquences d'accidents majeurs de barrages : Etat des réflexions de l'INERIS pour l'évaluation de la gravité **109**

*Thibault Balouin, Anabel Lahoz*

### **Thème 2.2**

Notes sur l'Accidentologie du barrage-poids **125**

*Luc Deroo, Boris Jimenez*

### **Thème 2.3**

Apports de l'analyse des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) dans les études de dangers (EDD) de barrages **145**

*Eric Brandon, Fabien Rival*



## **Thème 3: Etude de cas**

### **Thème 3.1**

Retour d'expérience sur les études de dangers dans le secteur du GPL **167**

*Thierry Tixier, Pierre Sécher*

### **Thème 3.2**

Etude de Dangers du Barrage du Cheylard (Ardèche) **181**

*Laurent Vidal, Bachir Touileb, Lopez Christine, Michel Marino*

### **Thème 3.3**

Etude de dangers du Canal de Curbans **189**

*Cécile Dubien, François Delorme*

### **Thème 3.4**

Barrages du Pas du Riot et du Gouffre d'Enfer, exemples d'études de dangers de 2 barrages successifs, dont l'un doit faire l'objet de travaux de confortement **201**

*Caroline Varon1, Arnaud Ducroux, Alexandre Moy, Valérie Chassignol, Daniel Pancher*

### **Thème 3.5**

Retour d'expérience sur les premières études de dangers des aménagements hydraulique de la CNR et la SDEM **217**

*Bernard Bathelemy, Jacques De Saint Seine, Eric Domps, Claire Bernard*

### **Thème 3.6**

Evaluation de la pertinence et de l'exhaustivité des actions de maintenance sur les barrières de sécurité **231**

*Claire Bernard, Eric Domps*

---



## **Thème 4 : Apports et bilan des EDD**

### **Thème 4.1**

Les Etudes spécifiques de danger (ESD) Tunnels Routiers / les EDD Barrages **249**

*Claude. G. Bessière*

### **Thème 4.2**

Partage de l'EDD avec le Responsable de l'Ouvrage **257**

*Isabelle Penot, Christine Girel*

### **Thème 4.3**

L'utilisation par les services de contrôle des études de dangers dans le contrôle des barrages **259**

*Philippe Lamarsaude, Patrick Le Delliou*

### **Thème 4.4**

Lien entre les études de dangers et les revues de sûreté des barrages à EDF **265**

*Marc Perez*

### **Thème 4.5**

Incidence des nouvelles prescriptions sur les pratiques de suivi et de contrôle par un gestionnaire de parc de barrages-réservoirs **275**

*Daniel Boubée, Jean-Luc Brodin*

### **Thème 4.6**

Résumé Non Technique de l'EDD du barrage **289**

*Jean Boulet, Patrick Le Delliou, Xavier Layrac*



# **Thème 1**

## **METHODOLOGIE**





## ANALYSE DE RISQUES ET BARRAGES ELEMENTS DE CONTEXTE INTERNATIONAL

### *Risk Analysis and Dams Some aspects of the international context*

**Michel Poupart**

Assistance, Audit et Conseil  
Sécurité des barrages et Ouvrages Hydrauliques  
73000 BASSENS  
[poupart.m@free.fr](mailto:poupart.m@free.fr)

#### **MOTS CLES**

Analyse de risques, Sécurité des barrages, Etudes de dangers

#### **ABSTRACT**

*Dam safety is an ongoing concern at the international level, as demonstrated by numerous publications on this topic: articles about basic principles, methodologies and practical experiences. It is interesting to note that references of methods based on risk analysis have emerged in the late 70s in the literature dedicated to dams, and then track their application and their evolutions. The three technical bulletins devoted to safety, edited by ICOLD between 1987 and 2011, are very instructive from this point of view. The article provides a quick overview of the emergence of methods based on risk analysis in the field of dams, in conjunction with societal demands, and showing the parallels with other industries at risk. It will then develop in more detail the content and philosophy of bulletins 59, 130, xxx (forthcoming) of ICOLD, which give a good synthesis of recommendations on what should be implemented to ensure the safety of dams. They address activities needed for the control of risk, risk analysis methodologies (for a dam or a portfolio), management of safety and the importance of decision making. Finally, the article will show how the French approach to hazard studies is at the international level, and what is its place in all the activities that contribute to the safety of dams.*

#### **RÉSUMÉ**

*Analyse de risques et barrages: éléments de contexte international*

*La sécurité des barrages constitue une préoccupation constante au niveau international, comme en témoignent les très nombreuses publications consacrées à ce sujet: articles relatant des principes fondamentaux, des méthodologies ou des expériences concrètes. Il est intéressant de noter que les mentions de méthodes fondées sur l'analyse de risques sont apparues à la fin des années 70 dans la littérature consacrées aux barrages, et de suivre ensuite leur application et leurs évolutions. Les trois bulletins techniques consacrés à la sécurité, édités par la CIGB entre 1987 et 2011, sont très instructifs de ce point de vue.*

*L'article donne un aperçu rapide de l'émergence des méthodes à base d'analyse de risques dans le domaine des barrages, en lien avec les exigences sociétales, et en indiquant les parallèles avec d'autres industries à risques. Il développe ensuite de manière plus détaillée le contenu et la philosophie des bulletins 59, 130 et xxx (à paraître) de la CIGB, qui constituent une bonne synthèse des recommandations sur ce qu'il convient de mettre en œuvre pour assurer la sécurité des barrages. Ces bulletins traitent des activités nécessaires pour la maîtrise du risque, des méthodologies d'analyse de risques (pour un barrage ou un parc d'ouvrages), du management de la sécurité et de l'importance de la prise de décision. Enfin, l'article montre comment l'approche française des études de dangers s'inscrit dans ces démarches au niveau international, et quelle est sa place dans l'ensemble des activités qui concourent à la sécurité des barrages.*

## **1. EMERGENCE DE L'ANALYSE DE RISQUES DANS LE DOMAINE DES BARRAGES**

D'après D.Bowles [1] l'intérêt porté aux approches basées sur le risque aux USA remonte à 1973, suite à la parution d'un rapport de l'ASCE sur la réévaluation des évacuateurs de crue de barrages existants. Ce rapport montrait un besoin très important de travaux de mise en conformité, et une analyse coûts-bénéfices avait été entreprise pour prioriser ces investissements. Les conclusions de ce rapport furent controversées car les auteurs avaient affecté une valeur à la vie humaine pour déterminer ensuite un optimum sur des bases purement économiques.

Suite aux ruptures du barrage de Teton en 1976 et de Taccoa Falls, le gouvernement fédéral demanda aux agences fédérales d'explorer « le degré d'utilisation des probabilités ou des analyses de risques dans les processus de choix du site, de conception, de construction et d'exploitation ». Plusieurs projets de recherche furent alors entrepris par ces agences (USACE, USBR), mais sans prise en compte des conséquences sur les personnes dans la prise de décision. Par exemple en 1986, la FERC mit à jour ses recommandations pour inclure la possibilité d'analyse de risques en ne traitant que les conséquences matérielles. De même, l'ASCE publia un rapport en 1988 sur « l'évaluation de la sûreté hydrologique des barrages » tenant partiellement compte des conséquences sur les personnes par le biais des indemnités à verser aux victimes. Toujours d'après le même auteur, ce sont BC Hydro (1993) et le Comité australien des grands barrages (1994) qui furent les premiers à développer des critères de risque tolérable, basés sur les pratiques d'autres industries, et mentionnant explicitement des critères en fonction du risque de pertes de vies humaines. Dans la foulée, USBR mit au point des procédures méthodologiques pour la conduite d'analyse de risques, qui ont été largement utilisées depuis par cette agence. Début des années 2000, l'USSD a mandaté un groupe de travail pour évaluer l'état des pratiques d'appréciation du risque, donner des avis sur les méthodes appropriées et les moyens pour faciliter et renforcer leurs usages [12].

A partir de 2000, les méthodologies se sont consolidées, et ont donné lieu à des mises à jour de « guidelines », essentiellement par les agences fédérales américaines, comprenant des outils à l'usage des praticiens (« Tool Box »), dont le niveau de détail varie selon l'objectif recherché : analyse d'un barrage seul, ou d'un parc d'ouvrages [4].

Le bulletin 130 de la CIGB [9] propose une explication à ces développements des méthodes basées sur l'évaluation des risques : « ils reflètent les évolutions des attentes de la société, le fait que le public soit de plus en plus instruit, et l'exigence d'une meilleure transparence du processus de prise de décision ».

P.A. Zielinski explicite également ces nouvelles exigences sociétales dans le rapport général de la question 91 du congrès de la CIGB en 2009 : « Les concepts (de la sécurité des barrages) ont évolué suivant deux principes : le droit reconnu aux ingénieurs et aux experts de fixer les objectifs de sécurité, - et le principe de protection intégrale ». Ces deux principes ne sont plus acceptables par la société, qui comprend que le risque zéro n'existe pas et exige que les décisions prises soient fonction du risque résiduel tolérable, et que ces décisions soient transparentes. « Le vieil argument selon lequel « les experts savent » ce qu'ils font et sont mieux armés que n'importe qui pour prendre les meilleures décisions n'est désormais plus acceptable ».

Plus récemment, la profession s'est intéressée plus globalement à la gouvernance et l'organisation nécessaire à la maîtrise des risques liés aux barrages. En effet, l'analyse de risques, en tant que démarche de caractérisation des risques causés par une installation industrielle, est nécessaire mais n'est pas suffisante pour garantir la sécurité d'une installation. Elle doit s'inscrire dans un cadre politique et réglementaire au niveau des Etats, et d'un système de gestion de la sécurité au sein des organisations propriétaires et exploitantes de barrages. Ces deux aspects de la sécurité des barrages peuvent également être élaborés à partir des principes de l'analyse de risques. Ils font l'objet d'un bulletin CIGB à paraître.

## 2. LE RISQUE DANS L'INDUSTRIE – CONTEXTE FRANÇAIS

La loi sur les installations classées pour la protection de l'environnement du 19 juillet 1976, dite loi ICPE, peut être considérée comme un texte fondateur de la gestion du risque des installations industrielles à risques en France. Elle instaure un classement des installations selon " trois régimes " réglementaires de déclaration et d'autorisation. Ces régimes sont basés sur la nomenclature ICPE qui définit des seuils (quantités de produits ou nature d'activité) à partir desquels les différents régimes s'appliquent. Par ailleurs, de nombreux textes nationaux, souvent fondés sur le retour d'expérience, fixent des mesures spécifiques ou exigences relatives à telle ou telle activité (les stockages de gaz inflammables liquéfiés sous pression, la protection parasismique, la protection contre la foudre, les dépôts de liquides inflammables...). Il est aisé de faire le parallèle avec le domaine des barrages, pour lesquels les exigences sont définies en fonction de leur classe.

Au niveau européen, la directive Seveso 2 de 1996, reprise en France au travers de l'arrêté du 10 mai 2000, introduit deux seuils de classement : " Seveso seuil bas " et " Seveso seuil haut ", définis par des critères complémentaires. Pour les exploitants, cela se traduit par l'exigence de mise en place d'une " politique de prévention des accidents majeurs ". Le contrôle de son application est opéré, pour les établissements " seuil haut ", par un " système de gestion de la sécurité "

Suite à la catastrophe d'AZF une nouvelle loi, promulguée le 30 juillet 2003, impose à l'exploitant la réalisation d'une étude des dangers résultant de l'exploitation de ses installations ainsi que la mise en œuvre des mesures adéquates de prévention et de limitation des risques, fondées sur une analyse de risques. Cette loi s'est traduite par une profonde évolution du dispositif réglementaire encadrant l'élaboration des études des dangers, confirmant ainsi la priorité qu'il convient d'accorder à la prévention et à la réduction des risques à leur source.

Cette loi a également apporté des compléments dans les domaines de l'information et l'association du public à la prévention des risques industriels, et de la maîtrise de l'urbanisation autour des sites à risques.

Ce rapide survol du contexte réglementaire français permet néanmoins de mesurer l'évolution progressive des pratiques de management du risque industriel : dans les années 70 des exigences fondées sur des critères assez normatifs, et basées sur des potentiels de dangers ; actuellement une analyse de risques conduite par l'exploitant, débouchant sur la mise en œuvre, et le maintien dans la durée, des barrières assurant la réduction du risque.

Des guides méthodologiques d'application des analyses de risques ont été élaborés, spécifiques à chaque secteur industriel, mais utilisant des outils génériques tels que les arbres de causes, de conséquences, et tirant partie d'un retour d'expérience accidentologique bien documenté. Des données de fiabilité par composant sont par exemple disponibles pour étayer des valeurs de probabilité de défaillance.

A l'énoncé de ces principes on comprend les similitudes, mais aussi les différences, entre les installations industrielles et les barrages. Les grands principes peuvent être appliqués aux barrages : classement des ouvrages selon leur potentiel de dangers, exigences graduées en fonction de ces classes, système de gestion de la sécurité, responsabilité de l'exploitant, autorisation subordonnée à une étude de dangers. Mais dès que l'on s'approche de l'objet « barrage », deux grandes particularités émergent : l'aspect « prototype » de chaque ouvrage, excluant des normes très précises, et conduisant à des études spécifiques à chaque cas, - et l'importance de la géotechnique dans la conception et l'évaluation de la sécurité des barrages. La connaissance ponctuelle des caractéristiques des fondations et des remblais, leurs hétérogénéités spatiales et leurs évolutions temporelles en sont un des aspects les plus marquants. Cela explique aussi pourquoi il est difficile d'estimer des paramètres de fiabilité, à l'exception des organes hydromécaniques. Sur le plan des conséquences, un aspect également fondamental est le périmètre des conséquences potentielles en cas de défaillance : le plus souvent circonscrit à proximité du site dans le cas d'installations industrielles, pouvant couvrir des linéaires pouvant être importants dans le cas des barrages. Cela explique d'ailleurs que l'une des mesures possibles de réduction du risque dans le cas d'installations industrielles est la limitation de l'urbanisation à proximité du site, ce qui est difficilement applicable dans le cas des barrages.

### 3. LES METHODES UTILISEES DANS LE DOMAINE DES BARRAGES

#### 3.1. Les concepts de base

L'objectif du management du risque dans le domaine industriel est d'évaluer, qualitativement ou quantitativement, les risques d'un processus industriel, et de les réduire s'ils sont supérieurs à des critères de tolérabilité. Son champ d'application classique comprend des structures et des équipements industriels mais concerne aussi toute activité, d'organisation, de conception ou d'exploitation.

L'analyse de risques fait l'objet de nombreuses publications, dont les concepts et les définitions ne sont pas toujours homogènes. S'agissant d'un concept relativement nouveau dans le domaine des barrages, il est en effet assez compréhensible que les différentes entités pionnières dans l'usage de ces méthodes forgent chacune leur méthode et le vocabulaire correspondant. Nous avons retenu deux sources pour définir de manière la plus correcte possible les concepts de l'analyse de risques : la publication de l'AFNOR [6] sur le vocabulaire utilisé dans le management du risque, et le bulletin 130 de la CIGB [9].

Pour l'AFNOR, le risque est la combinaison de la **probabilité** d'un **événement** et de ses **conséquences**. Le tableau ci après présente hiérarchiquement les différents concepts du management du risque tel que définis par l'AFNOR ; les équivalents anglais sont également indiqués :

| Management du risque |                                  |                        |                            |
|----------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------|
|                      | Appréciation du risque           |                        |                            |
|                      |                                  | Analyse du risque      |                            |
|                      |                                  |                        | Identification des sources |
|                      |                                  |                        | Estimation du risque       |
|                      |                                  | Evaluation du risque   |                            |
|                      | Traitement du risque             |                        |                            |
|                      |                                  | Refus du risque        |                            |
|                      |                                  | Optimisation du risque |                            |
|                      |                                  | Transfert du risque    |                            |
|                      |                                  | Prise de risque        |                            |
|                      | Acceptation du risque            |                        |                            |
|                      | Communication relative au risque |                        |                            |

| Risk Management |                    |                   |                       |
|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------------|
|                 | Risk Assessment    |                   |                       |
|                 |                    | Risk Analysis     |                       |
|                 |                    |                   | Source Identification |
|                 |                    |                   | Risk Estimation       |
|                 |                    | Risk Evaluation   |                       |
|                 | Risk Treatment     |                   |                       |
|                 |                    | Risk Avoidance    |                       |
|                 |                    | Risk Optimization |                       |
|                 |                    | Risk Transfer     |                       |
|                 |                    | Risk Retention    |                       |
|                 | Risk Acceptance    |                   |                       |
|                 | Risk Communication |                   |                       |

Fig. 1 - Relations entre les termes relatifs au risque, sur la base de leur définition (extraite de [6])

Pour information, la norme ISO 31000:2009 abandonne la vision de l'ingénieur pour coupler les risques aux objectifs de l'organisation : « le risque est l'effet de l'incertitude sur les objectifs », ce qui n'exclut pas les conséquences éventuellement positives d'une analyse de risques (dans le domaine financier, par exemple).

La définition donnée dans le bulletin 130 de la CIGB [9] ne concerne que l'étape d'appréciation du risque (Risk Assessment), en détaillant un peu plus les processus internes à chaque étape ; elle est présentée ci-dessous sous forme graphique (Fig.2), ce qui permet de constater la bonne concordance avec la norme AFNOR.

**L'analyse de risques** comprend ainsi les étapes suivantes :

- L'identification des sources (de dangers), ce qui, pour les barrages, correspond essentiellement à la présence de la retenue et aux aléas naturels (crues, séismes, glissement de terrain),
- L'identification des modes de rupture,
- L'estimation du risque, étape dans laquelle on affecte des valeurs à la probabilité et aux conséquences d'un risque.

**L'évaluation du risque** est l'étape où l'on compare les risques estimés aux critères de risque tolérable ; ces critères peuvent comprendre les coûts et les avantages, les exigences d'ordre légal et réglementaire, les aspects socio-économiques et environnementaux, les préoccupations des parties prenantes.

Ces deux étapes de l'analyse de risques et de l'évaluation des risques sont celles qui ont focalisées les énergies de la profession des « barragistes », et sont développées ci-dessous.

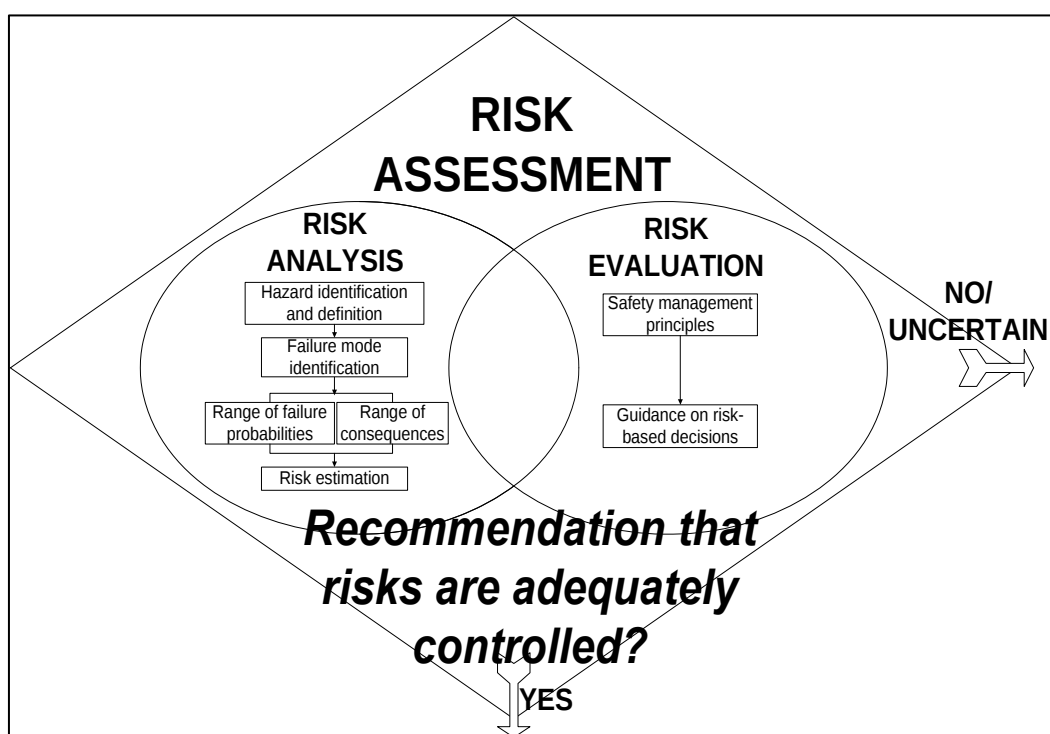


Fig. 2 Représentation du processus d'appréciation des risques (extraite de [9])

Une analyse de risques est élaborée collectivement, habituellement sous forme de groupes de travail réunissant les responsables du barrage, des spécialistes des diverses disciplines, et un animateur compétent dans la méthodologie. Cet aspect collectif de la construction des conclusions d'une analyse de risques est une différence importante par rapport aux démarches traditionnelles.

### 3.2. L'analyse de risques

**L'identification des sources de dangers** est une composante déjà très présente dans l'ingénierie « classique » des barrages où l'approche habituelle consiste à vérifier le dimensionnement de l'ouvrage et de ses organes de sécurité sous différentes sollicitations : statiques, sismiques, crues, etc. Le dimensionnement a priori est le fruit de l'art de l'ingénieur, suivi par une vérification régie par des règles fixant les hypothèses de chargement (crue, séismes, ..) et les critères de performance (coefficient de sécurité, valeurs limites, etc.).

Par rapport à cette approche classique, l'analyse de risques a pour objectif l'identification **des modes de défaillance** de manière plus systématique et l'attribution d'un niveau de risque global au barrage. Si l'on se réfère à la « théorie » décrite dans le bulletin 130 de la CIGB, plusieurs étapes sont mises en œuvre, en commençant par une modélisation du système à étudier et son découpage en composants, puis l'analyse

exhaustive de tous les modes de défaillances des composants identifiés lorsque le système est soumis à des sollicitations. C'est évidemment un problème très complexe, et on se limitera dans ce qui suit à décrire les principaux outils utilisés et la pratique actuelle. Les méthodes les plus utilisées sont les suivantes :

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) : on examine les effets des défaillances des différents composants du système sur les fonctions de ce système. Il faut noter que ces analyses restent souvent à un stade « macro » pour les barrages : en effet le découpage fin d'un barrage en composants, par similitude avec les installations industrielles « classiques » : fondation, drains, organe d'étanchéité, recharges, etc. peut parfois ne pas être pertinent du point de vue de la physique des phénomènes. Ces outils sont par contre bien adaptés aux organes hydro mécaniques et leurs systèmes de contrôle et de commande, par exemple pour les évacuateurs vannés.

L'arbre des événements, dans lequel on part d'un événement (dysfonctionnement d'un organe, crue extrême, etc.) pour chercher tous les scénarios possibles suite à cet événement. Il s'agit d'un raisonnement par induction.

L'arbre de défaillance dans lequel on définit a priori une défaillance (rupture d'une vanne, surverse du barrage,...) puis on cherche, par déduction, les causes possibles de cette défaillance.

Ces méthodes fournissent les modes de défaillance du système étudié, les relations entre les sollicitations et la réponse du système, ce qui est déjà souvent très riche d'enseignement pour la compréhension de la nature des risques et de leurs conséquences pour le barrage étudié. Une analyse de risques a cependant l'ambition de quantifier ces risques, ce qui nécessite d'évaluer une probabilité d'occurrence pour chacun des modes de défaillance.

Pour les méthodes citées plus haut, cela revient à affecter à chaque branche de l'arbre (des événements ou de défaillance) une probabilité d'occurrence. Pour l'AMDE, on parle alors d'AMDEC en ajoutant l'évaluation de la Criticité à l'analyse. L'évaluation d'une probabilité est relativement aisée pour certains événements, que ce soient des sollicitations (crues, séismes,...) ou des événements particuliers (défaillance d'un composant mécanique,...). Mais dans la majorité des cas, la nature des ouvrages analysés rend actuellement cette évaluation objective encore inaccessible. C'est le cas de phénomènes tels que l'érosion interne, la résistance ultime d'un barrage en remblai à la surverse, la résistance d'une fondation de barrage voûte, etc. On adopte alors une approche plus subjective de la probabilité, « à dire d'expert » avec une répartition en plusieurs classes distinctes en lieu et place d'une valeur absolue. La difficulté est alors d'avoir une bonne cohérence entre ces différentes évaluations.

A la lecture des publications faites sur ce sujet, on constate cependant que la pratique de l'analyse de risques adopte un découpage a priori par type de risque, parfois assez codifié dans des guides méthodologiques, tels celui édité récemment par la FEMA [4], par exemple. On y trouve ainsi :

- Risque hydrologique,
- Stabilité du barrage (poids ou remblais),
- Risque sismique,
- Erosion interne,
- Rupture de vannes,
- Dysfonctionnement de vannes.

Ce type de découpage correspond de fait à des scénarios de défaillance dont on déduit ensuite des modes de rupture. A titre d'illustration, dans le guide de la FEMA, des méthodologies plus ou moins détaillées sont proposées pour ces différents scénarios de défaillance, en général sous forme de feuilles de tableur, dans lesquelles l'utilisateur saisit les caractéristiques nécessaires à l'évaluation du risque correspondant. Le résultat est la probabilité d'occurrence du scénario correspondant. Il faut noter que les concepteurs de ce type de méthodes ont implicitement « encapsulé » la physique des modes de rupture et leur probabilité à partir de leur expérience, de données de retour d'expérience, et parfois à dire d'expert.

De même, pour les aléas, dans de nombreux pays, le niveau d'aléa à prendre en compte est fixé par le niveau de conséquences d'une défaillance. Ainsi pour l'aléa hydrologique, suivant que le barrage est classé en catégorie « high hazard » ou « low hazard » les règlements définissent la crue de sûreté à prendre en compte pour la vérification de l'évacuateur de crue.

Pour les conséquences aval en termes de vies humaines, économiques ou environnementales, de nombreuses méthodes, souvent très empiriques, ont vu le jour surtout dans les pays où le classement des barrages dépend des conséquences d'une défaillance. Peu connues en France, ces méthodes font également appel à des outils de type feuilles de calcul. Elles sont basées sur l'évaluation du nombre de personnes soumises au risque (PAR, Person At Risk), dont on déduit ensuite le nombre potentiel de victimes (LOL, Loss Of Life) en fonction de paramètres très incertains et variables tel que le délai d'alerte préventive, la profondeur et la vitesse du courant, la période de la journée, etc. Les écarts d'estimation sont parfois importants entre ces méthodes, qui donnent en définitive un ordre de grandeur des conséquences potentielles. Parmi ces méthodes certaines s'attachent à évaluer des conséquences incrémentales, qui s'appliquent pour le risque hydrologique. Cela revient à estimer les conséquences de la crue et à ne prendre en compte que l'incrément des conséquences suite à la rupture du barrage.

**L'estimation du risque** est le résultat du croisement des scénarios de défaillance et des conséquences associées, et se traduit par la probabilité de pertes économiques, environnementales, chiffrées en unités monétaire, et en pertes de vies humaines.

### 3.3. L'évaluation du risque

La phase d'évaluation du risque est la suite logique de la phase d'analyse de risques : ayant chiffré le risque, il faut vérifier qu'il est tolérable. Les critères utilisés sont différents pour les conséquences sur le public, sur l'économie et sur l'environnement.

Même si c'est implicite via les critères d'acceptabilité, le coût de la vie humaine n'est pas chiffré et on représente classiquement sur un diagramme F-N les zones « tolérable », « intolérable », et « intermédiaire » dans laquelle le principe « ALARP » (As Low As Reasonably Practicable) est appliqué.

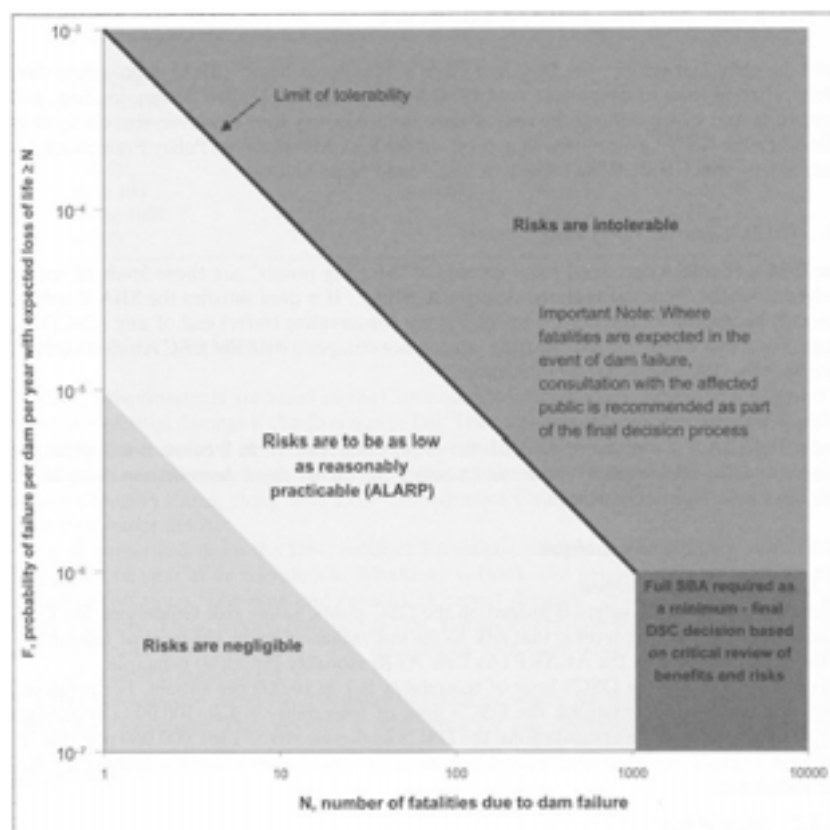


Fig. 3 Exigences sociétales du « Dam Safety Committee » de Nouvelle Galles du Sud pour les barrages existants [15]

Plusieurs diagrammes de ce type ont été proposés par différents pays ou entreprises, mais ils ont essentiellement une valeur indicative. En effet, à ce jour et à notre connaissance, seuls deux Etats utilisent cette approche d'évaluation du risque pour réglementer la sécurité des barrages et valider les prises de décision des propriétaires : il s'agit des Pays Bas (voir nombreuses références dans [9]), pour les digues, et, récemment, de la Nouvelle Galles du Sud, Australie (Fig. 3). Cette grille est utilisée par le « DSC » Dam Safety Committee (équivalent du CTPBOH) pour sa prise de décision concernant les projets.

En fait, on observe souvent que les critères d'acceptabilité restent fondés sur l'approche normative classique, c'est-à-dire qu'un scénario est acceptable lorsque les critères normatifs sont respectés : choix de la crue de projet, du séisme de dimensionnement, des hypothèses de calcul et des critères de performance.

### **3.4. Les outils de priorisation**

L'objectif essentiel des analyses de risques telles que décrites ci-dessus est la prise de décision en fonction du risque et des critères d'acceptation. Mais les outils mis en œuvre pour l'analyse d'un ouvrage peuvent être utilisés pour inter comparer les risques d'un parc d'ouvrages (dam portfolio) et ainsi prioriser les actions à entreprendre pour la maîtrise des risques.

Des méthodologies comme le « PRA » (Portfolio Risk Assessment) ou les « Index de Condition » ont été développées dans cet objectif. La méthodologie PRA (décrite dans [3]) revient à effectuer des analyses de risques pour les différents barrages du parc considéré, avec un niveau de détail (un « grain ») inférieur à celui utilisé pour un barrage individuellement. En particulier, il n'est pas fait usage dans ces méthodes des outils de la sûreté de fonctionnement tels que l'AMDEC. Mais ces méthodes prennent bien en compte les conséquences des défaillances parmi les critères de priorisation. Les « Index de Condition » (Condition Index, en anglais), qu'il vaut mieux traduire par « Indicateur d'état » ont une approche assez différente, puisque l'indicateur de l'état d'un barrage sera fonction de son comportement via l'auscultation et de son état via l'inspection visuelle [14]. Les ouvrages sont divisés en sous structures auxquelles on affecte des « scores » de 1 à 10, suivant leur état et leur contribution estimée à une rupture de l'ouvrage.

Dans un premier temps ces méthodes ont été développées essentiellement pour prioriser la maintenance ; des développements ultérieurs ont incorporé une dimension liée au risque.

## **4. L'APPORT DE LA CIGB**

La CIGB a édité trois bulletins spécifiquement consacrés à la sécurité des barrages, et a traité du sujet lors de deux congrès : Question 76 en 2000 et Question 91 en 2009.

### **4.1. Bulletin 59 : Sécurité des barrages- Recommandations**

Le bulletin 59 « Sécurité des barrages – Recommandations » date de 1987 et traite des activités de conception, de construction et d'exploitation des barrages contribuant à leur sécurité. Les recommandations portent sur la nécessité de réalisation de ces activités, en mettant l'accent sur les aspects techniques et organisationnels. La description technique des activités reste très actuelle, et il est certainement utile de lire ce bulletin pour embrasser l'ensemble des actions qui contribuent à la sécurité des barrages. Dans le préambule, les auteurs évoquent la nécessité de quantification de la sécurité et évoquent l'émergence de méthodes probabilistes. Reconnaisant la difficulté d'affecter une probabilité à la rupture d'un barrage, ils reconnaissent que la tendance est de s'écarter du concept déterministe et recommandent l'utilisation progressive des méthodes semi probabilistes. Cependant ce bulletin ne traite pas des relations entre les acteurs, régulateurs, concepteurs, exploitants, entreprises, ni ne définit d'exigences d'organisation des activités.

#### **4.2. Question 76 du 20<sup>e</sup> congrès de la CIGB (2000)**

L'intitulé de cette question est « L'utilisation de l'analyse de risques dans le processus de décision relatif à la sûreté des barrages et de leur gestion ». C'était la première fois que la CIGB traitait explicitement d'analyse de risques, et le nombre de rapports soumis pour cette question (48) montre l'intérêt que portait la profession à ce sujet. Ces rapports traitent de tous les aspects de l'analyse de risques, développements méthodologiques, applications concrètes, perspectives.

Certains de ces rapports ont été écrits par les auteurs ou instigateurs du bulletin 130, et il n'est donc pas étonnant d'y retrouver les mêmes concepts et méthodes que celles qui ont été ensuite publiées dans ce bulletin. Le mérite des rapports est de développer des exemples concrets, dont certains traités dans leur globalité, et de mieux comprendre les modes opératoires mis en œuvre. On trouve ainsi des analyses de risques quantitatives détaillées pour quelques barrages, mais la plupart des rapports ne traitent que de l'un des aspects de l'analyse : arbre des causes, conséquences aval, etc. Une dizaine de rapports « nationaux » dressent le tableau de l'utilisation de l'analyse de risques dans leurs pays respectifs. Le constat qui peut être fait est que très peu de pays utilisaient alors l'analyse de risques de manière opérationnelle.

Même si la majorité des rapports abordaient cette nouvelle approche avec un a priori favorable, reconnaissant ses avantages par rapport aux pratiques traditionnelles, on constate une certaine prudence sur son caractère opérationnel et des attentes vis-à-vis d'une standardisation des pratiques. Les freins au développement de l'analyse de risques sont bien résumés par le rapporteur général de cette question 76, H. Kreuzer : « Une des questions essentielles pour que l'analyse de risques soit mieux acceptée est celle de la validité des hypothèses émises pour réduire les incertitudes.

Ces hypothèses sont étayées par des avis d'expert, eux-mêmes basés sur l'observation d'un nombre croissant de barrages. La part de jugement dans l'analyse de risques rend cette dernière plus souple, mais également plus vulnérable du fait que des expériences particulières, des associations ou des pays perçoivent la notion de risque de manière différente. Accepter que la notion de risque dépende de paramètres culturels va à l'encontre de la perception traditionnelle de l'ingénieur, selon laquelle les normes et les recommandations sont basées sur des critères numériques plutôt que sur des opinions personnelles. »

#### **4.3. Bulletin 130 : Evaluation des risques pour la gestion de la sûreté des barrages**

C'est le bulletin de référence de la CIGB relatif à l'utilisation de l'analyse de risques dans le domaine des barrages. Edité en 2005, le bulletin vise à établir une introduction aux principes et à la terminologie de l'évaluation du risque, et présente les applications actuelles (en 2005). Son ambition était également de favoriser le dialogue sur ces techniques nouvelles. Le bulletin ne propose pas de méthode globale mais décrit plutôt les différents outils existants et leur emploi possible dans le domaine des barrages, tels que décrits au 3.2 ci-dessus. Il fait enfin un point assez détaillé de l'utilisation des méthodes d'analyse de risques dans différents pays, ainsi que les perspectives et études en cours.

#### **4.4. Question 91 du 23<sup>e</sup> congrès de la CIGB (2009)**

L'intitulé de la question 91 était « Dam Safety Management », improprement traduit par « Sécurité des barrages » au lieu de « Management de la sécurité des barrages ». En effet, comme pour la question 76 évoquée ci-dessus, la programmation de cette question était liée au travail en cours sur le futur bulletin du même nom (voir 4.5 ci-dessous). Cependant, on trouve finalement assez peu de rapports traitant de la philosophie, des techniques ou de la mise en œuvre de l'analyse de risques, et beaucoup de rapports sur la vérification de la sécurité des barrages par des méthodes traditionnelles. Le fait que le nombre de rapports traitant d'analyse de risques ou de gestion de la sécurité soit très inférieurs à celui des rapports de la question 76 en 2000 est surprenant, et tendrait à prouver, soit que les utilisateurs de ces méthodes n'éprouvent plus le besoin de communiquer, soit que leur appropriation et leur mise en œuvre est assez lente. On trouve néanmoins quelques exemples intéressants de méthodologies mises en œuvre, arbre des événements, approche bayésienne, semi probabiliste, etc.

#### 4.5. **Bulletin 1xx (à paraître) : Management de la sécurité des barrages en exploitation**

Comme l'indique son titre, ce bulletin est consacré aux questions de gouvernance et d'organisation. Il définit les grands principes qui régissent la sécurité des barrages, au même titre que toute installation industrielle à risques. Il édicte dans une première partie des recommandations sur les responsabilités des différents acteurs : la responsabilité des gouvernements est de promulguer le contexte réglementaire et contrôler son application ; celle des responsables d'ouvrages est de définir une politique, de mettre en place une organisation définissant rôles et responsabilités, de contrôler le bon fonctionnement de l'ensemble et de mettre en œuvre une boucle d'amélioration continue.

Ces éléments, objets des trois premiers chapitres du bulletin, sont relativement génériques. Le bulletin donne ensuite des indications et des exemples pour la mise en œuvre d'un système de gestion de la sécurité dans une entité responsable de l'exploitation de barrages, et rappelle les activités concernées, ainsi que les bulletins techniques de la CIGB qui les décrivent plus précisément.

En annexes figurent une analyse de tous les bulletins de la CIGB (à partir du n° 49) vis-à-vis de leur impact sur la sécurité, ainsi qu'un développement sur la prise de décision. Ce bulletin est limité à la gestion de la sécurité en phase d'exploitation, car il est apparu que cette gestion de la sécurité était assez différente en phase de conception et de construction. Le Comité de la Sécurité des Barrages a proposé de traiter cet aspect dans un prochain bulletin.

Le synoptique suivant (Fig.4) présente un exemple de structure organisationnelle mettant en exergue la place des responsabilités en matière de sûreté.

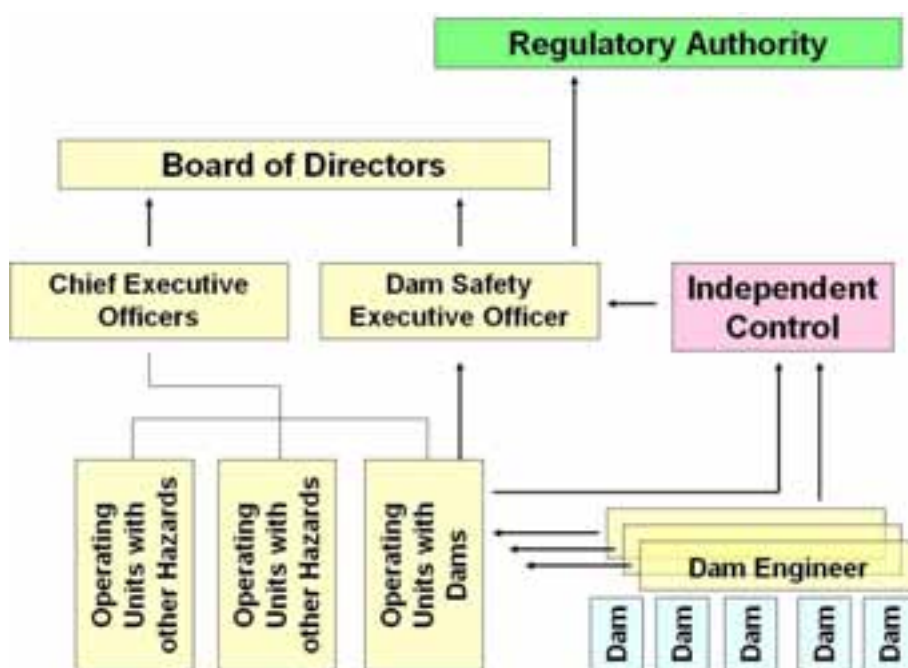


Fig. 4 Exemple de structure organisationnelle

## 5. RETOUR SUR LES PRATIQUES FRANÇAISES

Jusque très récemment, la pratique française de vérification de la sécurité des barrages est basée sur une approche déterministe, dans laquelle, pour les scénarios jugés les plus pénalisants, la sécurité est réputée assurée si les calculs montrent le non dépassement de seuils, ou l'obtention de coefficients de sécurité minimaux. La Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques, les décrets et arrêtés d'application correspondants ont fait évoluer ces pratiques par l'introduction de la pratique des études de dangers (EDD).

Comparées aux pratiques internationales, les études de dangers constituent une véritable analyse de risques, dont les attendus sont bien définis dans le « guide de lecture »: identification des scénarios de défaillance et de leur probabilité, estimation des conséquences, évaluation d'un niveau de risque. Le cadre méthodologique proposé est relativement « ouvert » : des outils types sont proposés, mais le réalisateur de l'étude peut choisir d'autres méthodes, en les justifiant. Si l'on s'intéresse aux méthodes « de base » proposées dans le guide des EDD, on peut constater que l'analyse préliminaire de risques s'apparente à une AMDEC dans laquelle les sous structures objets de l'analyse restent à un niveau macroscopique : le barrage, l'évacuateur, la vidange de fond, etc.

La méthode dite des « nœuds papillons » est moins « standardisée » que les « boîtes à outils » évoquées au §3.2, et permet donc une meilleure prise en compte des spécificités et une adaptation du niveau de détail aux enjeux de chaque ouvrage. C'est une méthodologie qui est « complète » puisque ses résultats in fine se traduisent par le positionnement de tous les scénarios étudiés dans une seule grille de criticité. Il y a un apport évident en terme de transparence, d'affichage des hypothèses, et de prise en compte de tous les facteurs de risques, y compris organisationnels et humains. Il faut noter également que la pratique internationale s'intéresse en général uniquement aux scénarios de rupture des ouvrages, alors que le guide de lecture des EDD demande également l'examen de tous les scénarios ayant des conséquences pour le public, ce qui paraît plus satisfaisant.

Les conséquences des défaillances sont évaluées de manière simple, ce qui n'est pas très étonnant, car, actuellement, la « culture » réglementaire française prend peu en compte les conséquences explicites ; cela n'incite pas à raffiner leur évaluation.

En complément de cette introduction fondamentale des analyses de dangers dans la pratique française, des évolutions sont en cours à travers les différents projets du Comité Français des Barrages et Réservoirs en matière de justification de la stabilité des barrages poids et en remblais à partir des concepts semi-probabilistes issus des Eurocodes [17, 18]. Des recommandations devraient paraître très prochainement concernant la vérification des barrages sous sollicitations de crues extrêmes et sismique [19], et il est probable que des évolutions réglementaires auront lieu dans un proche avenir sur ces sujets.

## 6. CONCLUSION

L'analyse de risques appliquée aux barrages est un domaine en pleine évolution au niveau international. Il y a un intérêt certain pour cette approche, mais une certaine prudence de la plupart des acteurs. On reconnaît les indéniables progrès de l'analyse de risques, sur les aspects transparence des hypothèses et de la démarche, sur sa prise en compte de l'ensemble des facteurs de risques, sur son approche probabiliste plus réaliste que les critères normatifs. On peut constater aussi une relative diversité de la mise en œuvre des méthodologies, phénomène normal pour une démarche encore « jeune », mais qu'il faudra vraisemblablement encadrer progressivement par des recommandations, voire des standards, plus précis.

Les principales limitations signalées dans le bulletin 130 sont toujours d'actualité : difficulté de quantifier de façon fiable la probabilité de certains phénomènes physiques complexes, difficulté d'estimation des conséquences d'une défaillance, absence de méthodologie pour déterminer les risques tolérables, et absence d'une acceptation générale du concept de risque tolérable adapté à chaque pays.

Les développements théoriques de modélisation des phénomènes complexes, par exemple la modélisation probabiliste des résistances et de sollicitations [20], et la constitution de bases de données d'incidents permettant une approche empirique des probabilités constituent donc des axes importants pour améliorer la qualité des analyses de risques.

Les limitations citées ci-dessus ne doivent certainement pas freiner l'usage de l'analyse de risques dans le domaine des barrages. Comme toute nouvelle méthodologie prometteuse, il faut au contraire accumuler de l'expérience, seul moyen de mieux comprendre ses forces et ses faiblesses, pour consolider les méthodologies, et pour une meilleure compréhension de ses résultats par la société.

## REFERENCES ET CITATIONS

- [1] Bowles, D. S., Anderson, L., R. & Glover T.F. (1998). *The practice of dam safety risk assessment and management, its roots, its branches, and its fruit*. Eighteen USCOLD Annual meeting and Lecture, Buffalo.
- [2] Zielinsky, P. A. (2009). *Dam Safety Management, Sécurité des Barrages*. Rapport général de la Question 91, 23ème congrès de la CIGB, Brasilia.
- [3] Harrauld, J., R & al (2004). *Review of risk based prioritization/decision making methodologies for dams*, USACE, Institute for Crisis, Disaster, and Risk Management, ICDRM.
- [4] FEMA. (2008). *Risk priority tool for dams*. Federal Emergency Management – Agency Mitigation Division
- [5] Le Delliou & al (1999). *Evaluation des risques*. Rapport du groupe de travail « Evaluation des risques » du Comité français des Grands Barrages.
- [6] Normalisation française (2002). *Management du risque, Vocabulaire X 50-251*. AFNOR 2002.
- [7] McGrath, S. (2000). *To study international Practice and Use of Risk Assessment in Dam Management*. The Winston Churchill Memorial Trust of Australia.
- [8] Hartford, D., N., D. & Baecher, G., B. (2004). *Risk and Uncertainty in Dam Safety*. CEA Technologies Dam Safety Interest Group, Thomas Telford.
- [9] Commission Internationale des Grands Barrages CIGB (1987). *Sécurité des barrages*. Bulletin 59.
- [9] Commission Internationale des Grands Barrages CIGB (2003). *Evaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage*. Bulletin 130.
- [10] Commission Internationale des Grands Barrages CIGB (à paraître). *Dam Safety management : Operational phase of the dam life cycle*. Bulletin 1xx.
- [11] Kreuzer, H. (2000). *L'utilisation de l'analyse des risques dans le processus de décisions relatif à la sûreté des barrages et à leur gestion*. Rapport général de la Question 76, 20ème congrès de la CIGB, Beijing.
- [12] David S. Bowles, Working Group on Risk Assessment, USSD Committee on Dam Safety (2003). *Summary of USSD emerging issues white paper on dam safety risk assessment*.
- [13] Hugues, A. and al, (2000). *Risk management for UK reservoir*. CIRIA C542
- [14] Chouinard L. and al (1998), *Priority ranking for maintenance activities on embankment dams*. Congrès annuel 1998 de l'Association canadienne des barrages.
- [15] Heinrichs, P. (2011). *A risk based approach to dam safety management in New South Wales, Australia*. Dams and reservoirs under changing Challenges, CRC Press, pp 129 – 135. Symposium international de la 79ème réunion annuelle de la CIGB, Lucerne.
- [16] Bowles D.S., Giuliani F.L., Hartford D.N.D, Janssen H., Lafitte R., McGrath S., Poupart M., Zielinski P.A., (2010). *ICOLD Bulletin on Dam Safety Management*, Dam Safety – Sustainability in a changing environment, 8th ICOLD European club Symposium, Innsbruck, pp. 331 - 338.
- [17] CFBR, Royet P. et Peyras L. coord. (2006), *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids*, janvier 2006, Dépôt légal BN juin 2006, CD Rom. 62 p.

- [18] CFBR, Royet P. et Peyras L. coord. (2010), *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*.
- [19] MEDDTL, Loudiere D. coord., (2011), *Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques*. Novembre 2010
- [20] Peyras L., Boissier D., Carvajal C. (2010). *Analyse de risques et fiabilité des barrages – Application aux barrages poids en béton*. Editions universitaires Européennes.



## L'UTILISATION DES METHODES DE L'ANALYSE DE RISQUES ISSUES DE L'INDUSTRIE DANS LE DOMAINE DES BARRAGES

### *The use of the risk analysis methods and tools in the world of dams*

**Nicholas BUKOWSKI**

Sogreah, 6 rue de Lorraine – 38130 – ECHIROLLES  
Tél : +33 (0)4 76 33 40 51, Fax : +33 (0)4 76 33 43 32  
[nicholas.bukowski@arteliagroup.com](mailto:nicholas.bukowski@arteliagroup.com)

**Benjamin DELARUELLE**

Sogreah, 6 rue de Lorraine – 38130 – ECHIROLLES  
Tél : +33 (0)4 56 38 46 80, Fax : +33 (0)4 76 33 40 94  
[benjamin.delaruelle@arteliagroup.com](mailto:benjamin.delaruelle@arteliagroup.com)

#### MOTS CLES

Etude de dangers, arbre des causes, arbre des événements, nœud papillon, criticité, cinétique des modes de défaillance, barrières de prévention.

#### RÉSUMÉ

La législation élaborée en France pour la réalisation des études de dangers de barrages est fortement inspirée de la législation en vigueur concernant les études de dangers réalisées dans l'industrie, en particulier pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Dans une même logique, les méthodes d'analyse de risques utilisés afin d'étudier les barrages sont des outils qui ont été initialement développés pour l'industrie. Néanmoins, une approche adaptée se révèle nécessaire pour prendre en compte les spécificités des barrages et en particulier les cinétiques des modes de défaillance. La présentation est axée sur trois thématiques :

- **Une revue des différents outils d'analyse de risque** utilisés dans l'industrie, avec par exemple : les méthodes APR, HAZOP, AMDEC, l'Analyse Préliminaire des Risques, les arbres des causes, les arbres d'événements, le nœud papillon, la méthode « What if », etc. Les avantages et les inconvénients de ces méthodes pour leur application aux problématiques des barrages seront présentés.
- **Une revue des pratiques internationales concernant les analyses de risques dans le domaine des barrages.** Pour l'industrie, l'approche est relativement standardisée. En revanche, dans le monde des barrages, il n'y a pas de consensus, et différentes approches sont utilisées suivant les pays. Une revue des méthodes utilisées en Australie, aux Etats-Unis, en Grande Bretagne est présentée.
- **Le retour d'expérience de Sogreah pour la prise en compte des spécificités des barrages dans les analyses de risques.** Celles-ci comprennent: l'importance des documents de conception dans l'analyse, l'importance de l'état de l'ouvrage, la prise en compte de la cinétique dans l'élaboration des mécanismes de défaillance, l'estimation des fréquences d'occurrence de défaillance, la prise en compte des barrières de prévention, et l'estimation de la gravité des accidents.

#### ABSTRACT

French legislation for dam safety studies is strongly influenced by the legislation in force regarding safety studies for industrial facilities and in particular the requirements for installations which are classified with respect to the protection of the environment. Similarly the risk analysis tools which are being used for the dam risk analysis are those that were initially developed for industry. However, it is necessary to adapt the approach used in order to take into account specific aspects of dams and in particular the kinetics of failure modes. The paper is orientated towards three themes:

- **A review of the risk analysis tools used in industry**, including the following methods: Preliminary Risk Analysis, HAZOP, fault trees and event trees, bow-tie, What if, etc. The advantages and disadvantages of these methods and their pertinence with respect to an application, in the world of dams are presented.
- **A review of the current international practices for dam risk assessment.** In industry the approach and tools for risk analysis is relatively standardized, on the other hand in the world of dams there is no shared agreement regarding methods, and different approaches are used in different countries. A review of the methods used in Australia, the USA and Great Britain is presented.
- **Lessons learnt by Sogreah with respect to taking into account the specific aspects of dams when performing risk assessment.** This includes the importance of: availability of design documents dating from the time that the dam was constructed and establishing the physical integrity of the structure; taking into account the kinetics of failure modes, estimating the likelihood of malfunction, taking into account safety systems, and estimating the severity of dam rupture.

## **PREAMBULE**

La législation élaborée en France pour la réalisation des études de dangers de barrages est fortement inspirée de la législation en vigueur concernant les études de dangers réalisées dans l'industrie, en particulier pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Dans une même logique, les outils d'analyse de risques utilisés afin d'étudier les barrages sont des outils qui ont été initialement développés pour l'industrie. Néanmoins, une approche adaptée se révèle nécessaire pour prendre en compte les spécificités des barrages et en particulier les cinétiques lentes des modes de défaillance et les mécanismes de défaillance complexe.

L'article est axé sur trois thématiques : une revue des différents outils d'analyse de risques utilisés dans l'industrie ; une revue des pratiques internationales concernant les analyses de risques dans le domaine des barrages ; le retour d'expérience de Sogreah pour la prise en compte des spécificités des barrages dans les analyses de risques.

## **1. UNE REVUE DES DIFFERENTS METHODES D'ANALYSE DE RISQUE UTILISES DANS L'INDUSTRIE**

Cette partie s'appuie essentiellement sur le guide  $\Omega$ -7 Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle d'INERIS [1], sachant qu'il existe une abondante littérature sur le sujet notamment Villemeur 1988 [2], Peyras 2010 [3], Peyras et al., 2010 [4] et Baroth et al. 2011 [5].

Les principaux outils d'analyse des risques d'accidents utilisés dans l'industrie sont les suivants :

- l'Analyse Préliminaire des Risques (APR).
- l'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC).
- l'Analyse des risques sur schémas type HAZOP ou « What-if ? ».
- l'Analyse par arbres des défaillances.
- l'Analyse par arbres d'évènements.
- le Nœud Papillon.

### **1.1. Analyse Préliminaire des Risques (APR)**

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) ou L'Analyse Préliminaire des Dangers (APD) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires. Depuis, elle est utilisée dans plusieurs autres domaines. L'APR est une méthode couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. Cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée.

L'APR/APD nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation (matières dangereuses ou équipements/procédés dangereux par exemple). Puis l'APR vise à identifier, pour chaque élément dangereux, une ou plusieurs situations de dangers. L'APR est élaborée par un groupe de travail qui doit déterminer les causes et les conséquences de chacune des situations de dangers identifiés. Le groupe de travail analyse ensuite les mesures de sécurité existantes. Si ces dernières sont jugées insuffisantes, des propositions d'améliorations doivent être envisagées.

Le principal avantage de l'APR est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses. En revanche, l'APR ne permet pas, pour des systèmes complexes, de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur. Il s'agit d'une méthode préliminaire qui permet d'identifier les points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées.

### 1.2. AMDE et AMDEC

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été développée pour l'industrie aéronautique durant les années 1960. Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs d'activités tels que l'industrie chimique, pétrolière ou le nucléaire.

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse qui permet :

- D'évaluer les effets et la séquence d'événements provoqués par chaque mode de défaillance des composants d'un système sur les diverses fonctions de ce système ;
- Déterminer l'importance de chaque mode de défaillance sur le fonctionnement normal du système et en évaluer l'impact sur la fiabilité, la sécurité du système considéré, et
- Hiérarchiser les modes de défaillances connus suivant la facilité que l'on a à les détecter et les traiter.

Lorsqu'il est nécessaire d'évaluer la criticité d'une défaillance (probabilité et gravité), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) apparaît comme une suite logique à l'AMDE. L'AMDEC reprend en effet les principales étapes de l'AMDE et y ajoute une évaluation semi-quantitative de la criticité.

| 1                 | 2                | 3                   | 4                     | 5           | 6           | 7                   | 8                            | 9 | 10 | 11        |
|-------------------|------------------|---------------------|-----------------------|-------------|-------------|---------------------|------------------------------|---|----|-----------|
| Equipement Repère | Fonctions, états | Mode de défaillance | Causes de défaillance | Effet local | Effet final | Moyens de détection | Dispositifs de Remplacements | P | G  | Remarques |
|                   |                  |                     |                       |             |             |                     |                              |   |    |           |
|                   |                  |                     |                       |             |             |                     |                              |   |    |           |

Source : INERIS P=Probabilité G=Gravité

Fig 1 - Exemple d'un tableau de type AMDEC

L'AMDEC est très efficace lorsqu'elle est mise en œuvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant à la défaillance globale du système. L'AMDEC permet d'identifier les modes communs de défaillances pouvant affecter le système étudié. Les modes communs de défaillances correspondent à des événements qui provoquent simultanément des états de panne sur plusieurs composants du système.

### 1.3. HAZOP

La méthode HAZOP, pour HAZard OPerability, a été développée par la société Imperial Chemical Industries (ICI) au début des années 1970. Elle a depuis été adaptée dans différents secteurs d'activité. La méthode HAZOP est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermohydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit...

L'HAZOP ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. De ce fait, elle est centrée sur l'installation à la différence de l'AMDE qui est centrée sur les composants. L'HAZOP est élaborée par un groupe de travail qui doit déterminer les causes et les conséquences potentielles de chacune de ces dérives. Il s'agit également d'identifier les moyens existants permettant de détecter cette dérive, d'en prévenir l'occurrence ou d'en limiter les effets. Le cas échéant, le groupe de travail pourra proposer des mesures correctives à engager en vue de tendre vers plus de sécurité.

#### 1.4. What-if

La méthode dite « What if » est une méthode dérivée de l'HAZOP. Elle suit donc globalement la même procédure. La principale différence concerne la génération des dérives des paramètres de fonctionnement. Ces dérives ne sont plus envisagées en tant que combinaison d'un mot clé et d'un paramètre, mais fondées sur une succession de questions de type : « QUE (What) se passe-t-il SI (IF) tel paramètre ou tel comportement est différent de celui normalement attendu ? ».

#### 1.5. Arbres des Défaillances

L'analyse par arbre des défaillances fut historiquement la première méthode mise au point en vue de procéder à un examen systématique des risques. Elle a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine Bell Telephone et fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles.

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

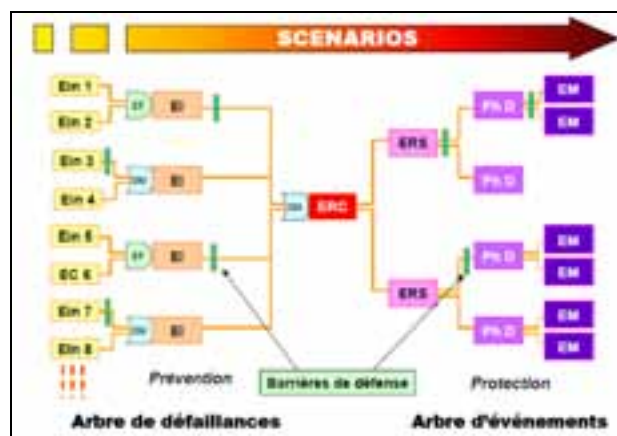
#### 1.6. Arbres d'Evènements

L'analyse par arbre d'évènements a été développée au début des années 1970 pour l'évaluation du risque lié aux centrales nucléaires à eau légère.

A partir d'un événement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'évènements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention... Ces dispositifs concernent donc les moyens automatiques (alarmes), humains (intervention des opérateurs) ou organisationnels (application de procédures).

#### 1.7. Nœud Papillon

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



Source : INERIS

Fig 2 - Exemple d'un arbre d'évènement

Le point central du Nœud Papillon, appelé ici Événement Redouté Central, désigne généralement une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition). La partie gauche du Nœud Papillon s'apparente alors à un arbre des défaillances s'attachant à identifier les causes de cette perte de confinement. La partie droite du Nœud Papillon s'attache quant à elle à déterminer les conséquences de cet événement redouté central tout comme le ferait un arbre d'événements. Sur ce schéma, les barrières de sécurité sont représentées sous la forme de barres verticales pour symboliser le fait qu'elles s'opposent au développement d'un scénario d'accident.

De fait, dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (événement indésirable ou courant) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles (effets majeurs) désigne un scénario d'accident particulier pour un même événement redouté central. Cet outil permet d'apporter une démonstration renforcée de la bonne maîtrise des risques en présentant clairement l'action de barrières de sécurité sur le déroulement d'un accident.

## **2. EXEMPLES DES APPROCHES UTILISEES POUR L'ANALYSE DES RISQUES DANS LE DOMAINE DES BARRAGES**

Les méthodes utilisées pour l'analyse des risques dans l'industrie sont relativement standardisées. En revanche, dans le monde des barrages, différentes approches sont utilisées suivant les pays. Dans les paragraphes suivants un aperçu des méthodes utilisées en Australie, aux Etats-Unis et en Grande Bretagne est présenté.

Nous constatons trois cadres d'utilisation des méthodes de l'analyse de risques, spécifiques selon la finalité recherchée. Dans cet article, nous donnons des exemples de ces applications issues des pratiques américaines : *US Army Corps of Engineers* (USACE) and *US Bureau of Reclamation* (USBR) ; anglaises : *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA) et australiennes : *Australian National Commission On Large Dams* (ANCOLD).

- Dans la première approche, l'étude porte sur un parc de barrages : ils sont comparés entre eux avec un système d'indice de risque afin d'établir une hiérarchisation pour la mise en place de mesures correctives. Cette approche utilise donc l'analyse de risques comme un outil de management et de gestion du risque. La probabilité de rupture d'un barrage n'est pas estimée. Exemples : US Army Corps [6], and US Bureau of Reclamation aux Etats-Unis [7] et [8].
- L'approche qualitative avec l'étude d'un seul barrage (pas de comparaison des barrages entre eux) et sans estimation de la probabilité de rupture. Exemple : Risk Management for UK Reservoirs (RMUKR) [9]. , et
- L'approche quantitative utilisée en Australie [9]. et en Angleterre [10]. Avec cette approche, il y a une estimation de la probabilité de la rupture.

### **2.1. Australie**

Cette partie s'appuie sur le travail du DEFRA [10]. ANCOLD a publié un premier guide en 1994 [9] pour la réalisation des études de risques. Le guide détaille la méthodologie à mettre en place afin d'estimer la probabilité de rupture des différents types de barrages (remblais, béton et maçonnerie).

Il s'agit d'une méthode d'analyse de risques complète, telle qu'elle devrait être mise en œuvre dans les études de dangers en France. Le guide préconise de prendre en considération les situations et les modes de défaillance suivants :

| Condition de chargement                        | Mode de défaillance                                      | Méthode(s) pour l'analyse de risques                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Exploitation normale                           | Instabilité du barrage                                   | Performance historique, jugement d'expert et résultats d'analyse ou d'expertise si disponible                                                                                                                                                         |
|                                                | Erosion interne                                          | Arbres d'événements                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                | Instabilité du chenal de l'évacuateur de crue            | Performance historique, jugement d'expert et résultats d'analyse ou d'expertise si disponible                                                                                                                                                         |
| Situation de crue                              | Surverse du barrage                                      | Etude hydraulique et hydrologique (notamment l'historique des plus fortes crues connues). Détermination des cotes atteintes pour les différentes crues de projet en considérant que la crue arrive sur un plan d'eau à la cote de la Retenue Normale. |
|                                                | Instabilité                                              | Performance historique, jugement d'expert et résultats d'analyse ou d'expertise si disponible                                                                                                                                                         |
|                                                | Erosion interne                                          | Arbres d'événements                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                | Instabilité du chenal de l'évacuateur de crue            | Performance historique, jugement d'expert et résultats d'analyse ou d'expertise si disponible                                                                                                                                                         |
| Situation d'instabilité des rives du réservoir | Glissement de terrain dans la retenue – vague – surverse | Etude de stabilité des rives (interprétation photographique, inspection, estimation de la hauteur des vagues éventuelles)                                                                                                                             |
| Séisme                                         | Instabilité du barrage                                   | Détermination de l'accélération de pointe. Analyse des déformations à l'aide d'un modèle numérique, en considérant le niveau du plan d'eau à la cote de la Retenue Normale                                                                            |
|                                                | Erosion interne                                          | Détermination de l'accélération de pointe, avec arbres d'événements pour tous les chemins critiques                                                                                                                                                   |

Tab. 1 - Extrait des recommandations d'ANCOLD afin d'estimer la probabilité de rupture des barrages en remblais

| Condition de chargement                        | Mode de défaillance                                      | Méthode(s) pour l'analyse de risque                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Exploitation normale                           | Instabilité du barrage                                   | A étudier dans la partie situation de crue                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                                | Erosion interne                                          | Arbres d'événements                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                | Instabilité du chenal de l'évacuateur de crue            | Performance historique, jugement d'expert et résultats d'analyse ou d'expertise si disponible                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Situation de crue                              | Surverse du barrage                                      | Détermination des cotes atteintes pour les différentes crues de projet en considérant que la crue arrive sur un plan d'eau à la cote de Retenue Normale.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                | Instabilité                                              | Etude hydraulique et hydrologique (notamment l'historique des plus fortes crues connues). Détermination des cotes atteintes pour les différentes crues de projet en considérant que la crue arrive sur un plan d'eau à la cote de Retenue Normale. Etude de l'augmentation des sous-pressions et des contraintes dans le béton et la fondation.                                                                                                                                                           |
|                                                | Erosion interne                                          | Arbres d'événements                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                | Instabilité du chenal de l'évacuateur de crue            | Historique, jugement d'expert et résultats d'analyse ou d'expertise si disponible                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Situation d'instabilité des rives du réservoir | Glissement de terrain dans la retenue – vague - surverse | Etude de stabilité des rives (interprétation photographique, inspection, estimation de la hauteur des vagues éventuelles)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Séisme                                         | Instabilité du barrage                                   | 3 accélérogrammes sont testés au minimum. Le plus critique d'entre eux est retenu pour simuler le tremblement de terre. Une analyse dynamique, couplée à une analyse de type Newmark, permet d'estimer les déplacements permanents et donc la probabilité de rupture du barrage. Ces analyses peuvent être couplées à une simulation de type Monte Carlo. La probabilité de rupture du barrage après le séisme, avant que des réparations puissent être réalisées sur l'ouvrage, est également à étudier. |

Tab.2 - Extrait des recommandations d'ANCOLD afin d'estimer la probabilité de rupture des barrages en béton

## 2.2. Aux Etats Unis

Cette partie s'appuie sur le travail du DEFRA [10], McGrath [11], et Harrold et al [12].

Aux Etats-Unis, de nombreuses organisations sont responsables de la sécurité des barrages, et notamment 23 agences fédérales (par exemple, l'US Bureau of Reclamation, l'US Army Corps of Engineers, le Federal Energy Regulatory Commission).

Quelques exemples de pratiques sont présentés dans les paragraphes suivants. D'une manière générale, l'objectif de la prise en compte du risque est d'établir des priorités dans la mise en place de mesures correctives: la notion de risque est en effet utilisée pour comparer les barrages entre eux. Il n'y a pas d'estimation de probabilité de rupture.

### 2.2.1. *Approche utilisée par l'US Bureau of Reclamation (USBR)*

Le Bureau of Reclamation (USBR) gère 362 barrages dans 17 états situés dans l'ouest du pays. La méthode développée par l'USBR est dénommée Risk Based Profile System (RBPS).

Cette méthode permet de définir les priorités d'actions sur les barrages. L'utilisation d'indices permet de comparer les niveaux de sûreté des différents barrages. Néanmoins, cette méthode ne fournit pas d'estimation sur la probabilité de rupture.

Avec la méthode RBPS deux indices sont quantifiés : (i) l'indice de risque et (ii) l'indice socio-économique.

La méthode s'appuie sur une qualification des risques sous 4 conditions de chargement : statique (retenue normale), situation de crue (plus hautes eaux), sismique et opération & maintenance. Le risque est exprimé comme un « indice de rupture ».

L'analyse se déroule de la manière suivante : il s'agit tout d'abord de remplir des formulaires préétablis concernant les conditions d'exploitation du barrage et son état. L'indice de rupture est calculé à partir des informations rentrées dans le logiciel. Cette méthode d'analyse repose donc sur un jugement d'expert.

Dans une deuxième étape, le facteur « perte de vie » est estimé ; il tient compte de :

- La population totale exposée au risque ;
- La gravité de l'inondation en cas de rupture ;
- La gravité du mode de défaillance.

Ce facteur perte de vie est ensuite multiplié à l'indice de rupture afin d'obtenir l'indice de risque.

L'indice de risque est calculé pour chacune des 4 conditions de chargement précitées, et la somme des indices est égale à l'indice total de risque.

Dans la troisième et dernière étape de l'analyse, l'indice socio-économique est calculé en multipliant l'indice de rupture par le nombre de personnes exposées au risque, le tout divisé par mille.

### 2.2.2. *Approche utilisée par l'US Army Corps of Engineers (USACE)*

L'USACE est responsable des barrages situés dans l'est du pays. Dans les années 1980, l'USACE a développé un programme pour l'entretien, la maintenance et la réhabilitation de ses barrages. Ce programme, nommé REMR (*Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation*), a été développé afin de mieux gérer les ressources.

En 1999, un module concernant l'état physique des barrages a été intégré dans le programme REMR. Le module permet d'attribuer un indice de risque au barrage étudié. L'indice est établi par un groupe de travail et l'évaluation est basée sur un avis d'expert.

## 2.3. **Grande Bretagne**

Cette partie s'appuie sur le travail du *Department for Environment Food and Rural Affairs* (DEFRA) [10]. Deux exemples de méthodes utilisées en Grande Bretagne sont décrits dans les paragraphes suivants.

### 2.3.1. *Risk Management of UK Reservoirs (RMUKR)*

La méthode RMUKR a été publiée en 2000 par CIRIA. La méthode comprend une « checklist » d'indicateurs et l'utilisateur définit lui-même, d'une manière qualitative, la gravité des conséquences et la fréquence d'occurrence des événements initiateurs.

Les étapes de l'analyse sont résumées comme suit :

- Analyse simplifiée de la rupture du barrage et de l'onde de submersion, l'analyse repose sur l'évaluation de 3 ou 4 composants du barrage et pour chaque composant, il y a entre 1 et 4 modes de défaillance prédéfinis. Pour chaque mode de défaillance, il y a 2 ou 3 indicateurs de défaillance prédéfinis. Pour chaque indicateur, un indice de notation est attribué (entre 1 et 5) pour : (a) Le degré d'importance de la défaillance sur la probabilité de rupture ; (b) La fréquence d'occurrence de la défaillance, et (c) Le niveau de confiance de l'estimation.
- Quantification de l'impact de la rupture sur l'aval du barrage avec prise en considération de deux zones : impact sur l'aval proche (inférieur à 5 km), et impact sur l'aval éloigné (supérieur 5 km). L'impact de la rupture du barrage est classé comme mineur, modéré ou majeur ;
- Sélection du niveau d'analyse à utiliser en fonction du classement de la gravité de la rupture. Il y a trois niveaux d'analyse ;
- Analyse de risques avec la méthode AMDEC pour les barrages avec un impact majeur et modéré.

15 tableaux LCI (Location, Cause, Indicateur) sont fournis comme guide pour estimer les indices de notation (voir l'exemple ci-dessous).

| Dam Type                                                 | Concrete/Masonry Dams |       |     |           |       |     | Service Reservoir |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|-------|-----|-----------|-------|-----|-------------------|
| Date of construction                                     | 1840-1960             |       |     | Post 1960 |       |     |                   |
| Height                                                   | <15                   | 15-30 | >30 | <15       | 15-30 | >30 |                   |
| LCI Diagram No. (Appendix A6)                            | 1                     | 2     | 3   | 4         | 5     | 4   | 6                 |
| Number of dams in category (522 total, 51 age not known) | 94                    | 45    | 37  | 53        | 16    | 20  | 193               |
| <b>Dam</b>                                               |                       |       |     |           |       |     |                   |
| Softening/spalling                                       | L                     | L     | -   | -         | -     | -   | -                 |
| Seepage/leakage                                          | L                     | L     | L   | -         | H     | -   | -                 |
| <b>Foundation</b>                                        |                       |       |     |           |       |     |                   |
| Cracking                                                 | L                     | L     | -   | -         | -     | -   | -                 |
| Seepage/leakage                                          | L                     | L     | L   | -         | H     | -   | -                 |
| <b>Spillway</b>                                          |                       |       |     |           |       |     |                   |
| Seepage/leakage                                          | L                     | L     | L   | -         | -     | -   | -                 |
| <b>Inlet/Outlet Pipework</b>                             |                       |       |     |           |       |     |                   |
| Seepage/leakage                                          | L                     | L     | L   | -         | H     | -   | -                 |

Fig.3 - Exemple d'un guide pour estimer l'indice de notation en vue de définir la gravité des conséquences (RMUKR)

Pour chaque indicateur, la criticité est déterminée par la multiplication des indices de notation :

Criticité = indice de gravité des conséquences x indice de fréquence d'occurrence x indice de niveau de confiance

### 2.3.2. *Interim Guide to Quantitative Risk Assessment (QRA) for UK Reservoirs*

La version intermédiaire du guide développée par Kellogs Brown and Root pour le compte du DEFRA a été publiée en 2004. La version définitive n'est toujours pas disponible. Il est éventuellement prévu que le guide remplace, à terme, la méthode RMUKR.

L'outil se présente sous la forme d'un logiciel. L'utilisateur remplit un ensemble de tableaux et le logiciel calcule la probabilité de la rupture. Quatre causes principales de rupture sont prises en compte :

- Crue
- Rupture d'un barrage en amont
- Stabilité interne
- Stabilité des ouvrages annexes

Le calcul de probabilité repose sur les données statistiques des barrages en remblais situées en Grande-Bretagne. Il faut noter que le risque sismique n'est pas pris en compte et que la méthode n'est pas applicable aux barrages en béton.

Deux exemples des tableaux à remplir par l'utilisateur sont présentés ci-après.

| SITE INSPECTION                                                                                                                                                                                                                                                            |                   |                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|-----------|
| Sheet 1.1: Characteristics of Subject Reservoir                                                                                                                                                                                                                            |                   |                                            |           |
| Dam name                                                                                                                                                                                                                                                                   | Dam 4             |                                            |           |
| Grid ref.                                                                                                                                                                                                                                                                  | XX ABCD EFGH      |                                            |           |
| Calculation Number/ description                                                                                                                                                                                                                                            | Run 1 - July 2003 |                                            |           |
| Information                                                                                                                                                                                                                                                                | Units             | Column to be completed, as far as possible |           |
| Crest wall : Is there one and if so can it withstand sustained overtopping with reservoir stillwater at or above top of crest wall? (choose from pick list)                                                                                                                |                   | No wall                                    | Remarks   |
| Level of -                                                                                                                                                                                                                                                                 |                   |                                            |           |
| Top of crest wall (Note 2)                                                                                                                                                                                                                                                 | mOD               | None                                       |           |
| Lowest point on dam crest (Note 3)                                                                                                                                                                                                                                         | mOD               | 71.77                                      |           |
| Maximum retention level                                                                                                                                                                                                                                                    | mOD               | 71.01                                      |           |
| Original ground level on dam axis (Note 4)                                                                                                                                                                                                                                 | mOD               | 66.5                                       |           |
| Downstream stream bed                                                                                                                                                                                                                                                      | mOD               | 65.95                                      |           |
| Datum for level                                                                                                                                                                                                                                                            |                   | OS                                         |           |
| Height of dam crest above OGL on axis                                                                                                                                                                                                                                      | m                 | 5.27                                       |           |
| Height of dam crest above stream bed                                                                                                                                                                                                                                       | m                 | 5.82                                       |           |
| Freeboard to dam crest                                                                                                                                                                                                                                                     | m                 | 0.76                                       |           |
| Height of wave wall above crest                                                                                                                                                                                                                                            | m                 | No crest wall                              |           |
| Reservoir capacity - at spillway crest level                                                                                                                                                                                                                               | m <sup>3</sup>    | 28,000                                     |           |
| Reservoir area - at spillway crest level                                                                                                                                                                                                                                   | m <sup>2</sup>    | 15,000                                     |           |
| - at top of intact crest wall/ Dam crest level if no crest wall, or wall cannot withstand overtopping                                                                                                                                                                      | m <sup>2</sup>    | 18,000                                     | Estimated |
| Reservoir capacity at top of intact crest wall/ Dam crest level if no crest wall, or wall cannot withstand overtopping                                                                                                                                                     | m <sup>3</sup>    | 40,540                                     |           |
| Catchment area                                                                                                                                                                                                                                                             | km <sup>2</sup>   | 4.53                                       |           |
| Downstream slope (overall)                                                                                                                                                                                                                                                 | H:V               | 2.0                                        |           |
| Upstream slope (overall)                                                                                                                                                                                                                                                   | H:V               | Unknown                                    |           |
| Notes                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   |                                            |           |
| 1. The contents of shaded cells are used in subsequent analysis and must be included                                                                                                                                                                                       |                   |                                            |           |
| 2. Insert "None" if no wall                                                                                                                                                                                                                                                |                   |                                            |           |
| 3. Input lowest (used in estimate of overtopping flow)                                                                                                                                                                                                                     |                   |                                            |           |
| 4. Used to derive the dam height used in calculating the dam break flood                                                                                                                                                                                                   |                   |                                            |           |
| Caution : Data input is also required in other sheets. It is therefore recommended that in order to identify the data to be obtained from site inspection and measurement all sheets in this workbook are reviewed, and where possible completed, prior to the site visit. |                   |                                            |           |

Fig 4 - Exemple des feuilles de la méthode « Interim Guide to QRA for UK Reservoirs »

| OVERALL ANNUAL PROBABILITY OF FAILURE                                                                                                                                                                     |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|---|-----------|
| Sheet 7.1: Overall Annual Probability of Failure                                                                                                                                                          |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
| Dam name                                                                                                                                                                                                  | Dam 4                            |                                                 |                                                       | Calculation 1                    |                       |                                                       | Calculation 2                                                             |                       |         |   |           |
| Grid ref.                                                                                                                                                                                                 | XX ABCD EFGH                     |                                                 |                                                       | Condition at 1998 inspection     |                       |                                                       | Anticipated condition after proposed works                                |                       |         |   |           |
| Calculation Number/ description                                                                                                                                                                           | Run 1 - July 2003                |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       | (Sections 2, 3 input by user; Sections 4, 5 as Calculation 2 in workbook) |                       |         |   |           |
| Threat                                                                                                                                                                                                    | Refer to analysis in Section No. | Assessment of threat                            | Inferred annual probability of failure of subject dam |                                  |                       | Inferred annual probability of failure of subject dam |                                                                           |                       |         |   |           |
|                                                                                                                                                                                                           |                                  | Critical threat as % of maximum probable threat | AP of failure                                         | AP of failure x 10 <sup>-6</sup> | Return period (years) | AP of failure                                         | AP of failure x 10 <sup>-6</sup>                                          | Return period (years) |         |   |           |
| <b>7.1.1 Core Threats</b>                                                                                                                                                                                 |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
| <b>External</b>                                                                                                                                                                                           |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
| Extreme rainfall                                                                                                                                                                                          | 2                                | 15%                                             | 3.0E-03                                               | 3,000                            | 330                   | 5.0E-04                                               | 500                                                                       | 2,000                 |         |   |           |
| Failure of reservoir in cascade upstream                                                                                                                                                                  | 3                                |                                                 | 4.1E-04                                               | 410                              | 2,500                 | 4.1E-04                                               | 410                                                                       | 2,500                 |         |   |           |
| <b>Internal</b>                                                                                                                                                                                           |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
|                                                                                                                                                                                                           |                                  | Condition Score                                 |                                                       |                                  |                       | Condition Score                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
|                                                                                                                                                                                                           |                                  | Intrinsic                                       | Current                                               |                                  |                       | Intrinsic                                             | Current                                                                   |                       |         |   |           |
| Internal stability (Embankment)                                                                                                                                                                           | 4                                | 8                                               | 7                                                     | 9.0E-05                          | 90                    | 11,000                                                | 6                                                                         | 1                     | 6.0E-07 | 1 | 1,700,000 |
| Internal stability (Appurtenant works)                                                                                                                                                                    | 5                                | 10                                              | 9                                                     | 2.0E-03                          | 2,000                 | 500                                                   | 10                                                                        | 3                     | 4.0E-06 | 4 | 250,000   |
| <b>7.2.2 Other threats (or mechanism of deterioration for the above core threats) to be added by user - identified in Section 6</b>                                                                       |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
|                                                                                                                                                                                                           |                                  |                                                 |                                                       | 0                                | #DIV/0!               |                                                       |                                                                           | 0                     | #DIV/0! |   |           |
|                                                                                                                                                                                                           |                                  |                                                 |                                                       | 0                                | #DIV/0!               |                                                       |                                                                           | 0                     | #DIV/0! |   |           |
|                                                                                                                                                                                                           |                                  |                                                 |                                                       | 0                                | #DIV/0!               |                                                       |                                                                           | 0                     | #DIV/0! |   |           |
|                                                                                                                                                                                                           |                                  |                                                 |                                                       | 0                                | #DIV/0!               |                                                       |                                                                           | 0                     | #DIV/0! |   |           |
| Total AP =                                                                                                                                                                                                |                                  |                                                 |                                                       | 5.5E-03                          | 5,500                 | 180                                                   | 9.1E-04                                                                   |                       |         |   |           |
| Remarks                                                                                                                                                                                                   |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
| Assume AP of failure of spillway after works is 1 in 2000 (based on design flood of 1000 years)                                                                                                           |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
| Assume no change to upstream dam, in terms of internal stability                                                                                                                                          |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |
| As subject dam is 130 years old the overall annual probability of failure seems high; but this may be because it is showing signs of distress due to deterioration of the appurtenant structures with age |                                  |                                                 |                                                       |                                  |                       |                                                       |                                                                           |                       |         |   |           |

Fig 4 - Exemple des feuilles de la méthode « Interim Guide to QRA for UK Reservoirs »

### **3. RETOUR D'EXPERIENCE DE SOGREAH DANS LA PRISE EN COMPTE DES SPECIFICITES DES BARRAGES DANS LES ANALYSES DE RISQUE**

L'objectif de cette dernière partie de l'article est de présenter le retour d'expérience de Sogreah dans la réalisation des études de dangers de barrages.

Sogreah présente une solide expérience dans la réalisation des études de dangers pour l'industrie. Cette expérience concerne notamment l'élaboration d'études rentrant dans le cadre de la législation sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Cependant, l'expérience de Sogreah sur les études de dangers de barrages est relativement récente, à l'exemple des autres bureaux d'études français. Une comparaison des méthodologies développées pour les études de dangers réalisées pour l'industrie et pour les barrages semble donc pouvoir être pertinente.

#### **3.1. Analyse fonctionnelle**

Dans le monde de l'industrie, le nombre et le type de composants à analyser dans le cadre d'une étude de dangers dépendent de plusieurs facteurs :

- L'activité industrielle ;
- Les types des procédés mis en œuvre ;
- La nature et la quantité des produits stockés sur le site, et
- La taille de l'installation.

Typiquement, au début de l'analyse de risques, une analyse fonctionnelle comprenant une analyse structurelle est réalisée : l'installation est déclinée en système et sous-système afin de structurer l'analyse. Le nombre et le type de composants à analyser peuvent donc se révéler très importants.

Pour un barrage, les éléments à analyser et leur mode de défaillance sont relativement standards :

- La retenue et les rives de la retenue : possibilité de débordage du fond de la retenue ou de glissement des rives dans la retenue ;
- Le barrage lui-même avec sa fondation et ses appuis : rupture du barrage par augmentation des sous-pressions, érosion interne, déstabilisation d'un appui ou dégradation du matériau du barrage ;
- Les vannes de l'évacuateur de crues : rupture des vannes par corrosion, ouverture ou fermeture intempestive par erreur humaine, non ouverture ou non fermeture à cause d'un problème de contrôle-commande ;
- Les vannes de fond ou de demi-fond,
- Les conduites de vidange : rupture de la conduite par coup de bélier
- Les divers ouvrages traversant le barrage ou son étanchéité (dérivation provisoire par exemple) : lâcher intempestif d'eau à l'aval par rupture du bouchon en béton de la galerie de dérivation provisoire.

Il est donc tout à fait possible de partir d'une liste générique, retravaillée ensuite par le groupe de travail, afin d'adapter les éléments à retenir dans l'étude et d'évaluer leur mode de défaillance.

#### **3.2. Complexité de l'ouvrage**

La complexité de l'ouvrage est un élément important dans la réalisation d'une étude de risques. Plus l'installation est complexe, et plus le risque d'incident est important. Par conséquent, le grain de l'analyse de risque doit être adapté à la complexité de l'installation. La complexité des sites industriels peut être très variable.

Dans le domaine industriel, la complexité de l'ouvrage dépend essentiellement de l'activité et des types de procédés mis en œuvre sur le site.

Dans une étude de dangers de barrage, la complexité de l'ouvrage dépend des facteurs suivants :

- Des aléas naturels auxquels l'ouvrage est soumis : hydrologie, sismicité, stabilité des versants de la retenue
- Des ouvrages de sécurité dont dispose le barrage et notamment du type d'évacuateur de crues : à seuil libre ou vanné, c'est-à-dire si le passage des crues nécessite une intervention humaine ou non ;
- De la destination de l'ouvrage (irrigation, hydroélectricité, écrêtement des crues,...), ainsi que de la gestion de l'aménagement par l'exploitant ;
- De la sensibilité intrinsèque des structures de génie civil et des équipements hydromécaniques.

Contrairement à un site industriel, il est difficile de préjuger de la complexité d'un barrage avant de démarrer l'étude. Enfin, il convient de bien noter que la complexité d'un barrage ne dépend pas de sa taille.

### **3.3. Analyse des modes de défaillance**

Dans l'analyse des risques d'une installation industrielle, l'étude est réalisée en deux étapes : une analyse préliminaire pour identifier les scénarii critiques puis une analyse détaillée des scénarii critiques.

L'analyse préliminaire des risques doit balayer tous les systèmes et sous-systèmes afin d'identifier les scénarii critiques en termes de gravité des conséquences. Pour une étude de dangers, l'analyse préliminaire des risques vise donc à identifier les scénarii d'accident dont les conséquences dépassent les limites du site (appelés les Evénements Redoutés Centraux (ERC) dans la méthode du Nœud Papillon). La méthode généralement utilisée dans le domaine industriel est la méthode APR et parfois HAZOP ou AMDEC.

Les phénomènes que l'on souhaite éviter (les ERC dans la méthode du Nœud Papillon) sont en général des pertes de confinement d'une matière dangereuse et les phénomènes dangereux sont : feu, explosion, dégagement des gaz toxiques, dégagement de fumée, pollution. A partir d'un ERC perte de confinement (rupture ou fuite), l'enchaînement des événements pourrait créer plusieurs phénomènes dangereux.

Pour l'analyse des modes de défaillance d'un barrage, le principe est le même que pour l'industrie : identifier les modes de défaillance susceptibles de conduire à un état-limite ultime. Ces derniers sont aussi les événements de perte de confinement mais le phénomène dangereux est toujours un lâcher intempestif d'eau à l'aval. Ils comprennent typiquement : la rupture du barrage, l'ouverture intempestive d'une vanne, la rupture d'une vanne, la rupture d'un bouchon obturant une galerie traversant l'ouvrage, la rupture d'une conduite.

### **3.4. Analyse détaillée des risques et modélisation des scénarii**

En France, pour une étude de dangers ICPE l'outil typiquement utilisé pour l'analyse détaillée des risques est le nœud papillon. L'expérience de Sogreah montre que l'outil nœud papillon se prête également bien à l'étude d'un barrage. Néanmoins le groupe de travail doit être vigilant concernant certains aspects du nœud papillon. Quelques exemples sont présentés dans les paragraphes suivants :

#### **3.4.1. Mécanismes de défaillance**

Une attention particulière est requise afin d'établir les mécanismes de défaillance faisant intervenir un opérateur : il faut bien identifier les erreurs humaines mais surtout les actions de rattrapage possibles. Dans le cas de l'industrie, l'analyse de risque peut s'appuyer sur des analyses fonctionnelles. Mais dans le domaine des barrages, il est rare d'avoir cette analyse et il est nécessaire que le groupe de travail s'appuie d'avantage sur la participation des exploitants de l'ouvrage.

Les mécanismes de défaillance pour les structures génie civil / géotechnique sont parfois complexes, et il n'y a pas de toujours de consensus entre experts (exemple de l'érosion interne). Le groupe de travail doit donc être vigilant afin d'établir un niveau de détail adapté à l'ouvrage et présenter un mécanisme clair et cohérent dans le

nœud papillon. Il semble que la meilleure solution soit de présenter graphiquement les mécanismes dans une forme la plus simple possible et de joindre des explications par écrit.

La prise en compte des aspects hydrauliques dans l'analyse est parfois problématique. Il en est ainsi de la prise en considération des différents débits de crue (hauteurs d'eau) et l'interface avec les différents modes de défaillance. D'une manière générale, les scénarii de défaillance des ouvrages hydrauliques comprennent plus de facteurs variables que les scénarii d'accidents industriels : cela est dû au fait qu'un barrage est soumis à des aléas naturels dont l'occurrence est à combiner avec les différents modes de défaillance envisagées pour les éléments du barrage.

#### 3.4.2. *Prise en compte de la cinétique*

La prise en compte de la cinétique est particulièrement importante, et parfois problématique à prendre en compte dans le mécanisme de la défaillance. Deux exemples sont présentés ci-après afin d'illustrer ce propos :

L'état de crue, pour un barrage, est la phase durant laquelle des lâchers d'eau sont indispensables afin de respecter la cote de la retenue normale. Cet état est anticipé : en effet, avant l'état de crue, il y a généralement l'état de surveillance rapproché ou l'état de veille. Durant ces phases, l'exploitant surveille son ouvrage et anticipe donc l'arrivée de la crue en effectuant par exemple des essais d'ouverture de vannes et en mobilisant les équipes d'astreinte. Dans le cas où un incident surviendrait durant ces phases de surveillance antérieure à l'état de crues (par exemple, le non fonctionnement d'une vanne détecté durant l'essai), des actions correctives sont possibles. Le groupe de travail doit donc prendre en compte la rapidité de la montée du plan d'eau, le temps d'intervention et de réaction d'un opérateur pour résoudre les défaillances envisagées, les conditions d'accès au site, le temps nécessaire pour mobiliser d'autres modes de transport en cas de besoin (hélicoptère, approche à ski...) ou pour mobiliser du matériel supplémentaire (un groupe électrogène de secours par exemple).

Le mécanisme d'érosion interne présente une cinétique très lente, mais dans le cas du dépassement de la charge hydrostatique admissible par l'ouvrage (ainsi par exemple le dépassement de la cote de danger du barrage), le phénomène pourrait accélérer très rapidement. Le groupe de travail doit prendre en compte la cinétique dans le mécanisme de défaillance et prendre en compte le temps nécessaire pour la détection et l'action de correction (par exemple la baisse du niveau de la retenue si cela est possible).

La prise en compte de la cinétique est plus complexe dans les études de dangers de barrages que dans les études de dangers réalisées pour l'industrie. Les mécanismes de défaillance pour les ouvrages hydrauliques comprennent de multiples interactions dont les cinétiques sont variables, y compris pour les barrières.

#### 3.4.3. *Prise en compte des barrières de sécurité*

Dans le contexte industriel, les systèmes de sécurité sont facilement identifiés et mis en évidence dans les nœuds papillons. Certaines mesures sont mises en œuvre dès la conception de l'installation : minimiser les quantités de matières dangereuses stockées, concevoir l'installation avec des distances de sécurité adaptées, choix des procédés, etc. Dans la méthode du Nœud Papillon, ces aspects sont pris en compte dans la partie droite du nœud papillon (arbre d'événements) avec les enchaînements des événements après l'ERC. Il y a aussi les mesures pour détecter les déviations et arrêter les installations.

Dans le cas de la déviation de fonctionnement d'une installation industrielle, le principe est de détecter la déviation, de stopper la production et de mettre l'installation en sécurité afin de réduire la probabilité d'enchaînement des événements.

Dans le contexte d'un ouvrage hydraulique, au niveau de la conception de l'ouvrage, les éléments de sécurité comprennent le choix du site de barrage par rapport aux aléas naturels et le choix du type de construction. Les principaux éléments de sécurité de l'ouvrage sont les organes d'évacuation des crues et les systèmes pour assurer leur bon fonctionnement. Néanmoins, la nature des situations dangereuses rend la présentation des barrières de sécurité dans les nœuds papillons moins évidente que pour un site industriel. La prise en compte des éléments de sécurité s'effectue par la cotation de l'événement initiateur.

#### 3.4.4. *Estimation de la fréquence d'occurrence d'événements initiateurs*

L'une des plus grandes différences entre les analyses de risques réalisées pour l'industrie et pour les barrages réside dans l'estimation de la fréquence d'occurrence des événements initiateurs.

Pour l'industrie, il existe des bases de données afin d'estimer la fréquence de défaillance de tel ou tel procédé.

Pour les barrages, les données statistiques sont insuffisantes pour s'appuyer sur des retours d'expérience et estimer la fréquence d'une défaillance d'un élément d'un barrage. L'ordre de magnitude de la fréquence des événements initiateurs est donc estimé par les experts du groupe de travail. Cette estimation requiert la prise en compte des divers documents techniques de l'élément étudié : notes de calculs, rapports d'inspection, rapports d'expertise, rapports d'auscultation, retour d'expérience sur la défaillance de l'élément, état actuel, travaux engagés sur l'élément... Cette approche n'est généralement pas utilisée dans les études de dangers de sites industriels.

#### 3.5. *L'estimation des conséquences des phénomènes dangereux*

Dans le cas d'un site industriel, l'estimation des conséquences des phénomènes dangereux est effectuée par des calculs ou par des logiciels. Les seuils d'effets sur les personnes et les structures sont définis par la législation. L'étude de dangers doit déterminer le rayonnement des effets d'un accident majeur. Il est ensuite possible d'estimer le nombre des personnes exposées au risque.

On sait modéliser une rupture de barrage et déterminer l'onde de submersion afin d'estimer le nombre de personnes exposées au risque. Néanmoins les différences par rapport à une étude industrielle résident dans le fait que la législation ne définit pas de seuils de référence. Il faut aussi prendre en compte le fait qu'un lâcher intempestif d'eau est un phénomène naturel, équivalent à une crue. Certains maîtres d'ouvrages ont proposé de quantifier la gravité d'un lâcher d'eau non contrôlé en termes d'équivalent crue et non en termes de nombre de personnes exposées au risque.

### 4. CONCLUSIONS

La comparaison des études de danger menées dans l'industrie et dans le monde des barrages amène aux principales conclusions résumées ci-après :

- Les barrages comprennent en général moins d'éléments à étudier qu'une installation industrielle et pourraient, à première vue, sembler moins complexes à étudier. La complexité d'un barrage réside dans les nombreux phénomènes naturels auxquels l'ouvrage est soumis et leur interaction avec la structure du barrage.
- L'outil le plus adapté pour l'analyse des modes de défaillance d'un barrage semble être l'AMDEC avec quelques modifications pour prendre en compte les spécificités des ouvrages hydrauliques. En conclusion, les outils développés pour l'industrie semblent bien adaptés aux spécificités des ouvrages hydrauliques.
- L'utilisation de l'outil nœud papillon pour l'analyse détaillée des risques est également bien adaptée, mais le groupe de travail doit être vigilant dans l'élaboration des mécanismes de défaillance en tenant bien compte de la cinétique de chaque événement initiateur et de celle de chacune des barrières, ainsi que les interactions entre l'hydraulique, le génie civil, la géologie et l'exploitation du barrage. Le groupe de travail devrait éviter de développer de façon trop détaillée certains phénomènes comme l'érosion interne, car il n'y a pas de consensus, pour l'instant, sur ces mécanismes.
- L'estimation des fréquences d'événements initiateurs de défaillances est basée sur l'avis d'expert. Il n'est pas possible de s'appuyer sur des données statistiques comme dans le cas d'une étude menée pour l'industrie. Cette approche d'avis d'expert nécessite une parfaite connaissance de l'ouvrage et peut être sujette à des interprétations subjectives.
- La gravité des conséquences des lâchers d'eau non contrôlés est moins évidente à quantifier que les accidents majeurs industriels. La législation ICPE a défini des seuils de référence et le nombre de personnes exposées pourrait être estimé. En revanche, un lâcher d'eau est comparable à un phénomène naturel et dans le cas d'une crue il y aura aussi des dégâts. Il est par conséquent proposé par certains maîtres d'ouvrages de quantifier la gravité en termes d'équivalent crue et non en termes de nombre de personnes exposées au risque.

## REFERENCES

- [1] INERIS – 2003 – *Q-7 Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle*.
- [2] VILLEMEUR A. – 1998 – *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels* – Eyrolles, Paris.
- [3] PEYRAS L. – 2010 – *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages* – Editions Universitaires Européennes.
- [4] PEYRAS L., BOISSIER D., CARVAJAL C. – 2010 – *Analyse de risques et fiabilité des barrages* – Editions Universitaires Européennes.
- [5] BAROTH J., SCHOEFS F., BREYSSE D. – 2011 – *Fiabilité des ouvrages* – Lavoisier-Hermès.
- [6] [www.cecer.army.mil/fl/remr/remr.html](http://www.cecer.army.mil/fl/remr/remr.html)
- [7] Bureau of Reclamation – 2004 – *Security, Safety and Law Enforcement, Risk Based profiling System*, accessed online at [www.usbr.gov/ssle/dam\\_safety/risk/profilingsystem.html](http://www.usbr.gov/ssle/dam_safety/risk/profilingsystem.html)
- [8] Bureau of Reclamation – 2001 – *Risk Based Profiling System, Technical Manual*.
- [9] Australian National Committee on Large Dams – 1994 – *Guidelines on Risk Assessment*.
- [10] DEFRA – 2006 – *Supplement N°1 to Interim Guide to Quantitative Risk Assessment for UK Reservoirs*.
- [11] McGrath S. – 2006 – *International Practice and use of Risk Assessment in Dam Management*.
- [12] Harrauld J. R., Renda-Tanali I., Shaw G.L., Rubin C. B., Yeletaysi S. – 2004 – *Review of Risk Based Prioritization/Decision Making Methodologies for Dams* – The George Washington University Institute for Crisis Management, Disaster, and Risk Management.



## UNE METHODE D'ESTIMATION DE LA PROBABILITE DES ACCIDENTS MAJEURS DE BARRAGES : LA METHODE DU NŒUD PAPILLON

*A methodology to estimate probability of dams major accident:  
a bow tie approach*

**Christophe, Bolvin**

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Direction des Risques Accidentels, B.P.2,  
Parc ALATA, 60550 Verneuil-en-Halatte (France)  
[christophe.bolvin@ineris.fr](mailto:christophe.bolvin@ineris.fr)

**Thibault, Balouin, Agnès, Vallée, Yann, Flauw**

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Direction des Risques Accidentels, B.P.2,  
Parc ALATA, 60550 Verneuil-en-Halatte (France)  
[thibault.balouin@ineris.fr](mailto:thibault.balouin@ineris.fr), [agnes.vallee@ineris.fr](mailto:agnes.vallee@ineris.fr), [yann.flauw@ineris.fr](mailto:yann.flauw@ineris.fr)

### MOTS CLES

Barrière, Fréquence, Nœud Papillon, Probabilité.

### ABSTRACT

Article R.214.115 from the French Code de l'environnement – introduced by the 11<sup>th</sup> dec. 2007 Decree n°2007-1735 – plans safety reports for some hydraulic installations (class A and B dams, class A, B and C dikes). The risk control/level safety of the operator is demonstrated by the safety report. This safety report uses a cross analysis based on severity of consequences and probability of identified major accidents. INERIS assesses the probability of major accident through a methodology based on the analysis of scenarios using bow tie diagrams and frequencies/probabilities expressed as range values. The bow tie diagram describes major accident scenarios from root events to accidents. In this methodology, the risk assessor has to identify prevention and protection safety measures and analyses their performances through the study of some criteria. The bow tie approach deploys a step by step method. This method helps demonstrating the decrease in risk level by implementing new safety measures or upgrading existing once. This approach implies the assessment of root events and probability of failure on demand of safety measure as range frequencies/probabilities. As such, the bow tie diagram approach takes into account root events, prevention and protection safety measures to assess the accident frequencies. However the challenge in assessing unlikely events is not solved using this approach as some specific root events have very low occurrence frequencies.

### RÉSUMÉ

L'article R.214.115 du Code de l'environnement introduit par le Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 prévoit la réalisation d'une étude de dangers pour certains ouvrages hydrauliques (barrages de classes A et B ; digues de classes A, B et C). Cette étude a pour objectif la démonstration de la maîtrise des risques par l'exploitant au travers d'une analyse croisée de la gravité des conséquences des effets et de la probabilité d'occurrence annuelle des accidents majeurs identifiés. Afin de réaliser l'estimation en probabilité des accidents, l'INERIS utilise une méthode semi-quantitative qui consiste à analyser les scénarios d'accident en utilisant l'outil nœud papillon. Cet outil décrit les séquences d'événements depuis un événement initiateur jusqu'à un accident. Les barrières de sécurité intervenant en prévention et en protection sont déterminées, et leurs critères de performance analysés. L'outil nœud papillon permet de mettre en œuvre une approche itérative en vue de démontrer la réduction des risques par l'ajout ou l'amélioration des mesures de sécurité par exemple. Il permet d'estimer la probabilité finale de l'accident majeur en se basant sur la fréquence d'événements initiateurs diminuée par les probabilités de défaillances associées aux barrières de sécurité. Si cette démarche est démonstrative et structurée, elle se confronte toutefois à des difficultés d'identifier une fréquence pour certains événements initiateurs dits « rares ».

# 1. LA PROBABILITE : UN CRITERE REGLEMENTAIRE RENTRANT DANS LE PROCESSUS GENERAL D'ANALYSE DES RISQUES

## 1.1. Contexte réglementaire

La prise en compte de la probabilité dans le cadre des études de dangers est exigée par l'article R. 214-116 du Code de l'environnement : « *L'étude de dangers [...] explicite les niveaux des risques pris en compte, détaille les mesures aptes à les réduire et en précise les niveaux résiduels une fois mises en œuvre les mesures précitées. [...] Elle prend également en compte des événements de gravité moindre mais de probabilité plus importante tels les accidents et incidents liés à l'exploitation courante de l'aménagement.* »

L'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, revient dans son chapitre 8 sur l'identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets, et de gravité des conséquences. « *L'étude de dangers s'appuie sur une analyse de risques permettant d'identifier les causes, les combinaisons d'événements et les scénarios susceptibles d'être, directement ou par effet domino, à l'origine d'un accident important. Chaque accident potentiel est caractérisé par sa probabilité d'occurrence, l'intensité et la cinétique de ses effets et la gravité des conséquences pour la zone touchée. En synthèse, les différents scénarios d'accident sont positionnés les uns par rapport aux autres en fonction de leur probabilité d'occurrence et de la gravité des conséquences, évaluée en termes de victimes humaines potentielles et de dégâts aux biens, en mettant en évidence les scénarios les plus critiques.* »

Si les textes requièrent la prise en compte de la probabilité dans les études de dangers, ils rappellent que celle-ci ne peut intervenir qu'à l'issue d'une analyse de risque exhaustive.

Le processus d'élaboration d'une étude de dangers suit donc le phasage classique d'analyse de risques décrit dans la norme ISO 31000 « management du risque », à savoir une phase d'identification du risque (processus de recherche), une phase d'analyse de risques et une phase d'évaluation (processus de comparaison des niveaux de risques aux critères). Ces trois étapes sont décrites dans la figure ci-dessous :

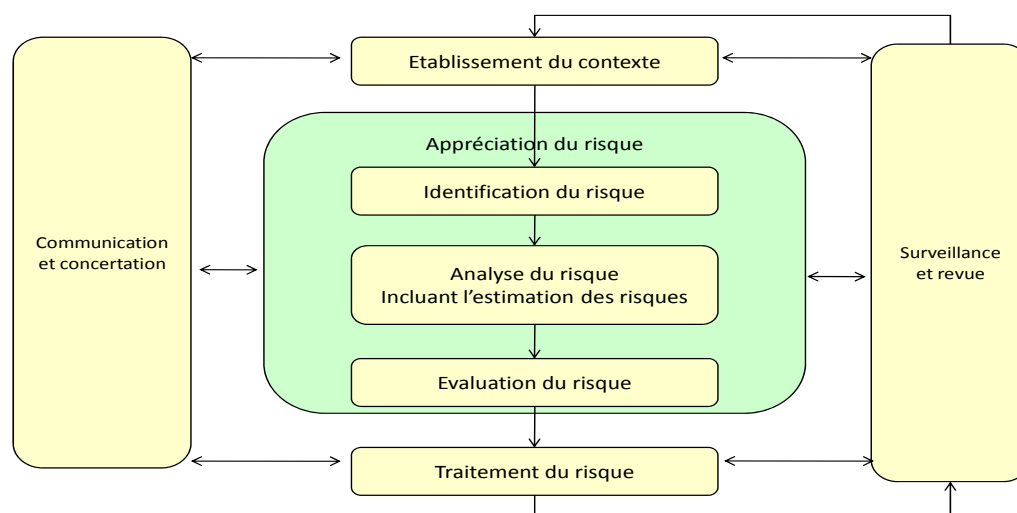


Fig. 1 - Processus de management du risque issu de la norme ISO 31000, Management du risque, principes et lignes directrices

L'estimation de la probabilité intervient donc à l'issue d'un travail d'identification des scénarios d'accidents, des phénomènes redoutés et des mesures de sécurité (ou barrières de sécurité).

## 1.2. L'échelle de probabilité des accidents majeurs

La probabilité annuelle doit être estimée pour chaque accident majeur. La circulaire « étude de dangers barrages » donne l'exemple de trois méthodes présentées dans le tableau 1 ci-dessous :

| Echelle de probabilité                | E                                                                                                                                                                            | D                                                                                                                                                       | C                                                                                                                                                                                                                                                                         | B                                                                                                                | A                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Qualitative (si le REX est suffisant) | « événement possible mais non rencontré au niveau mondial » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles                                                         | « événement très improbable » : s'est déjà produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité de ce scénario | « événement improbable » : 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 | « événement probable sur site » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations | « événement courant » : se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives |
| Semi-quantitative                     | Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte de la cotation des mesures de maîtrise des risques mises en place. |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                          |
| Quantitative (par unité et par an)    | $10^{-5}$                                                                                                                                                                    | $10^{-4}$                                                                                                                                               | $10^{-3}$                                                                                                                                                                                                                                                                 | $10^{-2}$                                                                                                        |                                                                                                                                                                                          |

Tab.1 - Echelle de probabilité réglementaire

L'objectif est de pouvoir estimer la probabilité d'occurrence de chaque accident majeur potentiel conformément à l'échelle en 5 classes (A à E). Pour mémoire, une probabilité est une valeur sans dimension qui varie entre 0 et 1. Conformément au cadre réglementaire, la fenêtre d'observation considérée est l'année. Il est nécessaire de préciser ce que l'on recherche, typiquement la *probabilité d'occurrence annuelle* de A, c'est-à-dire la probabilité que A se produise *au moins une fois* dans l'année.

Au travers de cette explication, on ressent bien que la notion de fréquence est beaucoup plus intuitive et facilement manipulable que celle de probabilité. Pour ces raisons, nous préconisons d'utiliser les fréquences lors des calculs de propagation, et de ne convertir en probabilité qu'à la fin de l'estimation. Cette approche permet d'éviter de nombreuses erreurs.

Les méthodes peuvent être classées en trois catégories. Dans la première catégorie, l'évaluation qualitative qui passe par l'utilisation de qualificatifs du type : « *n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations* ». Le recours à cette méthode nécessite un bon retour d'expérience. Dans la deuxième catégorie, la probabilité est exprimée par classe. Enfin, dans la dernière catégorie, la fréquence de l'évènement est exprimée en nombre d'occurrences par an.

Le choix de la méthode dépend, dans le cadre des barrages, comme d'ailleurs dans le monde des installations classées, du nombre et de la qualité des données disponibles.

## 2. PRESENTATION DE L'APPROCHE RETENUE PAR L'INERIS POUR LA DETERMINATION DE LA PROBABILITE DE L'ACCIDENT MAJEUR

### 2.1. Le nœud papillon

L'approche retenue par l'INERIS pour estimer la probabilité des accidents majeurs de barrages est l'approche semi-quantitative. Ce choix résulte des travaux que l'INERIS mène depuis une dizaine d'années dans le cadre de programmes européens (notamment le programme ARAMIS [5] terminé en 2004), de programmes d'appui au Ministère de l'Ecologie et d'interventions auprès d'exploitants d'installations classées.

Cette approche propose l'utilisation d'un modèle de représentation des risques, à savoir le nœud papillon. Celui-ci est utilisé d'abord comme outil graphique de représentation des séquences accidentelles puis comme support à l'estimation de la probabilité. Il rassemble un arbre des défaillances et un arbre des événements autour d'un même événement redouté central (ERC). Par consensus, les ERC sont des situations dangereuses. Par exemple, on trouvera la rupture du barrage, mais également la rupture de vanne, la rupture d'un bouchon de galerie ...

Le nœud papillon permet d'avoir une vision globale des scénarios d'accident en mettant en exergue leurs causes, les liens logiques existant entre elles et les barrières de sécurité. La modélisation graphique des séquences accidentelles proposée par cet outil en fait un support adapté pour l'étape d'estimation probabiliste. Le schéma de la figure 2 illustre les principales notions techniques.

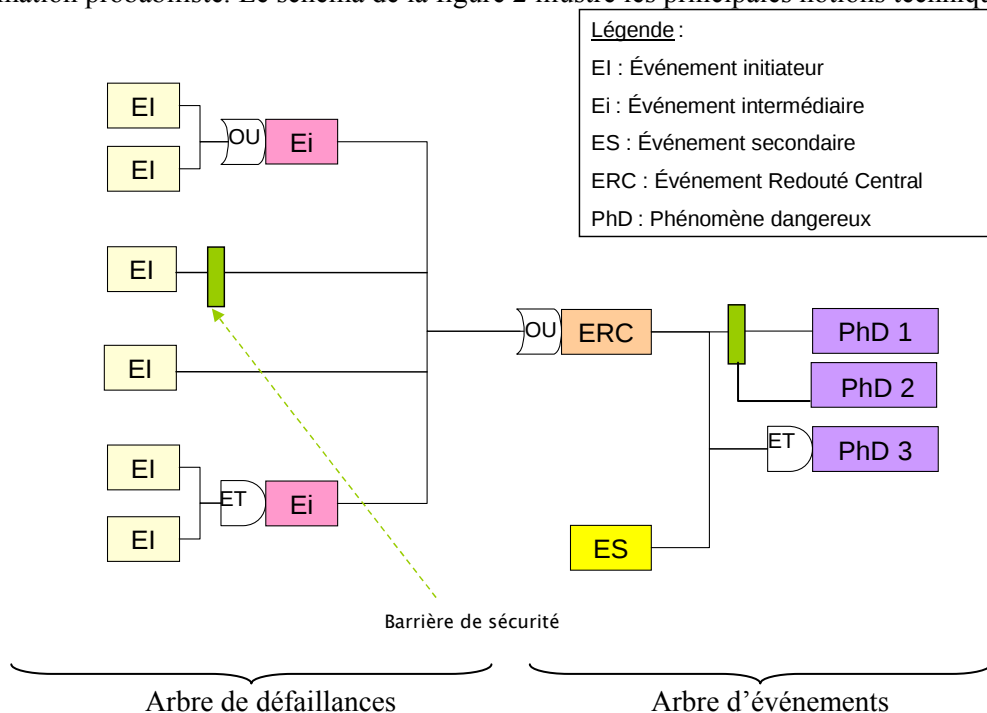


Fig.2 - Nœud papillon

Les événements initiateurs peuvent être des agressions externes ou des défaillances du système étudié. Par exemple, le vieillissement des matériaux, le choc d'embâcles, la défaillance humaine lors d'une manœuvre, la non ouverture de clapets ou encore le séisme, la foudre, l'avalanche ...

Les événements intermédiaires sont des familles d'événements initiateurs. Plusieurs exemples peuvent être donnés :

- les « agresseurs externes », regroupant le séisme, les embâcles, etc. ;
- la « défaillance des évacuateurs de crues », regroupant l'impossibilité d'accéder au barrage et aux organes de manœuvre, la fermeture intempestive des clapets, etc.

Les mesures de sécurité identifiées en amont et en aval de l'ERC peuvent être à la fois des barrières humaines ou des barrières techniques.

Du point de vue pratique, les nœuds papillon mobilisent des méthodes spécifiques des arbres de défaillances et d'événements, et sont réalisés en groupe de travail. Ils permettent de visualiser :

- les scénarios susceptibles de conduire à des accidents majeurs ;
- les mesures de maîtrise des risques ;
- en conséquence directe des deux points précédents, les chemins critiques ne présentant pas suffisamment de mesures de maîtrise du risque.

## 2.2. L'estimation de la probabilité à partir des nœuds papillon

L'étude de dangers doit permettre l'évaluation de la fréquence d'occurrence des phénomènes dangereux (PhD) et/ou des accidents majeurs (AM). Leurs fréquences sont évaluées à partir de la fréquence de l'événement redouté central (ERC) et des événements pouvant survenir entre l'ERC et le PhD et/ou l'AM.

L'évaluation de l'ERC peut être réalisée de deux manières. Premièrement, la fréquence de l'ERC peut être issue de l'évaluation des fréquences des événements initiateurs et de la probabilité de défaillance des barrières de sécurité en prévention de l'ERC. Deuxièmement, la fréquence de l'ERC peut être déterminée directement en utilisant une source de données quantifiée. Le plus souvent, on est amené à travailler à partir des événements initiateurs, compte tenu de données statistiques insuffisantes.

Les fréquences sont déterminées à partir de règles d'agrégation (porte logique OU et ET) usuellement utilisées en amont de l'ERC. Les règles mathématiques, présentées dans le document [2], à appliquer sont le plus souvent peu complexes. Ainsi :

Pour une porte OU :  $f_{A \text{ ou } B} = f_A + f_B$

- Pour une porte ET, on doit prendre en compte les durées moyennes de A et B. En effet, on cherche à quantifier l'occurrence simultanée de A et B, et il est très intuitif qu'ils se produisent simultanément beaucoup plus souvent si chacun dure 3 mois que s'ils ne durent qu'une seconde. On note ces durées  $D_A$  et  $D_B$ . On a alors :

$$f_{A \text{ et } B} = f_A \times f_B \times (D_A + D_B)$$

Pour un événement secondaire de probabilité conditionnelle d'occurrence p, ou une barrière de sécurité de probabilité de défaillance à la sollicitation p,

$$f = f_{EI} \times p$$

## 3. LA COLLECTE DES DONNEES D'ENTREE ET LEUR MISE EN ŒUVRE

### 3.1. Introduction

La quantification des probabilités proposée pour la méthode du nœud papillon peut être réalisée en deux étapes :

- la collecte des données d'entrée,
- l'estimation de la probabilité du phénomène dangereux par attribution d'une classe de probabilité.

On se place dans le cadre où les données nécessaires et disponibles sont :

- les fréquences annuelles des événements initiateurs (exprimées sous forme de valeurs ou de classes),
- les probabilités de défaillance à la sollicitation des mesures de maîtrise des risques retenues pour l'évaluation probabiliste (exprimées sous forme de valeurs ou de niveaux de confiance (classes de probabilité)).

### 3.2. La fréquence annuelle d'événements initiateurs

Les événements initiateurs regroupent les causes d'accidents d'origines interne (par exemple la sensibilité intrinsèque du clapet) et externe (par exemple, le choc d'embâcles). Conformément aux exigences de la réglementation, les données utilisées pour mener l'évaluation de la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux et leur adéquation avec la spécificité de l'installation considérée doivent être justifiées. Le retour d'expérience de l'installation ou d'installations similaires doit être étudié. L'INERIS utilise une échelle de fréquence annuelle spécifique aux événements initiateurs :

|           |           |           |           |           |           |   |           |           |     |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----|
| $10^{-6}$ | $10^{-5}$ | $10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $10^{-2}$ | $10^{-1}$ | 1 | $10^{+1}$ | $10^{+2}$ | ... |
| ...       | 5         | 4         | 3         | 2         | 1         | 0 | -1        | -2        | ... |

Tab. 2 - Exemple d'échelle de cotation en fréquence annuelle

où la classe de fréquence  $n$  correspond aux fréquences comprises entre  $10^{-n-1} \text{ an}^{-1}$  et  $10^{-n} \text{ an}^{-1}$ . L'échelle de fréquence  $n$  n'est ni limitée vers la gauche, ni limitée vers la droite.

Certains événements initiateurs externes ou internes sont traités de façon déterministe dans le domaine des installations classées. Il s'agit, dans ce cas, de démontrer que l'installation qui peut être impactée par l'événement initiateur est conforme à une règle ou un arrêté ministériel. Alors aucune estimation de la probabilité n'est requise pour le scénario engendré par l'événement initiateur.

L'estimation des classes de fréquence des événements initiateurs se base ainsi sur :

- des bases de données génériques ou spécifiques,
- l'expertise des personnes présentes dans le groupe de travail et leur retour d'expérience,
- des modèles probabilistes ou statistiques des sollicitations.

Le groupe de travail se verra notamment questionné sur trois aspects relatifs aux défaillances technologiques :

- Tout ce qui est relatif au contexte de l'événement initiateur étudié (conditions d'opération, design des divers équipements impliqués, etc.)
- Combien de fois l'événement étudié est survenu sur le site considéré ? Y a-t-il des barrières qui ont été mises en place pour réduire sa fréquence d'occurrence ?
- Combien de fois chacune des barrières a été sollicitée ?

Ces questions permettront d'orienter le choix d'une base de données appropriée, et d'appliquer éventuellement un facteur correctif aux données utilisées.

### 3.3. La probabilité de défaillances à la sollicitation des barrières de sécurité

Les barrières de sécurité interviennent en prévention de l'ERC ou en limitation des effets des accidents. Les barrières intervenant dans la maîtrise du risque sont de trois types : les barrières techniques de sécurité, les barrières humaines de sécurité et une combinaison des barrières techniques et humaines.

Parmi la famille des barrières techniques, on peut classer en deux catégories les dispositifs de sécurité et les systèmes instrumentés de sécurité (SIS). Parmi les dispositifs pour les ouvrages hydrauliques, on pourra trouver : des déversoirs à seuil libre, des dispositifs fusibles, tous deux passifs, des vannes à flotteurs. Parmi les SIS, on peut citer les évacuateurs de crues asservis à des détections de niveau. Les évacuateurs de crues fonctionnant en manuel sur une détection sont considérés comme une combinaison de barrières techniques et humaines.

Il existe peu de retours d'expérience, issus d'un ouvrage hydraulique, qui soient formalisés et comportent un nombre de données suffisantes sur une barrière pour pouvoir en déduire des probabilités de défaillance. D'autre part, les sources de données existantes (OREDA, EIREDA,...) apparaissent souvent

comme des moyennes de données de fiabilité de dispositifs utilisés dans des contextes différents (plateformes off shore, installations classées ...). Les conditions d'utilisation sont imprécises et les valeurs sont de ce fait difficilement utilisables dans une étude de dangers spécifique de barrage. Leur utilisation supposerait également une bonne connaissance des termes de la fiabilité (distinction entre taux de défaillances sûres et non sûres, temps de référence correspondant à la fréquence des maintenances).

Pour pallier ces faiblesses, l'INERIS a développé une méthode d'évaluation semi-quantitative des barrières techniques et humaines. L'avantage de cette méthode, décrite dans les rapports INERIS Oméga 10 [4] et Oméga 20 [3] (les rapports Oméga formalisent l'expertise de l'INERIS sur un sujet donné), est de permettre une évaluation complète des performances des barrières de sécurité réellement en place sur l'ouvrage étudié. Dans un premier temps, une évaluation de chaque composant de la barrière de sécurité est réalisée dans son contexte d'utilisation.

Les deux premières questions consistent à renseigner la fonction de sécurité remplie par la barrière et à s'interroger sur la question de l'indépendance de la barrière par rapport notamment à l'événement initiateur. Les performances de la barrière ne doivent pas être dégradées par l'occurrence de l'événement initiateur. Ensuite, les performances des barrières sont évaluées au travers de trois critères : efficacité, temps de réponse et niveau de confiance.

Comme spécifié dans l'oméga 10 [4], l'efficacité d'une barrière de sécurité est « l'aptitude de la barrière à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie, dans son contexte d'utilisation et pendant une durée donnée de fonctionnement ». Dans l'étude de dangers, l'efficacité d'un détecteur de niveau sera abordée en posant des questions sur ses seuils de détection, son positionnement et les résistances aux contraintes spécifiques par exemple les agressions externes. Lors de l'examen d'un évacuateur de crues, les questions de dimensionnement seront examinées.

Le temps de réponse est défini dans les rapports Omégas 10 et 20 comme « l'intervalle de temps entre le moment où une barrière de sécurité [...] est sollicitée et le moment où la fonction de sécurité assurée par cette barrière de sécurité est réalisée dans son ensemble ». La comparaison de cet intervalle de temps avec la cinétique du phénomène à maîtriser est indispensable. Dans le cadre des mesures de sécurité (qui comprennent une intervention humaine), le délai de diagnostic ainsi que les traitements de l'information et de déplacement du personnel seront comptabilisés dans le temps global de réponse de la barrière.

Le niveau de confiance (NC) permet de déterminer un facteur de réduction de risques. Une agrégation des composants est ensuite réalisée pour qualifier la barrière de sécurité, tout en vérifiant que d'éventuels modes communs de défaillance ne viennent pas dégrader le NC global.

Le niveau de confiance est lié au facteur de réduction du risque et intervient alors dans l'évaluation des fréquences d'occurrence des ERC (pour les barrières de prévention) et dans l'évaluation des fréquences d'occurrence des PhD à partir des fréquences de l'ERC (barrières de protection). Les barrières de prévention réduisent la probabilité d'occurrence d'avoir un événement redouté central : dans une approche semi-quantifiée, si l'événement initiateur a une fréquence de  $10^{-1}$  et que le niveau de confiance de la barrière est NC, correspondant de manière conservatrice à un facteur de réduction de risques de  $10^{NC}$ , la fréquence d'occurrence de l'ERC est alors de l'ordre de  $10^{-(1+NC)}$ . Les barrières de protection réduisent de même la probabilité d'avoir le phénomène dangereux avec les conséquences maximales (en absence de barrières).

Le niveau de confiance est déterminé au terme d'un questionnaire sur les différentes barrières, tel que précisé dans les rapports Oméga 10 et 20. Le niveau de confiance attendu d'un système instrumenté de sécurité (SIS) est défini par extrapolation des SIL (Safety Integrity Level) présents dans les normes de sûreté de fonctionnement NF EN 61508 et NF EN 61511. L'INERIS a étendu ces principes aux dispositifs actifs. Pour les barrières passives et les barrières humaines, un NC maximal a été déterminé à partir d'études bibliographiques, à défaut d'études spécifiques. Dans tous les cas, le NC prévisible est ensuite pondéré en fonction d'un certain nombre de critères.

La démarche proposée dans les rapports Omégas 10 et 20 permet avant tout de fournir une méthode relativement simple pour évaluer la performance des barrières de sécurité, applicable en groupes de travail, notamment lors de la réalisation des analyses de risques. Elle permet de se poser les bonnes questions et d'identifier des améliorations techniques ou organisationnelles.

### **3.4. Avantages et limites de cette approche**

La méthode du nœud papillon présente l'avantage d'apporter un modèle pour la maîtrise des risques : sur tel ou tel scénario, des mesures de sécurité sont-elles présentes, sont-elles suffisantes ? L'intégralité des causes possibles des différents Phd et ERC susceptibles de se produire est listée, puis quantifiée. Par cette quantification, on gagne ainsi une excellente visibilité sur les importances relatives des différentes sources de risque, ce qui permet notamment de savoir où le réduire pour que l'impact soit maximal.

L'une des limites de cette approche réside dans la quantification des événements initiateurs. Le problème d'estimation de la fréquence d'occurrence d'un ERC est en fait repoussé et redécoupé au niveau de différents EI. Cependant, il est, en pratique, plus simple d'estimer les fréquences des EI, car ils sont en général plus courants que les ERC, et donc les bases de données relatives à ces événements sont plus fournies et fiables. Toutefois, certains EI posent problème, typiquement ceux très peu fréquents et sur lesquels les données n'existent pas toujours, comme les séismes.

## **4. CONCLUSIONS**

L'article R.214.115 du Code de l'environnement introduit par le Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 prévoit la réalisation d'une étude de dangers pour certains ouvrages hydrauliques (barrages de classes A et B, digues de classes A, B et C). Cette étude a pour objectif la démonstration de la maîtrise des risques par l'exploitant au travers d'une analyse croisée de la gravité des conséquences et de la probabilité d'occurrence annuelle des accidents majeurs identifiés. La méthode semi-quantitative du nœud papillon permet d'analyser les scénarios d'accident et d'estimer leur probabilité. Cet outil décrit les séquences d'événements depuis un événement initiateur jusqu'à un accident. Les barrières de sécurité intervenant en prévention et en protection sont déterminées, et leurs critères de performance analysés. L'outil nœud papillon permet de mettre en œuvre une approche itérative en vue de démontrer la réduction des risques par l'ajout de nouvelles mesures de sécurité ou l'amélioration des mesures de sécurité existantes par exemple. Il permet d'estimer la probabilité finale de l'accident majeur en se basant sur la fréquence d'événements initiateurs diminuée par les probabilités de défaillances associées aux barrières de sécurité. Si cette démarche est démonstrative et structurée, elle se confronte toutefois à des difficultés d'identifier une fréquence pour certains événements initiateurs dits « rares ».

## **REFERENCES ET CITATIONS**

- [1] De Dianous et al. (2007). La prise en compte de la probabilité dans les études de dangers. *Préventique sécurité*, N°95, 32-37.
- [2] INERIS (2008). Estimation des aspects probabilistes. Guide pour l'intégration de la probabilité dans les études de dangers. Site internet [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).
- [3] INERIS (2009). Evaluation Démarche d'évaluation des Barrières Humaines. Oméga 20. Site internet [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).
- [4] INERIS (2008). Evaluation des performances des Barrières Techniques de Sécurité. Oméga 10. Site internet [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).
- [5] INERIS (2004). ARAMIS, Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs. Site internet [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).

# APPORT DES METHODES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT ET DE LA FIABILITE DANS LE CADRE DES ETUDES DE DANGERS : EXEMPLE D'APPLICATION SUR LE BARRAGE DU XOLDOCOAGAINA

## *Contribution of risk analysis and reliability methods in the context of hazard studies: example of application on the Xoldocogaina dam*

**Claudio Carvajal, Gwenaëlle Philip & Jean-Pierre Bécue**

Safège Ingénieurs Conseil, Parc de l'Île 15-27 rue du Port 92022, Nanterre, France

e-mail: {claudio.carvajal, gwenaelle.philip, jean-pierre.becue}@safège.fr

**Laurent Peyras, Huguette Félix & Paul Royet**

Cemagref, 3275 route de Cézanne CS 40061, 13182 Aix-en-Provence, France

e-mail : {laurent.peyras, huguette.felix, paul.royet}@cemagref.fr

### MOTS CLÉS

Fiabilité, sûreté de fonctionnement, méthodes probabilistes

### ABSTRACT

*The aim of this paper is to present, through an application example, implementation of risk analysis and reliability methods for assessing the structural safety of a dam in a probabilistic format.*

*A reliability analysis of structures consists in modeling uncertainties related to its loads and strengths by random variables and integrating them in the stability calculations in order to assess their impact on the structural safety of the dam.*

*The case study is the Xoldocogaina dam, a RCC gravity dam 32 m high (class A), located in the Pyrenees Atlantiques.*

*This case study has highlighted the interest of hazard study as a tool to establish a finding of overall security level of the dam and appurtenant structures and prioritize measures to reduce risks.*

*In particular, the hazard study was conducted to compare the impact of earthquake and hydrologic hazards. Finally the method of reliability analysis of structures was used to assess probability of failure of the dam, but above all to assess the impact of various risks (hydrological, seismic, materials, ...) on the structural safety of structure.*

### RÉSUMÉ

*L'objectif de cette communication consiste à présenter, au travers d'un exemple d'application, la mise en œuvre couplée de méthodes de la sûreté de fonctionnement et de la fiabilité permettant d'évaluer la sécurité structurelle du barrage dans un format probabiliste.*

*Une analyse de fiabilité des structures consiste à modéliser par variables aléatoires les incertitudes liées aux chargements et aux résistances d'un ouvrage et à les intégrer dans les calculs de stabilité afin d'évaluer leur impact sur la sécurité structurelle du barrage.*

*Le cas d'étude correspond au barrage de Xoldocogaina, un barrage-poids en BCR de 32 m de hauteur (classe A), situé dans les Pyrénées Atlantiques.*

*Cette étude de cas a mis en évidence l'intérêt de l'étude de danger comme outil permettant d'établir un constat du niveau de sûreté global du barrage et des ouvrages annexes et de prioriser les mesures destinées à la réduction des risques.*

*En particulier, l'étude de danger a permis de comparer l'impact des aléas sismiques et hydrologiques. Enfin la méthode d'analyse de fiabilité des structures a permis d'évaluer une probabilité de défaillance du barrage, mais surtout d'évaluer l'impact des différents aléas (hydrologique, sismique, matériaux, ...) sur la sécurité structurelle de l'ouvrage.*

## INTRODUCTION

L'évaluation de la sécurité des barrages est un enjeu majeur dans le domaine des ouvrages hydrauliques, que ce soit en phase de conception, de construction ou encore d'exploitation. Cet enjeu est dorénavant pris en compte dans la récente réglementation française (décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques) qui prévoit la réalisation d'études de dangers. Dans celles-ci, il est possible de mettre en œuvre des démarches probabilistes d'analyse de risques.

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement sont des méthodes qualitatives, indispensables pour modéliser les scénarios complexes agissant dans des ouvrages constitués de plusieurs composants susceptibles d'interagir et de conduire à des enchainements de défaillances. Elles visent à analyser le fonctionnement des ouvrages, leurs modes et scénarios de défaillances pouvant conduire à un fonctionnement dégradé et à une situation à risques. Dans le cadre des études de dangers de barrages, les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement aboutissent à la modélisation des scénarios de rupture (ou d'autres potentiels de dangers), par enchainement de défaillances élémentaires des composants du barrage.

Les scénarios conduisant à un potentiel de dangers sont évalués en termes de probabilité d'occurrence et de gravité des conséquences afin de les classer en fonction de leur criticité (couple probabilité d'occurrence et de gravité des conséquences)

Les probabilités d'occurrence des scénarios de défaillance peuvent être obtenues en faisant appel à différents types d'analyse, par exemple : l'analyse fréquentielle (évaluation de certaines défaillances technologiques) ou le jugement d'expert (évaluation des défaillances mal documentées). En revanche, ces approches s'avèrent moins pertinentes pour évaluer la probabilité d'un événement très rare ou exceptionnel tel que les états-limites de perte de résistance ou de rupture d'un barrage compte tenu du très faible taux d'occurrence et de la diversité des ouvrages.

Dans ce contexte, les méthodes fiabilistes constituent une alternative d'intérêt pour l'évaluation probabiliste de la sécurité structurelle d'un barrage. Ces méthodes permettent de prendre en compte, dans un contexte probabiliste, les incertitudes des données associées aux paramètres de calcul utilisés dans les justifications de la stabilité structurelle. Une analyse de fiabilité des structures consiste à modéliser par variables aléatoires les incertitudes liées aux chargements et aux résistances d'un ouvrage et à les intégrer dans les calculs de stabilité afin d'évaluer leur impact sur la sécurité structurelle du barrage.

L'objectif de cette communication consiste à présenter, au travers d'un exemple d'application, la mise en œuvre d'une démarche complète d'analyse de risque comprenant la mise en œuvre de méthodes de la sûreté de fonctionnement et de méthodes fiabilistes permettant d'évaluer la sécurité structurelle du barrage dans un format probabiliste.

En première partie est présentée la démarche générale des méthodes mises en œuvre : la Sûreté de Fonctionnement et la Fiabilité des structures.

L'application de la démarche au cas d'étude est présentée en seconde partie. Ce cas d'étude correspond à un barrage-poids en BCR de 32 m de hauteur (classe A), situé dans les Pyrénées Atlantiques. Il est étudié dans cette application le scénario de défaillance de l'évacuateur de crues, susceptible d'être partiellement obstrué par des embâcles en période de crue exceptionnelle et ayant pour conséquence une élévation non contrôlée du niveau de la retenue pouvant conduire à la rupture du corps du barrage. Une comparaison est effectuée finalement avec les résultats de la démarche dans des situations sismiques.

## 1. SURETE DE FONCTIONNEMENT ET FIABILITE DES STRUCTURES

### 1.1. La Sûreté de Fonctionnement

Les méthodes qualitatives de la Sûreté de Fonctionnement conduisent à un modèle de la sûreté de fonctionnement, qui constitue une représentation des modes de fonctionnement et de dysfonctionnement, des scénarios de défaillances pouvant conduire à un fonctionnement dégradé et une situation à risques pour un ouvrage. La construction d'un tel modèle de sûreté de fonctionnement d'un ouvrage dans le cadre d'une étude de dangers comporte classiquement les étapes suivantes [1] :

- étape 1 : l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement. (chapitre 3) ;
- étape 2 : la modélisation de la sûreté de fonctionnement comprenant l'analyse et la modélisation des modes de défaillance. Par exemple, développement de la méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) puis une représentation des scénarios de défaillance et de rupture par la méthode des Arbres d'Événements ;
- étape 3 : une évaluation quantitative de la mesure de la sûreté de fonctionnement. Couplage des mesures déclaratives issues de l'expertise, des résultats de la modélisation physique des mécanismes, le retour d'expérience et l'accidentologie (chapitre 7), et des modèles probabilistes à l'instar du Gradex pour l'aléa hydrologique et de la Fiabilité des structures pour la sécurité structurale ;
- étape 4 : une synthèse et conclusions, comprenant les scénarios les plus critiques, les ouvrages les plus vulnérables associés à une probabilité de défaillance et les propositions visant à améliorer la sûreté de fonctionnement des aménagements et la réduction des risques (chapitre 9).

#### 1.1.1. Analyse des modes de défaillances

L'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système [2]. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillance. On recherche avec l'AMDE les différents modes de défaillance des ouvrages présentés sous forme d'un tableau indiquant :

- les *composants* du système ;
- les *fonctions* principales et techniques des composants, obtenues à partir de l'analyse fonctionnelle ;
- les *modes de défaillance* des composants ;
- les *causes* possibles de la défaillance ;
- les *effets* possibles de la défaillance.

Au final de l'AMDE, on dispose des modes de défaillance des composants de l'ouvrage, de leurs causes et de leurs effets.

#### 1.1.2. La modélisation de la sûreté de fonctionnement

Lorsque les modes de défaillance ont été identifiés, les méthodes pour la modélisation des scénarios de défaillance permettent de construire les enchaînements de modes de défaillance pouvant conduire à la défaillance du système. Il existe différentes méthodes pour la modélisation de la sûreté de fonctionnement, une des principales étant *la méthode des arbres d'événement*. Dans celle-ci, la séquence des événements de l'arbre se déroule de façon inductive, à partir d'un événement initiateur jusqu'aux événements finaux [3].

La qualité du modèle de sûreté de fonctionnement construit à partir d'un arbre d'événement dépend de la qualité de l'analyse fonctionnelle et de l'analyse des défaillances réalisées au préalable. Pour s'assurer de l'exhaustivité des défaillances, il est recommandé de réaliser une AMDE avant la mise en œuvre de la méthode de l'arbre d'événement, permettant ensuite de construire l'arbre d'événement par enchaînement successif des modes de défaillance obtenus par l'AMDE [1].

## 1.2. La fiabilité des structures

Les méthodes fiabilistes sont constituées classiquement des phases d'analyse suivantes : [4] (cf Figure 1)

- Étape A. Sélection du ou des états-limites dont on veut évaluer la probabilité qu'il(s) soi(en)t dépassé(s) ;
- Étape B. Analyse et caractérisation par des lois de probabilité des variables aléatoires intervenant dans chacun de ces états-limites : les variables de sollicitation et de résistance ;
- Étape C. Évaluation des probabilités de dépassement des états-limites et études de sensibilité éventuelles.

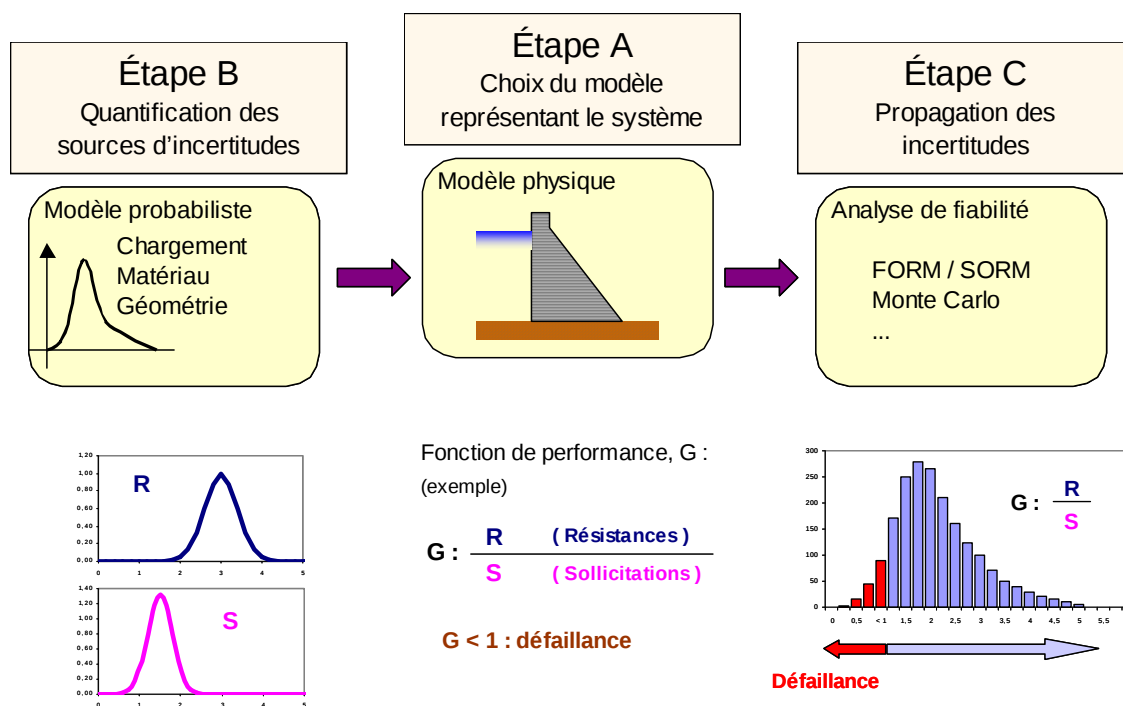


Fig.1 - Démarche générale d'une analyse de fiabilité

Les méthodes fiabilistes prennent en compte la variabilité des résistances et le caractère aléatoire des sollicitations sous un format probabiliste. L'intérêt d'une telle approche est donc conditionné par la pertinence des lois de probabilité utilisées pour représenter les sollicitations et les résistances ; nos travaux ont ainsi apporté des méthodologies pour la modélisation des sollicitations hydrostatiques sur un barrage et pour la modélisation des propriétés de résistance des bétons des barrages-poids :

Concernant la modélisation probabiliste des sollicitations hydrostatiques agissant sur les barrages de tout type, les méthodes que nous avons développées aboutissent à une démarche pour la détermination de la distribution des cotes de la retenue d'un barrage, qui intègre : i) différents hydrogrammes de crue obtenus par différentes méthodes hydrologiques et associés à différentes périodes de retour ii) la variabilité de la cote de la retenue à laquelle on accède par l'analyse statistique des chroniques de remplissage d'un barrage et iii) la capacité des évacuateurs de crues [5].

Concernant la modélisation probabiliste des propriétés des matériaux du corps des barrages-poids, les méthodes que nous avons développées pour les bétons BCR s'appuient sur l'ensemble de l'information disponible et notamment sur les essais réalisés lors de la construction. Plusieurs démarches ont été mises en œuvre : i) l'analyse des dispersions des paramètres de résistance aux différentes échelles spatiales ; ii) l'analyse statistique des paramètres de contrôle et de résistance à la compression du béton ; iii) la fusion des données pour l'évaluation de la variabilité de la résistance à la traction ; iv) l'utilisation d'une formulation physique du critère de résistance au cisaillement du béton pour l'étude de la variabilité de la résistance au cisaillement. Ce travail analyse en particulier la variabilité des propriétés de résistance aux échelles spatiales pertinentes au regard des différentes étendues de matériaux qui gouvernent les états-limites [6].

## 2. APPLICATION DES METHODES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT ET DE LA FIABILITE AUX ETUDES DE DANGERS DES BARRAGES

Le cas traité est un barrage en BCR (béton compacté au rouleau) pour lequel on dispose d'un dossier complet (données de l'étude hydrologique et données relatives à la construction de l'ouvrage). Il est étudié dans cette application le scénario de défaillance de l'évacuateur de crues, susceptible d'être entravé par des embâcles en période de crue exceptionnelle et ayant pour conséquence une élévation non contrôlée du niveau de la retenue pouvant conduire à la rupture du corps du barrage. On présente les résultats de : (i) la modélisation du scénario de défaillance de l'évacuateur de crues par les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement, (ii) la modélisation probabiliste des sollicitations hydrauliques en tenant compte de la défaillance potentielle de l'évacuateur de crues, (iii) la modélisation probabiliste des propriétés des matériaux du corps du barrage et (iv) l'analyse de fiabilité mise en œuvre à partir des résultats de (i) à (iii).

### 2.1. Description du cas d'étude

Le cas d'étude est un barrage-poids en BCR d'une hauteur sur le terrain naturel de 35 m, d'une épaisseur en crête de 6 m, avec un parement aval de fruit 0,75 (H/V) et un parement amont quasi-vertical de fruit 0,10 (Figure 2). Le couronnement du barrage est à la cote 255,5 m NGF, le niveau normal d'exploitation (RN) de la retenue est à la cote 254 m NGF et le niveau des plus hautes eaux (PHE) est à 255,1 m NGF. L'évacuateur de crues est un déversoir à surface libre de 13,5 m de largeur, calé à la cote 254 m NGF et situé en partie centrale du barrage.

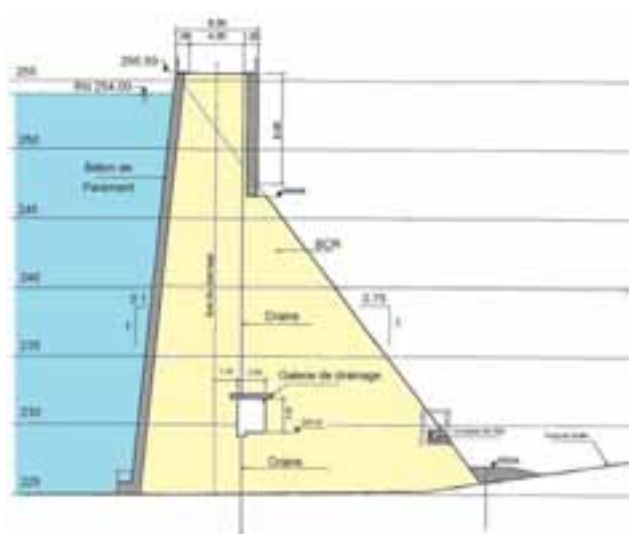


Fig.2 - Coupe transversale du barrage étudié.

Le BCR utilisé a été dosé entre 110 et 120 kg de liant par mètre cube de béton compacté. Il a été mis en place par couches de 0,30 m avec l'application d'un mortier de reprise dosé à 250 kg/m<sup>3</sup> à chaque couche sur une largeur de 2,50 m à partir du parement amont. Le parement amont du barrage est en béton conventionnel vibré et coulé en place par levées de 0,60 m.

L'étanchéité du barrage est assurée par le parement en béton BCV et la partie amont de la masse du béton BCR. Le drainage du corps du barrage est assuré par un réseau de drains forés à partir de la crête et de la galerie de drainage du barrage.

## 2.2. Modélisation de la sûreté de fonctionnement du barrage vis-à-vis du scénario de défaillance de l'évacuateur de crues

La modélisation de la sûreté de fonctionnement est présentée uniquement pour le scénario de défaillance de l'évacuateur de crues.

Le scénario de défaillance peut être modélisé par la méthode des arbres d'événements : le scénario de défaillance étudié envisage l'occurrence d'une crue de période de retour  $T_i$  (événement initiateur du scénario) et la défaillance de l'évacuateur de crues (évacuation partielle ou pas d'évacuation de la crue), provoquant une augmentation non contrôlée du niveau de la retenue ; l'augmentation excessive des charges hydrostatiques est susceptible de conduire au cisaillement du corps du barrage et la rupture du corps de barrage ; la conséquence du scénario est la rupture de l'ouvrage.

L'enchaînement des séquences de défaillance est modélisé par la méthode de l'arbre d'événement (Figure 3) qui représente le modèle qualitatif de sûreté de fonctionnement du barrage :

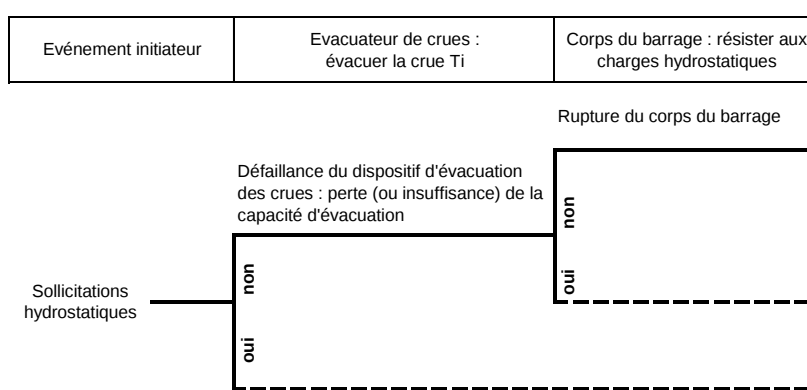


Fig.3 - Arbre d'événements modélisant le scénario de rupture par défaillance de l'évacuateur de crues.

## 2.3. Modélisation probabiliste des actions hydrostatiques

### 2.3.1. Génération d'hydrogrammes de crue

Pour la modélisation probabiliste des hydrogrammes de crue, nous disposons de la distribution probabiliste des débits de crues obtenue à partir d'une méthode hydrologique probabiliste (Figure 4).

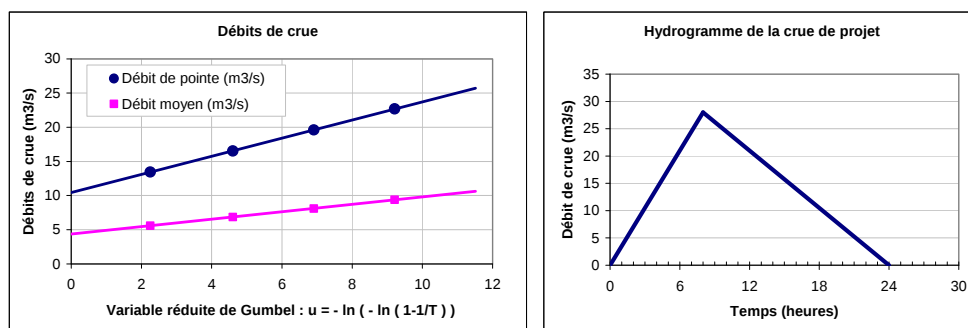


Fig.4 - Distribution des débits de crue et hydrogramme de projet du barrage étudié.

A partir de la distribution probabiliste des débits de crue et en gardant la forme de l'hydrogramme de projet, il est possible de reconstituer des hydrogrammes pour différentes périodes de retour (Figure 5).

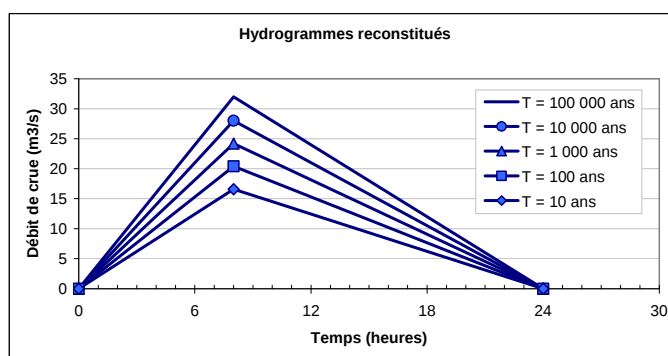


Fig.5 - Hydrogrammes reconstitués pour différentes périodes de retour.

### 2.3.2. Modélisation de la cote initiale de la retenue

Pour la modélisation probabiliste de la cote initiale de la retenue, nous disposons des chroniques de remplissage de la retenue pendant l'exploitation de l'ouvrage (Figure 6).

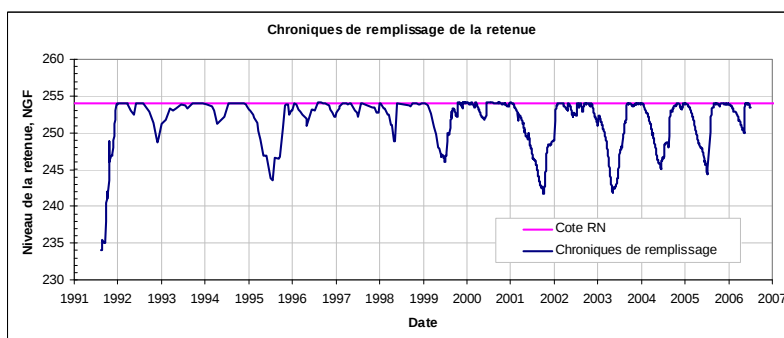


Fig. 6 - Chroniques de remplissage de la retenue.

L'analyse statistique des chroniques de remplissage permet d'obtenir la distribution statistique de la cote de remplissage de la retenue. Une fonction analytique peut être ajustée à l'inverse de la fonction de répartition empirique de manière à faciliter le tirage aléatoire de la cote initiale de la retenue.

### 2.3.3. Analyse experte de la probabilité d'occurrence de la défaillance de l'évacuateur de crues

On cherche dans un premier temps à évaluer la nature de la défaillance de l'évacuateur de crues. Le mode de fonctionnement de ce dernier est du type seuil libre, sans dispositif de vannage. Le mode de défaillance est donc lié à une obstruction du seuil par des embâcles de type végétal (arbres, troncs, etc.) ou anthropiques (caravane, etc.).

Il n'existe pas pour ce mode de défaillance de chroniques permettant l'analyse statistique de sa fréquence d'occurrence. Dans ce contexte, nous avons recours à une évaluation déclarative par expertise, au moyen d'un panel d'ingénieurs, basée sur les éléments suivants :

- absence d'embâcle depuis l'origine de l'exploitation ;
- pas de risques d'encombrants de grosse dimension (caravanes par exemple), car absence d'activité touristique ou humaine en amont du bassin versant ;
- bassin versant peu générateur d'embâcles du fait de ses caractéristiques naturelles (peu boisé) ;
- déversoir de crues large et peu susceptible d'être complètement bloqué (largeur du déversoir : 13,5 m).

Dans ces conditions, la défaillance complète du déversoir de crues n'est pas envisagée et le panel d'ingénieurs n'envisage que la défaillance partielle du déversoir sur une section de 30 % (70 % du déversoir restant donc opérant).

Les ingénieurs, questionnés sur l'occurrence de cette défaillance, indiquent une défaillance « peu probable » pour toutes les intensités de crue, soit une probabilité d'occurrence annuelle de 0,10 d'obstruction partielle à 30 % du déversoir (en utilisant une grille de traitement quantitatif des dires d'experts).

#### 2.3.4. Détermination de la loi de probabilité du niveau de la retenue en crue

Les calculs hydrauliques, effectués pour chaque hydrogramme de crue, considèrent le laminage de la crue par la retenue et la capacité de l'évacuateur de crues. Ce travail permet d'obtenir la distribution des cotes maximales de la retenue en période de crue, à laquelle on peut ajuster un modèle de loi de probabilité.

La sollicitation hydrostatique amont est modélisée en tenant compte de l'obstruction partielle du déversoir de crues (30 % défaillant). Les résultats sont synthétisés dans la figure suivante (Figure 7) :

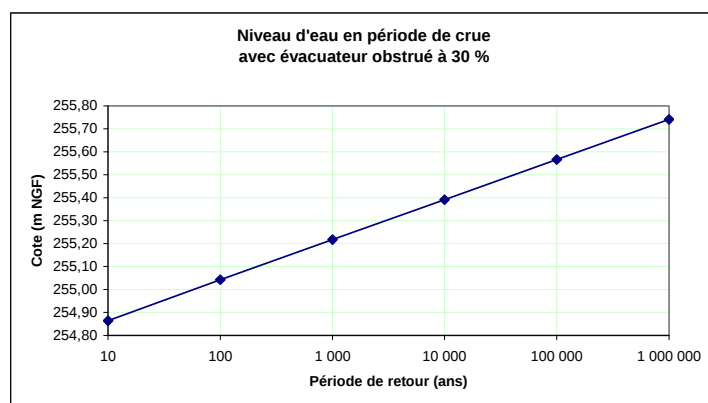


Fig.7 - Loi de probabilité obtenue pour la sollicitation hydraulique avec déversoir défaillant à 30 %

#### 2.3.5. Prise en compte de l'action des sous-pressions

Les incertitudes sur l'intensité de l'action des sous-pressions sont importantes et sont liées essentiellement aux propriétés intrinsèques des matériaux et des dispositifs visant à réduire les sous-pressions (qualité du voile d'injection, conception et état du système de drainage). Les dispositifs particuliers, tels que les voiles d'injection dans la fondation et les voiles de drainage en fondation et dans le corps du barrage, visant à réduire le diagramme des sous-pressions, sont pris en considération à l'aide du coefficient de rabattement  $\lambda$  [7].

Dans le cadre d'une analyse fiabiliste, il y a lieu de prendre en compte l'incertitude pesant sur la connaissance du diagramme des sous-pressions par une variable aléatoire traduisant la performance des dispositifs de drainage et d'injection et donc à modéliser le coefficient de rabattement  $\lambda$  par une variable aléatoire.

Il n'existe pas de loi de probabilité établie dans la littérature pour la variable aléatoire modélisant le coefficient de rabattement  $\lambda$ . La loi de probabilité du coefficient de rabattement  $\lambda$  a donc été établie de façon déclarative par le panel d'ingénieurs qui, pour ce faire ont analysé : i) l'instrumentation disponible pour le barrage et ii) les mesures d'auscultation. Ils proposent d'adopter pour le coefficient de rabattement la loi de probabilité suivante :

- une loi log normale, permettant de rendre compte de l'asymétrie de la loi dans l'intervalle  $[0 ; 1]$ , avec une densité de probabilité étalée du côté de l'origine ;
- une loi bornée par 0 et 1 ; (0 : pas de rabattement) ;
- une moyenne à 0,80 (les mesures d'auscultation actuelles sont représentatives de la moyenne) ;
- une probabilité que le coefficient de rabattement soit inférieur ou égal à  $2/3$  choisie égale à 0,2 (traduisant le terme « moyennement probable »).

En respectant ces conditions, la loi adoptée pour le coefficient de rabattement est la suivante (Figure 8) :

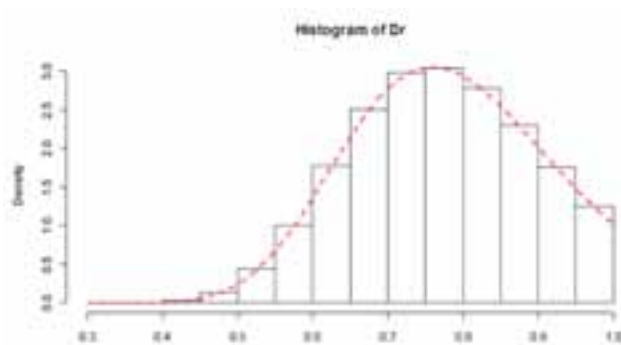


Fig. 8 - Loi de probabilité adoptée pour le coefficient de rabattement des sous-pressions

#### 2.4. Modélisation probabiliste des propriétés du corps du barrage

Les propriétés du matériau du corps du barrage à modéliser sont le poids volumique et la résistance à la compression du BCR en masse, la résistance à la traction et les propriétés de résistance au cisaillement des zones de reprise de bétonnage.

Des nombreux contrôles du BCR ont été réalisés pendant la construction du barrage, mais aucun de ces contrôles ne concerne directement les propriétés mécaniques des reprises de bétonnage. Les données utilisées ici proviennent : (i) des mesures du poids volumique réalisées lors du contrôle du compactage et (ii) des mesures de résistance à la compression réalisées sur des éprouvettes de béton issu de la centrale de bétonnage.

Les démarches mises en œuvre pour la modélisation probabiliste des propriétés des matériaux du corps des barrages-poids comportent : [6]

- l'analyse des dispersions des paramètres de résistance aux différentes échelles spatiales ;
- l'analyse statistique des paramètres de contrôle et de résistance à la compression du béton ;
- la fusion des données pour l'évaluation de la variabilité de la résistance à la traction ;
- l'utilisation d'une formulation physique du critère de résistance au cisaillement du béton pour l'étude de la variabilité de la résistance au cisaillement.

Ce travail analyse en particulier la variabilité des propriétés de résistance aux échelles spatiales pertinentes au regard des différentes étendues de matériaux qui gouvernent les états-limites.

Les lois marginales obtenues pour les variables aléatoires analysées sont résumées dans le Tableau 1 suivant :

| Variable aléatoire                                                                       | Loi de probabilité       | Moyenne                 | Ecart type             |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| Poids volumique<br>(à l'échelle globale), $\gamma_{\text{bcr}}$                          | Normale                  | 24,05 kN/m <sup>3</sup> | 0,02 kN/m <sup>3</sup> |
| Résistance à la compression<br>(à l'échelle de la couche), $f_c$                         | Normale                  | 9,0 MPa                 | 0,7 MPa                |
| Résistance à la traction<br>(à l'échelle locale), $f_t$                                  | Log-normale              | 0,25 MPa                | 0,15 MPa               |
| Cohésion<br>(à l'échelle de la couche), $C$                                              | Normale, tronquée<br>à 0 | 0,40 MPa                | 0,20 MPa               |
| Tangente de l'angle de frottement interne<br>(à l'échelle de la couche), $\tan(\varphi)$ | Normale                  | 1,04                    | 0,13                   |

Tableau 1 - Variables aléatoires associées aux propriétés des matériaux

## 2.5. Évaluation probabiliste des états-limites

On s'intéresse à l'état-limite de résistance à l'effort tranchant. La résistance à l'effort tranchant est transcrite par la fonction de performance  $G$  suivante :

$$G : C.L' + (N-U).tan(\varphi) - T \quad (1)$$

avec :

- $C$  et  $\varphi$  la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau du barrage ;
- $N$  et  $T$  les composantes normale et tangentielle des forces extérieures agissant sur la partie supérieure de la section horizontale étudiée ;
- $U$  la résultante des pressions interstitielles régnant au niveau de la section horizontale étudiée ;
- $L'$  la longueur non fissurée de la section horizontale étudiée. La longueur  $L'$  est déterminée au moyen d'un calcul itératif à partir de la condition de non-fissuration :

$$\sigma'_N(x) > -ft \quad (2)$$

avec :

$\sigma'_N(x)$  la contrainte effective normale à l'abscisse  $x$  de la section étudiée,

$ft$  la résistance à la traction du matériau.

Si  $G \leq 0$ , on est dans le domaine de défaillance et on a cisaillement de la section horizontale étudiée du barrage.

Si  $G > 0$ , on est dans le domaine de sûreté et le barrage reste intègre.

Les calculs sont conduits sur trois profils de l'étude de cas (profil courant « corps du barrage », profil de la vidange, profil de l'évacuateur de crues). Pour chaque profil, les calculs concernent la couche en BCR située au niveau du changement de pente du parement aval (cote 247,5), la couche la plus basse du BCR et l'interface barrage-fondation.

L'analyse quantitative est faite à partir de l'évaluation de l'indice de fiabilité  $\beta$ , en adoptant les lois de probabilité déterminées précédemment pour les différentes variables aléatoires.

Les résultats obtenus pour les scénarios de rupture analysés sont résumés dans le Tableau 2 ci-après, qui indique pour chaque profil et section, la probabilité de défaillance conditionnelle  $P_f$  pour le cisaillement de la section avec ouverture de fissure) et l'indice de fiabilité  $\beta$  (noté Bêta), dans la situation de crue avec défaillance du déversoir (probabilité d'occurrence annuelle de  $10^{-1}$ ).

A titre comparatif, nous présentons également dans le tableau 2 ci-après, les résultats de l'analyse de fiabilité effectuée dans deux situations sismiques associées aux probabilités d'occurrence des ouvrages de classe A (cf guide Meddtl « risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques » de novembre 2011) :

- Séisme de Base d'Exploitation, SBE (probabilité d'occurrence annuelle de l'ordre de 1/200) ;
- Séisme d'Evaluation de Sécurité, SES (probabilité d'occurrence annuelle de 1/5000).

| Profil : Corps du barrage   |        | Scénarios de crue         |           | Scénarios de séisme                |           |                                      |           |
|-----------------------------|--------|---------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|
|                             |        | Evacuateur obstrué à 30 % |           | Séisme de Base d'Exploitation, SBE |           | Séisme d'Evaluation de Sécurité, SES |           |
| Observation                 | Cote   | Bêta                      | Pf (Bêta) | Bêta                               | Pf (Bêta) | Bêta                                 | Pf (Bêta) |
| BCR                         | 247,50 | 5,9                       | 1E-09     | 5,9                                | 2E-09     | 5,6                                  | 8E-09     |
| BCR                         | 225,30 | 6,4                       | 9E-11     | 6,2                                | 3E-10     | 5,7                                  | 6E-09     |
| Interface barrage-fondation | 225,00 | 6,4                       | 9E-11     | 6,2                                | 3E-10     | 4,7                                  | 1E-06     |

| Profil : Evacuateur         |        | Scénarios de crue         |           | Scénarios de séisme                |           |                                      |           |
|-----------------------------|--------|---------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|
|                             |        | Evacuateur obstrué à 30 % |           | Séisme de Base d'Exploitation, SBE |           | Séisme d'Evaluation de Sécurité, SES |           |
| Observation                 | Cote   | Bêta                      | Pf (Bêta) | Bêta                               | Pf (Bêta) | Bêta                                 | Pf (Bêta) |
| BCR                         | 247,50 | 5,3                       | 5E-08     | 5,3                                | 6E-08     | 5,2                                  | 1E-07     |
| BCR                         | 223,30 | 6,2                       | 2E-10     | 6,0                                | 8E-10     | 5,6                                  | 1E-08     |
| Interface barrage-fondation | 223,00 | 6,1                       | 4E-10     | 5,7                                | 5E-09     | 3,7                                  | 9E-05     |

| Profil : Vidange            |        | Scénarios de crue         |           | Scénarios de séisme                |           |                                      |           |
|-----------------------------|--------|---------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|
|                             |        | Evacuateur obstrué à 30 % |           | Séisme de Base d'Exploitation, SBE |           | Séisme d'Evaluation de Sécurité, SES |           |
| Observation                 | Cote   | Bêta                      | Pf (Bêta) | Bêta                               | Pf (Bêta) | Bêta                                 | Pf (Bêta) |
| BCR                         | 247,50 | 5,9                       | 1,5E-09   | 5,9                                | 2E-09     | 5,2                                  | 1E-07     |
| BCR                         | 229,30 | 5,8                       | 3,9E-09   | 5,6                                | 8E-09     | 5,4                                  | 4E-08     |
| Interface barrage-fondation | 229,00 | 5,6                       | 1,2E-08   | 5,5                                | 2E-08     | 3,5                                  | 2E-04     |

Tab.2 - Résultats des analyses de fiabilité

Concernant les scénarios de crue, l'analyse des résultats montre une probabilité de défaillance  $P_f$  extrêmement faible ( $\ll 10^{-6}/\text{an}$ ) sur l'ensemble des sections et profils étudiés, permettant de conclure que la probabilité de rupture du barrage par sollicitation hydrostatique en crue (quelle que soit l'intensité de la crue envisagée) et en situation de défaillance du déversoir est hautement improbable.

Concernant les scénarios de séisme (SBE, SES) les résultats mettent en évidence que la situation sismique la plus critique correspond au séisme SES (probabilité annuelle d'occurrence : 1/5000) pour laquelle nous obtenons les résultats ayant la plus forte probabilité. Ces résultats sont obtenus au niveau de l'interface barrage-fondation :

- profil « corps du barrage » section 225 m NGF :  $1.10^{-6} \times 1/5000 = 2 \times 10^{-10}$
- profil « vidange » section 229 m NGF :  $2.10^{-4} \times 1/5000 = 4 \times 10^{-8}$
- profil « évacuateur de crue » section 223 NGM :  $9.10^{-5} \times 1/5000 = 2 \times 10^{-8}$

L'analyse des résultats montre une probabilité de défaillance  $P_f$  extrêmement faible ( $< 10^{-6}/\text{an}$ ) sur l'ensemble des sections et profils étudiés, permettant de conclure que la probabilité de rupture du barrage, dans le corps du barrage, à l'interface et dans la fondation, par sollicitation sismique est hautement improbable.

### 3. CONCLUSIONS

L'application des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement aux barrages est possible en adaptant les méthodes d'analyse au contexte particulier des ouvrages de génie civil. Cette démarche permet d'aboutir à une modélisation qualitative de la sûreté de fonctionnement du barrage pour les différents scénarios envisagés, constituant un enchaînement de séquences de défaillance des composants du barrage conduisant à des modes de rupture. Elle constitue le point de départ incontournable d'une analyse fiabiliste et est indispensable pour l'analyse quantitative des mécanismes complexes impliquant plusieurs modes de défaillance.

Dans une étude de dangers, les scénarios conduisant à un potentiel de dangers sont évalués en termes de probabilité d'occurrence et de gravité des conséquences. Dans ce cadre, les méthodes fiabilistes constituent une démarche intéressante pour l'évaluation probabiliste de la sécurité structurelle d'un barrage. Les méthodes fiabilistes permettent de prendre en compte, dans un contexte probabiliste, les incertitudes des données associées aux paramètres de calcul utilisés dans les justifications de la stabilité structurelle et permettent d'évaluer au plus près la sécurité intrinsèque d'un barrage.

L'application présentée concerne un barrage-poids récent, conçu dans les règles de l'art et bien contrôlé dans sa réalisation. Les résultats obtenus indiquent logiquement à un niveau de fiabilité très élevé. La même démarche mise en œuvre sur un barrage-poids ancien présentant des phénomènes de vieillissement des matériaux, nécessiterait de tenir compte de la résistance altérée des matériaux et des niveaux d'incertitude plus importante et conduirait à une fiabilité de l'ouvrage plus faible.

### REFERENCES

- [1] Peyras L., Boissier D., Carvajal C., Bacconnet C., Bécue JP., Royet P. (2010). *Analyse de risques et Fiabilité des barrages – Application aux barrages-poids en béton*. Ed. Universitaires Européennes. Berlin. 201 p.
- [2] Modarres M. (1993). *Reliability and Risk Analysis*, New York: Marcel Dekker, Inc, 1993. 349 p.
- [3] Villemeur A. (1988) *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Paris : Eyrolles, 1988. 798 p.
- [4] Lemaire M., Châteauneuf A et Mitteau J-C. (2005). *Fiabilité des structures. Couplage mécano-fiabiliste statique*. Hermes-Science, Lavoisier, 501p.

- [5] Carvajal C., Peyras L., Arnaud P., Boissier D, Royet P, (2009a). Assessment of hydraulic load acting on dams including filling variability and stochastic simulations, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 13, n°4. pp. 399-411.
- [6] Carvajal C., Peyras L., Bacconnet C., Bécue J-P. (2009b). Probability Modelling of Shear Strength Parameters of RCC Gravity Dams for Reliability Analysis of Structural Safety. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 13, n°1. pp. 91-119.
- [7] CFBR (2006). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids – propositions de recommandations*. CFBR, 2006. 82 p.

## ANALYSE DE RISQUES : COMMENT FAIRE QUAND LA STATISTIQUE NE SUFFIT PLUS

*Analysis of risks:  
how to make when the statistics is not any more sufficient*

**Solène Laloux**, Chef du service Ressources en eau  
CACG BP449 65004 Tarbes France  
[s.laloux@cacg.fr](mailto:s.laloux@cacg.fr)

**Yves Castel**, Analyste de risques  
49 T rue Larrey 65000 Tarbes France  
[yves.castel@j2c-services.fr](mailto:yves.castel@j2c-services.fr)

**Daniel Boubée**, Directeur de l'Aménagement Hydraulique  
CACG BP449 65004 Tarbes France  
[d.boubee@cacg.fr](mailto:d.boubee@cacg.fr)

### MOTS CLÉS

Evaluation et causes des risques, criticité, acceptabilité, plan d'action.

### ABSTRACT

*According to the decree of 2007, the study of dangers has to define actions able to decrease the criticality of the risks. Decrease does not say a complete elimination of the accidents; but would accept any member of the society that a third party made him take risks, evenly in regard with a probability?*

*The actions led for that purpose have to take into account levels of threshold or probability of occurrence of these risks: if the determinist approaches are not almost subject to critique, because not willing to assert more that they cannot, can the statistical determinations expected from the technician give better than "probabilities" and/or orders of magnitude? The actions led for that purpose have to take into account levels of threshold or probability of occurrence of these risks: if the determinist approaches are not almost subject to critique, because not willing to assert more that they cannot, can the statistical determinations expected from the technician give better than "probabilities" and/or orders of magnitude?*

*The recourse to a statistical display is intellectually satisfactory. Considering the regulations, the urgency due to the compulsory deadlines, engineering consulting firms are tried "to automate" the production of the studies of dangers of dams. The dangers are situations not necessarily only technical or technological. A human dimension in particular in all which recovers from the decision can be the object with difficulty of statistics. For that purpose, it is important to make that operational actors collaborate, to highlight quite typical of danger and the associated risks. A study of dangers will be useful only if it proposes a plan of preventive actions and a backup plan which answers all the studied risks.*

### RÉSUMÉ

*Selon le décret de 2007, l'étude de dangers doit définir des actions en vue de diminuer la criticité des risques. Diminution ne veut pas dire élimination des accidents mais est-ce que la société actuelle accepte qu'un tiers lui fasse prendre des risques ? Cette acceptabilité est-elle fonction d'un niveau statistique d'occurrence du risque ?*

*Les actions conduites à cet effet doivent prendre en compte des niveaux de seuil ou des probabilités d'occurrence : si les approches déterministes ne sont guère criticables, car ne prétendant pas affirmer plus qu'elles ne peuvent, les déterminations statistiques attendues du technicien peuvent-elles donner plus que des « probabilités » et des ordres de grandeur ?*

*Le recours à un affichage statistique est intellectuellement satisfaisant. Conformément à la réglementation, à l'urgence due aux dates limites imposées, les bureaux d'études sont tentés à vouloir « automatiser » la rédaction des études de dangers des barrages. Les dangers sont des situations non forcément techniques ou technologiques. Une dimension humaine notamment dans tout ce qui relève de la décision peut difficilement faire l'objet de statistiques. Pour cela, il est important de faire collaborer des acteurs opérationnels afin de mettre en évidence tout type de danger et les risques associés. Une étude de dangers ne sera utile que si elle propose un plan d'actions préventives et un plan de secours qui réponde à l'ensemble des risques étudiés.*

## 1. LE DANGER, LE RISQUE ...

Comment qualifier ces notions pour leur apporter la réponse appropriée ?

Danger (cf Larousse) : situation où l'on est exposé à quelque chose qui légitime une inquiétude ; ce qui constitue une menace, un risque, qui compromet l'existence ou le bon état de quelque chose, de quelqu'un.

Risque (idem) : possibilité, probabilité d'un événement considéré comme un dommage ; danger plus ou moins probable auquel on est exposé...

Selon le dictionnaire, ces deux notions se renvoient l'une à l'autre en mettant en avant une absence de certitude, voire une probabilité d'occurrence.

## 2. NOTRE SOCIÉTÉ FACE AUX RISQUES : L'ACCEPTABILITÉ

Comment réagit notre société face aux risques de dommages ?

Dernièrement, notre société a été marquée par la catastrophe due à la tempête Xynthia.  
Rappelons en les faits.

*La tempête Xynthia est une dépression météorologique majeure qui a balayé plusieurs pays européens entre le 26 février et le 1er mars 2010, causant un épisode de vents violents.*

*La conjonction de la tempête, de marées de fort coefficient et la pleine mer, conduit à la rupture de plusieurs digues dans plusieurs localités, conduisant à de fortes inondations dans les départements de Vendée (La-Tranche-sur-Mer, L'Aiguillon-sur-Mer, La Faute-sur-Mer), de Charente-Maritime (Aytré, Fouras, Châtelailon, Boyardville, La Rochelle) ou de Gironde (Andernos, Cap-Ferret).*



Après de tels incidents peut-on imaginer une société, des institutions capables de prendre des risques, si minimes soient-ils, ayant une conséquence sur les populations ? Une réponse en est donnée ci-après.

*Le 14 avril 2011, le maire d'une des communes affectées, la Faute-sur-Mer, est présenté au juge d'instruction au palais de justice des Sables-d'Olonne pour être mise en examen pour homicide involontaire et mise en danger de la vie d'autrui après le drame de la tempête Xynthia. On lui reproche de ne pas avoir respecté des règlements que, pour beaucoup, il ne connaissait pas ; il assure a contrario qu'il a toujours parfaitement respecté toutes les directives et circulaires qui lui avaient été données.*

Dans les sociétés contemporaines développées, les catastrophes sont de moins en moins bien acceptées, d'autant plus qu'elles semblent échapper au contrôle des spécialistes et des experts. Le passage à des sociétés plus individualistes a pu favoriser « le développement de sentiments d'insécurité, rendant plus intolérable la réalisation du risque » (Beck, 2001).

La liste des menaces et des catastrophes, dont l'actualité médiatique se fait l'écho, est longue : inondations, séismes, incendies, accidents technologiques, industriels et sanitaires alimentent des approches catastrophistes de l'information du public. Inversement, les pouvoirs publics peuvent, à l'occasion et pour ne pas effrayer l'opinion publique, être tentés par l'attitude, tout aussi discutable, du secret ou du "tout va très bien". Ces deux principes conjugués aboutissent à de « la désinformation citoyenne, s'opposent à une culture du risque maîtrisée et peuvent compliquer l'adoption de politiques de prévention rationnelles » (Géo confluence).

Certains (Jeudy, 1990) voient dans la fascination dont témoignent nos contemporains pour le risque un projet de maîtrise de la catastrophe. L'égrenage des menaces et des catastrophes parvient à saturer l'espace social d'incertitudes toujours plus fortes, entretenant ainsi une inquiétude généralisée, elle-même génératrice d'une demande de sécurité et de protection. Ce qui finit par constituer, tout à la fois, un cercle vicieux et un paradoxe, les sentiments d'inquiétude alimentant le besoin de sécurité. L'incertitude, vécue négativement, remplace alors "l'indétermination positive des trajectoires et des choix collectifs et/ou individuels » (Dobré in Y. Dupont, 2003).

Le décalage entre "risques perçus" et "risques réels" par notre société est, en partie, la conséquence d'un manque de sensibilisation, d'information et de communication. Il influe sur les degrés d'acceptabilité du risque. Dans ce contexte tous les décideurs sont « responsables » et montrés du doigt. **L'expert lui se réfugie derrière les statistiques.** Nous y reviendrons ci-après.

L'**acceptation d'un risque** dépend des critères retenus par la ou les personnes qui prennent la décision (ISO/CEI 73), en fonction des éléments objectifs dont il(s) dispose(nt).

A contrario, l'**acceptabilité des risques** est une notion subjective qui dépend donc du contexte socio-économique, de la culture et d'attitudes propres de la personne (ou des pratiques de l'organisme) qui prend la décision. L'acceptabilité des risques évolue donc dans l'espace ... et dans le temps.

Quels peuvent être les critères d'acceptabilité d'un risque ?

- La gravité des dommages du risque,
- La probabilité affichée d'occurrence du risque,
- La capacité à réduire le risque,
- Le coût des actions en diminution de risque, et les budgets dédiés ?
- La perception de « l'opinion publique »,
- ... ?

Quel peut-être le poids de chacun de ces critères ? Par exemple :

est-ce que l'opinion publique a un poids plus important que la probabilité d'occurrence ?

est-ce que les budgets à mobiliser l'emportent sur la gravité des dommages du risque ?

Toutes ces interrogations montrent que la prise de décision n'est pas simple. Les décideurs sont à la recherche d'outils pour les aider à faire des choix. Mais quand la catastrophe est là, peut-être que l'outil choisi pour décider sera remis en question et n'abritera pas le décideur dans sa responsabilité.

Aujourd'hui, la tendance est de prendre le moins de risques possibles et la mise en sécurité des ouvrages est devenu incontournable ...coûte que coûte ?

On ne peut imaginer un système visant « le risque 0 » que par une amélioration continue dans la diminution des risques.

### 3. L'EVALUATION RELATIVE

La culture actuelle du risque, la sensibilité des décideurs et de ceux qui sont exposés nous conduit plus vers **un management du risque** par un plan d'actions de diminution de risques que vers une évaluation des risques qu'il convient toutefois d'approcher au mieux.

Compte tenu des difficultés à cerner avec exhaustivité tous les paramètres influents, il est important de faire preuve d'honnêteté intellectuelle dans la démarche. L'évaluation des risques doit avoir pour objectif de déboucher sur une liste d'actions classées par ordre de priorité afin de manager le risque.

De nombreuses méthodes d'évaluation des risques existent :

- la méthode AMDEC : analyse des modes de défaillance et de leur criticité, plutôt utilisée dans le milieu industriel,
- La méthode HAZOP, Hazard Operability, plutôt dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermohydrauliques dans l'industrie chimique,
- La méthode HACCP, Hazard Analysis Critical Control Point, appliquée dans l'industrie agro-alimentaire,
- La démarche MADS, plus « systémique », méthode d'analyse des dysfonctionnements dans les systèmes, permet de recenser les événements non souhaités, de les appréhender,
- ...

Ces méthodes utilisent des techniques de l'ingénieur en caractérisant le risque comme un système à au moins deux dimensions :

- la probabilité de la cause,
- la gravité des dommages,

Certaines complexifiant l'évaluation en rajoutant une troisième dimension telle que « la capacité à détecter le danger ».

On peut faire appel à des experts pour justifier que tel risque est acceptable ou pas. Parfois les calculs sont compliqués et ne prennent pourtant pas en compte certains aspects humains difficilement chiffrables. Pourtant, cette évaluation des risques doit permettre au décideur d'engager des actions plus ou moins rapidement, car la décision, d'agir et/ou d'investir, lui revient.

Dans des domaines comme l'évaluation des risques des salariés (précédemment citée comme référence), le chef d'entreprise est responsable lui-même du couple probabilité/gravité dans la grille des risques : sa responsabilité civile et pénale est engagée.

La décision est souvent subjective alors que l'outil est voulu objectif ! En fait est-ce que l'outil est vraiment représentatif de toute la complexité de l'environnement naturel, social, culturel... ? Est-ce que les analyses qui précèdent l'utilisation de l'outil d'évaluation est suffisamment exhaustive ?

Il paraît, au moins, raisonnable de relativiser un risque par rapport à un autre afin de classer les actions à mener par ordre de priorité, car ce sont souvent les moyens (les budgets) alloués qui limitent le souhait de mener des actions d'élimination ou de réduction des risques. Dans ce cadre, un outil n'a pas nécessairement besoin d'être très performant (ie compliqué) pour sensibiliser les décideurs et prioriser les actions à mener. Par contre, l'outil a le mérite de donner un classement.

Il est habituellement utilisé une grille pour classer les risques l'un par rapport à l'autre.

|         |                   | Probabilité               |                      |                 |               |              |
|---------|-------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|---------------|--------------|
|         |                   | 1<br>Très très improbable | 2<br>Très improbable | 3<br>Improbable | 4<br>Probable | 5<br>Courant |
| Gravité | 5. désastreux     |                           |                      |                 |               |              |
|         | 4. catastrophique |                           |                      |                 |               |              |
|         | 3. important      |                           |                      |                 |               |              |
|         | 2. sérieux        |                           |                      |                 |               |              |
|         | 1. modéré         |                           |                      |                 |               |              |

**Ordre de criticité croissant**



Afin de faciliter l'attribution des probabilités et des gravités, il est souhaitable de raccorder les notions de « probable », de « grave » à des valeurs ou événements mieux précisés. A titre d'exemple en ce qui concerne les barrages, les valeurs ci-après, tirées du guide lecture des EDD, pourraient être proposées.

#### Valeur des probabilités

| Description                                      | Classe, niveau | Probabilité associée        |
|--------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|
| Evènement possible mais extrêmement peu probable | 0              | Inférieur à $10^{-5}$       |
| Evènement très improbable                        | 1              | Entre 1/100 000 et 1/10 000 |
| Evènement improbable                             | 2              | Entre 1/10 000 et 1/1 000   |
| Evènement probable                               | 3              | Entre 1/1 000 et 1/100      |
| Evènement courant                                | 4              | Supérieur à 1/100           |

A titre de commentaire : compte tenu de la diversité des ouvrages, des technologies utilisées et des métiers de l'art de chacun, il est difficile d'associer avec assurance une probabilité à un événement attendu. Est-ce que les mathématiciens experts en probabilités sauraient proposer des lois permettant de calculer la probabilité de l'évènement ? Est-ce que, comme dans l'aéronautique, l'on saurait partir de la

probabilité exigée de l'évènement indésirable et ensuite affecter les taux de fiabilité  $\lambda$  aux fonctions

techniques puis aux équipements ?

Nous proposerons plus avant une modeste analyse critique de cette démarche volontariste.

**Grille de gravité :**

Afin de prendre en compte la vitesse de propagation du phénomène une fois que l'accident survient, une grille de référence a été proposée en distinguant les personnes exposées en zone à cinétique rapide de celles situées en zone en cinétique lente disposant de plus de temps pour se mettre à l'abri. L'attribution d'une classe de gravité pour un scénario peut être effectuée sur la base de la colonne la plus pénalisante.

| Classes de gravité des conséquences<br>(par ordre décroissant) | Nombre de personnes exposées<br>en zone à cinétique rapide | Nombre de personnes<br>exposées en zone à<br>cinétique lente |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>5. désastreux</b>                                           | $\geq 1000$                                                | $\geq 10000$                                                 |
| <b>4. catastrophique</b>                                       | $\geq 100$ et $< 1000$                                     | $\geq 1000$ et $< 10000$                                     |
| <b>3. important</b>                                            | $\geq 10$ et $< 100$                                       | $\geq 100$ et $< 1000$                                       |
| <b>2. sérieux</b>                                              | $\geq 1$ et $< 10$                                         | $\geq 10$ et $< 100$                                         |
| <b>1. modéré</b>                                               |                                                            | $\geq 1$ et $< 10$                                           |

Au delà de l'outil, l'amélioration de la sécurité nécessite de passer d'une approche des risques cloisonnée par une approche technique à un management global, intégré et coordonné, des risques. La condition préalable et cruciale est le développement d'une culture de sécurité qui ne soit plus axée sur les approches techniques, sur le mythe de l'infailibilité humaine mais qui soit ouverte, constructive, non culpabilisante, et permette aux professionnels de pratiquer le retour d'expériences, de les discuter, d'en tirer des enseignements, et aux décideurs de mettre en place les mesures de prévention et de réduction des risques, en fonction d'un niveau de seuil ou de probabilité donné.

#### 4. UNE (MODESTE) CRITIQUE D'UNE APPROCHE TOUTE STATISTIQUE

Les phénomènes connus par le passé dans les régions de projet et pour des cas similaires, ne sont pas uniques et se reproduiront « probablement », mais quand et avec quelle intensité ? Pour nos projets nous sommes amenés à faire des reproductions ou des projections des données (supposées bien) connues.

Mais quel crédit doit-on accorder aux traitements statistiques que nous employons pour dimensionner un équipement ou prévoir son risque de défaillance face à un événement dépassant le seuil retenu ? Nous proposons ci-après au lecteur un ensemble de réflexions combinant tout à la fois notre propre expérience et une critique formulée par des professionnels du calcul mathématique.

Pour nos travaux (de conception, ici d'évaluation de dangers) peut-on affecter a priori une loi de distribution connue (qu'elle soit normale, de Gumbel ou de Poisson) à des paramètres considérés comme aléatoires, à des phénomènes qui n'y répondent « probablement » pas, en particulier quand l'écart-type sur échantillon est infiniment petit devant la moyenne (trop faible variance pour être honnête), ou au contraire quand une ou plusieurs mesures viennent « anormalement » contredire la distribution espérée.

Nous restons dans l'incertitude sur la possibilité d'affecter des probabilités à des phénomènes qui ne sont pas forcément aléatoires (qu'ils soient naturels ou résultent de comportement humain) et ne répondant pas nécessairement à des lois de distributions connues ou tout au moins classiques. Nous renvoyons le traitement de nos incertitudes à des mathématiciens statistiques que nous ne sommes pas. Nous pouvons ici évoquer les publications de la Société de Calcul Mathématique, en particulier sous la plume de Bernard Beauzamy. Ce dernier a eu notamment plusieurs occasions de répondre à des interrogations du MEDDT relatives aux phénomènes hydrologiques et aux séismes.

Il nous semble d'abord intéressant de renvoyer à ses analyses pour d'autres commanditaires, s'appuyant sur des développements mathématiques, sûrement irréprochables, traitant du sujet de l'état sanitaire de populations humaines : seraient-ils aussi transposables aux divers types de populations des barrages ?

Pour revenir à notre sujet des barrages, il est notamment intéressant de se référer à ses méthodes de comparaison de deux populations distinctes pour déterminer si elles font face à des taux de risques différents et offrent des réponses diversifiées aux mêmes questions : quelle espérance de vie (à la naissance, ie à la construction, puis au moment de l'examen, ie de l'étude de danger), l'influence de la pyramide des âges (poids du vieillissement des ouvrages), probabilité du décès à un âge donné (durée de vie de l'ouvrage) en fonction de critères environnementaux, sanitaires et sociaux...

Le rapprochement avec nos propres problématiques est évident : pour dégager des résultats statistiques il faut un échantillon le plus large possible (la population régionale, ... mondiale). Mais pour cela a-t-on le droit de rassembler dans un même panel l'ensemble du parc mondial des barrages soumis à des contextes naturels très différents, bénéficiant de conditions techniques et économiques de construction puis de maintenance très écartées.

A l'inverse quel crédit accorder à une statistique qui ne s'appuierait que sur le retour d'expérience retiré, par la CACG, du suivi de notre quarantaine d'années de construction et de gestion de quelques dizaines (centaines tout au plus) de barrages dans une zone tempérée (relativement) peu soumise aux séismes. L'absence de tout incident majeur, et encore plus de phénomène destructeur, nous conduirait à dégager une probabilité expérimentale de risque zéro !

Un constat également fait par cet auteur dans son analyse de travaux de cette nature est l'absence quasi générale du facteur temps : il est évident que pour nous ce critère est présent, dans notre inconscient au moins. La plupart des accidents se produisent à la naissance (durant la construction ou à la mise en eau) puis l'enfant se développe sainement dans de bonnes conditions environnementales. Avec l'âge il se solidifie ... puis vieillit et devient plus fragile aux atteintes. Nous avons tous en référence des cas de (très) vieux barrages pour certains encore fonctionnels. Mais « nous mourrons tous », les barrages aussi, que ce soit par lente érosion, destruction ou désaffectation. Nous ne pouvons ignorer ce critère temps dans nos analyses, qui remet en cause des traitements statistiques mal fondés sur des échantillons à la fois insuffisamment larges et discriminés.

Le statisticien attache également une forte importance aux données absentes ou censurées. Nous connaissons tous cet exercice de (re)constitution de la base de données. Nous ne l'illustrerons ici que par le rappel des deux premières années d'existence de l'un de nos barrages-réservoirs : l'Astarac, (catégorie B, d'une capacité de 10 hm<sup>3</sup>), mis en service en 1975, successivement soumis en 1976 à une sécheresse (vidange totale) encore non retrouvée à ce jour, puis en 1977 à une crue proche de la crue de projet ! Même en se fondant sur des chroniques historiques dépassant celle des mesures, il ne nous paraît pas réaliste de considérer que cette crue intervenue dans la deuxième année de fonctionnement soit effectivement d'ordre millénal.

Ceci montre bien la fragilité de nos résultats quand on veut dégager, de façon précise, une probabilité de retour pour des variables, qui ne sont pas forcément aléatoires, qui ne suivent a priori aucune loi statistique (et sûrement pas « normale ») sur la foi de trop courts échantillons de données ; et encore les mesures hydro-climatologiques sont elles sans doute les moins critiquables de ce point de vue. On peut tout au plus donner des ordres de grandeur, pour une probabilité de retour ou plutôt d'occurrence dans l'année, donnée, et encore avec une large plage d'incertitude. Il en va notamment ainsi de la crue de Paris de 1910 dont rien ne nous permet d'affirmer qu'elle est centennale parce qu'elle ne s'est pas reproduite depuis 100 ans (critique qui ne condamne pas les précautions aujourd'hui prises en perspective de sa reproduction dans l'année qui vient, ... mais qui auraient certainement dues être plus anticipées).

De même nous sommes très réservés sur la notion d'un « séisme d'évaluation de sécurité » affecté d'une quelconque probabilité d'occurrence. Compte tenu des méthodes d'évaluation (distribution historique x intensité mesurée par une échelle de dommage) cette notion n'a pas de sens en soi. Les

méthodes souvent utilisées (faute de mieux ?) combinent en cette matière calculs statistiques et évaluations déterministes (B. Beauzamy en fait le constat dans son étude comparative) et nous confondons régulièrement magnitude et intensité pour prédire le phénomène ou en constater les effets reproductibles.

Nous restons intéressés par le rapprochement parfois fait sur les tests de résistance des structures (ci-avant cités avec l'exemple de l'aéronautique) tout en conservant l'idée que les charges appliquées ne sont pas aléatoires (mais au contraire constantes et répétitives) : la casse intervient au-delà d'un seuil de nombre de sollicitations. Une telle démarche nous rapproche également du questionnement de l'industriel fabricant un équipement (une machine à laver ou un avion) quel effort de production doit-il consentir pour une « durée de garantie » acceptable par l'acheteur en fonction du prix payé. Nous ne pensons pas avoir ce type de raisonnement pour la construction de nos ouvrages hydrauliques que nous concevons et construisons pour durer (quarante ans, un siècle, un millénaire ?) et que nous amortissons fiscalement sur 60 à 100 ans. Bien sûr les conditions d'usage et de maintenance pèsent fortement sur cette durée de vie.

Il serait effectivement rassurant pour le technicien et le contrôleur de pouvoir « déterminer » mathématiquement l'occurrence de risques et de renvoyer leur prise en compte (technico-économique) à une acceptabilité plus ou moins grande de la société (des usagers) et à la capacité financière de les dépasser.

Le statisticien professionnel auquel nous avons fait plusieurs références pose la question « qu'il ne faut pas poser » : l'information (sur les données à prendre en compte) est-elle suffisante ? Il renvoie en cela dos à dos le politicien comme le journaliste relai d'opinion d'une part, qui tous deux tranchent « à la va vite » ou de façon péremptoire (parfois en se fiant à un ajustement effectué de façon indue sur une loi connue), et d'autre part le scientifique qui en toute rigueur ne dispose jamais d'assez d'éléments pour se prononcer (nous en connaissons tous dans nos équipes, et nous avons tous à faire aux premiers dans notre activité).

Bien sûr, ce scepticisme ou la réserve que nous dévoilons ici sur « une » vérité trop facile à afficher, ne doit pas nous empêcher de bâtir des projets, puis à faire en sorte que les aménagements réalisés soient les plus sûrs et durables possible. Nous sommes ainsi amenés à construire des plans d'action pour faire face aux possibles (probables) événements ainsi identifiés.

## **5. COMMENT APPRECIER LE RISQUE QUAND LA STATISTIQUE N'EST PAS LA REPONSE ADAPTEE ?**

Le danger est une situation qui fait naître des inquiétudes par les dommages qu'elle peut engendrer. C'est un ensemble d'événements, de circonstances, de relations concrètes. Il est parfois difficile d'imaginer tous les événements capables de faire naître des inquiétudes. Cette faculté d'imagination est ce que l'on appelle la créativité. Celle-ci est le propre de l'homme.

Il nous est désormais demandé de produire une étude de dangers pour ou résultant de l'existence d'ouvrages hydrauliques... et non une étude de risque. Il faudrait donc ne pas se limiter aux seuls problèmes techniques, il faut « élever » l'analyse au niveau des scénarii les plus probables aux (très) peu probables. Il est donc nécessaire de faire appel à la plus grande ouverture d'esprit afin d'imaginer même l'improbable.

Peut-on aujourd'hui demander aux ordinateurs d'imaginer des dangers ? L'ordinateur peut proposer des listes de situations, des combinaisons de situations qui ont été enregistrées dans une base de données qu'on lui aura fournie. Il réduira les situations et dangers en des processus bien déterminés et simples. Ces dangers sont alors issus d'une démarche ordonnée et mécanique à partir de quelques données. Un tel processus offre l'avantage de prendre en compte des faits (plus ou moins) connus.

Lorsque nous parlons de "créativité", il s'agit pour nous d'une activité humaine, assez mal définie, et grâce à laquelle sont obtenus des résultats inconnus à l'avance. La créativité est le fruit à la fois de

l'intuition, d'une idée heureuse, d'un coup de génie. La créativité permet de mettre en évidence des types de dangers non pris en compte dans des listes guides.

Après une catastrophe, on reprochera toujours à l'homme de ne pas avoir pensé au danger à l'origine de la catastrophe. Nous pouvons l'illustrer avec quelques situations non relatives aux barrages.

Après la catastrophe de Tchernobyl, les experts du nucléaire ont expliqué que la mauvaise technologie soviétique, des normes de sécurité insuffisantes et la nature bureaucratique du système étaient à la base de l'accident.

Est-ce qu'une étude de danger aurait mis en évidence en tant que danger : la nature bureaucratique d'un système ?



Le Japon est un pays de très haute technologie. Bien conscientes du risque sismique, les autorités nippones ont imposé des normes sévères pour la construction des centrales. Le réacteur 1 de Fukushima comportait même un double dispositif de sécurité, avec certains groupes électrogènes alimentés au fuel, d'une part, et d'autres fonctionnant sur batteries.

L'étude de danger n'avait pas prédit un tsunami noyant à une bonne hauteur au dessus des protections du bâtiment le groupe de secours.

Il est important de ne pas dissocier la réflexion

humaine des méthodes « automatiques » lors des recherches de dangers pour s'assurer d'une recherche optimale des dangers.

Faisons le parallèle avec les études des dangers des salariés, le document unique. Un groupe de travail INRS-CARSAT (ex CRAM) travaille depuis l'automne 2010 sur un document de référence dont la sortie est espérée fin 2011 mais selon les préventeurs, **un "document clés en mains " serait contre-productif et ferait complètement perdre de vue la finalité de la démarche**, à savoir l'auto-évaluation par l'entreprise des risques, sachant que cette dernière bénéficie d'une autonomie parfaite en ce qui concerne la présentation, la rédaction de ce document unique.

Pour faciliter la réflexion, certaines CARSAT proposent des listes guide de dangers à explorer. Ces listes guides ont été élaborées à partir du retour d'expérience et des bases de données en place.

Il a ainsi été possible de décompter près de 30000 cas regroupés en 9 catégories, une dixième de faible importance (environ 5%) mentionnant les « non classables ». Ce recensement a conduit à une grille développée sur une vingtaine de catégories de risques individualisés, tout en ménageant la possibilité d'en imaginer plusieurs autres. On voit bien dans cet exemple que la CARSAT ne souhaite pas enfermer la réflexion sur des thèmes bien précis et propose une analyse complémentaire par « Autres dangers ».

Dans une démarche de même nature, on peut vouloir s'appuyer sur des listes guide pour les études de dangers des barrages mais, il faudra toujours rester ouvert à toute sorte de propositions, objets de discussions dans les groupes de travail.

Comment compléter ces listes guide par d'autres dangers que peut subir le barrage ? L'analyse fonctionnelle préconisée peut ouvrir quelques pistes supplémentaires. Il existe plusieurs méthodes d'analyse fonctionnelle, parmi celles-ci la méthode APTE® a le mérite d'être adaptée à la conception et de faire appel à la créativité. Ainsi, des dangers potentiels auxquels on ne pense pas habituellement peuvent être mis en évidence.

Exemple d'application de la méthode APTE® au barrage :

Pour chaque contexte d'utilisation identifié, il s'agit d'exprimer les fonctions du barrage étudié, c'est-à-dire mettre en évidence les services à rendre par le barrage en service. A cette fin la méthode APTE® propose un outil méthodologique : « la Pieuvre ».

Lors de son fonctionnement, le barrage est en interface avec un certain nombre d'éléments de son environnement qui constituent son milieu extérieur. Le barrage étudié est placé au centre de la pieuvre entouré des éléments du milieu extérieur (EME). Il faut ensuite décrire les relations créées par le barrage avec ou entre ses éléments du milieu extérieur.

Ces relations sont traduites en fonctions. Il existe deux sortes de fonctions :

- les fonctions principales (FP) qui sont les buts des relations créées par le barrage entre au moins deux éléments de son milieu extérieur ;
- les fonctions contraintes (FC) qui sont des exigences d'un élément contraignant du milieu extérieur.

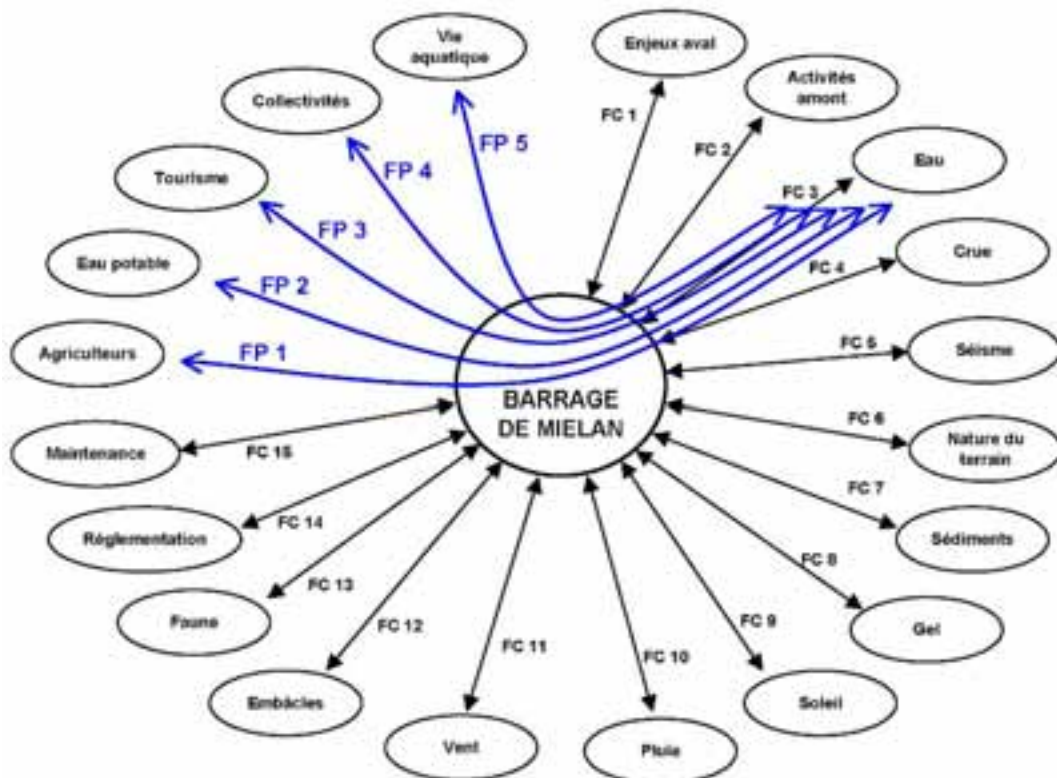


Fig.1 - Analyse Fonctionnelle d'un barrage (ici celui de Miélan 32)

Les règles de base de l'expression fonctionnelle à respecter sont les suivantes :

- utiliser un verbe d'action, de sens positif et à l'infinitif ;
- ne pas préjuger d'une solution ni même d'un principe technique ;
- faire figurer les noms des éléments du milieu extérieur concernés.

Les dangers, objets de notre étude, sont des situations qui devraient être relatives aux fonctions contraintes. Afin de ne rien oublier et de faire ressortir « l'inimaginable », il est utile d'utiliser la méthode « Brainstorming ».

#### Rappel de la méthode Brainstorming

L'idée générale de la méthode est la récolte d'idées nombreuses et originales. Deux principes définissent le brainstorming : la suspension du jugement et la recherche la plus étendue possible. Ces deux principes se traduisent par quatre règles : ne pas critiquer, se laisser aller, rebondir sur les idées exprimées et chercher à obtenir le plus grand nombre d'idées possibles.

Ainsi, les suggestions absurdes et fantaisistes sont admises durant la phase de production et de stimulation mutuelles. En effet, les participants à la réunion de travail ayant une certaine réserve peuvent alors être incités à s'exprimer, par la dynamique de la formule et les interventions de l'animateur. C'est pour amener à cet accouchement d'idées en toute quiétude que l'absence de critique, la suggestion d'idées sans aucun fondement réaliste, et le rythme, sont des éléments indispensables pour la réussite du processus.

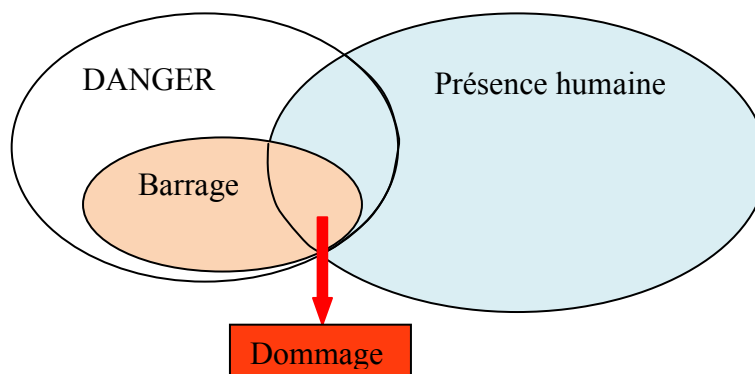
En quelques études de dangers conduites par la CACG pour son compte ou au bénéfice de tiers, la liste de dangers potentiels s'est allongée : par rapport aux contraintes énumérées dans la figure 1, lors de nouveaux groupes de travail, la liste a été enrichie de nouveaux dangers : management, centre de contrôle...

## **6. LES EFFETS ET CAUSES DU RISQUE**

Il y a souvent confusion entre danger, risque et dommage, même dans leur définition livresque.

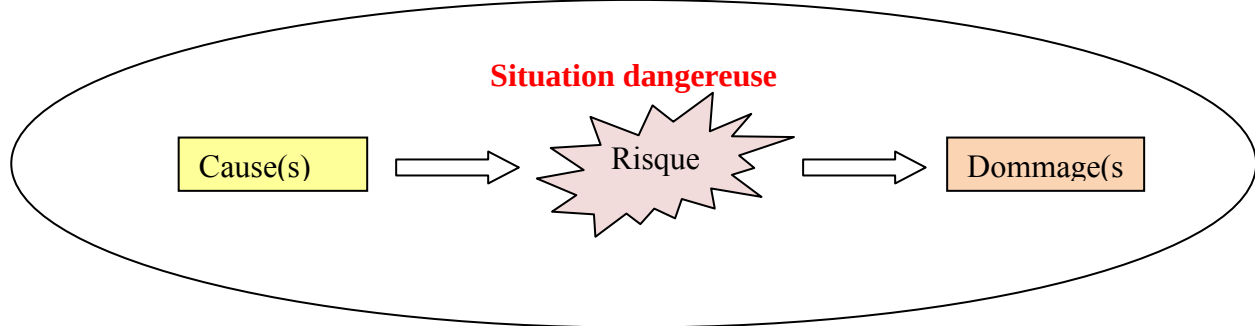
Dans le domaine de la sécurité industrielle, le *risque* se définit comme l'existence d'une probabilité de voir un danger se concrétiser dans un ou plusieurs scénarii, associée à des conséquences dommageables sur des biens ou des personnes.

Dans le cadre, ici imparti, des études de danger de barrage, il ne s'agit pas de regarder les risques techniques ou financiers mais uniquement les risques qui entraînent des dommages sur les hommes. Le danger est donc une situation qui impacte le barrage qui, de ce fait, risque de créer des dommages sur les populations.



C'est un fait déclencheur qui transforme une situation potentiellement dangereuse en une situation dommageable. Ce fait déclencheur sera la cause du risque. Donc, la cause ou les causes du risque génère(nt) un risque qui entraîne des dommages sur les populations.

La représentation schématique du risque peut ainsi être la suivante :



Pour illustrer cette terminologie, on peut s'appuyer sur l'exemple suivant :

En cas de crue, le barrage risque de créer des dommages sur les populations à cause d'une rupture par érosion du talus aval.

|        |   |                             |
|--------|---|-----------------------------|
| Danger | ☞ | crue                        |
| Risque | ☞ | créer des dommages          |
| Cause  | ☞ | rupture du talus de remblai |

Des confusions sont possibles entre danger, risque et cause. Il est important d'être précis dans la formulation afin de mettre en évidence la cause du risque.

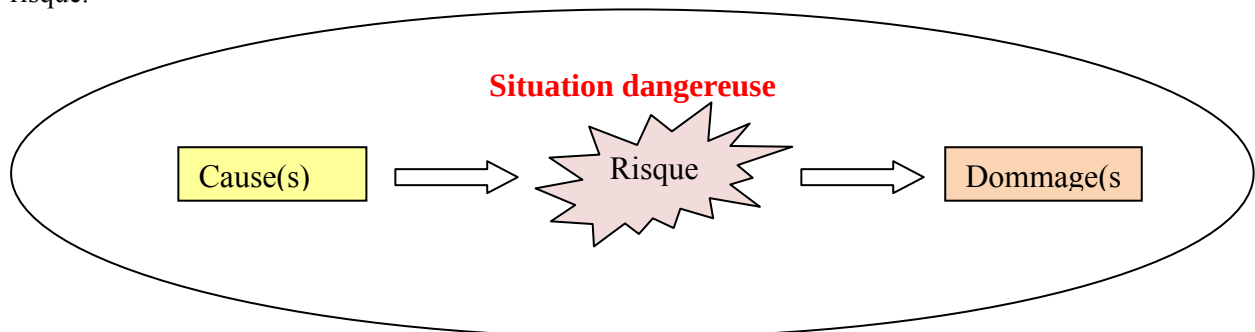
Quels sont les effets du risque sur les populations ? Quels pourraient être les dommages ?

Les dommages relatifs à la rupture d'un barrage sont liés à l'inondation qui en résulte, à la force du courant engendré. La force des eaux générée lors de la rupture d'un barrage est susceptible de générer des dommages humains mais aussi de détruire habitations, infrastructures et flore en raison :

- du fort courant qui emporte les structures peu ancrées dans le sol,
- de dégradations dues aux chocs d'objets charriés à grande vitesse par la crue.

De plus, des dégâts peuvent être causés indirectement par des pollutions induites par la destruction d'installations dangereuses et de dispersion de toxiques, de pathogènes à partir de ces installations (usines, décharges.)

La cause du risque est le fait déclencheur du risque. Il s'agit bien évidemment d'une cause potentielle du risque.



Il peut s'agir de causes complexes c'est-à-dire une combinaison d'événements qui devient le fait déclencheur du scénario redouté. Il peut s'agir aussi d'une cascade de causes potentielles. Il n'est pas évident de formuler les causes du risque. La démarche doit être rigoureuse et méthodique.

Revenons à la formulation du risque avancée au chapitre 2 :

**Risque 1 :** En cas de crue, le barrage risque de créer des dommages sur les populations à cause d'une rupture du talus aval.

**Cause du risque 1 :** Le talus aval risque une rupture

Cette cause de risque devient elle-même un risque. = **Risque 2**

**Cause du risque 2 :** Le talus aval risque de ne pas tenir une surcharge d'eau du barrage  
= **Risque 3**

**Cause du risque 3 :** Les bases du calcul initial risquent d'être erronées  
= **Risque 4**

**Cause du risque 4 :** Les spécifications initiales risquent de ne pas être précises  
= **Risque 5**

**Cause du risque 5 :** Manque de connaissances du technicien... etc

Quelle est la cause ou quelles sont les causes qu'il faudrait ici retenir pour l'analyse ?

L'analyse des causes du risque nécessite un discernement dont, aujourd'hui, un calculateur ne pourrait être capable que si de nombreuses données et des algorithmes complexes, similaires à la réflexion humaine, lui avaient été intégrés. Toutefois, une liste guide peut aider dans la recherche des causes racines. Pour créer cette liste guide, on pourra notamment s'appuyer sur :

- les techniques employées pour sa construction,
- les éléments constitutifs,
- les éléments naturels,
- l'état de l'art,
- les capacités du propriétaire ou du concessionnaire,
- le niveau d'entretien.

Les 3 derniers points de cette liste guide méritent chacune le petit développement suivant :

### **6.1. L'état de l'art**

L'état de l'art est l'état des connaissances existantes sur les études et spécifications de barrage à un moment donné.

Il est indéniable que certains ouvrages ont été construits à une époque où les connaissances, les moyens de contrôle et de mesure n'étaient pas aussi performants qu'aujourd'hui.

Le recensement des étapes marquant les changements dans les connaissances peut constituer une liste guide de causes potentielles de risque. Nous abordons ici la notion de prise en compte du facteur « temps » sur lequel nous reviendrons.

## **6.2. Les capacités du propriétaire ou du concessionnaire**

Le propriétaire ou concessionnaire est souvent celui qui fait des choix d'actions en fonction des budgets qu'il alloue aux barrages. Les informations sur les barrages qui doivent lui parvenir doivent être fiables, complètes et adaptées pour qu'il puisse prendre de bonnes décisions.

Souvent volontairement ignorée dans les études de danger, la capacité du propriétaire ou du concessionnaire à prendre de bonnes décisions, l'absence de « bonnes informations » peuvent être des causes de risque.

## **6.3. L'entretien**

L'ouvrage vit, travaille et se fatigue en fonction des efforts auxquels il est soumis.

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

Certains ouvrages intéressant la sécurité publique sont également auscultés, par des capteurs permettant de mesurer leurs comportements (mesures de déplacements, de pression d'eau, de débit...).

De même, les abords du barrage doivent être régulièrement maintenus en état afin d'éviter notamment les embâcles ou effondrements. Toutes ces fonctions techniques du barrage, ainsi que les abords nécessitent une visite régulière et certains travaux.

La maintenance, en ce qu'elle apporte ou non des améliorations ou des changements peut être aussi source de risque.

Cette appréciation et évaluation des risques potentiels, qui dépasse le cas échéant les statistiques que l'on pourrait dégager d'un traitement des données sur un échantillon de référence insuffisant (en quantité ou en qualité) doit présenter un intérêt pratique.

Nous avons précédemment indiqué que cette démarche :

- doit déboucher sur une acceptation, par le décideur, fondée, du risque encouru,
- doit également l'amener à une stratégie de réduction des risques par un plan d'action.

## **7. LE PLAN D'ACTIONS**

Certains dangers ne peuvent pas être éliminés, c'est pour cela que des actions en diminution des risques doivent être entreprises. Si une étude de dangers ne débouche sur aucune action, elle n'aura pour utilité que de faire une photographie de la situation. Par contre, une étude de dangers est vraiment utile quand elle débouche sur des actions en diminution de risques.

Il y a 2 types d'actions :

- les actions préventives,
- les actions de secours associées à leurs informations de déclenchement.

Ces actions doivent être engageantes, claires et précises. Elles doivent être décrites avec un verbe à l'infinitif du type agir. Les verbes : penser à, proposer, réfléchir, analyser sont à bannir, car ils n'engagent pas sur un résultat. A la place de réfléchir, on peut proposer par exemple : rédiger un rapport d'étude. Il est important dans un plan d'actions d'énumérer des verbes « proactifs ».

Le plan d’actions doit être précis pour chaque action élémentaire :

| N° | Activité           | Responsable | Lieu                 | Date visée | Durée | Moyens                          |
|----|--------------------|-------------|----------------------|------------|-------|---------------------------------|
| 10 | Mesurer l’humidité | Durand. M   | Pied de versant aval | 1/10/12    | 1j    | Capteur d’humidité, Télémessure |
|    |                    |             |                      |            |       |                                 |
|    |                    |             |                      |            |       |                                 |

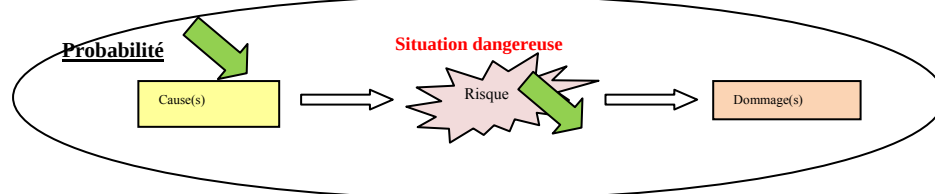
### 7.1. Les actions préventives

Pour déterminer une action préventive utile à l’étude, il est nécessaire au préalable d’avoir identifié correctement les causes racines du risque. L’action préventive peut être radicale ou atténuante.

Une action préventive peut **éliminer le risque** quand elle élimine la cause du risque.



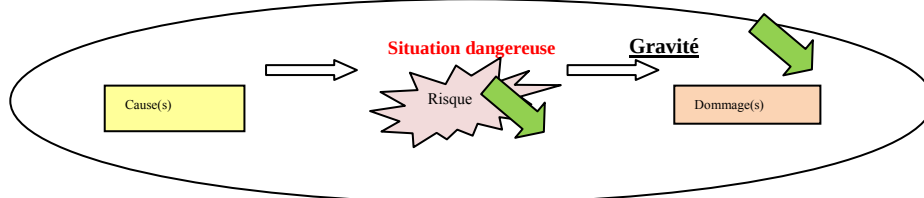
Une action préventive peut **diminuer le risque** en diminuant la probabilité d’occurrence de la cause.



### 7.2. Les actions de secours

Une action de secours est menée uniquement quand le risque s’est produit. Elle permet d’agir sur les situations catastrophiques pour en diminuer les gravités. Ces actions de secours sont toujours associées à des informations de déclenchement qui permettent d’alerter les responsables ou acteurs désignés.

Une action de secours peut **diminuer le risque** en diminuant la gravité des effets.



Ainsi, les plans de secours, plans particuliers d’intervention gérés par la Préfecture recensent l’ensemble des actions de secours à mettre en œuvre.

L’étude de Danger peut mettre en évidence de nouvelles actions de secours qui devraient être prises en compte pour améliorer ces plans de secours.

## 8. CORRELATION DES FONCTIONS CONTRAINTES AUX FONCTIONS TECHNIQUES ET AUX ACTIONS

L'étude menée peut-être complexe. L'analyse fonctionnelle génère de nombreuses fonctions contraintes mettant en évidence des dangers. Le barrage, dans son système, propose de nombreuses fonctions techniques. Est-ce que les fonctions techniques associées au plan de maintenance ou de secours permettent de limiter tous les dangers possibles non acceptables ? A ce stade de l'étude, il est important de confronter toutes les fonctions et actions entre elle afin de vérifier s'il n'y a pas d'oubli.

Un tableau sous forme de matrice peut faciliter cette confrontation.

|                                                                                                                                     |                                                                                                            | FC1                      | FC2                                    | FC3                                                                          | FC4                       | FC5                                                                                    | FC17                                        | FC18                                                                  | FC19                                                         | FC26                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Potentiel de Danger : <b>P</b> en rouge ;<br>Potentiel de Danger non critique : <b>NS</b> en vert ;<br>Actions : <b>A</b> en bleu ; |                                                                                                            | Protéger les objets aval | Eviter protéger des activités en amont | Répondre à la force de l'eau et limiter l'extension de l'eau dans le remblai | Laisser transiter la zone | Respecter la réglementation de sécurité rapide et laisser transiter la zone d'embarras | Eviter l'obstruction sur l'état de l'actuel | Le gestionnaire doit assurer une maintenance et surveillance adéquate | Le management opérationnel doit prendre les bonnes décisions | Le gestionnaire et le propriétaire doivent avoir des budgets et des moyens adaptés au fonctionnement et à la sécurité du barrage |
| Enrochement amont antibouillage                                                                                                     | L'enrochement protège contre le bouillage (FT1)                                                            | NS                       |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        | NS                                          | Action 5                                                              |                                                              | NS                                                                                                                               |
| Remblai amont                                                                                                                       | Le remblai amont assure l'étanchéité du barrage                                                            | NS                       |                                        | NS                                                                           |                           |                                                                                        | NS                                          | Action 5                                                              |                                                              | NS                                                                                                                               |
|                                                                                                                                     | Le remblai amont participe à la stabilité interne de l'ouvrage (FT2)                                       | NS                       |                                        | NS                                                                           |                           |                                                                                        | NS                                          | Action 5                                                              |                                                              | NS                                                                                                                               |
| Tranchées drainantes amont                                                                                                          | Les tranchées et les peignes drainants amont draine la partie superficielle du remblai amont (FT4)         | NS                       |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        | NS                                          | Action 5                                                              |                                                              | NS                                                                                                                               |
| Crête                                                                                                                               | La crête résiste au roulement d'engins                                                                     | NS                       |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        | NS                                          | Action 5                                                              |                                                              | NS                                                                                                                               |
|                                                                                                                                     | La crête protège le remblai des eaux de ruissellement et de l'évaporation (FT6)                            | NS                       |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        | NS                                          | Action 5                                                              |                                                              | NS                                                                                                                               |
| Télémésure                                                                                                                          | La télémesure permet de suivre et de transmettre le niveau du plan d'eau amont et le niveau d'eau résiduel | NS                       |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        |                                             | Action 5                                                              | NS                                                           | NS                                                                                                                               |
| Télécommande                                                                                                                        | La télécommande assure la vance de restitution                                                             |                          |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        |                                             | Action 5                                                              | NS                                                           | NS                                                                                                                               |
| Centre opérationnel délocalisé                                                                                                      | Le centre délocalisé contrôle et décide des actions opérationnelles                                        |                          |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        |                                             | Action 5                                                              | NS                                                           | NS                                                                                                                               |
| Local de surveillance                                                                                                               | Le local permet la supervision du barrage et assure les fonctions de crise - PPI (FT45)                    | NS                       |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        |                                             | Action 21                                                             | NS                                                           | NS                                                                                                                               |
| Dispositif d'alerte (PPI)                                                                                                           | Le dispositif d'alerte PPI permet l'alerte en cas de crise (FT47)                                          | NS                       |                                        |                                                                              |                           |                                                                                        |                                             | Action 21                                                             | NS                                                           | NS                                                                                                                               |

Exemple de Tableau Croisé FC / FT

## 9. LA SENSIBILISATION DES HOMMES

Tous les professionnels intervenant sur les barrages, leur hiérarchie doivent être sensibilisés aux dangers et méthodologies d'analyse des risques. Cette information de chacun devrait permettre à tous les acteurs de contribuer en complétant l'analyse par les informations dont ils disposent, par leur pertinence due à leur connaissance des lieux, leur pratique opérationnelle, à leur retour d'expérience.

Il est recommandé de présenter l'étude de dangers des barrages à une fréquence déterminée aux personnels de l'exploitation, de la maintenance, à leur hiérarchie, et de recueillir leur avis et recommandations. La sensibilisation est aussi une mesure de prévention. C'est ce que nous faisons depuis une vingtaine d'années dans nos réunions de « retour d'expérience ».

**La sécurité, c'est l'affaire de tous.**

## 10. VERS LE MANAGEMENT DES RISQUES

L'étude de dangers répond à une exigence légale. Tout en instiguant une analyse nécessaire, cette étude pourrait en contre partie limiter, par effet pervers, la responsabilité de chacun par ce document réglementaire.

Conscient de la difficulté d'une exhaustivité des situations dangereuses, il serait préférable de mettre en place dès la première évaluation une méthodologie de management des risques.

Aux étapes citées plus haut, se rajouterait un processus continu et itératif avec les activités suivantes :

### 10.1. *Le suivi et le contrôle des risques*

Tout au long de la vie du barrage, le catalogue des risques potentiels doit être réajusté en fonction des nouvelles informations recueillies. Certains risques pouvant disparaître, d'autres apparaître ou d'autres encore, considérés initialement comme faibles, pouvant devenir rapidement inacceptables dès lors qu'ils n'ont pu être maîtrisés, le niveau d'exposition aux risques de l'ouvrage est amené à changer. C'est pourquoi il est important de procéder périodiquement au suivi et au contrôle des risques encourus.

Puis, il s'agit d'actualiser la liste initiale des risques identifiés, d'affiner les données caractéristiques des risques déjà connus, de réévaluer leur criticité, de contrôler l'application des actions de maîtrise, d'apprécier l'efficacité des actions engagées, et de surveiller le déclenchement des événements redoutés et leurs conséquences.

### 10.2. *La capitalisation et la documentation des risques*

Le management des risques d'un projet nécessite enfin de capitaliser le savoir-faire et les expériences acquises et d'établir une documentation rigoureuse sur les risques associés au barrage. Cela doit permettre d'enrichir la connaissance des risques potentiels et dommageables, d'accroître la réactivité à chaque niveau d'intervention, de faciliter la prise de décision et d'améliorer l'efficacité des actions de maîtrise.

Pour cela, il convient, d'une part, de formaliser un certain nombre de documents spécifiques (le Plan de Management des Risques du barrage, le Dossier de Management des Risques du barrage...) permettant d'assurer la traçabilité des risques énoncés, des actions engagées, ainsi que les résultats obtenus. D'autre part, il convient d'organiser et de planifier la collecte et le stockage des informations utiles. Cette capitalisation et cette documentation des risques doivent être effectuées de manière périodique afin de donner l'état global des risques encore encourus et d'apprécier l'état d'avancement des actions de maîtrise mises en œuvre.

## 11. CONCLUSIONS

Le déterminisme dans les études de dangers peut masquer de nombreux éléments non techniques notamment ceux liés aux hommes et à l'état de l'art. La prise de décision de faire ou ne pas faire est difficile et est souvent fonction des budgets mis en place. Est-ce que notre société, dans les pays développés, est capable d'accepter et d'assumer la prise risque ?

La dimension humaine, l'appréciation des dangers, l'évaluation des risques, la pertinence des actions font que la méthodologie doit à la fois associer les moyens modernes de calculs et d'analyse à la collaboration des hommes impliqués dans le dossier.

Au-delà de sa réponse à une nouvelle attente sociétale et réglementaire, n'oublions pas que l'étude de danger doit avoir une valeur ajoutée, un intérêt évident pour le maître d'ouvrage : ce n'est qu'à cette conditions que son contenu sera justement calé et son coût accepté.

## **RÉFÉRENCES ET CITATIONS**

- GEO confluence
- Bachelet Rémi (2008), « Comment animer un Brainstorming. »
- Bertrand de la Bretsche (2000), « La méthode APTE : analyse de la valeur, analyse fonctionnelle »,
- Hervé Courtot, « Management des risques projet »
- Bernard Beauzamy (2010), « Nouvelles méthodes probabilistes pour l'évaluation des risques »,

# METHODOLOGIE POUR L'ANALYSE FONCTIONNELLE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES A GRAND LINEAIRE

Huguette Félix, Bruno Beullac, Rémy Tourment, Patrice Meriaux, Laurent Peyras

Cemagref, 3275 route de Cézanne CS 40061, 13182 Aix-en-Provence, France

e-mail : {prenom.nom}@cemagref.fr

## INTRODUCTION

Les études de dangers requises par la réglementation pour les ouvrages hydrauliques introduisent des concepts nouveaux d'analyse de risques. Ces concepts proviennent du domaine de l'industrie à risques technologiques et mettent en œuvre les méthodologies de la Sûreté de Fonctionnement (Villemeur 1988). Dans une étude de dangers et dans les démarches d'analyse de risques et de sûreté de fonctionnement en général, une étape incontournable est celle de l'analyse fonctionnelle du système examiné (Zwingelstein 1996). De la qualité de l'analyse fonctionnelle dépend la qualité de l'ensemble de l'étude ultérieure, notamment la mise en œuvre des méthodes d'analyse des défaillances et de construction des scénarios.

Pour les ouvrages à caractère ponctuel tels que les barrages, la transposition des méthodes d'analyse fonctionnelle aux ouvrages d'art du génie civil nécessite des adaptations des méthodologies, mais la démarche d'analyse reste analogue. Ces adaptations ont été conduites dans plusieurs domaines du génie civil, notamment sur les ouvrages hydrauliques (Peyras 2010) ou (Serre 2007). On renvoie aux travaux scientifiques et techniques traités dans Peyras et al. (2010) qui développe les méthodologies d'application des méthodes d'analyse de la valeur aux barrages.

Pour les ouvrages hydrauliques à grands linéaires tels que les canaux (qui sont des « barrages » au sens de la réglementation) et les systèmes d'endiguement de protection contre les crues, l'analyse fonctionnelle conduit à des difficultés méthodologiques nouvelles qui n'ont pas été résolues dans le domaine industriel. Au niveau de l'ingénierie, cela se traduit par des questions très pragmatiques : quel système étudier ? Comment établir l'analyse structurelle ? Quel découpage en tronçons ? La notion de tronçon vue du côté du gestionnaire est-elle pertinente pour la démarche d'analyse ?

Le présent article se propose de traiter la question de l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire, vue avec une approche méthodologique issue des théories des méthodes d'analyse fonctionnelle, puis technique avec une approche d'ingénierie. Deux applications récentes menées par les auteurs dans le cadre d'études de dangers relatives à des digues fluviales et de protection torrentielle viennent illustrer les démarches proposées.

## 1. METHODOLOGIE DE L'ANALYSE FONCTIONNELLE POUR LES OUVRAGES A GRAND LINEAIRE

### 1.1. Principes généraux de l'analyse fonctionnelle

Un *système de génie civil*, à l'instar d'un ouvrage hydraulique, se définit, d'une part, à partir des éléments structurels (ou des sous-systèmes) qui le composent, d'autre part, à partir des fonctions qu'il accomplit. A chaque niveau de décomposition du système, les éléments structurels remplissent à leur tour des fonctions qui contribuent à la réalisation des fonctions globales de l'infrastructure (Crémona 2003). Ainsi, un système de génie civil peut se définir soit à partir des éléments structurels (ou des sous-systèmes) qui le composent – approche *structurelle* –, soit à partir des fonctions qu'il accomplit – approche *fonctionnelle*.

L'approche fonctionnelle s'appuie sur les fonctions d'un système pour comprendre son fonctionnement, puis ses dysfonctionnements. A partir de l'analyse structurelle, elle établit de façon systématique et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur du système (Zwingelstein 1996).

Les méthodes d'analyse fonctionnelle permettent de proposer un modèle de fonctionnement d'un système, appelé *modèle fonctionnel*, en interaction avec son environnement. L'analyse fonctionnelle est l'étape préliminaire fondamentale avant l'application d'une méthode de la Sécurité de Fonctionnement. Elle constitue donc une étape fondamentale dans une étude de dangers, avant l'application de toutes méthodes d'analyse de risques.

L'analyse fonctionnelle permet la compréhension et la description synthétique du fonctionnement du système étudié et elle établit de façon formelle et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur du système. L'analyse fonctionnelle comprend trois phases :

- la définition du système ;
- l'analyse fonctionnelle externe ;
- l'analyse fonctionnelle interne.

Il existe de nombreuses méthodes d'analyse fonctionnelle adaptées à l'industrie, aux services ou aux organisations : Reliasep, FAST, DEN, SADT..., mais aucune méthode spécifique n'a été développée pour le génie civil. L'examen des différentes méthodes d'analyse fonctionnelle montre que celles issues de l'analyse de la valeur sont d'application générale et sont bien adaptées aux systèmes mécaniques (Peyras al. 2010). Parmi celles-ci, la méthode APTE (APplication aux Techniques d'Entreprise) a été utilisée et adaptée avec succès pour les systèmes de génie civil, notamment dans les applications aux ouvrages hydrauliques. Le lecteur intéressé peut consulter Peyras (2010) et Serre (2007). C'est cette méthode qu'il est proposé de mettre en œuvre pour les ouvrages hydrauliques à grand linéaire.

## **1.2. Définition du système ouvrage hydraulique à grand linéaire**

### *1.2.1. Définition des contours du système*

L'analyse fonctionnelle externe est une approche systémique, dans laquelle l'ouvrage hydraulique à grand linéaire étudié (un canal, une digue de protection) est considéré comme une « boîte noire » dont on étudie les interactions avec l'environnement. Il est donc nécessaire de définir précisément le *système* qui va être examiné, ses limites et les milieux extérieurs en interaction. Le système étudié dans les études de dangers est l'ouvrage hydraulique à grand linéaire, considéré dans son ensemble :

#### Exemples :

- pour un bief de canal, le système comprend les remblais en rive droite et gauche et l'ouvrage de fermeture aval, et éventuellement l'ouvrage amont ;
- pour un système d'endiguement, le système comprend les digues en rive droite et gauche, et éventuellement des ouvrages ponctuels (épis, seuils, passages batissables, station de pompage, digues de deuxième niveau, etc.).

### *1.2.2. Définition des granularités de l'analyse fonctionnelle*

Les ouvrages hydrauliques à grand linéaire sont constitués d'un linéaire d'ouvrages de génie civil de composition pouvant être variable le long du linéaire en géométrie et en constitution structurelle. Sur un point donné de ce linéaire, chaque ouvrage peut être décomposé en composants élémentaires.

En général, on distingue trois niveaux de granularité permettant de définir l'échelle spatiale de description de l'aménagement hydraulique :

- granularité 1 : le système dans son ensemble, c'est-à-dire l'aménagement hydraulique. Exemple : le bief d'un canal, un système d'endiguement ou de protection ;
- granularité 2 : les ouvrages constituant le système (appelé *les sous-systèmes*). Ceux-ci sont les linéaires d'ouvrage homogènes fonctionnellement et constituant le système ;
- granularité 3 : les composants de ces sous-systèmes. Exemples : le remblai, le dispositif d'étanchéité, le drainage, etc.

Le système (granularité 1) est constitué d'un ensemble d'ouvrages linéaires (granularité 2) homogènes en termes de fonctionnalité. Pour les biefs de canaux, il s'agit d'un ensemble d'ouvrages linéaires visant à contenir et à transporter un volume d'eau vers l'aval ; pour un système d'endiguement, il s'agit d'un ensemble d'ouvrages linéaires et ponctuels visant à empêcher l'inondation d'une zone protégée.

### *1.2.3. Définition des milieux extérieurs*

Lors de la première étape de définition du système, il est important de définir les contours géographiques du système d'ouvrages hydrauliques à grand linéaire étudié. Pour cela, il convient d'en définir les limites, qui conduisent ensuite à considérer les milieux extérieurs en interaction dans leurs différentes orientations géographiques.

Un tel choix des limites du système permet d'étudier les milieux extérieurs en contact avec le système, notamment les bassins versant, les milieux naturels (géologiques, hydrogéologiques, etc.) et les aménagements anthropiques. Cela permettra d'étudier ultérieurement dans l'étude de dangers (chapitre 8) les conséquences potentielles des scénarios de défaillance des aménagements sur les zones en contact de part et d'autre de l'aménagement hydraulique à grand linéaire.

#### Exemples :

- pour un bief de canal :
  - o le bief amont
  - o le bief aval
  - o les milieux extérieurs en rive droite
  - o les milieux extérieurs en rive gauche
  - o le milieu géologique, hydrogéologique
- pour un système d'endiguement :
  - o le bassin versant amont
  - o la zone protégée, pouvant être parfois décomposée en zones protégées rive droite et rive gauche
  - o les systèmes d'endiguement d'autres zones protégées
  - o d'autres zones protégées par d'autres systèmes d'endiguement
  - o l'environnement aval
  - o le milieu géologique, hydrogéologique

Les milieux extérieurs interagissant avec l'aménagement hydraulique sont obtenus par une analyse spatiale des secteurs en contact avec l'ouvrage hydraulique à grand linéaire. Ces milieux extérieurs induisent différentes interactions atteignant le système. Les limites des découpages entre deux milieux extérieurs contigus résultent de choix exprimant des interactions particulières, en termes de contraintes pour un bief de canal ou en termes de protection pour un système d'endiguement.

## **1.3. Analyse fonctionnelle externe d'un ouvrage hydraulique à grand linéaire**

### *1.3.1. Description et analyse des milieux extérieurs*

L'analyse fonctionnelle externe vise la description de l'environnement, des milieux extérieurs, en interaction avec le système.

Lors de l'analyse fonctionnelle externe, on produit pour chaque milieu extérieur une description détaillée du milieu, en termes d'emprise géographique, d'occupation du territoire, de constitution structurelle, de fonction hydraulique.

Exemples :

- pour un bief de canal, on s'attache à décrire les biefs amont et aval du bief étudié, en termes hydraulique et technique ;
- pour un système d'endiguement, on s'attache à décrire le(s) zone(s) protégée(s) en termes d'occupation anthropiques, d'enjeux et de qualité environnementale, le lit du cours d'eau, les autres zones protégées par d'autres systèmes d'endiguement, les systèmes d'endiguement d'autres zones protégées

1.3.2. *Analyse des interactions avec les milieux extérieurs*

L'analyse fonctionnelle externe examine les milieux extérieurs en interaction avec l'ouvrage hydraulique à grand linéaire et définit les interactions entre les milieux extérieurs et le système. Ces interactions peuvent être de différentes natures :

- des *interactions de contact* entre le système et les milieux extérieurs. Pour un système d'endiguement, elles traduisent le(s) milieu(x) extérieur(s) protégé(s) par le système et les milieux non protégés ;
- des *interactions hydrauliques* entre le système et les milieux extérieurs. Pour un bief de canal, elles traduisent l'objet du système destiné à transporter l'eau du milieu amont vers le milieu aval ;
- les *interactions liées aux sollicitations mécaniques* que l'environnement va imposer au système ou que le système peut induire à l'environnement. Par exemple : les contraintes géotechniques, les chocs ou le transport solide, etc.

Les interactions entre le système et son environnement peuvent être matérialisées au moyen d'un Bloc Diagramme Fonctionnel dans lequel on distingue les relations de contact (représentées par des segments droits) et de flux (représentées par des arcs). Le lecteur intéressé peut consulter Zwingelstein (1996)

1.3.3. *Détermination des fonctions principales et technique du système*

Par l'analyse fonctionnelle externe, on obtient les fonctions accomplies par le système considéré dans sa globalité (granularité 1).

Les *fonctions principales* sont les fonctions essentielles pour lesquelles le système a été conçu. Elles sont obtenues en examinant les milieux extérieurs en interaction entre eux, via ou à travers le système.

Exemples :

- pour un bief de canal, les fonctions principales sont : contenir l'eau dans le bief, transporter l'eau dans le bief aval, fournir de l'eau à l'usine de production (ou d'autres systèmes extérieurs) ;
- pour un système d'endiguement, les fonctions principales sont : assurer la protection de la (les) zone(s) située(s) derrière les digues.

Les *fonctions techniques* résultent de la réaction du système face aux contraintes imposées par les milieux extérieurs et sont obtenues en examinant les interactions avec les milieux extérieurs.

Exemples :

- fonctions techniques d'un canal ou d'une digue : les fonctions de résistance aux aléas extérieurs ou aux agressions extérieures.

1.4. *Analyse fonctionnelle interne d'un ouvrage hydraulique à grand linéaire*

1.4.1. *Détermination des sous systèmes*

Après l'analyse globale du système, l'*analyse fonctionnelle interne* vise à étudier le fonctionnement interne du système et va rechercher les fonctions de chacun des ouvrages ou des sous-systèmes. Tout d'abord, on procède à l'*analyse structurelle*, qui permet de lister tous les composants constitutifs des ouvrages, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants.

Dans l'analyse structurelle, on procède au découpage du système en sous-systèmes, selon les limites données dans sa définition. Dans la démarche d'analyse fonctionnelle, on distingue les sous-systèmes de part les fonctions accomplies (Zwingelstein 1996), induisant généralement des sous-systèmes de structuration ou de composition différente, mais pas nécessairement, car on peut avoir des sous-systèmes physiquement identiques mais accomplissant des fonctions différentes en deux positions géographiques distinctes. Une telle analyse vise à déterminer les fonctions accomplies par chaque ouvrage (ou sous-système), de manière à analyser ultérieurement leurs modes de défaillance.

Pour les ouvrages hydrauliques ponctuels tels que les barrages, l'analyse structurelle ne pose pas de difficulté majeure car elle revient à décomposer le barrage en composants élémentaires ayant chacun une fonction distincte : drain, masque, corps, etc. Le lecteur intéressé peut consulter Peyras (2010).

L'analyse structurelle d'un ouvrage à grand linéaire est plus complexe. Elle va consister à déterminer les sous-systèmes homogènes du linéaire en terme d'analyse fonctionnelle. Ceci revient à la recherche des tronçons de linéaire d'ouvrage hydraulique, homogènes en terme fonctionnel. Il s'agit donc de définir des tronçons sur lesquels sont réalisées les mêmes fonctions principale et techniques.

L'analyse fonctionnelle interne des biefs de canal et des systèmes d'endiguement est différente de par la fonctionnalité de ces ouvrages.

Pour un bief de canal, l'analyse structurelle ne pose pas de difficultés particulières et est réalisée de façon identique à celle d'un ouvrage ponctuel. En effet, la fonction principale de chaque tronçon d'un canal, quelle que soit sa longueur, est identique et vise à transporter l'eau vers l'aval ou à contenir l'eau.

De fait, seules les fonctions techniques sont discriminantes et dicteront l'analyse structurelle. On procède alors à un découpage des remblais du canal selon la seule constitution structurelle du remblai. On détermine ainsi les tronçons de biefs présentant un profil structurel homogène, conduisant ainsi à un découpage par tronçon de profil structurel identique.

Pour un système d'endiguement, l'analyse structurelle est plus complexe et on ne peut pas se contenter d'une analyse par tronçon de composition homogène. En effet, chaque partie du linéaire de digue est dédiée à la protection d'une zone particulière identifiée par les études hydrauliques. Il est donc nécessaire d'examiner la fonction principale de protection de chaque linéaire de digue.

Par ailleurs, il faut également examiner les fonctions techniques accomplies par les linéaires de digues et donc prendre en compte la composition et la structuration des différents profils. En effet, pour deux secteurs de digues constitués de façon différente (par exemple un secteur avec étanchéité amont et un secteur en remblai homogène), on obtient des fonctions techniques différentes.

L'analyse structurelle d'un système d'endiguement est donc réalisée en déterminant les tronçons homogènes en termes de fonction principale et de fonctions techniques. Cela conduit à formuler que les tronçons de digues d'un système d'endiguement sont obtenus par découpage du linéaire de manière à obtenir pour chaque tronçon une même fonction principale et les mêmes fonctions techniques.

Du point de vue pratique et de l'ingénierie, on découpe les sous-systèmes d'un système d'endiguement en tronçons présentant la même composition et structuration et, selon les cas de figure, protégeant une même zone.

#### 1.4.2. Détermination des fonctions principales des sous-systèmes

La *fonction principale* d'un sous-système d'un ouvrage hydraulique à grand linéaire traduit l'essence même du tronçon de l'ouvrage hydraulique linéaire étudié.

##### Exemples :

- pour un tronçon de bief de canal, la fonction principale est de transporter l'eau vers l'aval du tronçon ou de contenir l'eau dans le tronçon.

- pour un tronçon de digue du système d'endiguement étudié, la fonction principale est la fonction de protection de la (ou les) zone(s) protégée(s). L'analyse des fonctions de protection des tronçons du système d'endiguement est établie par cartographie de la zone présumée protégée et les études hydrauliques.

#### 1.4.3. Détermination des fonctions techniques des sous-systèmes

Les *fonctions techniques* d'un sous-système d'un ouvrage hydraulique à grand linéaire traduisent la réaction du sous-système étudié face aux interactions avec les milieux extérieurs.

Exemples :

- pour un tronçon d'un bief de canal ou d'un système d'endiguement, les fonctions techniques sont les fonctions de résistance aux mécanismes affectant les ouvrages : fonction de résistance à l'érosion interne, fonction de résistance au glissement, fonction de résistance à l'affouillement, etc.

- pour un tronçon d'un système d'endiguement, on trouve également une fonction technique de résistance à la surverse ou de non débordement jusqu'à la crue de projet de protection.

## 2. APPLICATION 1 : ANALYSE FONCTIONNELLE D'UN SYSTEME DE PROTECTION TORRENTIELLE

L'étude de dangers « prototype » des digues de protection contre les crues du torrent de La Salle (Hautes-Alpes), conduite par le Cemagref et les services RTM (Restauration des Terrains en Montagne) à la demande du Ministère en charge de l'Ecologie, vise à aborder l'ensemble des questions rencontrées sur les études de dangers des digues des torrents de montagne - cours d'eau caractérisés par leur forte pente et par la prépondérance des phénomènes de transports solides (charriages et/ou laves torrentielles) – et les prendre en compte dans la démarche de caractérisation et d'évaluation des risques propres à ce type d'ouvrages hydrauliques à grand linéaire particuliers de défense.

### 2.1. Définition du système étudié

Pour ces digues de torrent, le périmètre des ouvrages ou système endigué étudié(s) englobe les digues proprement dites (digues en remblai homogène ou à structure composite intégrant en parement un ouvrage de protection enroché ou en béton), dès lors que leur hauteur dépasse 1 m, et leurs fondations. L'endiguement du torrent de La Salle n'est pas continu en ce sens que les tronçons de digue sont parfois séparés par des tronçons de berge dépourvus de digue (même déportée) ou comportant des « digues » de hauteur inférieure à 1 m (cordons de curage ou dépôts torrentiels naturels) : soit 900 m de digues, réparties entre rive gauche et rive droite, pour 750 m de cours du torrent sur son cône de déjection.

Le bassin versant torrentiel en amont de la cote 1480 m (sommet du cône de déjection), le lit torrentiel sur son cône corrigé par des seuils ou des protections de berge, les ponts ou passerelles qui le traversent, l'extrémité aval du cours du torrent avant sa confluence avec la rivière Guisane, la Guisane elle-même au niveau et en aval de cette confluence et, enfin, les zones inondables rive gauche et rive droite du cône forment l'environnement du système.

### 2.2. Analyse fonctionnelle externe

La description de l'environnement du système et de ses milieux extérieurs s'inscrit dans la phase de l'analyse fonctionnelle externe. Elle vise à examiner les milieux extérieurs en interaction avec le système d'endiguement et à définir les interactions entre les milieux extérieurs et le système.

Ces interactions peuvent être de différentes natures :

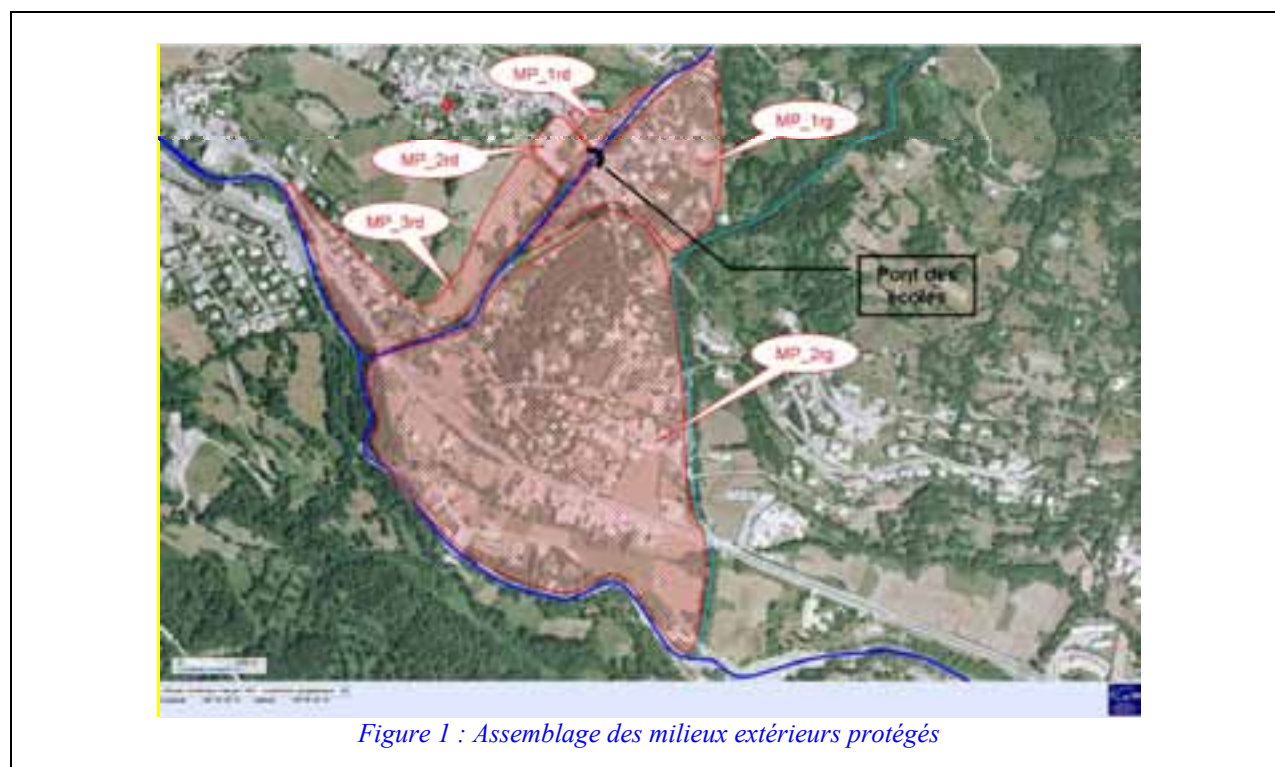
- les interactions hydrauliques entre le système et les milieux extérieurs : elles traduisent notamment les milieux extérieurs protégés par le système ;
- les interactions liées aux sollicitations mécaniques (*Exemples* : les chocs, l'usure, etc.) que l'environnement (*Exemple* : les écoulements torrentiels) va imposer au système.

Notons que contrairement au cadre d'ouvrage hydraulique à grand linéaire classique tels que des digues de canaux ou de protection, les interactions ne se limitent pas seulement à une problématique « d'eau claire ». Le transport solide est à la fois un effet de l'écoulement et une cause de modification des conditions d'écoulement. La dynamique torrentielle introduit des contraintes spécifiques sur les ouvrages du système, en termes de variation de la cote du fond minimale (suppression d'appui en fondations, affouillement) ou maximale (débordement). De plus, les hypothèses à considérer peuvent être multiples et très variées, et les scénarios très complexes, selon les hypothèses de fonctionnement (ou de dysfonctionnement) du milieu « extérieur » amont (bassins versants amont).

Les milieux extérieurs interagissant directement avec l'ouvrage hydraulique à grand linéaire sont identifiés par une analyse spatiale des secteurs en contact avec le système d'endiguement. Ces milieux extérieurs induisent différentes interactions atteignant le système. Les limites des découpages entre deux milieux extérieurs contigus résultent de choix exprimant des interactions particulières, en particulier en termes de protection. Ils sont résumés dans le tableau suivant :

| Type                                                                        | Milieux extérieurs                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Environnement lié à l'eau et aux transports solides et/ou érosions associés | Bassins versants amont                                                                                     |
|                                                                             | Lit du torrent entre ses digues et/ou ses berges, ainsi que les ouvrages de correction qui y sont présents |
| Milieux extérieurs protégés                                                 | Milieu extérieur protégé en rive droite                                                                    |
|                                                                             | Milieu extérieur protégé en rive gauche                                                                    |

**Tableau 1 : les milieux extérieurs au système d'endiguement**



Il est pertinent de diviser les milieux protégés rive gauche et rive droite en respectivement deux et trois sous-zones (figure 1). Ceci permet de tenir compte des différentes zones protégées : i) les débordements ou ruptures de digue rive gauche du torrent de La Salle qui se produiraient en aval du « pont des écoles » ne peuvent pas impacter la sous-zone en amont de ce chemin ; ii) le pont des écoles lui-même constitue un point sensible du cours actuel du torrent, avec un risque fort d'embâcle et de débordement ; iii) le secteur de l'école en rive droite est un milieu extérieur protégé particulier.

### 2.3. Analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle interne vise à étudier le fonctionnement interne du système. Elle consiste en une analyse structurale qui permet de lister tous les ouvrages constitutifs du système d'endiguement, de repérer leur position géographique au sein de l'aménagement et de déterminer leurs interactions avec les milieux extérieurs.

Pour ce faire, on procède au découpage du système, selon les limites données dans sa définition, en tronçons de digue homogènes placés dans des environnements également homogènes. Une telle analyse permet de déterminer les fonctions accomplies par chaque tronçon de digue, de manière à analyser ultérieurement leurs modes de défaillance.

Le principe de l'analyse fonctionnelle qui régit le découpage du système en tronçons est le suivant :

- la fonction principale tout le long d'un même tronçon est identique, c'est-à-dire que chaque tronçon est destiné à protéger un même ensemble de zones du milieu extérieur. Exprimé en termes de défaillance, cela signifie qu'une défaillance au droit d'un profil de la digue, quel que soit le lieu du profil dans le tronçon considéré, est susceptible de toucher une surface incluse dans le même ensemble de zones exposées et conduit à des conséquences dont la borne supérieure est identique ;
- les fonctions techniques pour chaque tronçon sont identiques, i.e. le profil de la digue est structurellement homogène sur un même tronçon.

#### 2.3.1. Granularité de l'étude et caractérisation des tronçons de digue

L'ouvrage hydraulique à grand linéaire objet de notre étude est constitué d'un ensemble d'ouvrages de génie civil, eux-mêmes pouvant être décomposés en composants élémentaires. Trois niveaux de granularité permettant de définir l'échelle spatiale de description de l'aménagement sont considérés :

- granularité 1 : le système dans son ensemble, c'est-à-dire l'aménagement hydraulique de protection contre les débordements du torrent ;
- granularité 2 : les tronçons homogènes de digues, considérés comme des sous-systèmes ;
- granularité 3 : les composants des tronçons de digue constituant les ouvrages (*Exemples* : mur et remblai), les ouvrages parafeuilles, les épis, etc.

Les niveaux de granularité inférieure (*Exemples* : matériaux constituant les différents composants) ne sont pas pris en compte.



Figure 2 : découpage structurel du système d'endiguement en 9 tronçons

Dans le présent article, nous déclinons la méthodologie d'analyse sur le tronçon 1-RG (soit le tronçon de digue rive gauche le plus amont du système), pris comme exemple. Ce tronçon est intéressant car il a fait l'objet de travaux de rehaussement suite à la crue de 1988 lors de laquelle le torrent avait failli déborder à son niveau.

### **Description structurelle du tronçon n°1-RG**

Le tronçon n°1 - RG a comme limites amont et aval un barrage (ou seuil) de correction torrentielle : à l'amont, l'ouvrage transversal B13 et, à l'aval, l'ouvrage transversal B14. Sa longueur est de 25 m.

L'ouvrage est constitué d'une construction mixte de blocs de béton préfabriqués et d'enrochements, pour une hauteur totale de 2 m côté torrent (figure 3), probablement fondée sur une ancienne digue à caissons bois édifée après la crue de 1948. En aval du seuil B13, la hauteur de la digue côté extérieur dépasse 4 m (figure 4) ; au droit du seuil B14, elle s'abaisse à 1,5 m.

. Caractéristiques hydrauliques :

|      | Pente du lit avant correction | Pente du lit du torrent après correction |
|------|-------------------------------|------------------------------------------|
| 1-RG | 23%                           | 17%                                      |

- Section mouillée minimale à débit de plein bord : 15 m<sup>2</sup> (barrage B14)



*Figure 3 : Tronçon 1-RG entre les barrages B13 et B14, vu depuis l'aile rive droite du barrage B13 (vue amont-aval). La digue est rehaussée (rangée de blocs de béton et enrochements)*



*Figure 4 : Parement extérieur enroché du tronçon 1-RG vu depuis son pied (vue amont-aval).  
Côté milieu extérieur protégé, la hauteur de la digue est importante et atteint 4,5 m par rapport au point le plus bas du terrain naturel. Le parement extérieur de la digue est totalement enroché, avec des blocs de grosse taille.*

### 2.3.2. Fonctions principales

La fonction principale de protection de zones du cône de déjection exposées aux crues torrentielles se traduit par une fonction principale de non débordement du torrent hors de son lit pour toute crue d'intensité au plus égale à celle de la crue de projet de protection ; ce que nous décrivons de la façon suivante : « la digue doit contenir le torrent dans son lit en tout point du tronçon de digue étudié et sur la rive concernée, pour toute crue torrentielle d'intensité inférieure ou égale à l'événement de projet de protection ».

L'analyse de la fonction principale – c'est-à-dire la fonction de protection requise – de chaque tronçon est établie à travers la description des sous-zones des milieux extérieurs censées être protégées par le tronçon étudié. Pour cela, il est pris en compte notamment l'analyse fonctionnelle externe (définition des milieux extérieurs protégés), le Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) et son zonage de l'aléa torrentiel, mais aussi l'expertise du groupe de travail mis en place autour de l'étude de dangers.

Exemple : fonction principale du tronçon n°1-RG

Ce tronçon de digue rive gauche étant situé à l'extrémité amont du système d'endiguement (cf. figure 2), le milieu extérieur qu'il défend comprend logiquement l'ensemble du milieu protégé rive gauche. Ceci ne veut pas dire, bien sûr, que la totalité de cette surface serait impactée, lors d'une unique crue, en cas de débordement ou de défaillance du tronçon de digue. Par contre, elle constitue l'enveloppe théorique maximale des trajets possibles que pourrait prendre une lave torrentielle ayant débordé de l'endiguement du tronçon.

Une défaillance de ce tronçon serait donc particulièrement préjudiciable car il domine les deux sous-zones du milieu protégé rive gauche qui contiennent la majorité des enjeux. En outre, la forte dénivelée du parement extérieur de la digue communiquerait une forte énergie cinétique à une crue débordante.

### 2.3.3. Fonctions techniques

Les fonctions techniques : elles traduisent la réaction de l'ouvrage étudié face aux interactions avec les milieux extérieurs. Pour un tronçon de digue du système d'endiguement étudié, les fonctions techniques sont les fonctions de résistance aux mécanismes de dégradation affectant les digues et la fonction de non débordement jusqu'à la crue de projet de protection.

Les fonctions de résistance peuvent être assurées par l'ouvrage dans son ensemble (*Exemple* : corps de digue ou fondation auto-filtrant dans leur masse pour la fonction de résistance à l'érosion interne) ou par un composant de cet ouvrage (*Exemple* : mur maçonné ou protection en enrochements contre le parement côté torrent pour la fonction de résistance à l'érosion latérale).

Le tableau suivant résume les fonctions techniques de résistance que les tronçons de digues doivent accomplir :

| Fonctions techniques                     | Description des fonctions techniques                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Résistance à l'affouillement ou incision | La fondation et le pied de parement intérieur (ou côté torrent) de la digue doivent résister aux effets de l'incision du torrent.                                                                    |
| Résistance à l'érosion latérale          | Le parement intérieur (ou côté torrent) de la digue doit résister aux effets de l'érosion latérale du torrent.                                                                                       |
| Résistance aux chocs localisés           | Le parement intérieur (ou côté torrent) de la digue doit résister aux chocs causés par les blocs et/ou les troncs d'arbres transportés par les laves torrentielles.                                  |
| Résistance à la surverse                 | La digue résiste à un débordement fortuit par delà sa crête.                                                                                                                                         |
| Résistance à l'érosion interne           | Le corps et la fondation de la digue doivent résister à l'érosion interne, en cas de crue uniquement liquide de période de retour de même ordre de grandeur que l'événement de projet de protection. |

*Tableau 2 : Les fonctions techniques de résistance des tronçons de digue*

Les fonctions techniques définies ci-dessus (tableau 2) sont, quant à elles, évaluées au travers de deux critères d'analyse :

. *Le niveau de contrainte* : il qualifie, à l'échelle du tronçon et pour la fonction technique considérée, le niveau de sollicitation appliqué au tronçon de digue pour l'aléa de référence (crue torrentielle de projet de protection). Ce niveau de contrainte est décrit selon quatre modalités qualitatives : négligeable, faible, modéré, fort ;

. *Le niveau de résistance* : il qualifie la propension du tronçon de digue à résister à un état-limite donné correspondant à la fonction technique. Le niveau de résistance est décrit selon quatre modalités qualitatives : excellent, fort, moyen, faible.

Les fonctions techniques sont ainsi évaluées indépendamment des enjeux à protéger par le tronçon de digue.

Le tableau suivant illustre fonctions techniques de résistance du tronçon n°1-RG.

| Fonctions techniques                     | Niveaux de contraintes (négligeable, faible, modéré, fort)                                                                                                                                    | Niveaux de résistance (excellent, fort, moyen, faible)                                                                                                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Résistance à l'affouillement ou incision | <b>Négligeable</b> , car le lit du torrent est fixé par le barrage B14 et que le tronçon est court.                                                                                           | <b>Indéterminé</b> , selon nature et profondeur de la fondation.                                                                                                    |
| Résistance à l'érosion latérale          | <b>Modéré</b> , car un méandrement est toujours possible entre les barrages B13 et B14.                                                                                                       | <b>Excellent</b> , grâce à la nature du parement intérieur du tronçon (enrochements et blocs de béton).                                                             |
| Résistance aux chocs                     | <b>Modéré</b> , car l'implantation du tronçon de digue est légèrement oblique par rapport à l'écoulement et que l'axe rive à rive du barrage B13 présente un léger angle avec le barrage B14. | <b>Excellent</b> , grâce à la nature du parement intérieur du tronçon (enrochements et blocs de béton).                                                             |
| Résistance à la surverse                 | <b>Fort à modéré</b> , selon l'état plus ou moins engravé du lit au droit du tronçon.                                                                                                         | <b>Moyen</b> , du fait de la nature de la crête et du parement extérieur du tronçon (enrochements). A contrario, la hauteur de digue est importante côté extérieur. |
| Résistance à l'érosion interne           | <b>Négligeable</b> , car gradient imposé par la crue liquide de projet très faible et durée des crues brève.                                                                                  | <b>Moyen</b> , selon constitution exacte de la fondation et du corps de digue.                                                                                      |

*Tableau 3 : Les fonctions techniques de contraintes et de résistance du tronçon de digue n°1-RG*

### 2.3.4. Tableau récapitulatif d'Analyse Fonctionnelle

La démarche d'analyse décrite ci-dessus sur l'exemple du tronçon 1-RG a été appliquée aux 9 tronçons composant le système étudié.

| Nom du tronçon | Caractéristiques principales                                                  | Longueur du tronçon (m) | Fonction de protection : sous-zones des milieux extérieurs protégées. | Principal risque de défaillance                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>1-RG</b>    | Digue rehaussée enrochements                                                  | 25                      | MP 1_rg et MP 2_rg                                                    | Débordement en rive gauche du barrage B14                       |
| <b>2-RG</b>    | Mur-digue béton armé                                                          | 21                      | MP 1_rg et MP 2_rg                                                    | Débordement en rive gauche de la passerelle 1477,72             |
| <b>3-RG</b>    | Mur-digue béton armé en parement digue en caissons bois                       | 100                     | MP 1_rg et MP 2_rg                                                    | Débordement en section courante                                 |
| <b>4-RG</b>    | Berge partiellement endiguée                                                  | 131                     | partie de MP 1_rg et MP 2_rg                                          | Débordement en rive gauche du barrage B18 ou du pont des Ecoles |
| <b>5-RG</b>    | Digue et chenal en-déblai remblai                                             | 186                     | MP 2_rg                                                               | Débordement en rive gauche suite à divagation du torrent        |
| <b>6-RG</b>    | Confortement de berge en enrochements maçonnés, digue large de faible hauteur | 159                     | partie de MP 2_rg                                                     | Débordement au niveau de la passerelle aval                     |
| <b>1-RD</b>    | Mur-digue béton armé                                                          | 58                      | MP 1_rd, MP2_rd et MP 3_rd                                            | Contournement par l'amont                                       |
| <b>2-RD</b>    | Digue rehaussée et confortée côté torrent                                     | 64                      | MP2_rd et MP 3_rd                                                     | Erosion côté torrent de la berge soutenant la digue rehaussée   |
| <b>3-RD</b>    | Digue rustique à talus côté torrent reprofilé                                 | 154                     | Partie de MP 3_rd                                                     | Débordement en section courante ou au niveau de la passerelle   |
| <b>Total</b>   |                                                                               | 898                     |                                                                       |                                                                 |

Tableau 4 : Tableau récapitulatif de l'analyse fonctionnelle

En conclusion, l'analyse fonctionnelle du système est synthétisée par le tableau d'analyse fonctionnelle suivant qui récapitule, pour chaque tronçon du système d'endiguement, les sous-zones du milieu extérieur protégé, ses caractéristiques principales, la fonction de protection du tronçon et son principal risque de défaillance.

## 3. APPLICATION 2 : ANALYSE FONCTIONNELLE D'UN SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL

Dans le cadre de la réalisation des études de dangers des trois systèmes d'endiguement de classe A de Loire moyenne (vals d'Orléans, de Tours et de l'Authion), le Cemagref développe et applique une méthodologie d'analyse fonctionnelle générique adaptée à la complexité des systèmes endigués fluviaux. Pour illustrer ce document, nous prendrons l'exemple d'une application de l'analyse fonctionnelle au système endigué du val d'Orléans. Il est important de noter que compte tenu de l'avancement actuel de l'étude, les données diffusées dans ce document ne constituent en aucun cas des résultats mais bien des exemples non validés et utilisés pour illustrer la méthodologie.

### 3.1. Définition du système

#### 3.1.1. Définition du système et de ses contours

Sur ses 450 km, la Loire moyenne compte environ 700 km de digues qui se répartissent en plus de 30 systèmes endigués dénommés « vals ». Le système étudié dans cette application est celui de digues du val d'Orléans. Ce système est de classe A du fait de la hauteur de ses ouvrages (supérieure à 1 m) et du fort enjeu que représente sa zone protégée en termes de population (65 000 habitants). Son système d'endiguement mesure près de 44 km de long et correspond donc tout à fait à un « ouvrage hydraulique à long linéaire ». Son parcours est d'ailleurs repéré par un système de PK (points kilométriques) croissant de l'amont vers l'aval qui permet d'en faciliter la gestion. Comme la plupart des digues de Loire, il s'agit d'ouvrages essentiellement composés de matériaux alluvionnaires sableux, dont la construction s'est déroulée par étapes successives et au cours d'une histoire qui remonte parfois jusqu'au Moyen Âge. Ils comportent généralement des perrés maçonnés sur leur talus côté fleuve (bien que souvent recouverts d'une certaine épaisseur de sol) et une route bitumée sur leur couronnement.

Le système d'endiguement est principalement défini par son implantation (figure 6). Il est composé de la ligne de défense principale qui correspond au linéaire de digues de référence du point de vue de la fonction de protection et constitue généralement la limite entre la zone protégée et le cours d'eau. Dans le cas du val d'Orléans, on observe une ligne de défense principale qui définit une zone protégée en rive gauche du cours d'eau. On remarque également qu'il s'agit d'une zone protégée ouverte puisque les digues ne se reconnectent pas au coteau à l'aval du système, laissant un passage au Loiret et impliquant un risque d'inondation par remous pour la zone protégée. Les différentes ramifications de la ligne de défense principale constituent les ouvrages secondaires. Seuls les ouvrages présentant un potentiel de rupture et ayant un rôle de protection avéré ou formant la continuité d'ouvrages de protection sont à considérer. Ils sont retenus pour l'analyse lorsqu'ils impliquent une forte différence dans les scénarios de propagation des inondations dans le val selon qu'ils rompent ou non. Dans le cas présent, il s'agit de remblais autoroutiers et ferroviaires, ainsi que d'ouvrages de protection (anciennes digues, digues latérales de déversoir).

#### 3.1.2. Définition des granularités de l'analyse fonctionnelle

Du fait de son linéaire important, le système d'endiguement du val d'Orléans présente de nombreuses hétérogénéités qui s'expriment les questions suivantes :

- Quels sont les objectifs du système d'endiguement ?
- Comment fonctionne le système en termes hydrauliques et quels ouvrages contribuent à ce fonctionnement ?
- Quels est le niveau de protection apporté par le système d'endiguement ?
- Quels ouvrages composent le système d'endiguement du point de vue de leurs vocations autres qu'hydraulique ?
- Comment ces ouvrages sont-ils structurés en termes de composants géotechniques ?

Pour répondre à ces questions, on analyse le système à différentes granularités spatiales :

- Granularité 1 : le système d'endiguement dans son ensemble,
- Granularité 2 : les ouvrages constituant le système d'endiguement, des sous-systèmes définis par leurs fonctions principales hydrauliques,
- Granularité 3 : les composants qui constituent ces ouvrages et peuvent conduire à leur découpage en tronçons différents sur les aspects géotechniques.

#### 3.1.3. Définition des milieux extérieurs

Dans son contexte local, un système endigué fluvial correspond à l'ensemble en interaction constitué par un système d'endiguement (la ligne de défense principale et ses différentes ramifications) et son environnement (figure 5).

Ses milieux extérieurs sont donc au nombre de deux : le cours d'eau et les ouvrages hydrauliques autres implantés dans son lit (défini par les sollicitations qu'il exerce sur le système d'endiguement de par son comportement hydraulique et ses dynamiques hydro-géomorphologiques) ; la zone protégée (caractérisée par ses limites, son comportement hydraulique en cas d'inondation et les enjeux qui s'y trouvent).

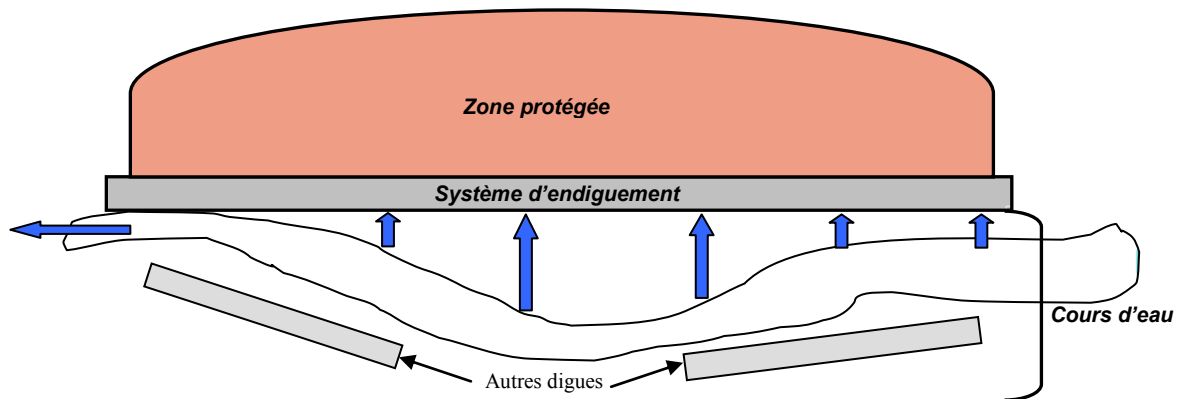


Figure 5 : Les trois composantes d'un système endigué fluvial

### 3.2. Analyse fonctionnelle externe du système d'endiguement

Cette partie de l'analyse s'attache à la description des milieux extérieurs qui composent le système endigué, ainsi qu'à leur analyse du point de vue de leurs interactions avec le système d'endiguement.

#### 3.2.1. Description et analyse du milieu extérieur « cours d'eau »

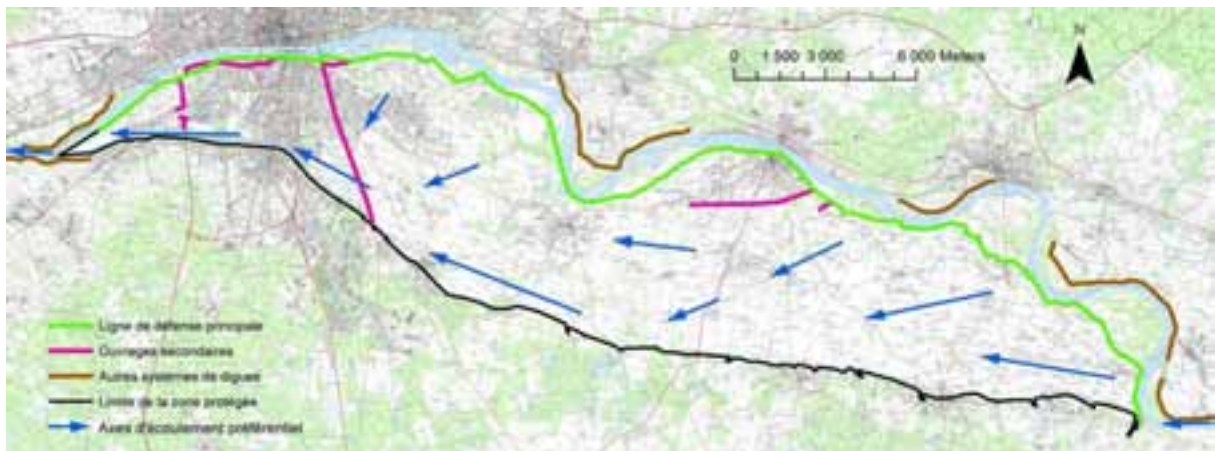
Le cours d'eau est la source principale des sollicitations pouvant s'appliquer au système d'endiguement. Celles-ci doivent être évaluées pour des périodes de crue comme en régime normal. On distingue tout d'abord les éléments pouvant avoir une influence sur le comportement hydraulique du cours d'eau. Ce sont principalement les ouvrages hydrauliques de l'environnement proche et dans le cas présent les différents linéaires de digues à proximité immédiate du système d'endiguement du val d'Orléans (figure 6). Le comportement de ces ouvrages lors des crues a un impact direct sur la nature des sollicitations hydrauliques auxquelles est soumis le système d'endiguement. En effet, leur présence a tendance à augmenter localement les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement, alors que leur rupture provoque généralement un effet inverse en écrétant les lignes d'eau en aval de la brèche.

Les dynamiques hydro-géomorphologiques en cours dans le lit actif et les sollicitations potentielles sur les digues sont également à identifier. On met notamment en évidence les secteurs de contact direct permanent entre le cours d'eau et le système d'endiguement, où le risque d'affouillement est important, ainsi que les zones où des phénomènes potentiels de déplacements latéraux et d'incision du lit en période de crues menacent particulièrement la sûreté du système d'endiguement.

#### 3.2.2. Description et analyse du milieu extérieur « zone protégée »

Concernant la zone protégée, on commence par en déterminer les limites en étudiant la topographie du val. Pour le val d'Orléans, ce travail est mené à l'aide d'un modèle numérique de terrain issu d'une acquisition Lidar aéroportée. Sur la même base, on étudie ensuite le comportement hydraulique de la zone protégée, en cas d'inondation par défaillance du système de protection, en identifiant les axes d'écoulements principaux de l'amont vers l'aval. On constate ici que les écoulements ont tendance à se concentrer en pied de coteau (au sud) et que le Loiret joue un rôle collecteur vers l'aval du système (à l'ouest). Pour les enjeux, on remarque qu'ils se répartissent entre l'agglomération d'Orléans en partie aval et un habitat rural dispersé sur l'ensemble du val où quelques localités comme Jargeau se distinguent par

un tissu urbain relativement dense (figure 6). Ils se situent globalement en dehors des axes d'écoulements principaux en cas de rupture sur l'amont du système. Ils sont par contre très exposés en cas de rupture dans les secteurs où l'urbanisation est en arrière immédiat des ouvrages.



### 3.2.3. Détermination des fonctions principales et techniques du système d'endiguement

Au vu de la configuration du système endigué, on peut identifier les *fonctions principales* du système d'endiguement étudié. Pour le val d'Orléans, ces fonctions principales sont notamment :

- d'empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée en partie amont du système ;
- de minimiser les effets de l'inondation (en imposant une inondation par remous) en partie aval ;
- de permettre la mise en sécurité des populations présentes dans la zone protégée.

On peut rassembler ces fonctions principales en disant que le système d'endiguement a une fonction principale de protection des enjeux situés dans la zone protégée.

Les *fonctions techniques* du système sont celles qui permettent la réalisation de la fonction principale du système étudié. Dans le cas présent, il s'agit donc des fonctions qui garantissent la pérennité de l'ouvrage du système d'endiguement : retenir l'eau, résister aux sollicitations extérieures, être stable...

## 3.3. Analyse fonctionnelle interne du système d'endiguement

### 3.3.1. Analyse de la fonction technique hydraulique

Cette partie de l'analyse fonctionnelle s'intéresse principalement à la ligne de défense principale. Elle correspond à une analyse de granularité 2 et consiste en la caractérisation du système d'endiguement en termes de fonctionnement hydraulique.

La première étape consiste en l'identification des sous-systèmes qui composent le système de protection et conditionnent son fonctionnement hydraulique. Les trois types de sous-systèmes du val d'Orléans sont définis par les fonctions techniques hydrauliques (ou *fonctions hydrauliques*), suivantes (figure 7) :

- les levées, qui ont pour fonction hydraulique d'empêcher l'entrée d'eau dans le val avant le dépassement de leur crête ;
- les levées à muret batardable, qui ont pour fonction hydraulique d'empêcher l'entrée d'eau dans le val avant le dépassement de la crête des levées ou de la crête des batardeaux (après leur mise en place) ;
- le déversoir, qui a pour fonctions hydrauliques :
  - d'empêcher l'entrée d'eau dans le val avant le dépassement de la crête de sa banquette fusible,
  - d'écarter les crues à son aval, après le dépassement par l'eau de la crête de sa banquette fusible, pour limiter la charge hydraulique sur les ouvrages,
  - de contrôler l'intensité des inondations dans le val, après le dépassement par l'eau de la crête de sa banquette fusible.



Figure 7 : Les différents types de sous-systèmes de la ligne de défense principale du val d'Orléans

La seconde étape de cette analyse vise la caractérisation des niveaux de protection des sous-systèmes précédemment mis en évidence. Ce travail consiste tout d'abord en le découpage de la ligne de défense principale en tronçons considérés comme homogènes du point de vue de leurs niveaux de protection. Ce découpage du système de protection est réalisé par le biais du croisement entre les différentes modélisations de lignes d'eau de crues disponibles et les cotes de crête des ouvrages qui composent la ligne de défense principale (figure 8). Un tronçon correspond à un grand linéaire de digues dont la pente des crêtes d'ouvrages est globalement parallèle et au dessus d'une ligne d'eau de crue qui en est proche et dont le niveau de protection se définit par la cote de son point le plus bas (figure 9).

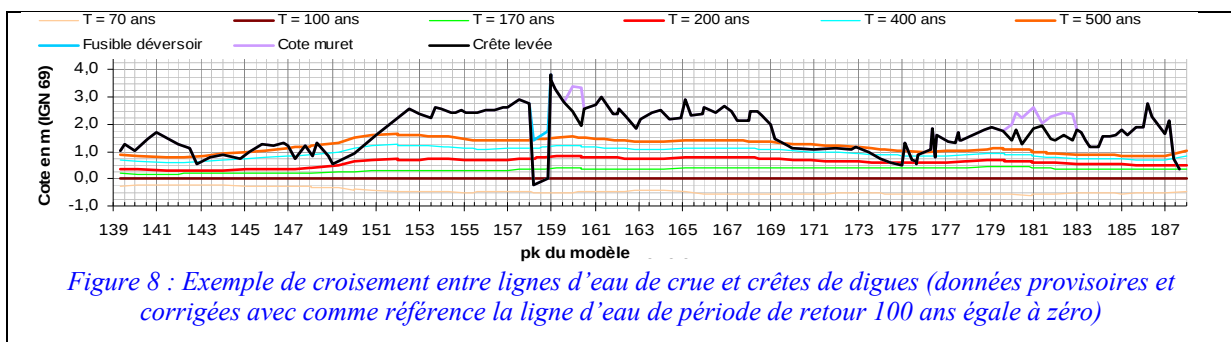


Figure 8 : Exemple de croisement entre lignes d'eau de crue et crêtes de digues (données provisoires et corrigées avec comme référence la ligne d'eau de période de retour 100 ans égale à zéro)

Les secteurs de transition entre deux tronçons de niveaux de protection différents sont soit brusques, soit progressifs (à pente moyenne uniforme sur un linéaire important). Dans le premier cas, il semble plus commode de les rattacher au tronçon juxtaposé ayant le niveau de protection le plus faible. Dans le second cas, nous les considérons comme des tronçons à part entière, alors définis par leur nature croissante ou décroissante de l'amont vers l'aval et par les valeurs de leurs extrémités en termes de niveau de protection.



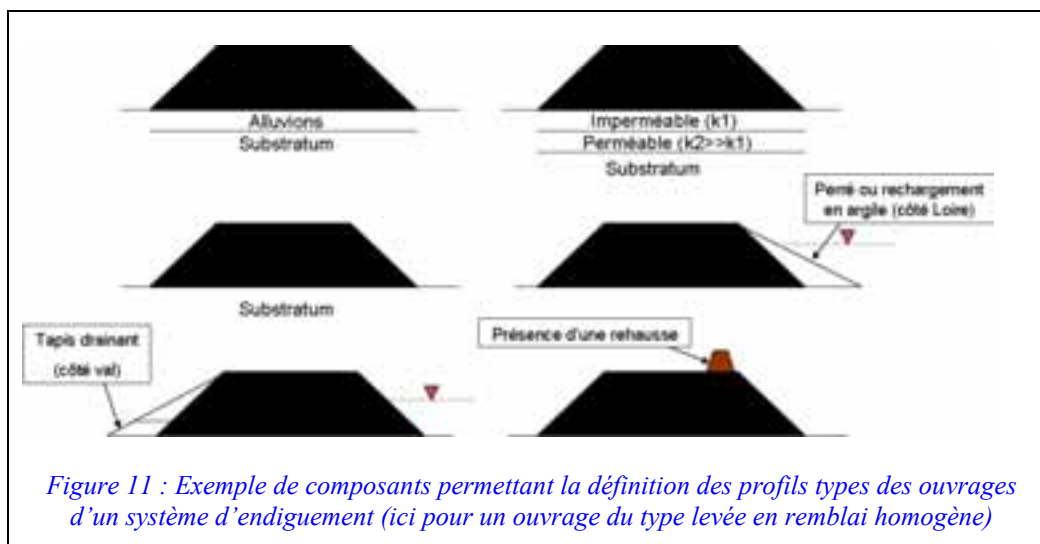
Figure 9 : Découpage de la ligne de défense principale en tronçons de niveau de protection homogène exprimé en période de retour (données provisoires)

La connaissance des points bas de chacun des tronçons permet la qualification du niveau de protection associé au système d'endiguement dans son intégralité, celui-ci étant caractérisé par le point le plus bas du système au regard des lignes d'eau de crue.

### 3.3.2. Analyse des fonctions techniques des composants des sous-systèmes

Cette analyse nécessite de faire appel à une analyse à la granularité 3 des composants des sous-systèmes de digue. Elle a pour objectif de décrire les fonctions techniques des composants géotechniques qui permettent la réalisation des fonctions principales et techniques des sous-systèmes du système d'endiguement. Ce travail doit permettre l'identification, la localisation et la description fonctionnelle des composants des différents profils en travers géotechniques types qui composent les ouvrages du système et en définissent des tronçons homogènes.

Avant de pouvoir réaliser l'analyse des fonctions techniques des composants, il faut d'abord procéder à leur identification. On réalise donc l'analyse structurelle des sous-systèmes. Sur la base de ces informations et du dossier de d'ouvrage du système d'endiguement, l'analyse structurelle permet de conduire à l'identification des différents profils en travers géotechniques types qui composent les sous-systèmes. Chacun d'entre eux est défini par la nature de ses composants géotechniques (figure 11). Ces profils sont localisés au travers du découpage des sous-systèmes en tronçons structurellement homogènes.



En dehors des ouvrages spécifiquement conçus pour la protection, un système d'endiguement peut également se composer d'ouvrages ayant aussi des vocations différentes (remblais routiers, remblais ferroviaires, quais...). Ces vocations ont un impact direct sur la nature des composants géotechniques des sous-systèmes. Les identifier constitue donc une première étape de l'analyse structurelle (figure 10). Lorsque ces ouvrages ne représentent qu'un linéaire réduit, ils peuvent être considérés comme des points singuliers (*Exemple* : les piles de pont).



Figure 10 : Les différents types d'ouvrages composant le système d'endiguement d'Orléans

L'analyse fonctionnelle des composants de chacun des profils types identifiés peut alors être réalisée. Celle-ci a pour objectif d'identifier les fonctions techniques remplies par chacun des composants pour permettre la réalisation des fonctions principales et la sûreté du sous-système auquel le profil-type considéré appartient. Les fonctions techniques propres à chacun des composants identifiés sont, par exemple, des fonctions : de portance, d'étanchéité, de drainage, de filtration, de stabilité, ou encore de protection contre l'érosion externe.

### 3.3.3. Synthèse des fonctions du système d'endiguement pour ses différentes granularités

L'analyse fonctionnelle menée sur le système d'endiguement du val d'Orléans permet la définition de ses fonctions pour les trois granularités d'analyse, allant de la fonction principale de protection du système jusqu'aux fonctions techniques des composants des profils en travers géotechniques qui composent ses sous-systèmes. Ce travail permet la mise en évidence d'un découpage du système d'endiguement en trois types de tronçons :

- les sous-systèmes définis par leurs fonctions principales hydrauliques ;
- les secteurs de sous-systèmes de niveaux de protection homogènes ;
- les subdivisions des sous-systèmes en profils en travers structurellement homogènes.

L'ensemble des fonctions peut ensuite être synthétisé par l'intermédiaire de tableaux fonctionnels pour les différentes granularités étudiées (figure 12).

| Granularité 1         |                                |                                                                              | Granularité 2 |                                                                                          | Granularité 3            |             |                      |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|----------------------|
| Système               | Fonction principale            | Fonction technique                                                           | Sous-système  | Fonctions techniques hydrauliques                                                        | Profils en travers types | Composants  | Fonctions techniques |
| Système d'endiguement | Protection de la zone protégée | Assurer la réalisation de la fonction principale et la durabilité du système | Levée 1       | Empêcher l'entrée d'eau dans le val jusqu'au niveau de protection 400 ans                | Profil 1.1               | Composant 1 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          |                          | Composant 2 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          |                          | ...         | ...                  |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          | Profil 1.2               | Composant 1 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          |                          | Composant 2 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          |                          | ...         | ...                  |
|                       |                                |                                                                              | Levée 2       | Empêcher l'entrée d'eau dans le val jusqu'au niveau de protection 500 ans                | Profil 2.1               | Composant 1 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          |                          | ...         | ...                  |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          | Profil 2.2               | Composant 1 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               |                                                                                          |                          | ...         | ...                  |
|                       |                                |                                                                              | Déversoir     | Empêcher l'entrée d'eau dans le val jusqu'au niveau de protection 200 ans                | Déversoir                | Composant 1 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               | Ecrêter les crues à son aval, après le niveau de protection 200 ans                      |                          | Composant 2 | Fonctions            |
|                       |                                |                                                                              |               | Contrôler l'intensité des inondations dans le val, après le niveau de protection 200 ans |                          | ...         | ...                  |
| ...                   | ...                            | ...                                                                          | ...           | ...                                                                                      | ...                      | ...         | ...                  |

Figure 12 : Exemple de tableau de synthèse de l'analyse fonctionnelle d'un système d'endiguement fluvial

## BIBLIOGRAPHIE

Crémona C. (dir.). *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2003.

Peyras L. *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages – Développement de méthodes d'aide à l'expertise*. Ed. Universitaires Européennes. Berlin. 199 p.

Peyras L., Boissier D., Carvajal C., Bacconnet C., Becue JP., Royet P. *Analyse de risques et Fiabilité des barrages – Application aux barrages-poids en béton*. Ed. Universitaires Européennes. Berlin. 2010. 201 p.

Serre D., Peyras L., Curt C., Boissier D., Diab Y. *Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil*. In Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, 2007, p.1298-1313.

Villemeur A. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Paris : Eyrolles, 1988, 798 p.

Zwingelstein G. *La maintenance basée sur la fiabilité*. Paris : Hermès, 1996



## MODELISATION DES CONSEQUENCES DES EVENEMENTS RETENUS DANS LES ETUDES DE DANGERS ET EXPRESSION DES GRAVITES

**Benjamin VIDEMENT**

EDF – Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH)

Savoie Technolac

73373 Le Bourget du Lac

[benjamin.videment@edf.fr](mailto:benjamin.videment@edf.fr)

**Nicole GOUTAL, Gilbert DUVIVIER**

EDF - Recherche et Développement

Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

6 quai Watier

78401 Chatou

[nicole.goutal@edf.fr](mailto:nicole.goutal@edf.fr)

### MOTS CLÉS

Onde de submersion, Onde de rupture, Rupture de digue, Rupture de vanne, MASCARET, « Etudes de Dangers ».

### KEY WORDS

Dam break flood analysis, dyke break flood analysis, gate break study, MASCARET, “Etudes de Dangers”.

### ABSTRACT

*This article deals with methodologies applied by EDF to carry out dam, dyke and gate break flood analysis as part of the “Etudes de Dangers”. The most challenging difficulty in defining these methodologies is related to the level of accuracy of the input data available.*

*Dam break flood analysis are carried out by building a hydraulic 1D model following a methodology very close to the one applied for dams subjected to PPI (“Plan Particulier d'Intervention”). Main difference is the position of the downstream boundary.*

*For dyke break flood analysis, singular situation of EDF dykes usually allows to determine flooded area by doing only a field survey. No model is built.*

*For gate break studies, the level of accuracy of topographic data compared to the discharge range studied (much lower than for dam break) is a challenging issue. Therefore, the methodology leads to define schematic cross sections for the river bed. This methodology was validated by results comparison for cases for which accurate topographic data was available.*

### RESUME

*Cette communication présente les méthodologies appliquées par EDF pour étudier, dans le cadre des Etudes de Dangers, les ondes de rupture de barrage (y compris le cas particulier des canaux) et les ondes de rupture de vanne de barrage. Les incertitudes admissibles liées au niveau de précision requis des données pour réaliser ces études constitue l'une des contraintes principales pour la mise au point de ces méthodologies.*

*Les études d'onde de rupture de barrage sont réalisées grâce à une modélisation 1D, selon une méthodologie très proche de celle déployée dans le cadre de l'établissement des PPI. La principale différence résidant dans le point d'arrêt des études.*

*Pour les études d'onde de rupture des canaux, la situation particulière des canaux d'EDF permet généralement de déterminer la zone inondable sans faire de modélisation, en se basant alors uniquement sur une visite de terrain.*

*Les études d'onde de rupture de vanne posent a priori des problèmes de précision des données topographiques disponibles par rapport à la gamme de débits générés (beaucoup plus faibles que dans le cas des ruptures de barrage). Il a donc été nécessaire de mettre au point une méthodologie particulière passant par la définition d'un lit mineur schématique. Des comparaisons de résultats pour des cas où l'on disposait de données topographiques précises ont permis de valider cette méthodologie.*

## 1. INTRODUCTION

L'article 8 de l'annexe à l'Arrêté du 18 juin 2008 relatif aux *Etudes de Dangers des barrages et des digues* indique : « *Chaque accident potentiel est caractérisé par sa probabilité d'occurrence, l'intensité et la cinétique de ses effets et la gravité des conséquences pour la zone touchée. Une étude de propagation de l'onde sera fournie pour l'accident correspondant à la rupture de l'ouvrage ...* » Il est donc clairement indiqué qu'une *étude d'onde de rupture* doit être réalisée pour chaque barrage relevant de cet arrêté. « *... et, si nécessaire, pour d'autres accidents présentant un niveau de risque comparable.* » Cette partie du texte (lue à la lumière du *guide de lecture des Etudes de Dangers des barrages*) indique qu'on peut être amené à réaliser une étude d'onde de rupture d'une vanne du barrage étudié.

En 2011, EDF est l'exploitant d'environ 240 barrages relevant de cet Arrêté. Parmi ces barrages, environ 70 sont des barrages soumis à PPI (Plan Particulier d'Intervention) pour lesquels une étude d'onde de rupture avait déjà été réalisée. Pour les autres, il a fallu définir une méthodologie d'étude de l'onde de rupture du barrage et d'une de ses vannes. On notera que parmi ces ouvrages, une quinzaine sont des canaux pour lesquels une méthodologie spécifique a été développée.

L'objet du présent document est la présentation de ces méthodologies.

## 2. METHODOLOGIE D'ONDE DE RUPTURE DE BARRAGE

### 2.1. Historique

Lors de la réalisation de ses premières Etudes de Dangers, EDF appliquait la méthode CASTOR développée par le CEMAGREF (cf. Réf. [1]) pour déterminer les impacts de la rupture de barrage. Il s'est rapidement avéré qu'en passant à une modélisation 1D plus complète (très proche de celle mise en place lors de l'établissement des PPI), on obtenait des résultats plus précis et répondant mieux aux objectifs. C'est cette méthodologie qui a été retenue par EDF et qui est présentée dans ce présent document.

Cette méthodologie a été mise au point par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de EDF-R&D (cf. Réf. [2]).

### 2.2. Philosophie de la méthodologie – Objectif de la modélisation

On rappelle tout d'abord que la méthodologie retenue est très proche de celle qui avait été mise en place pour les études d'onde de rupture réalisées dans le cadre de l'établissement des PPI. Pour EDF, cette méthodologie avait été déjà mise au point par le LNHE (cf. Réf. [3]).

La modélisation est l'outil retenue pour évaluer la zone qui pourrait être inondée par une rupture du barrage et la cinétique associée. Pour autant, l'objectif final n'est pas la détermination d'une ligne d'eau précise reflétant la réalité d'un phénomène.

Les hypothèses à retenir pour les simulations de ce type basées sur la résolution monodimensionnelle des équations de Saint-Venant sont liées aux scénarios de défaillance retenus pour le barrage et à une modélisation hydraulique classique (géométrie, coefficient de frottement, etc.). Les hypothèses concernant plus particulièrement les tenues des ouvrages aval et les modes de rupture des barrages aval sont généralement des hypothèses « fortes » dans le sens où elles ont un impact important sur les résultats. On rappelle les paramètres à définir :

- Définition de la géométrie cohérente avec les objectifs de l'étude
- Caractéristiques hydrauliques de la zone d'étude (coefficient de Strickler, perte de charge singulière, ...),
- Point d'arrêt de l'étude,
- Etat hydraulique initial de la zone d'étude (retenue et vallée en aval du barrage étudié),
- Mode de rupture du barrage,
- Conditions hydrologiques (rupture sur crue ?),
- Comportement des barrages aval (rupture à l'arrivée de l'onde ?),
- Comportement des ponts (rupture ? totale ou partielle ? embâcle ?) ou des seuils.

Au regard du nombre important d'hypothèses à faire et à leur impact sur les résultats, deux principes ont été retenus :

1. Choisir des hypothèses conservatives, dans la mesure du possible, conduisant à fournir des résultats « sécuritaires » en termes de niveau d'eau et de temps d'arrivée de l'onde.
2. Cohérences de la modélisation en termes de précision avec les objectifs de l'étude. Ne pas essayer d'apporter une « fausse précision » au calcul.

Définir la méthodologie d'étude des ondes de rupture revient donc à définir une méthodologie de détermination de ces paramètres. C'est l'objet des paragraphes suivants.

### 2.3. Code de Calcul

Les calculs de propagation de l'onde de rupture sont effectués avec le code MASCARET développée par le LNHE (cf. Réf. [4]), code de modélisation hydraulique 1D basé sur la résolution des équations de Saint-Venant.

### 2.4. Géométrie

#### 2.4.1. Géométrie de la vallée

La forme de la retenue et de la zone d'expansion de l'onde de submersion est traduite par la définition de profils en travers représentatifs des principales variations de géométrie. La zone d'expansion de l'onde est généralement représentée par un unique bief, seuls les affluents présentant un risque particulier (forte population à l'amont de la confluence par exemple) sont pris en compte dans la modélisation.

Le choix des données d'entrée pour la définition de la géométrie est capital puisque la précision des résultats en est directement dépendante. EDF utilise un modèle numérique de terrain (MNT) de maille 5m, dont la précision verticale pour des terrains de pentes inférieures à 10° et en zones non obstruées est de 1 m, et la précision horizontale est de 2 m. Ce niveau de précision apparaît suffisant pour l'objectif recherché. Ce MNT constitue la principale donnée d'entrée pour définir la géométrie du modèle hydraulique et peut être localement enrichi par

- Les cartes IGN au 1 / 25 000<sup>ème</sup>,
- Les profils en long de cours d'eau levés par le service du Nivellement Général de la France et mis à disposition sur le site internet de l'IGN,
- Des données topographiques fournies par l'exploitant du barrage étudié (bathymétrie de la retenue, plan topo dans la zone du barrage, profils en travers à l'aval immédiat du barrage, etc.),
- Des levés plus récents, etc.

**L'acquisition des MNT présente globalement une amélioration de la qualité des sources d'information pour la définition de la géométrie du modèle** (en comparaison de ce qui était fait dans le cadre de l'établissement des PPI). De plus, associé aux outils de SIG, l'utilisation de MNT permet une automatisation et donc **une grande simplification de la définition des profils en travers** définissant le modèle, de même que pour le dessin des zones inondables.

#### 2.4.2. Ouvrages

En dehors des barrages aval (qui sont traités au § 2.8 Barrage aval), seuls les ouvrages qui ont un impact sur la ligne d'eau devraient être intégrés à l'étude ; ces ouvrages peuvent être des ponts, des seuils, des remblais (SNCF, autoroute, etc.), etc. Dans la pratique, il est généralement difficile d'estimer si un pont va résister partiellement ou non au passage l'onde et avec quelle cinétique. On peut également envisager qu'une partie du pont soit obstrué par des embâcles, il est, par conséquent, difficile de connaître son

impact sur la ligne d'eau. Il n'est donc généralement pas pertinent d'essayer de modéliser un pont avec une grande précision.

On a ainsi retenu les principes suivants :

- Dans le cas où la rupture totale et immédiate du pont paraît présenter peu de doutes (généralement les ponts se trouvant immédiatement à l'aval du barrage principal ou aval s'il cède, ou les ponts très « fragiles »), on ne modélise pas le pont.
- Dans le cas où il n'y a pas d'enjeux dans la zone de remous du pont, il n'est pas modélisé.
- Dans les autres cas, afin de simplifier la modélisation, on peut ne prendre en compte que les culées et les piles du pont. Ceci peut se justifier de la manière suivante :
  - si le niveau d'eau atteint est inférieur au niveau bas du tablier, il est inutile de modéliser le tablier puisqu'il n'a aucun impact hydraulique ;
  - si le niveau d'eau dépasse le tablier, on peut estimer que tout ou partie du tablier pourrait être arraché.

Ces principes ne sont pas contraignants. On peut y déroger en fonction des caractéristiques des ponts, de la précision des éléments récoltés, si l'on a des indications plus précises sur leur tenue, ...

On tient un raisonnement similaire pour la prise en compte des autres ouvrages (seuils, remblais, etc.).

## 2.5. Coefficients de rugosité (Strickler)

Les coefficients de Strickler prennent en compte, au niveau du calcul hydraulique, la rugosité du lit de la rivière (mineur et majeur) ainsi que sa morphologie.

Si, dans le cadre d'une étude de ligne d'eau classique, on va s'attacher à caler ces coefficients à partir d'événements passés connus, il n'en est pas de même dans le cadre des études d'onde de rupture de barrages. En effet, il n'y a généralement aucun événement passé connu d'une ampleur comparable à celle de la rupture du barrage (tout au moins dans son aval immédiat). Un calage n'est donc généralement pas possible. De plus, réaliser un calage de ces coefficients est un travail lourd (collecte et traitement des données de terrain) qui, au regard des autres incertitudes, pourrait amener une « *fausse précision* » à l'étude.

Les principes suivants ont donc été retenus :

Dans la zone d'étude les hauteurs d'eau atteintes par l'onde sont telles que l'on peut faire abstraction de la séparation entre lit mineur et lit majeur. Les coefficients de Strickler du lit unique sont déterminés par le responsable de l'étude à partir du barème validé par le CTPB pour les études PPI repris dans le tableau ci-dessous.

| <i>Caractéristiques de la vallée</i>                                                                | <i>Coefficients de Strickler</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Vallée régulière avec une végétation de hauteur négligeable devant la hauteur présumée de l'onde    | 30                               |
| Vallée régulière avec des arbres et des haies de hauteur comparable à la hauteur présumée de l'onde | 25                               |
| Vallée tortueuse avec une végétation négligeable                                                    | 25                               |
| Vallée tortueuse avec une végétation dense et de hauteur comparable à la hauteur présumée de l'onde | 20                               |
| Gorges rocheuse encaissées et tortueuses<br>Traversée des villes                                    | 15                               |

*Tableau 1 - Coefficients de Strickler*

De même que pour la prise en compte des ouvrages aval, ces principes ne sont pas contraignants, il revient au chargé d'étude d'y déroger s'il estime, par exemple, qu'une séparation lit mineur / lit majeur apparaît nécessaire à son cas particulier ou s'il dispose de données sur une crue passée ayant affectée la plaine d'inondation.

## 2.6. **Etat hydraulique initial de la zone d'étude – Conditions hydrologiques**

Pour la définition de l'état hydraulique initial de la zone d'étude se pose le problème du caractère « non entièrement défini » du phénomène étudié. Il apparaît donc nécessaire de faire des hypothèses de calcul. Les principes suivants ont été retenus :

- **Etat hydraulique des retenues** : Les retenues concernées par l'étude (la retenue du barrage principal et la retenue des éventuels barrages aval) sont considérées initialement au niveau des Plus Hautes Eaux (« hypothèse conservatrice »).
- **Etat hydraulique des vallées** : On considère que la vallée est sèche à l'aval du barrage principal (hormis dans les retenues des barrages situés à l'aval). Cette hypothèse se justifie car dans la zone d'étude (cf. § 2.9 Point d'arrêt), les écoulements naturels des cours d'eau sont faibles comparés aux débits générés par la rupture du barrage (« fausse précision »). Si l'onde arrive au niveau de la mer, la cote fixe à imposer correspond généralement à une cote moyenne majorée d'une surcote décennale.
- **Conditions hydrologiques** : On ne considère aucun apport (aucun débit entrant) dans le modèle : ni par ruissellement ni par les affluents.

## 2.7. **Mode de rupture du barrage principal et hydrogramme de vidange**

De même que pour l'état hydraulique initial, le mode de rupture et la cinétique associée ne sont, a priori, pas complètement connus. Les principes retenus sont décrits ci-dessous, ils ont été choisis de façon à constituer des « hypothèses conservatrices ».

On distingue 2 types de barrages :

- Les barrages bétons ou maçonnerie (qu'ils soient poids, voûte ou à contrefort),
- Les barrages en remblais (zoné ou non, avec masque amont ou non, ...),

Les barrages béton ou maçonnerie sont supposés se rompre totale et instantanément (« hypothèse conservatrice »).

Les barrages en remblais de tous types, même avec des masques amont sont supposés se rompre de façon progressive. Deux types de ruptures pourraient être envisagés : par déversement érosif ou par phénomène de renard. Le mode de rupture retenu comme le plus souvent critique est une rupture par renard se formant au pied de la zone où le barrage a la plus grande hauteur (généralement dans l'axe du thalweg). On utilise le code RENARD (cf. Réf. [5]) pour déterminer l'hydrogramme de rupture résultant. Bien que ce mode de rupture ne soit pas réaliste pour un barrage en enrochements, l'utilisation du code RENARD permet de déterminer un hydrogramme plus proche de celui qui serait effectivement généré lors de la rupture de l'ouvrage que si l'on considérait une rupture totale et instantanée (comme pour les barrages en béton ou maçonnerie).

L'hydrogramme de vidange se déduit de l'état initial de la retenue, de l'hydrologie entrante (nulle en l'occurrence) et du mode de rupture de l'ouvrage.

## 2.8. **Barrage aval**

L'onde générée par la rupture du barrage principal peut entraîner la rupture de barrages situés à l'aval. Il est difficile de définir des principes généraux sur la décision quant à la rupture ou non des barrages aval. Il revient donc au chargé d'étude de faire un choix sur l'éventuelle rupture du barrage aval aux vues du temps d'arrivée de l'onde et du niveau atteint à l'amont immédiat du barrage aval (comparaison de la cote atteinte à la cote de danger du barrage aval). La prise en compte du temps d'arrivée de l'onde vise à

évaluer s'il apparaît réaliste que les vannes de l'évacuateur de crue du barrage aval soient ouvertes avant l'arrivée de l'onde.

Plusieurs simulations pourraient donc être nécessaires : une première modélisation permettrait de connaître le temps d'arrivée de l'onde et le niveau potentiellement atteint si le barrage aval ne rompt pas, une deuxième modélisation permettra de poursuivre l'étude à l'aval du barrage aval en prenant en compte les décisions quant à la rupture ou non du barrage aval. Il y aura donc deux simulations (mais un seul modèle).

Dans la pratique, si on ne dispose de bons indices pour s'assurer de la non-rupture du barrage aval, on prendra souvent l'hypothèse conservatrice de sa rupture.

Le cas où le volume de la retenue amont (celle dont on étudie la rupture du barrage) est entièrement stockable dans la tranche de la retenue aval comprise entre le niveau à PHE et le niveau de la cote de danger, conduira généralement à considérer la non-rupture du barrage aval.

## **2.9. Point d'arrêt**

Dans le cadre des Etudes de Dangers, nous avons pris le parti de présenter les résultats des études d'onde de rupture jusqu'à un point où le débit généré par l'onde de rupture est inférieur au débit de pointe de la crue centennale en ce même point, ce qui semble cohérent avec les objectifs de l'étude et le degré de modélisation.

Le débit de pointe de la crue centennale n'étant pas connu en tout point de la rivière, on se référera au débit de pointe de la crue centennale en des points connus (barrage principal, barrage aval, points de calculs de EDF-DTG, Station de la Banque Hydro, ...) si ces points ne sont pas trop éloignés du point d'arrêt.

Si on ne dispose pas d'informations sur les débits centennaux, on pourra prendre comme point d'arrêt le point où le niveau d'eau généré par la rupture du barrage rejoint la cote de référence indiquée dans les PPRI.

## **2.10. Résultats - Valeurs calculées et valeurs recommandées**

La méthodologie de calcul ainsi définie permet de calculer toute une série des grandeurs dont les plus importantes, sont :

- Les cotes maximales atteintes par l'onde
- Les temps d'arrivée du front d'onde
- Les débits maximaux
- Les temps d'obtention des niveaux maximum

Pour tenir compte de l'influence des hypothèses et des méthodes de calcul sur les résultats, on détermine des « valeurs recommandées » obtenues à partir des « valeurs calculées » de la façon suivante :

- Majoration des hauteurs d'eau maximales (comptées à partir de la ligne d'eau initiale) de 15% avec un minimum de 1 mètre pour les valeurs de hauteur supérieures ou égales à un mètre. Les hauteurs inférieures à un mètre sont doublées. Les cotes maximales sont majorées en conséquence.
- Minoration des temps de 13%
- Les valeurs de vitesses et de débits ne sont pas modifiées.

Les cotes sont arrondies au mètre voisin lorsque les surélévations sont supérieures à 2 m, et au décimètre voisin dans le cas contraire. Les temps sont arrondis à la minute voisine pour les temps supérieurs à 15 minutes et au 1/10<sup>ème</sup> de minute voisine pour les temps inférieurs à 15 minutes.

Les résultats ainsi obtenus peuvent être présentés sous forme de tableau, de graphique et de cartographie des zones inondables.

### 2.11. Commentaires sur la méthodologie

Les valeurs chiffrées des résultats peuvent présenter de fortes incertitudes liées entre autres :

- A la connaissance imparfaite du phénomène et à son caractère extrême (rupture du barrage et propagation de l'onde),
- Aux approximations de modélisation (modélisation unidimensionnelle -1D - avec un unique bief, conditions hydrauliques et hydrologiques, rugosité,...),
- Au comportement des ouvrages aval : ponts, seuils, routes endiguées, bâtiments,...
- Au comportement des barrages aval,
- Au changement de caractéristique de la vallée lors du passage de l'onde : végétation arrachée, érosion, etc.,

Mais on rappelle que l'objectif n'est pas de déterminer une ligne d'eau précise correspondant à un phénomène qui serait entièrement défini. En donnant des ordres de grandeur réalistes du phénomène, la méthodologie répond à l'objectif recherché.

## 3. METHODOLOGIE D'ONDE DE RUPTURE DE VANNE

### 3.1. Philosophie de la méthodologie – Objectif de la modélisation

La rupture d'une vanne d'un barrage génère une onde dont les débits sont beaucoup plus faibles que la rupture totale du barrage. Si pour une onde de rupture de barrage, il était admissible de ne pas prendre en compte spécifiquement le lit mineur, ceci n'apparaît pas raisonnable dans le cadre des études d'onde de rupture de vanne.

Le LNHE a donc mis au point une méthodologie spécifique pour ces études qui passe par la définition d'un lit mineur schématique. Elle est présentée dans la suite de cette partie.

Cette méthodologie a été testée sur deux cas (rupture d'une vanne des barrages de Tuilières et de Plan d'Arem – Réf. [7]) pour lesquels on disposait de données topographiques précises (profils en travers) pour représenter le lit mineur des tronçons étudiés. En comparant les résultats obtenus à partir des modèles créés avec ces données topographiques précises aux résultats obtenus avec la méthodologie mise au point, il s'est avéré que cette méthodologie fournissait des résultats fiables, permettant de répondre aux objectifs recherchés.

La suite de ce chapitre met en avant les options de modélisation retenues pour les études d'onde de rupture de vanne et la nature des résultats escomptés.

### 3.2. Géométrie

Comme rappelé au § 3.1 Philosophie de la méthodologie – Objectif de la modélisation, la définition de la géométrie est une question centrale de ces modélisations.

Les principes de modélisation décrits ci-dessous ne sont valables que dans le cas où on ne dispose pas de topographie précise du lit mineur.

Les données d'entrée sont les mêmes que pour les études d'onde de rupture de barrage (MNT, cartes IGN au 1 / 25 000<sup>ème</sup>, etc.).

La géométrie de la zone d'écoulement est traduite par la définition de profils en travers. **Les profils en travers auront une forme rectangulaire (i.e. en U) correspondant au lit mineur.** Le lit majeur n'est généralement pas modélisé.

La largeur du profil est déterminée à partir de photographies aériennes (Google-Earth par exemple) ou des cartes IGN au 1 / 25 000<sup>ème</sup>. Les cotes de fond des profils en travers sont déterminées à partir du MNT dont on vérifie la cohérence avec les informations tirées des profils en long de l'IGN. L'objectif recherché

n'est pas d'avoir une information précise sur la cote de fond, on recherche une bonne précision de la pente moyenne des tronçons de rivières étudiées.

De même que pour les études d'onde de rupture de barrage, sauf cas particuliers, les affluents ne seront pas pris en compte dans la modélisation.

Seuls les ouvrages qui ont une emprise sur le lit mineur sont intégrés au modèle (en dehors des barrages aval - cf. § 3.6 *Point d'arrêt*). Il peut s'agir de ponts ayant des piles ou des culées dans le lit mineur, de seuils, ...

Etant donnée la gamme de débits générés, on considèrera (sauf cas particulier) que ces ouvrages résistent au passage de l'onde.

### **3.3. Coefficients de rugosité (Strickler)**

Les coefficients de Strickler du lit mineur sont déterminés à dire d'expert par le responsable de l'étude. Sauf si l'on dispose de données particulières, on ne procède pas à un calage de ces paramètres.

### **3.4. Etat hydraulique initial de la zone d'étude – Conditions hydrologiques**

De même que pour les études d'onde de rupture de barrage, des hypothèses de calcul doivent être faites en ce qui concerne l'état hydraulique initial de la zone d'étude et les conditions hydrologiques. Les principes suivants ont été retenus :

- Les retenues concernées par l'étude (la retenue du barrage principal et la retenue de l'éventuel barrage aval) seront considérées initialement à leur niveau normal (RN) ;
- La ligne d'eau dans la vallée à l'aval du barrage étudié est la ligne d'eau correspondant au débit moyen (module) de la rivière ;
- Les calculs seront effectués en considérant généralement un débit entrant égal au module de la rivière. Ce débit n'est pas forcément constant sur toute la zone d'étude.

### **3.5. Mode de rupture de la vanne et hydrogramme de vidange**

On considèrera une rupture totale et instantanée de la vanne.

L'hydrogramme de vidange se déduit alors de l'état initial de la retenue et de la vallée, de l'hydrologie entrante et de la débitance du pertuis étudié.

### **3.6. Point d'arrêt**

Les résultats sont généralement présentés jusqu'à un point de la rivière à l'aval duquel l'une des deux conditions suivantes est vérifiée :

- la surcote de l'eau (par rapport à la cote de l'eau initiale) engendrée par la rupture de la vanne est inférieure à 0,25m ;
- Le gradient de montée du niveau d'eau est inférieur à 1 cm/min.

#### **Présence d'un barrage aval :**

Un barrage aval constituera également un point d'arrêt de l'étude. En effet, les conséquences hydrauliques de la rupture d'une vanne du barrage amont, au droit et à l'aval du barrage aval dépendent entièrement de la gestion de ce dernier (ouverture des vannes). Il n'est donc pas pertinent de présenter des résultats en aval du barrage aval. Le barrage aval constituera donc le point d'arrêt de l'étude même si les seuils définis ci-dessus ne sont pas atteints.

Dans la pratique, quand le point d'arrêt n'est pas défini par la présence d'un barrage, les critères d'arrêt sont souvent atteints lorsque l'onde de rupture rejoint un affluent de plus grande importance.

### 3.7. Résultats

La méthodologie de calcul ainsi définie permet de calculer toute une série des grandeurs dont les plus importantes, dans le cadre de ces études, sont

- la surcote maximale par rapport au niveau initial ( $\Delta H$ )
- le débit maximal
- le temps d'arrivée du front de vague
- le gradient de montée du niveau d'eau

De même que pour les études d'onde de rupture de barrage, pour tenir compte de l'influence des hypothèses et des méthodes de calcul sur les résultats, on détermine des « valeurs recommandées » obtenues à partir des « valeurs calculées » de la façon suivante :

- Majoration des surcotes maximales par rapport au niveau initial ( $\Delta H$ ) de 15%.
- Minoration des temps de 13%
- Les valeurs de vitesses, de débits et de gradients ne sont pas modifiées.

Les surcotes sont arrondies au décimètre voisin. Les temps sont arrondis à la minute voisine pour les temps supérieurs à 15 minutes et au 1/10ème de minute voisine pour les temps inférieurs à 15 minutes.

### 3.8. Validation de la méthodologie

Comme indiqué au § 3.1 *Philosophie de la méthodologie – Objectif de la modélisation*, les résultats obtenus avec cette méthodologie ont été comparés aux résultats obtenus avec des modèles basés sur des levées topographiques (qui fournissent donc des résultats fiables) pour les barrages de Tuilières et de Plan d'Arem. C'est ce qui a permis de valider la méthodologie. Ces études ont fait l'objet d'un rapport (Réf. [7]). Pour le cas du barrage de Tuilières, la comparaison de certains résultats est présentée sur les graphiques ci-dessous :

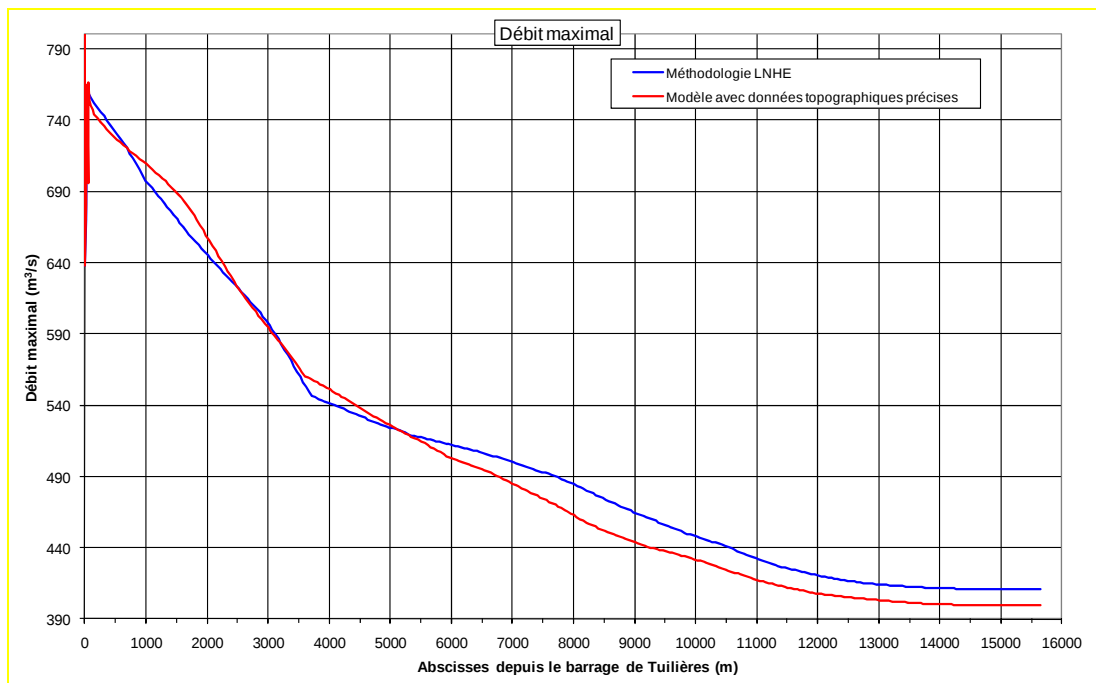


Figure 1 - Comparaison des débits maximaux dans le cas du barrage de Tuilières

La figure 1 présente la comparaison des débits maximaux à l'aval du barrage de Tuilières entre le modèle basé sur des données topographiques précises et le modèle construit selon la méthodologie LNHE. On observe la même forme d'atténuation du débit maximal avec des écarts de l'ordre de - 17 m³/s à + 22 m³/s. Les écarts sont de moins de 5%.

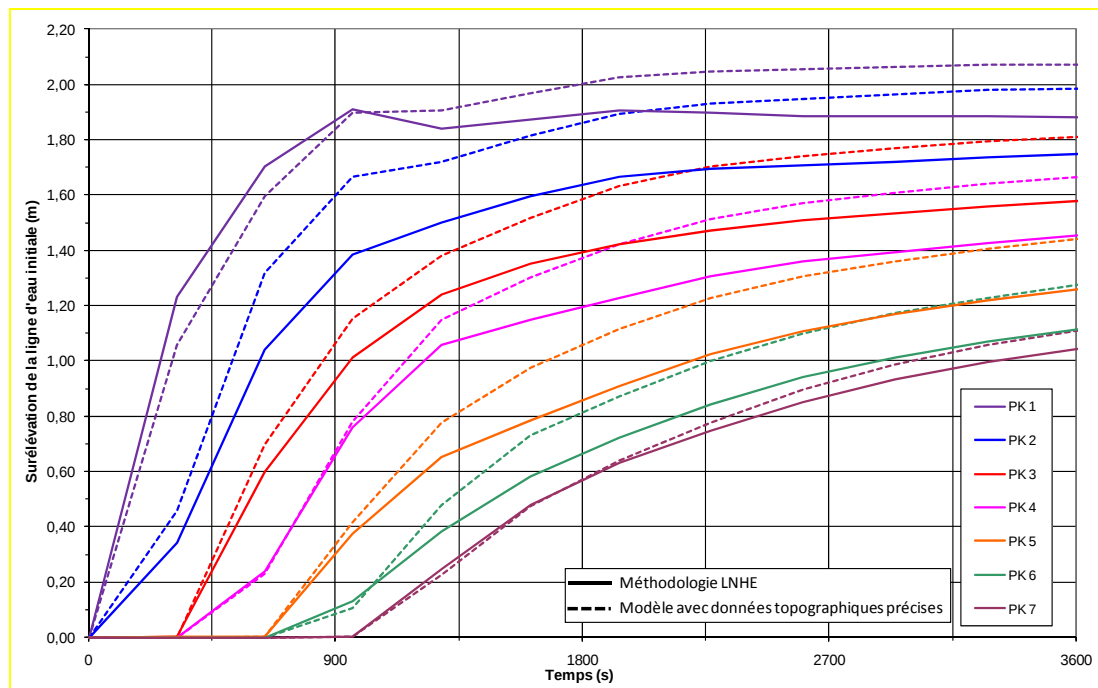


Figure 2 : Comparaison des limnigrammes à plusieurs PK dans le cas du barrage de Tuilières

La Figure 2 présente les évolutions temporelles du niveau d'eau en plusieurs points repérés par leur distance au barrage en kilomètre (PK). Ce graphique permet de visualiser les gradients d'augmentation du niveau d'eau et les surélévations maximales. Il met en évidence les faibles écarts entre les gradients déterminés en suivant la méthodologie LNHE et ceux déterminés avec un modèle basé sur des données topographiques précises. De même, les surélévations présentent un écart toujours inférieur à 0,25 m, ce qui correspond à une erreur de 11 % au maximum.

D'une manière générale, ces graphiques illustrent le fait que la méthodologie développée permet d'obtenir des résultats du même ordre de grandeur que ceux qui seraient obtenus avec des données topographiques plus précises.

### 3.9. Commentaires sur la méthodologie

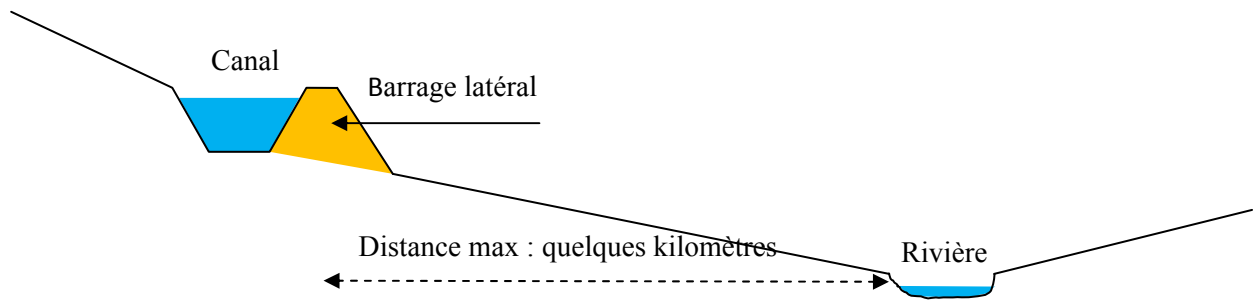
Le nombre important d'hypothèses qui doivent être faites pour réaliser cette modélisation (principalement sur la définition des profils en travers schématique) entraînent une forte incertitude sur les valeurs chiffrées des résultats. Néanmoins, la méthodologie permet de déterminer de bons ordres de grandeurs, et le processus d'atténuation de l'onde dans la vallée est généralement bien mis en évidence. On notera cependant, qu'en l'absence de données topographiques précises, on ne pourra pas déterminer s'il y a un risque de débordement en dehors du lit mineur (et un donc éventuel risque d'inondation).

## 4. METHODOLOGIE D'ONDE DE RUPTURE DE CANAUX

### 4.1. Généralités

La principale difficulté pour la réalisation d'études d'onde de rupture de canal réside dans leur grand linéaire. Il a donc été nécessaire de définir une méthodologie spécifique pour ces études.

Cette méthodologie est liée à la particularité des canaux EDF : ils sont souvent situés parallèlement à l'axe d'une rivière dont ils dérivent les eaux plus en amont. Le schéma ci-dessous présente cette situation particulière. C'est le cas, notamment, des canaux de la Durance.



*Figure 3 : Situation particulière des canaux EDF*

La distance entre le canal et l'axe de la rivière varie de quelques dizaines de mètres (au niveau de l'embouchure du canal) à quelques kilomètres.

#### **4.2. Méthodologie**

La réalisation de ces études est essentiellement basée sur une visite de terrain.

Contrairement aux études d'onde de rupture de barrage « classique », on ne réalise pas de modélisation hydraulique, même grossière pour ces études.

Le principe consistant à fournir des résultats conservatifs est maintenu.

##### *4.2.1. Zone inondable*

Le premier objectif est la définition de zones inondables par la rupture du canal.

On définit deux types de zones inondables :

- Une zone inondable totale. Elle correspond à l'enveloppe de toutes les zones qui peuvent être impactées par une rupture du canal.
- Des zones inondables correspondant à un scénario de brèche défini. Pour définir ces zones inondables, c'est essentiellement la position de la brèche sur le linéaire du canal plus que le processus de formation de la brèche qui est importante. Seules les zones présentant le potentiel de danger le plus important font l'objet de ces études particulières. Elles sont choisies soit en fonction de leur caractéristiques propres (morphologie spécifique, fragilité mise en évidence, ...) soit en fonction des zones qu'elles protègent (zones à enjeux spécifiques : habitations, zone industrielle, ...).

La schématisation de ces zones est représentée sur la figure ci-après.

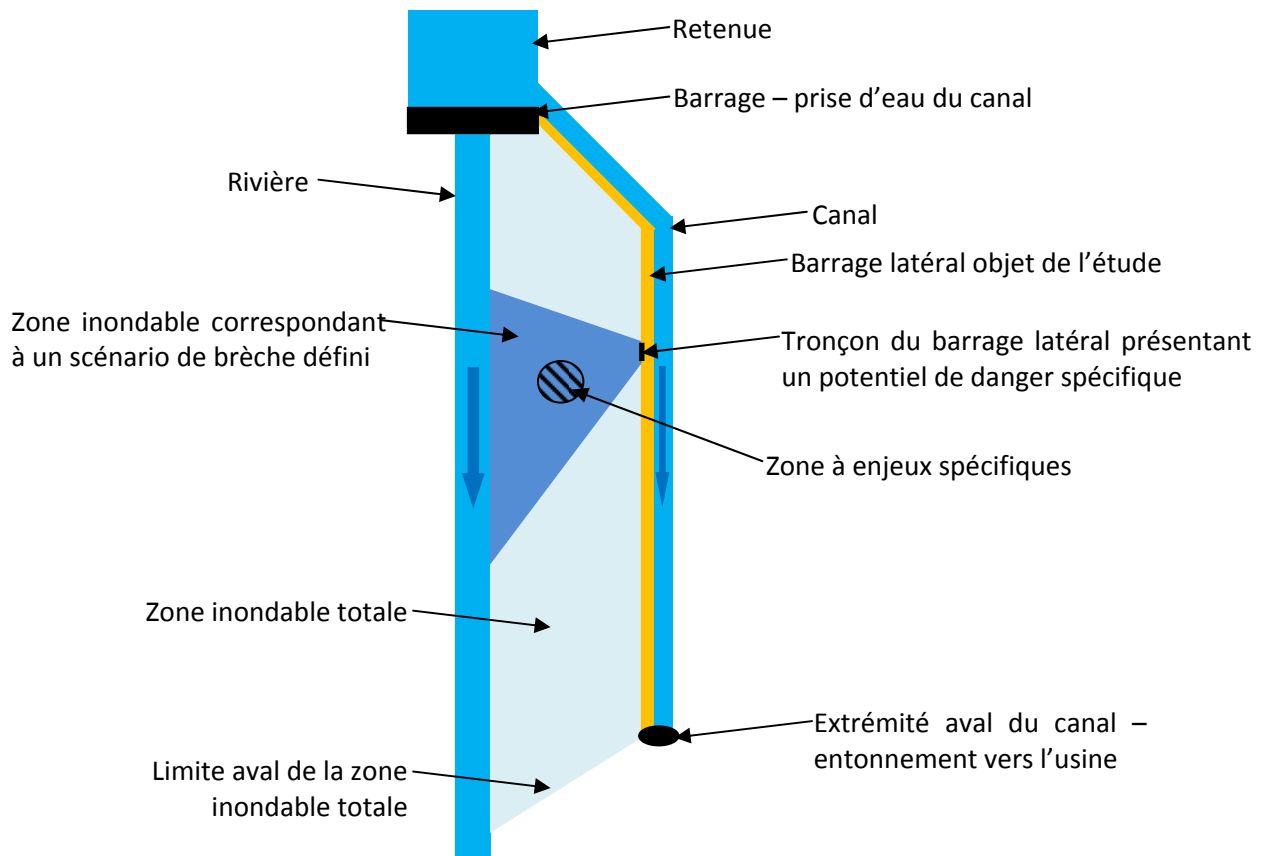


Figure 4 : Positionnement schématique des zones inondables dans le cas des canaux d'EDF

#### Zone inondable totale

Etant donnée la configuration des aménagements EDF, cette zone est généralement simple à définir : il s'agit de l'ensemble de la zone se situant entre le canal et le lit de la rivière située en fond de vallée. On considère généralement qu'une remontée de l'onde sur l'autre rive de la rivière est impossible.

La seule difficulté réside dans la définition de la limite aval. Comme indiqué précédemment, elle est essentiellement basée sur une visite de terrain. La présence de routes endiguées, de thalweg (affluent de la rivière en fond de vallée) permettent généralement de définir cette limite aval.

La limite amont est souvent constituée par le barrage servant de prise d'eau au canal.

#### Zone inondable correspondant à un scénario de brèche donné

La définition de la zone inondable correspondant à un scénario de brèche donné se fait de la même manière que la définition de la zone inondable totale : « à dire d'expert », suite à une visite de terrain. La définition de la limite amont présente alors les mêmes difficultés que la définition de la limite aval.

#### 4.2.2. Cinétique

Des éléments de cinétiques d'inondation ne sont fournis que pour les zones à enjeux spécifiques (zone d'habitation, zone industrielle, zone commerciale, espace de loisir, ...).

Quand la topographie s'y prête (la pente du terrain naturel entre le canal et la zone d'enjeu est régulière sans obstacle type route endigué, diguette de canal d'irrigation, ...), on peut utiliser le logiciel CASTORDIGUE (cf. Réf. [6]) développé par le CEMAGREF. On peut alors fournir des ordres de grandeur du temps d'arrivée de l'onde, de gradient de montée du niveau d'eau, de hauteur d'eau, ...

Quand on estime que la topographie ne se prête pas à l'application du code CASTORDIGUE, on procèdera alors de la manière suivante : Par analogie avec d'autres cas, on définit un ordre de grandeur du temps d'arrivée de l'onde (1/4 d'heure ?, 1 heure ?, ...). En revanche, on ne chiffrera pas les autres paramètres (hauteur d'eau, vitesse, ...), on se contentera de qualifier le phénomène de sorte à rendre compte de sa cinétique et de sa dangerosité associée.

#### 4.2.3. *Point d'arrêt de l'étude*

L'étude se limite généralement à la zone située entre le canal et la rivière en fond de vallée. Si on estime que l'onde peut remonter sur la berge de la rivière en fond de vallée (ce n'est généralement pas le cas), cette zone fera également partie de la zone d'étude.

Par analogie avec les études d'onde de rupture de barrage « classique », on ne mène pas d'étude de propagation de l'onde une fois que celle-ci a atteint la rivière si le débit de pointe résultant est inférieur au débit de pointe de la crue centennale, c'est généralement le cas.

### 4.3. *Commentaire sur la méthodologie – apport d'une modélisation bidimensionnelle -2D*

Cette méthodologie est très simple à mettre en œuvre puisqu'elle repose essentiellement sur une visite de terrain. Elle peut, à première vue, paraître « simpliste » mais, pour la configuration de canaux tels que décrits ci-dessus, elle semble généralement bien répondre aux objectifs recherchés.

Pour la critiquer, on peut la comparer à la méthodologie de « niveau supérieur » qui consisterait en la réalisation d'un modèle numérique 2D de la zone d'étude.

#### 4.3.1. *Apport de la modélisation 2D*

En ce qui concerne la détermination de zone inondable (totale ou spécifique), étant donnée la situation particulière des canaux d'EDF, on peut penser en première analyse qu'une modélisation 2D permettrait seulement une meilleure définition des limites amont et aval des zones inondables dont la plus grande partie est souvent « évidente ».

En revanche, une modélisation 2D permettrait, sans doute, d'associer des valeurs chiffrées plus précises à la description de la cinétique, à la condition que les hypothèses de calcul aient un bon degré de précision (cf. § 4.3.2 *Limite de la modélisation 2D*).

#### 4.3.2. *Limite de la modélisation 2D*

On notera tout d'abord que la réalisation d'un tel modèle demanderait beaucoup de moyens (temps consacré à l'étude, acquisition de données topographiques de grande précision).

Une modélisation 2D nécessite de plus de faire des hypothèses de calcul, notamment sur l'hydrogramme de brèche ou sur le comportement des ouvrages aval :

- La définition de l'hydrogramme de brèche est sans doute l'une des plus grandes sources d'incertitude. Si des modèles de formation de brèche existent, il est généralement admis qu'ils fournissent des hydrogrammes de rupture présentant un niveau d'incertitude élevé, d'autant plus quand l'étanchéité des canaux étudiés est un revêtement amont en béton (ce qui est le cas d'une grande partie des canaux d'EDF).
- Le comportement des ouvrages situés dans la zone d'étude est difficile à appréhender (rupture ou non des « diguettes » se trouvant dans la zone d'étude, obstruction ou non des ouvrages – type buse –

traversant les routes endiguées, ...). Il conviendrait donc de faire des hypothèses fortes sur le comportement de ces ouvrages.

Les hypothèses fortes qui devront être faites (principalement sur le calcul de l'hydrogramme de rupture) entraîneront de fortes incertitudes sur les résultats. On retrouve alors l'idée de « *fausse précision* » évoquée précédemment.

#### 4.3.3. Conclusion

Pour les canaux dont la situation est telle que définie précédemment, il apparaît que les apports d'une modélisation 2D sont assez limités en ce qui concerne la détermination des zones inondables. Si, à première vue, on peut penser que la modélisation 2D permet d'apporter une meilleure caractérisation de la cinétique, cette idée est à nuancer fortement au regard des fortes incertitudes sur l'hydrogramme de brèche entraînant des fortes incertitudes sur les résultats.

L'utilisation systématique d'une modélisation 2D n'a donc pas été retenue dans la méthodologie d'EDF vu les moyens à déployer pour les mettre en place au regard du gain modéré en termes de précision de résultats. Néanmoins, si le chargé d'étude estime que, dans son cas précis, une modélisation 2D est indispensable pour répondre aux objectifs, il peut décider de la mettre en place.

## 5. CONCLUSIONS GENERALES

En 2011, EDF exploite environ 240 barrages relevant de l'Arrêté du 18 juin 2008 relatif aux *Etudes de Dangers des barrages et des digues*. Pour chacun de ces ouvrages, une étude d'onde de rupture de barrage (et pour certains une étude d'onde de rupture d'une vanne) doit être réalisée. Devant le nombre important d'études à réaliser, EDF a souhaité définir des méthodologies d'études simples à mettre en place (si possible sans campagne topographique) mais fournissant des résultats d'une précision compatible avec les prescriptions des Etudes de Dangers.

Pour les ondes de rupture de barrage, la méthodologie est très proche de celle mise en place dans le cadre de l'établissement des PPI. On y apporte un gain de précision et de facilité de mise en place par l'acquisition de MNT, mais on limite la zone d'étude au tronçon de vallée sur lequel la gamme de débits étudiés permet de se dispenser d'une topographie précise du lit mineur et en cohérence avec les objectifs de l'étude.

Pour l'étude des ruptures de vannes, il semblait a priori difficile de répondre aux objectifs sans réaliser une modélisation basée sur des données topographiques précises. Des études sur des cas particuliers ont permis de mettre au point une méthodologie basée sur la définition d'un lit mineur synthétique sans recourir à une campagne topographique.

Pour l'étude de la rupture des canaux, la situation particulière des canaux d'EDF permet généralement de déterminer une zone inondable de manière assez fiable sans recourir à une modélisation. Les grandeurs caractérisant la cinétique sont plus difficiles à déterminer, mais une modélisation 2D, lourde à mettre en place, fournirait des résultats très dépendants des hypothèses de calculs.

Toutes ces méthodologies définissent des principes généraux. Toutefois, le chargé d'étude peut y déroger en engageant des modélisations plus complètes s'il estime que l'application étudiée présente certaines particularités non compatibles avec ces principes.

## **REFERENCES**

- [1] : CTGREF (1978). – Calcul d'onde de submersion due à la rupture d'un barrage. N° 25.
- [2] : Goutal N. (2009) – Méthodologie des études d'ondes de submersion pour les études de danger – Rapport EDF-R&D – H-P73-2009-01166-FR
- [3] : Van Haren L. (1998) – Ondes de submersion Plan Qualité d'étude – Rapport EDF-R&D – HE-401998-01250FR
- [4] : Goutal N., Maurel F., 2002. A finite volume solver for 1D shallow water equations applied to an actual river. Int. J. Numer. Meth. Fluids. [5] : Herledan R. (1995) – Note de principe du code RENARD – Note EDF R&D – HE- 43/95/027/B
- [6] : Renzoni J., Paquier A., Cogoluegnes A. – CEMAGREF (2004) – Un outil d'estimation rapide du risque d'inondation à l'aval d'une digue
- [7] : Duvivier G. (10/09/2009) – Méthode simplifiée de calcul d'une surélévation du niveau d'eau générée par la rupture d'une vanne ou d'un clapet de barrage. – Rapport EDF-R&D – H-P73-2009-01217-FR



## Thème 2

# ACCIDENTOLOGIE / INCIDENTOLOGIE





## CONSEQUENCES D'ACCIDENTS MAJEURS DE BARRAGES : ETAT DES REFLEXIONS DE L'INERIS POUR L'EVALUATION DE LA GRAVITE

### *Human consequences of major events on dams : State of works from INERIS concerning the determination of severity levels*

**Thibault, Balouin**

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Direction des Risques Accidentels,  
Parc Technologique ALATA, BP2, 60550 Verneuil-en-Halatte (France)

[thibault.balouin@ineris.fr](mailto:thibault.balouin@ineris.fr)

**Anabel, Lahoz**

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Direction des Risques Accidentels,  
Parc Technologique ALATA, BP2, 60550 Verneuil-en-Halatte (France)

[anabel.lahoz@ineris.fr](mailto:anabel.lahoz@ineris.fr)

#### MOTS CLÉS

Barrages, Cinétique, Conséquences, Enjeux, Gravité, PAR

#### ABSTRACT

Article R.214.115 from the French Environmental Code introduced by the 11th dec. 2007 Decree n°2007-1735 plans safety reports for some hydraulic installations (class A and B dams, class A, B and C dikes). This safety study aims to demonstrate control of risks by the owner through a cross analysis between the consequences of the effects and the annual probability of identified major accidents. The severity level can be determined quantitatively or qualitatively. It depends on the availability of cartographic representations of the hydraulic effects (flood wave) and on an identification of the "Population At Risk" (PAR) eventually impacted by these effects. A method for characterization of the effects is based on an estimate of the local intensity and kinetics. Criteria such as "pre-accident kinetics" or "post-accident kinetics" represent potential ways to reduce the severity level by decreasing the number of people impacted. The gravity or severity level associated with each accident is the result of an analysis that uses several parameters. This paper presents the progress of work underway at the INERIS by offering:

A 'comprehensive' method to respond to all the theoretical criteria under Article 8 of the Ministerial decree of June 12th, 2008,

A 'simplified' method taking into account the available data for the characterization of various parameters.

#### RÉSUMÉ

L'article R.214.115 du Code de l'Environnement introduit par le Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 prévoit la réalisation d'une étude de dangers pour certains ouvrages hydrauliques. Cette étude a pour objectif la démonstration de la maîtrise des risques par l'exploitant au travers d'une analyse croisée de la gravité des conséquences des effets et de la probabilité d'occurrence annuelle des accidents majeurs identifiés. La gravité peut être déterminée de manière quantitative ou qualitative, en fonction de la disponibilité de représentations cartographiques des effets hydrauliques (onde de submersion ou vague/s), et sur la base d'un recensement des enjeux humains susceptibles d'être impactés par ces effets, ou PAR (« Population At Risk » ou « Population Assujettie aux Risques »). Une méthode de caractérisation des effets s'appuie sur une estimation de l'intensité et de la cinétique locales. Certains critères tels que la « cinétique pré-accidentelle » ou la « cinétique post-accidentelle » sont potentiellement des voies de réduction de la gravité via une diminution du nombre de personnes effectivement impactées. La notion de gravité associée à chaque accident résulte donc d'une analyse faisant intervenir plusieurs paramètres. Cette communication présente l'avancement des travaux en cours à l'INERIS en proposant

- une méthode « complète » permettant de répondre de façon théorique à l'ensemble des critères définis dans le cadre de l'article 8 du plan des études de dangers défini par l'Arrêté du 12 juin 2008,

- une méthode « simplifiée » prenant en compte les données disponibles et exploitables pour la caractérisation des différents paramètres.

La méthodologie proposée par l'INERIS dans la détermination de la gravité des conséquences d'un accident survenant sur un barrage s'inscrit dans le cadre réglementaire des études de dangers relatives aux barrages de classe A et B. Son élaboration est issue de l'analyse de multiples données et s'est appuyée notamment sur :

- la prise en considération de l'ensemble des critères définis par l'Arrêté du 12 juin 2008 [3] permettant de justifier de la gravité des conséquences (intensité des effets, cinétiques) ;
- l'exploitation des données et dossiers déjà réalisés par les exploitants dans le cadre d'autres démarches réglementaires ;
- l'exploitation du retour d'expériences des premières études de dangers (EDD) réalisées ;
- une harmonisation avec les autres réglementations françaises (notamment la réglementation relative aux Installations Classées).

## **1. L'ESTIMATION DE LA GRAVITE DES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT MAJEUR : UN PARAMETRE DANS L'ESTIMATION DU RISQUE**

La loi n° 2006-1172 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques [1], codifiée, et le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 [2] également codifié rénovent en profondeur les règles de sécurité et de sûreté des ouvrages hydrauliques (barrages de retenue et digues de protection des populations) en France. En particulier, cette évolution prévoit (selon l'article R214-115 du code de l'environnement) la réalisation d'une étude de dangers (EDD) pour les barrages de classe A ou B.

Le contenu de l'étude de dangers pour de tels ouvrages est précisé dans l'Arrêté interministériel du 12 juin 2008 [3] définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu. Un « guide de lecture » des EDD barrages a été diffusé par une circulaire [4] datée du 31 octobre 2008 du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) actuellement remplacé par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL).

### **1.1. Gravité proposée dans le cadre des EDD répondant à la réglementation française des ouvrages hydrauliques**

La notion de « gravité des conséquences » apparaît de façon plus ou moins détaillée dans les différents textes réglementaires et circulaire (destinée aux Services Instructeurs) encadrant la réalisation des EDD, notamment dans :

- l'Annexe de l'Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu au travers du point « 8. Identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets, et de gravité des conséquences ». Tous les accidents potentiels doivent être qualifiés en termes de probabilité d'occurrence annuelle et de gravité des conséquences ;
- le Guide de lecture des études de dangers des barrages annexé à la Circulaire du 31 octobre 2008 relative aux études de dangers des barrages (Partie 8-III-d) qui précise qu'« Un accident majeur peut comporter plusieurs types de conséquences : humaines, matérielles, économiques, etc. ». Dans ce guide, une attention toute particulière est portée à l'estimation de la gravité des conséquences sur les enjeux humains même si l'exploitant ne doit pas omettre l'analyse et l'étude des autres conséquences (enjeux économiques et enjeux environnementaux). Sur ce dernier point, il s'agit a minima d'identifier la nature des bien exposés.

### **1.2. Notion de gravité des conséquences**

Une définition de la gravité des conséquences des effets d'un accident a été proposée par le MEDDTL dans le cadre de la réglementation relative aux Installations Classées par le biais de la Circulaire du 10 mai 2010 [5] qui précise que la gravité des conséquences potentielles prévisibles sur les personnes [...]

résulte de la combinaison en un point de l'espace de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux et de la vulnérabilité des cibles potentiellement exposées).

En suivant la logique de cette définition (qui reste cohérente avec les exigences relatives aux ouvrages hydrauliques), la gravité des conséquences d'un accident majeur sur un ouvrage hydraulique peut être ainsi déterminée par la superposition de la cartographie de recensement des enjeux avec la cartographie des effets de l'onde résultante de la libération d'un potentiel de dangers.

Pour le recensement des enjeux humains, la notion de PAR (Population Assujettie au Risque ou "Population At Risk" [6]) est utilisée par la suite. Cette PAR représente une estimation du nombre de personnes susceptibles de subir les effets de l'accident. Elle ne traduit toutefois pas le nombre de victimes [10, 11, 12].

### 1.3. Exemple d'échelle de classification en gravité

Le Guide de lecture présente un exemple de classification de la gravité des conséquences sur les enjeux humains en cinq catégories (Gravités Modérée, Sérieuse, Importante, Catastrophique, Désastreuse) définies en fonction du nombre de personnes susceptibles d'être impactées par les effets de l'accident mais également en fonction de la cinétique du phénomène (et donc de la possibilité de mise à l'abri des personnes).

| Classes de gravité des conséquences<br>(par ordre décroissant) | Nombre de personnes exposées en zone à cinétique rapide | Nombre de personnes exposées en zone à cinétique lente |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 5. désastreux                                                  | $\geq 1000$                                             | $\geq 10000$                                           |
| 4. catastrophique                                              | $\geq 100$ et $< 1000$                                  | $\geq 1000$ et $< 10000$                               |
| 3. important                                                   | $\geq 10$ et $< 100$                                    | $\geq 100$ et $< 1000$                                 |
| 2. sérieux                                                     | $\geq 1$ et $< 10$                                      | $\geq 10$ et $< 100$                                   |
| 1. modéré                                                      |                                                         | $\geq 1$ et $< 10$                                     |

Tableau 1 : Exemple de grille de référence de détermination de la gravité (Guide de lecture EDD Barrages) [4]

Cette hiérarchisation en cinq classes de la gravité ainsi que les termes associés sont repris de la réglementation française relative aux Installations Classées (Annexe 3 de l'Arrêté du 29 septembre 2005 [7] relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation).

### 1.4. Discussions autour de la notion de cinétique

La mise en sécurité des populations situées à l'amont ou à l'aval de l'ouvrage peut s'exprimer par :

- la compatibilité entre le temps de détection de l'apparition de l'Évènement Redouté Central (ERC) ou de la perte de confinement accidentelle sur l'ouvrage et le temps d'alerte des populations (ex : absence ou présence de signaux précurseurs) ;

la compatibilité entre le temps d'alerte des populations et le temps de l'arrivée des premiers effets ;

la possibilité des populations de se mettre à l'abri une fois les premiers effets ressentis.

Compte tenu du tableau donné en exemple dans la circulaire, les notions de cinétique rapide et de cinétique lente prises en compte pour l'évaluation de la gravité des conséquences semblent principalement associées au temps d'alerte des populations pour leur mise en sécurité entre le moment où l'ERC se produit et où localement les effets maximaux sont ressentis.

## 2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES PREMIERES EDD REALISEES

### 2.1. *Ce qui est demandé...*

La réglementation française demande de caractériser en gravité les conséquences de tout phénomène accidentel pouvant se produire sur un ouvrage hydraulique, notamment :

- la rupture totale de l'ouvrage (lors d'événements climatiques exceptionnels ou due à une défaillance structurelle sur l'ouvrage) ;
- l'apparition d'une brèche sur l'ouvrage ;
- le passage d'une vague au-dessus de l'ouvrage liée à un effondrement dans la retenue ;
- la rupture / ouverture partielle ou totale d'un organe / équipement hydraulique,...

Les volumes mis en jeu pour chacun de ces phénomènes ne sont pas du même ordre de grandeur qu'il s'agisse d'une rupture totale de l'ouvrage, d'une brèche ou d'une rupture d'un organe hydraulique. Les débits associés sont une illustration de cet écart : par exemple, quelques milliers de mètres cubes par seconde pour les trois premiers cas contre quelques dizaines voire centaines de mètres cubes par seconde pour des cas de rupture ou ouverture de vannes.

Les zones d'effets associées sont alors d'autant plus étendues que le volume libéré est important. La gravité des conséquences évolue donc dans le même sens que le volume d'eau libéré au pied de l'ouvrage (pour un même profil aval).

L'Arrêté du 12 juin 2008 [3] précise qu'une étude de propagation de l'onde [doit être] fournie pour l'accident correspondant à la rupture de l'ouvrage et, si nécessaire, pour d'autres accidents présentant un niveau de risque comparable.

### 2.2. *Ce qui est fait...*

Le retour d'expérience des premières études de dangers françaises réalisées pour le compte de différents exploitants a montré que l'ensemble des effets des accidents ne fait quasiment pas ou sinon que très peu l'objet d'une modélisation et d'une représentation cartographique. Le plus souvent, seule la modélisation de l'onde de rupture du barrage à la cote des Plus Hautes Eaux (PHE) est fournie. Dans certains cas, celle-ci peut être déjà avoir été réalisée dans le cadre d'autres demandes réglementaires (principalement des dossiers relatifs aux Plans Particuliers d'Intervention – PPI) [8].

Si la détermination de la gravité des conséquences est menée de façon systématique pour la rupture de l'ouvrage (sur la base du recensement des enjeux à partir des cartographies), elle se révèle **plus délicate pour les autres accidents identifiés**.

## 3. METHODOLOGIE PROPOSEE

### 3.1. *Éléments préalables*

#### 3.1.1. *Analyse documentaire*

Une première étape consiste en l'identification et le recensement des données et des études disponibles par l'exploitant au moment de la réalisation de l'EDD afin de construire une méthodologie adaptée.

Le tableau ci-après décrit les principaux paramètres pour caractériser les conséquences d'un accident en gravité suivant qu'il existe ou non des études relatives à la modélisation de la propagation de l'onde de crue.

|                                   | Avec Modélisation                                                                                                                                                                                  | Sans Modélisation                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ERC / Perte de confinement</b> | Estimation du débit de pointe de l'ERC                                                                                                                                                             | Estimation du débit de pointe de l'ERC                                                                                                                                                                          |
| <b>Cinétique</b>                  | Temps de l'arrivée des premiers effets                                                                                                                                                             | Non connu                                                                                                                                                                                                       |
|                                   | Temps d'arrivée du débit de pointe                                                                                                                                                                 | Non connu                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Intensité</b>                  | Connaissance en différents PK des hauteurs maximales atteintes, des débits locaux atteints                                                                                                         | Non connus                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Enjeux</b>                     | Recensés à partir de l'emprise maximale des effets (cartographie)                                                                                                                                  | Non identifiés                                                                                                                                                                                                  |
|                                   | Connaissance des profils en différents Points Kilométriques (PK)<br><br>Connaissance en certains lieux des débits et des hauteurs d'eaux de crues décennale, centennale et millennale de référence | Connaissance en certains lieux des débits et des hauteurs d'eau liés à des crues déjà rencontrées (généralement jusqu'à la centennale) et des débits de crue de référence (décennale, centennale et millennale) |

Tableau 2 : Données exploitables pour la détermination de la gravité

Les paragraphes suivants présentent le déroulement de la méthodologie suivant qu'une étude de propagation ait été faite ou non.

### 3.1.2. Définitions complémentaires

En sus des définitions indiquées dans le glossaire du guide, le paramètre "cinétique" est ci-après explicité :

Cinétique : Vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle, de l'événement initiateur aux conséquences sur les éléments vulnérables. (Définition issue du "glossaire technique des risques technologiques" annexé à la Circulaire du 10 mai 2010 [5] - réglementation des Installations Classées). Cette définition a été adaptée au contexte des ouvrages hydrauliques (schéma 2), notamment avec la distinction de :

- ✓ la cinétique pré-accidentelle : cinétique de détection et de suivi des dérives jusqu'à l'occurrence de l'ERC. Ce suivi est notamment décrit :
  - dans le cadre de l'élaboration de Plan Particulier d'Intervention ou PPI (réglementation spécifique à certains ouvrages hydrauliques) [8] par la mise en œuvre de stades successifs (stade de vigilance renforcée, stade de préoccupation sérieuse, stade d'alerte) ;
  - dans les consignes de gestion des événements exceptionnels (crue, séisme...) ;
- ✓ la cinétique post-accidentelle : cinétique d'apparition des premiers effets au droit des enjeux (temps de l'arrivée de l'onde) ;
- ✓ la cinétique locale (au droit des enjeux) : temps de montée des eaux une fois les premiers effets ressentis au niveau de chaque enjeu.

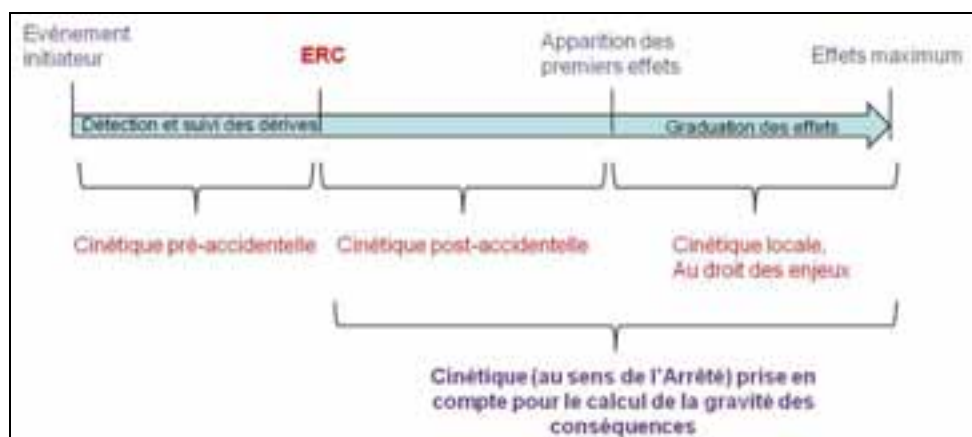


Schéma 1 : Critères de cinétique

### 3.2. *Cas des accidents modélisés et zonage des effets : caractérisation des effets au niveau des enjeux en termes d'intensité et de cinétique locale*

Au niveau de chaque enjeu recensé à partir des cartographies résumant la modélisation, il est possible d'obtenir les valeurs de différents paramètres en des PK proches (généralement, l'incrément de distance retenue est de 0,5 kilomètre) ainsi que l'hydrogramme caractéristique.

Au droit des enjeux, les paramètres exploitables sont les suivants :

- le temps de l'arrivée de l'onde,
- le temps d'arrivée du débit de pointe de l'onde,
- la vitesse de montée des eaux ( $V_m$ ),
- le profil de la rivière,
- la hauteur maximale atteinte,
- la vitesse d'écoulement ( $V_e$ ).

Les effets de l'accident au droit des enjeux peuvent être caractérisés en termes de cinétique et d'intensité avec les paramètres suivants :

- le critère cinétique : la vitesse d'écoulement et la vitesse de montée des eaux ; la vitesse de montée des eaux pouvant, suivant l'hydrogramme correspondant, être approximée par le rapport de la différence entre la cote maximale atteinte et la cote du cours d'eau et de la différence entre le temps d'arrivée du débit de pointe et du temps d'arrivée des premiers effets (approximation linéaire de l'hydrogramme jusqu'à atteinte de la cote maximale),
- le critère intensité : Hauteur maximale atteinte, Débit de pointe.

#### 3.2.1. *Cinétique (au droit des enjeux)*

Il s'agit ici de la cinétique de montée des eaux une fois les premiers effets ressentis. Ne sont pas inclus la cinétique d'alerte des populations ni le temps d'arrivée des premiers effets locaux de l'accident.

##### Vitesse de montée des eaux / Hauteur critique

Cette notion de vitesse de montée des eaux permet de prendre en compte un temps possible de mise à l'abri des populations.

Dans l'élaboration des Plans de Prévention du Risques Inondations (PPRI), certaines valeurs sont utilisées pour définir des seuils critiques de stabilité des personnes. Notamment, il peut être considéré que des hauteurs d'eau supérieures à une valeur seuil, appelée "**hauteur critique**", sont dangereuses et ne permettent pas de satisfaire à d'éventuels critères de stabilité et de déplacement d'une personne dans l'eau. Le calcul de la vitesse de montée des eaux au droit des enjeux permet de déterminer le laps de temps entre l'arrivée des premiers effets et la hauteur critique.

Le laps de temps disponible pour une évacuation des personnes cibles est déterminé par :

$$\text{Temps d'évacuation} = \text{Vitesse de montée des eaux} \times \text{Hauteur critique}$$

A titre d'exemple, [9] indique que des hauteurs d'eau supérieures à 50 centimètres sont considérées comme dangereuses pour le déplacement des personnes.

##### Vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement est conditionnée par la pente du lit et par sa rugosité. Elle peut atteindre plusieurs mètres par seconde. La dangerosité de l'écoulement dépend du couple hauteur/vitesse. A titre d'exemple, à partir de 0,5 m/s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, quelle que soit la hauteur de la lame d'eau, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure.

A titre d'exemple, [9] indique qu'"à partir de 0,50 m/s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure".

### Synthèse

En fonction des enjeux et des situations étudiées, il peut être défini un temps minimal de mise à l'abri d'un certain nombre de personnes. La valeur de ce critère reste à définir et doit permettre de déterminer une vitesse critique de montée des eaux.

Il pourrait également être intéressant de conjuguer cette valeur seuil de vitesse de montée des eaux à une valeur seuil de vitesse d'écoulement (par exemple prise égale à 0,5 m/s).

Deux cas seraient alors représentatifs de la caractérisation de la cinétique des effets au droit des enjeux et distingueraient une cinétique locale permettant de prendre en compte ou non une évacuation partielle des cibles.

| Paramètre choisi                                            | Cinétique au droit des enjeux permettant l'évacuation de certaines personnes | Cinétique au droit des enjeux ne permettant pas l'évacuation des personnes |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Vitesse d'écoulement<br>Et/ou<br>Vitesse de montée des eaux | $V_e < \text{Valeur seuil}$<br>Et<br>$V_m < \text{Valeur à définir}$         | $V_e \geq \text{Valeur seuil}$<br>Ou<br>$V_m \geq \text{Valeur seuil}$     |

Avec par exemple [9]:  
 $V_e (\text{seuil}) = 0,5 \text{ m/s}$   
 $V_m (\text{seuil}) = 5 \text{ cm/min}$

**Tableau 3 : Critères de cinétique locale (au droit des enjeux)**

### 3.2.2. Intensité (au droit des enjeux)

Pour définir le critère d'intensité des effets à partir des données possiblement fournies avec les cartographies d'une onde de submersion, la hauteur d'eau maximale atteinte ne peut être utilisée du fait de son intégration dans le critère cinétique pour le calcul de la vitesse de montée des eaux.

Le débit de pointe au droit des enjeux apparaît donc comme un paramètre exploitable pour caractériser l'intensité au regard des débits de crues connus ou estimés au niveau de ces mêmes enjeux.

Afin de prendre en compte la possibilité d'avoir dans l'étude de dangers plusieurs modélisations (incluant a minima celle de l'onde de submersion consécutive à la rupture de l'ouvrage), les références aux débits de crues décennale, centennale et millennale sont exploitables au niveau de chaque enjeu si les valeurs de ces derniers sont connues.

Il est alors proposé de retenir quatre classes de caractérisation de l'intensité :

- **Intensité très forte** : débit au droit des enjeux supérieur ou égal au débit de la crue de période de retour millennale,
- **Intensité forte** : débit au droit des enjeux inférieur au débit de la crue de période de retour millennale mais supérieur ou égal au débit de la crue de période de retour centennale ou des plus fortes crues connues,
- **Intensité modérée** : débit au droit des enjeux inférieur au débit de la crue de période de retour centennale ou des plus fortes crues connues mais supérieur ou égal au débit de la crue de période de retour décennale,
- **Intensité faible** : débit au droit des enjeux inférieur au débit de la crue de période de retour décennale.

Remarque : Dans le cas de la non-connaissance ou de la non-disponibilité des données de débit relatives aux crues de référence au niveau d'un enjeu, il peut être alors fait l'approximation suivante : l'intensité des effets au niveau de l'enjeu N peut être approximée par comparaison entre l'intensité des effets au niveau de l'enjeu N-1 (en amont) et l'intensité des effets au niveau de l'enjeu N+1 (en aval). Si l'intensité des effets en N-1 est différente de celle en N+1, il sera retenu l'intensité majorante (en général celle de N-1).

### 3.2.3. Zonage des effets

Les deux paragraphes précédents permettent de caractériser les effets de l'accident au niveau de chacun des enjeux identifiés, en termes de cinétique et d'intensité.

Ont été identifiés quatre niveaux d'intensité et deux niveaux de cinétique des effets, ce qui permet de définir jusqu'à huit zones caractéristiques des effets au niveau de chacun des enjeux. Des regroupements de zones sont possibles selon les configurations étudiées. Il est présenté ci-après un tableau de définition de trois zones caractéristiques.

Cette démarche rejoint celle déployée dans le cadre de l'élaboration des PPI [8] qui, à partir des cartographies de l'« Onde de Submersion liée à la rupture de l'ouvrage », découpe en trois parties (zone de proximité immédiate ZPI, zone d'inondation spécifique ZIS et zone d'inondation ZI) la zone totale des effets.

Dans la méthodologie décrite ici, trois zones caractéristiques sont proposées : Zone A, Zone B et Zone C.

| Cinétique<br>Intensité au droit<br>des enjeux | Evacuation dès<br>apparition premiers<br>effets possible | Evacuation dès<br>apparition des premiers<br>effets impossible |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Très Forte                                    | A                                                        | A                                                              |
| Forte                                         | B                                                        | A                                                              |
| Modérée                                       | C                                                        | B                                                              |
| Faible                                        | C                                                        | B                                                              |

←  $Q_{1000}$  au droit des enjeux

←  $Q_{100}$  au droit des enjeux

←  $Q_{10}$  au droit des enjeux

Avec

$Q_{1000}$  : débit de crue millennale de référence

$Q_{100}$  : débit de la crue centennale de référence

$Q_{10}$  : débit de la crue décennale de référence

Valeur(s) | seuil(s) de  
cinétique

**Tableau 4 : Tableau caractéristique des effets de l'accident modélisé – Zonage**

Sur la base d'une affectation d'une zone d'effets au niveau de chaque enjeu, il est possible alors de segmenter la cartographie générale référençant la zone totale impactée par les effets de l'accident en trois parties et de regrouper les enjeux par Zone (A, B et C).

## 3.3. Cas des accidents non modélisés

### 3.3.1. Détermination de la zone totale impactée

Contrairement aux accidents modélisés, il est fortement probable que les limites aval de la zone d'effets ne soient pas connues de manière précise.

La gravité des conséquences ne peut être, sauf données suffisamment précises, déterminée de manière quantitative. Il est proposé d'adopter une approche qualitative. Il est alors intéressant de faire à ce stade un inventaire des données disponibles par l'exploitant :

- le débit au droit du barrage est connu ou peut être facilement estimé. Ce débit correspond donc au débit de l'ERC ;

Les valeurs des crues de référence en différents points à l'aval de l'ouvrage : au travers du rapport de la modélisation de l'onde de submersion liée à la rupture de l'ouvrage, ces débits sont connus en différents points kilométriques (étant donné que la connaissance de la crue décennale de référence est un critère d'arrêt de la modélisation du phénomène).

L'essentiel de la méthode appliquée aux accidents non modélisés repose sur un **raisonnement à partir du débit initial** (au droit de l'ouvrage) contrairement au paragraphe 3.2 qui proposait un raisonnement à partir des débits au droit des enjeux.

#### Cas où le débit de l'ERC est inférieur à celui de la crue décennale (Q10) au droit du barrage

Il peut être considéré que la zone d'étude des effets de l'accident s'arrête dans les premiers kilomètres car l'onde ou la vague générée est rapidement voire directement contenue dans le lit de la rivière.

#### Cas où le débit de l'ERC est supérieur à celui de Q10 au droit du barrage

Il est choisi de retenir comme zone d'étude la zone comprise entre le barrage et le PK où le débit de l'ERC devient inférieur au débit de la crue de période de retour décennale connu à ce PK. Cette approche est majorante et pénalisante car il est considéré que la vague ou l'onde initiale n'est pas amortie le long de son parcours.

### *3.3.2. Caractérisation des enjeux*

Le critère cinétique locale (au droit des enjeux) ne peut être étudié dans une approche réaliste. Le fait de ne pas avoir effectué de modélisation rend difficile l'acquisition de données locales portant sur la vitesse d'écoulement, la hauteur d'eau maximale atteinte, les temps d'arrivée des premiers effets et du débit de pointe.

#### Cas où le débit de l'ERC est inférieur à Q10 au droit du barrage

Les enjeux sont limités aux zones probables de pêche (sur berges ou sur barques), aux zones touristiques et aux zones navigables situées en aval direct.

#### Cas où le débit de l'ERC est supérieur à Q10 au droit du barrage

Une fois la zone approximative d'impact estimée, sont identifiés, en amont du point d'arrêt, les enjeux sensibles, par exemple, de type ponts, routes, voies ferrées, sentiers touristiques, campings, hameaux, villes ou bâtiments à proximité du lit de la rivière....

La démarche menée ici est inverse vis-à-vis des enjeux listés : en ces différents enjeux, est estimé a minima le débit critique pouvant être contenu dans le lit de la rivière. Si le débit critique est supérieur au débit au droit du barrage, aucun effet ne sera considéré sur les enjeux hormis si une zone de pêche ou une zone d'activités est présente.

Des calculs complémentaires peuvent être fournis afin de préciser le débit critique maximal pouvant être supporté au droit de certains enjeux sans impacter les premières cibles (routes, ponts, bâtiments, usines,...).

### 3.3.3. Zonage des effets

L'échelle de caractérisation des effets de l'accident au droit des enjeux est réduite à une seule colonne (colonne de droite du Tableau 4), en considérant ici le débit centennal comme débit critique :

| <b>Cinétique</b><br><b>Intensité de l'ERC</b> | <b>Approche majorante retenue (absence de connaissance des paramètres)</b> |            |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Très Fort</b>                              | A                                                                          | $Q_{1000}$ |
| <b>Fort</b>                                   | A                                                                          | $Q_{100}$  |
| <b>Modéré</b>                                 | B                                                                          | $Q_{10}$   |
| <b>Faible</b>                                 | B                                                                          |            |

**Tableau 5 : Tableau caractéristique des effets des accidents non modélisés – Zonage**

## 3.4. Caractérisation de la Gravité des conséquences en niveaux

### 3.4.1. Détermination de la PAR maximale

La première étape est l'identification et le recensement des personnes susceptibles d'être impactées au niveau de chaque enjeu (Population Assujettie au Risque – PAR [6]). La circulaire du 31 octobre 2008 [4] relative aux études de dangers des barrages préconise *une maille de comptage assez fine sans pour autant obtenir un nombre de personnes précis ; un ordre de grandeur est souhaité.*

Dans un souci d'harmonisation des méthodologies de comptage avec la réglementation existante dans le domaine des installations classées, il est notamment proposé d'utiliser la méthode de comptage définie dans la réglementation française des Installations Classées : Fiche n°1 « Eléments pour la détermination de la gravité dans les études de dangers » de la « Circulaire du 10 mai 2010 [5] récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers à l'appréciation de la démarche de réduction du risques à la source et aux Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) dans les Installations Classées en application de la loi du 30 juillet 2003 ».

Avec ces outils et règles de comptage existants il est ainsi possible d'obtenir un ordre de grandeur maximal de l'ensemble des cibles atteintes (PAR) par les effets de l'accident au niveau de chaque enjeu.

### 3.4.2. Prise en compte de la cinétique pré- et/ou post-accidentelles

Les facteurs de réduction proposés dans ces paragraphes sont donnés à titre illustratif pour l'application de la méthode. Leur valeur pourra être définie et/ou appuyée par des données relatives à un retour d'expérience.

#### Critère de cinétique pré-accidentelle applicable :

Dans le cas où la cinétique pré-accidentelle est justifiée et peut être prise en compte (sur la base d'éléments justificatifs ou de critères applicables), il peut être proposé de retenir forfaitairement un facteur de réduction du nombre de personnes dans chaque zone. **Ce facteur de réduction s'applique alors à l'ensemble des enjeux identifiés.**

### Critère de cinétique post-accidentelle applicable :

Dans le cas où la cinétique post-accidentelle (temps d'arrivée des premiers effets compatibles avec une première évacuation des personnes) est applicable, il peut être proposé de retenir forfaitairement un **facteur de réduction du nombre de personnes pour les enjeux situés à un temps d'arrivée des premiers effets supérieur à un temps seuil défini pour la cinétique post-accidentelle.**

Si la valeur de temps seuil associée à la prise en compte du critère de cinétique post-accidentelle est supérieure à la limite temporelle d'arrêt de la modélisation, il ne sera comptabilisé que la PAR maximale.

*Remarque* : l'application du critère de cinétique post-accidentelle n'est envisageable que pour les accidents qui ont fait l'objet d'une modélisation (affichage des temps de propagation le long du parcours).

### Ainsi, globalement :

- si seul le critère pré-accidentel est applicable, on aura une réduction globale de la PAR maximale par un facteur correctif ;
- si seul le critère post-accidentel est applicable, on aura une réduction de la PAR maximale située au-delà du temps seuil d'un second facteur correctif.

Dans les cas contraires, aucun facteur correctif ne peut être appliqué. Il est alors affiché et retenu le nombre de personnes maximal (PAR initiale maximale).

### 3.4.3. Niveaux de gravité des conséquences

Une échelle de définition des niveaux de gravité basée sur l'estimation de la PAR dans chaque zone d'effets identifiée est proposée.

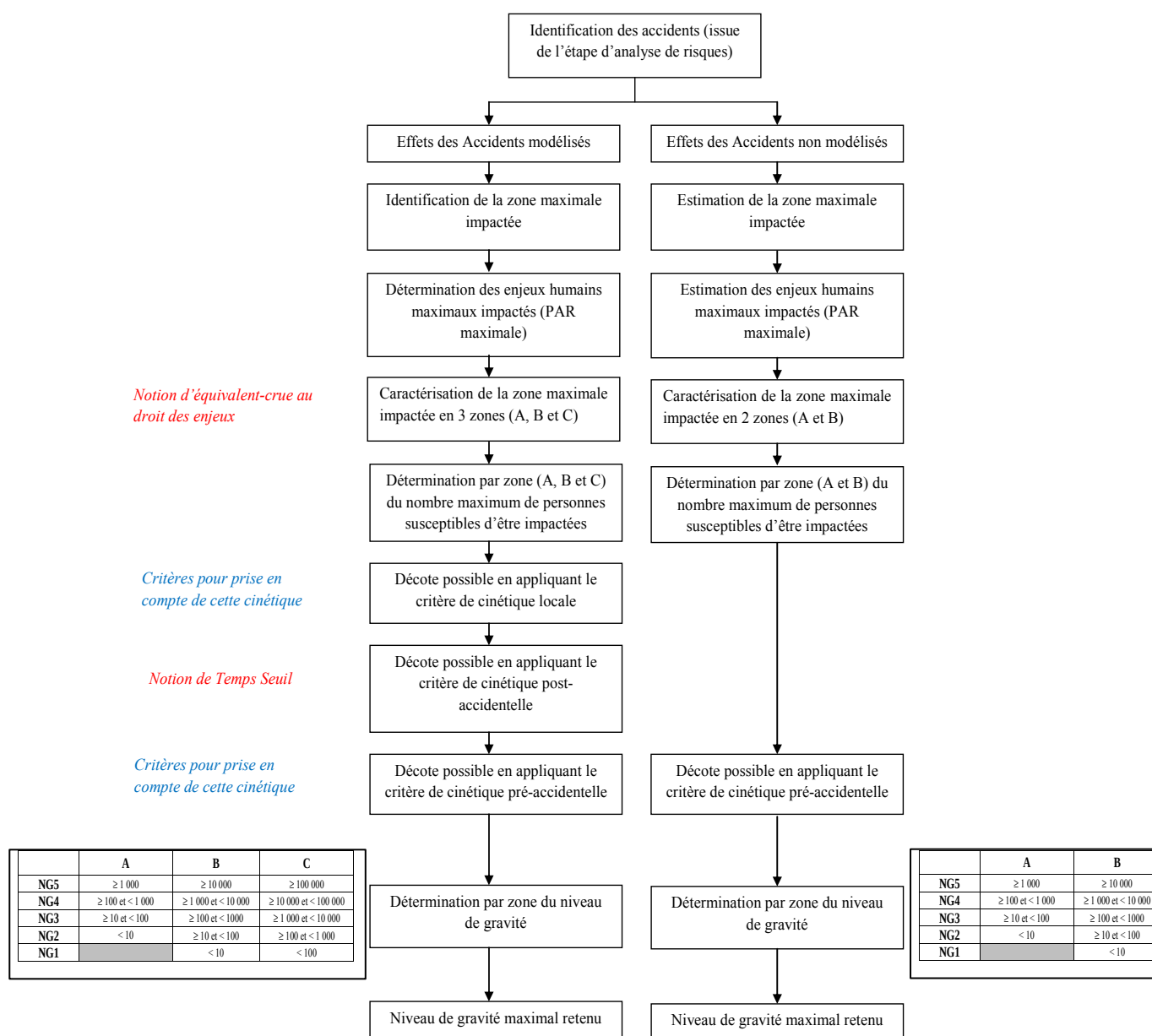
|            | <b>A</b>         | <b>B</b>            | <b>C</b>              |
|------------|------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>NG5</b> | ≥ 1 000          | ≥ 10 000            | ≥ 100 000             |
| <b>NG4</b> | ≥ 100 et < 1 000 | ≥ 1 000 et < 10 000 | ≥ 10 000 et < 100 000 |
| <b>NG3</b> | ≥ 10 et < 100    | ≥ 100 et < 1000     | ≥ 1 000 et < 10 000   |
| <b>NG2</b> | < 10             | ≥ 10 et < 100       | ≥ 100 et < 1 000      |
| <b>NG1</b> |                  | < 10                | < 100                 |

**Tableau 6 : Correspondance cibles impactées vs. niveau de gravité**

Ainsi pour chaque zone (A, B et C), il est mis en correspondance un niveau de gravité des conséquences.

Il sera retenu pour chaque phénomène dangereux, le niveau de gravité maximal des trois calculés (cas des accidents modélisés) ou des deux calculés sinon.

### 3.5. Logigramme synthèse de la méthode



**Graphique 1 : Logigramme de la méthodologie de détermination du niveau de gravité des conséquences sur les enjeux humains suite à un accident sur un barrage**

### 3.6. Inconvénients de la méthode et méthode simplifiée

#### 3.6.1. Eléments discutables

La méthode proposée dans les paragraphes précédents permet de répondre et de traiter de manière théorique l'ensemble des critères cités dans l'Arrêté du 12 juin 2008 [3] et du guide annexé à la circulaire du 31 octobre 2008 [4].

Toutefois, la mise en œuvre d'une telle méthode peut être rendue difficile du fait :

- de l'incertitude portée sur les nombreux résultats de modélisations (notamment sur les valeurs des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement en différents points de la zone d'effets) ;
- de l'ancienneté des modélisations effectuées ;
- de l'incertitude sur les valeurs des crues de référence en différents lieux situés à l'aval de l'aménagement étudié.

### 3.6.2. Simplification de la méthode pour la détermination du niveau de gravité d'un accident dont les effets ont été modélisés

Une des principales difficultés rencontrées dans les premières études de dangers réalisées a été la caractérisation des effets au niveau de chaque enjeu recensé le long du parcours des ondes générées par une perte de confinement sur l'ouvrage.

**Une adaptation conservatrice** de la précédente méthode peut être envisagée pour les accidents ayant fait l'objet d'une modélisation en ne caractérisant pas ces effets en terme de cinétique et d'intensité locales. Cela revient par conséquent à considérer qu'aucune mise en sécurité des personnes n'est envisageable une fois les premiers effets ressentis au niveau de chaque enjeu.

De cette action découle une non-prise en compte des paramètres seuils de Vitesse d'Écoulement (Ve) et de Vitesse de Montée des eaux (Vm). Le tableau 4 utilisé est ainsi simplifié :

| <b>Cinétique</b><br><b>Intensité au droit des enjeux</b> | <b>Evacuation dès apparition premiers effets impossible</b> |                                          |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Très Fort</b>                                         | A                                                           | ← Q <sub>1 000</sub> au droit des enjeux |
| <b>Fort</b>                                              | A                                                           | ← Q <sub>100</sub> au droit des enjeux   |
| <b>Modéré</b>                                            | B                                                           | ← Q <sub>10</sub> au droit des enjeux    |
| <b>Faible</b>                                            | B                                                           |                                          |

**Tableau 7 : Tableau caractéristique simplifié des effets de l'accident modélisé – Zonage**

Le zonage des effets est donc réduit à deux zones A et B (au lieu de trois) :

- une zone A pour des débits locaux supérieurs au débit de la crue centennale (Q100),
- une zone B pour des débits locaux inférieurs au débit de la crue centennale (Q100).

Contrairement au Tableau 4, l'identification de deux zones d'effets représente une approche majorante dans la détermination ultérieure du niveau de gravité des conséquences sur les enjeux humains.

La seule différence restante par rapport aux accidents qui n'ont pas fait l'objet d'une modélisation et d'une représentation cartographique réside en la possibilité ou non de considération de la cinétique post-accidentelle.

### 3.6.3. Positionnement et axes de recherche à venir

Les réflexions menées à ce jour nécessitent d'être poursuivies par la caractérisation et la définition de certaines données présentées. Les principaux axes de recherche à venir portent notamment sur la détermination des valeurs seuils correspondantes aux différents paramètres suivants :

- la vitesse d'écoulement locale et la vitesse de montée des eaux locale pour la cinétique au droit des enjeux (dans le cas d'une mise en œuvre de la méthode « complète ») ;
- le temps seuil d'arrivée des premiers effets et le coefficient de réduction de la PAR locale pour la cinétique post-accidentelle ;
- les critères à remplir pour la prise en compte de la cinétique pré-accidentelle et le coefficient de réduction de la PAR maximale associé.

## CONCLUSION

L'article R.214-115 du Code de l'Environnement introduit par le Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 [2] prévoit la réalisation d'une étude de dangers pour certains ouvrages hydrauliques. Cette étude a pour objectif la démonstration de la maîtrise des risques par l'exploitant au travers d'une analyse croisée de la gravité des conséquences des effets et de la probabilité d'occurrence annuelle des accidents majeurs identifiés.

La gravité peut être déterminée de manière quantitative ou qualitative, en fonction de la disponibilité de représentations cartographiques des effets hydrauliques (onde de submersion ou vague/s), et sur la base d'un recensement des enjeux humains susceptibles d'être impactés par ces effets, ou PAR (« Population At Risk » ou « Population Assujettie aux Risques » [6]).

Une méthode de caractérisation des effets s'appuie sur une estimation de l'intensité et de la cinétique locale. Certains critères tels que la « cinétique pré-accidentelle » ou la « cinétique post-accidentelle » sont potentiellement des voies de réduction de la gravité via une diminution du nombre de personnes effectivement impactées.

La notion de gravité associée à chaque accident résulte donc d'une analyse faisant intervenir plusieurs paramètres.

Cette communication présente l'avancement des travaux en cours à l'INERIS en proposant :

- une méthode « complète » permettant de répondre de façon théorique à l'ensemble des critères définis dans le cadre de l'article 8 du plan des études de dangers défini par l'Arrêté du 12 juin 2008,
- une méthode « simplifiée » prenant en compte les données disponibles et exploitables pour la caractérisation des différents paramètres.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatique et modifiant le code de l'environnement. Adoptée par l'Assemblée Nationale et le Sénat et promulguée par le Président de la République française. *Publiée au JO n° 303 du 31 décembre 2006 et Rectificatif au JO n° 17 du 20 janvier 2007.*
- [2] 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 et modifiant le code de l'environnement. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. *Publié au JO du 13/12/2007.*
- [3] Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire. *Publié au JO n° 142 du 19 juin 2008.*
- [4] Circulaire du 31 octobre 2008 relative aux études de dangers des barrages. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.
- [5] Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat.
- [6] Guidelines on Assessment of the Consequences of Dam Failure. ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams). 2000

- [7] Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. *Publié au JO du 7 octobre 2005.*
- [8] Arrêté du 22 février 2002 pris en application du Décret n°92-997 du 15 septembre 1992 relatif aux plans particuliers d'intervention concernant certains aménagements hydrauliques. Ministère de l'Intérieur. *Publié au JO du 22 février 2002*
- [9] Dossier d'information : Les inondations. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. 2004
- [10] McClelland, D.M., Bowles, D.S. (2002) Estimating life loss for dam safety risk assessment – a review and new approach. *IWR report 02-R-3. 420 p.*
- [11] Jonkman, S.N. (2007) Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications. *PhD Thesis. Delft University of Technology*
- [12] Graham, W.J. (1999) A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. *U.S.Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, Report no. DSO-99-06. 44 p.*



## NOTES SUR L'ACCIDENTOLOGIE DES BARRAGES-POIDS

### *Notes on Gravity dams accidentology*

**Luc, Deroo**

29 rue Maurice Flandin, 69003 Lyon

[deroo@isl.fr](mailto:deroo@isl.fr)

**Boris, Jimenez**

75 bd MacDonald, 75019 Paris

[boris.jimenez@isl.fr](mailto:boris.jimenez@isl.fr)

#### **MOTS CLÉS**

Barrage-poids, rupture, fissuration, calcul, béton, maçonnerie

#### **ABSTRACT**

*This paper proposes a compilation gravity dams accidents, looking only to accidents that led to complete failure of the dams. Documentary sources are disparate and actually rather rare : in the gathered literature review, only a couple of failures are sufficiently documented to provide guidance on the relevant mechanisms. This is probably the biggest obstacle to a thorough feedback on this issue. Dam failures covered by this document are: Fergoug (2), Cheurfa, Bouzey (2), Tigra, Austin, St. Francis, Camara, Mohn, Eder, Puentes, Elwha, Camara, Khadakwasla, Xuriguera, Chikkahole, Zerbino. Of these, only three failures correspond to the model for calculating gravity dams as it is practiced regularly. All others correspond to particular situations that the calculation reproduces poorly. This first compilation can highlight features common to past failures, and identify some risk situations: (1) unsuitable geological situations misidentified at the design stage, (2) foundations on subhorizontal alternating sandstone and shales or clay, (3) old masonry or concrete dams if not properly drained, especially if they are cracked and if their security relies heavily on the integrity of a thin upstream facing, (4) banks dam blocks, where the monolithism of the dam is uncertain. For other cases, calculation methods and parameters usually taken into account appear to be sufficiently conservative.*

#### **RÉSUMÉ**

*Cet article propose une compilation de l'accidentologie des barrages-poids, en s'intéressant uniquement aux accidents ayant conduit à la rupture. Les sources documentaires sont disparates et finalement assez rares : dans la littérature examinée, une quinzaine de ruptures sont suffisamment documentées pour donner des indications sur les mécanismes. C'est probablement l'obstacle le plus important à une véritable étude de retour d'expérience sur les ruptures des barrages-poids. Les barrages concernés par ce document sont les suivants : Fergoug (2), Cheurfas, Bouzey (2), Tigra, Austin, Saint-Francis, Camara, Mohne, Eder, Puentes, ElWha, Camara, Khadakwasla, Xuriguera, Chikkahole, Zerbino. Parmi celles-ci trois seulement correspondent au modèle de calcul des barrages-poids tel qu'il est régulièrement pratiqué. Toutes les autres correspondent à des situations particulières que le calcul reproduit mal. Cette première compilation permet de mettre en évidence des traits communs aux ruptures passées, et identifient quelques situations à risque : (1) les situations géologiques inadaptées mal identifiées à la conception, (2) les fondations subhorizontales en alternance grès-marne ou grès-argile, (3) les barrages anciens en maçonnerie ou béton s'ils sont mal drainés, en particulier s'ils sont fissurés et si leur sécurité repose beaucoup sur l'intégrité d'un parement amont mince, (4) les plots de rive, lorsque le monolithisme du barrage est mal assuré. Pour les autres cas, les méthodes de calcul et paramètres habituellement pris en compte apparaissent suffisamment conservatifs.*

## INTRODUCTION

Plusieurs études de dangers en cours concernent des barrages-poids, en béton ou en maçonnerie. Ces études amènent régulièrement à réexaminer les conditions de stabilité de ces ouvrages, en particulier sous sollicitations exceptionnelles, et en tenant compte de modes de rupture plus variés que le simple glissement sur la fondation. Dans ce contexte, les procédures classiques de calcul trouvent leurs limites, et méritent d'être complétées par la prise en compte de l'accidentologie observée sur ce type d'ouvrages.

Ce constat nous a amené à engager une action de recensement, compilation et analyse des accidents (ou incidents) d'instabilités de barrage-poids. Ce travail est par ailleurs une contribution au groupe de travail « Barrage-poids » du CFBR, en charge d'actualiser les recommandations pour leur justification. L'objet de la communication est d'en présenter les premiers résultats.

## 1. ACCIDENTOLOGIE

### 1.1. Inventaire des ruptures

La documentation relative aux ruptures de barrages-poids a été recherchée dans les différentes sources mentionnées en bibliographie. Une cinquantaine de ruptures ont été identifiées. Parmi celles-ci, 17 concernent des barrages en béton, 24 concernent des barrages en maçonnerie, 7 ne définissent pas la nature du barrage, 2 sont des ouvrages mixtes (béton, maçonnerie). Les ruptures pour lesquelles des éléments substantiels sont disponibles sont décrites ci-dessous.

### 1.2. Barrage de l'Habra (Algérie, 1881, 1927), [5], [9], [11]

Le barrage de l'Habra, sur l'oued Fergoug, est un ouvrage en maçonnerie, de hauteur 35 m au-dessus du terrain naturel. Achevé en 1871 et dimensionné pour une lame déversante de 1,60 m (500 m<sup>3</sup>/s), il subit successivement deux crues importantes : la première (1872, 700 m<sup>3</sup>/s) avec une lame de 2 m cause de « sérieux dégâts que l'on se contente de réparer », y compris une rupture partielle de l'évacuateur ; la seconde (1881, 850 m<sup>3</sup>/s) avec une lame de 2,25 m emporte la rive droite de l'ouvrage.



**Graphique 1 : Fergoug - Première rupture.**

Une nouvelle crue en 1927 cause une rupture complète du barrage. Cette rupture s'est également produite en crue, avec cette fois-ci réservoir initialement presque vide ; et une lame d'eau maximale de 3,85 m au-dessus du déversoir, niveau maximal jamais atteint au barrage.

Selon les calculs, la crue de 1881 a mis en tension la maçonnerie de l'ouvrage en parement amont (point « A »), à hauteur de 1kg/cm<sup>2</sup>.

Le barrage est reconstruit avec un profil-type pratiquement identique. Il subit une crue en 1900 avec un niveau d'eau supérieur (par obstruction du déversoir), sans désordres.



**Graphique 2 : Fergoug - Deuxième rupture**

La brèche s'est amorcée au voisinage de l'évacuateur (rive gauche), dans les maçonneries, puis s'est propagée vers la rive droite. Deux facteurs aggravants sont mentionnés par la Commission technique : les maçonneries étaient sèches (donc plus légères) et l'eau très chargée.

### **1.3. Barrage de Cheurfas (1885), [5], [9]**

Le barrage de Cheurfas est un barrage en maçonnerie de hauteur 35 m environ. En 1885, une crue emporte l'appui rive droite. Le barrage est reconstruit en allant chercher, en rive droite amont, une fondation calcaire de meilleure qualité.



**Graphique 3 : Le barrage de Cheurfas, après travaux : nouvel appui RD vers l'amont [17]**

Après la rupture du barrage de l'oued Fergoug (vallée voisine) en 1927, le barrage des Cheurfas est révisé (et surélevé). Les travaux ont impliqué : des tirants actifs, des injections en fondation et la régénération des maçonneries.

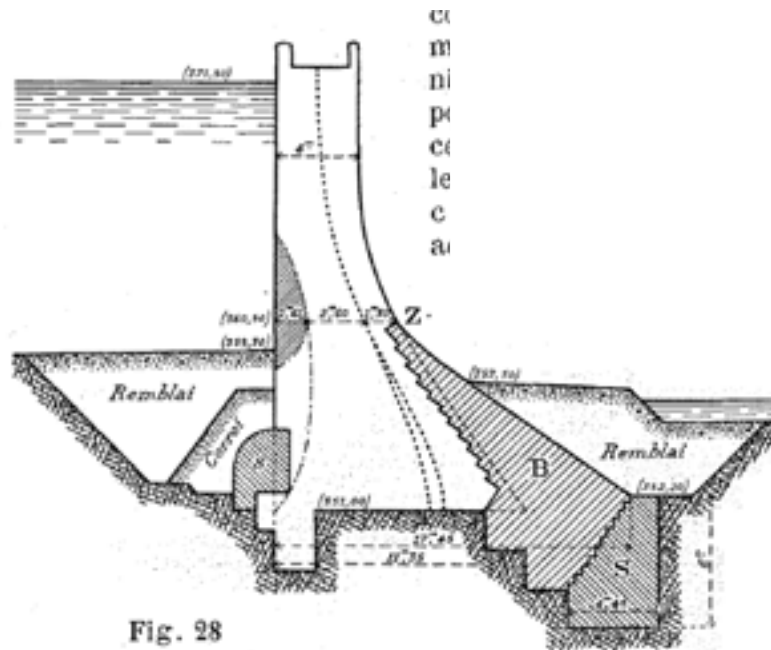
### **1.4. Barrage de Bouzey (France, 1884 et 1895), [8], [10]**

Le barrage de Bouzey fait 15 m au-dessus du terrain naturel, et 27 m au-dessus de sa fondation. Le barrage est fondé sur des grès décrits comme étant « fissurés et poreux » avec des passages d'argile. Le pendage est horizontal. Il a subi deux accidents.

L'accident de 1884 se produit au premier remplissage, et est décrit de la manière suivante.

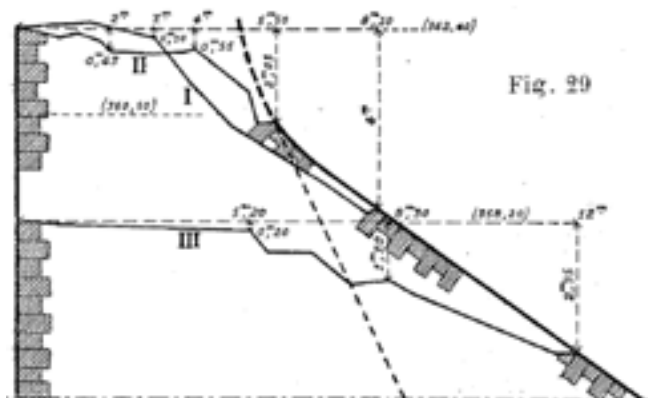
- A la cote 362, venues d'eau pour un débit de plus de 50 l/s, puis 75 l/s à la cote 365.
- A la cote 368,80, déplacement brutal de 135m de barrage vers l'aval, qui se sépare du mur de garde ; fracture horizontale à la base, sol de fondation broyé sur 2 à 3 m d'épaisseur sous le barrage. Le déplacement maximal atteint 34 cm en crête. Les fuites atteignent 230 l/s.
- Poursuite du remplissage jusqu'à la cote 369 (!)
- Vidange du réservoir fin 1885

Le barrage est alors renforcé par un massif de maçonnerie complémentaire, une butée aval et une consolidation des fondations. Il est remis en eau en septembre 1889.



**Graphique 4 : Bouzey - Le barrage après confortement (B, S) et figuré de la zone de traction amont ([10])**

Après 5 ans d'exploitation à la cote maximale (371,5), le barrage se rompt brutalement, le 27 avril 1895. 170 m de barrage sont emportés sur la partie centrale. Le plan d'eau est alors à la cote 371,4. On a noté de nombreuses traces d'écrasement et de cisaillement près du parement aval. Les fondations n'ont pas bougé du tout. Les profils de rupture sont illustrés sur le schéma ci-dessous.



**Graphique 5 : Bouzey - Surfaces de rupture ([10])**

La maçonnerie a utilisé un sable de qualité médiocre (forte teneur en fines).

Les pistes d'explication de la rupture, après 5 ans d'exploitation à retenue haute, ne figurent pas dans la littérature examinée. Notons cependant un hiver (décembre-mars) 1895 le plus froid depuis la mise en service du barrage, avec un mois de février exceptionnel : température moyenne  $-3,6^{\circ}$  à Paris.

### 1.5. Barrage d'Austin (Bayless), 1911, [4]

Le barrage d'Austin est un barrage de 13,1 m de hauteur au-dessus du terrain naturel, en béton cyclopéen. Il est fondé sur des grès lités horizontalement, avec intercalations de marnes et de grès peu cimentés. Le barrage est muni d'une bêche de profondeur 1,20 m prolongée par des ancrages de longueur 7,60 m. Le béton est de qualité très hétérogène. Des fissures verticales (retrait) apparaissent dès la construction, avant mise en eau. Au premier remplissage, des écoulements (« in large quantities ») apparaissent à l'aval du barrage. Le 23 janvier 1910, la partie centrale du barrage glisse de 50 cm environ vers l'aval. La retenue amont est abaissée par création à l'explosif d'une échancrure. Le barrage n'est pas conforté ; une crue l'emporte en 1911. Selon les témoignages, c'est d'abord un « bouchon » qui saute près de l'appui rive droite.



Figure AP-3. Photo showing downstream area after dam failure (after Potter County Leader 9-24-1986)

*Graphique 6 : Austin - Le barrage après rupture ([4])*

Le calcul du barrage par la méthode « standard », y compris propagation de la pleine sous pression dans la fissure amont, a montré qu'une rupture sur les marnes intercalées pouvait se produire pour un angle de frottement de moins de  $41^\circ$ . Ces calculs ont été conduits en négligeant la contribution de la bêche et des ancrages à la résistance du barrage.

**1.6. Barrage de Tigra (Inde, 1917), [3]**

Le barrage de Tigra est un barrage en mortier à la chaux, de hauteur 24 m, sur fondation gréseuse horizontale avec intercalation de joints (« seams »). Deux blocs du barrage ont été emportés lors d'une crue, au cours de laquelle une lame d'eau de 15 cm est passée par-dessus la crête. La littérature ([3]) fait l'hypothèse que la submersion n'a pas joué un rôle essentiel, et que la rupture provient probablement de fortes sous-pressions.



Photo 1. TIGRA DAM, INDIA

Left: Present Dam; and right: Old tailed dam

*Graphique 7 : Tigra - Le barrage après rupture*

### 1.7. Barrage de Saint-Francis (Etats-Unis, 1928), [3], [6]

Le barrage de Saint-Francis est un ouvrage-poids en béton, de hauteur 62,50 m ; il est légèrement arqué. Le parement amont est subvertical. Le fruit moyen des parements est de 0,75 H/1V.

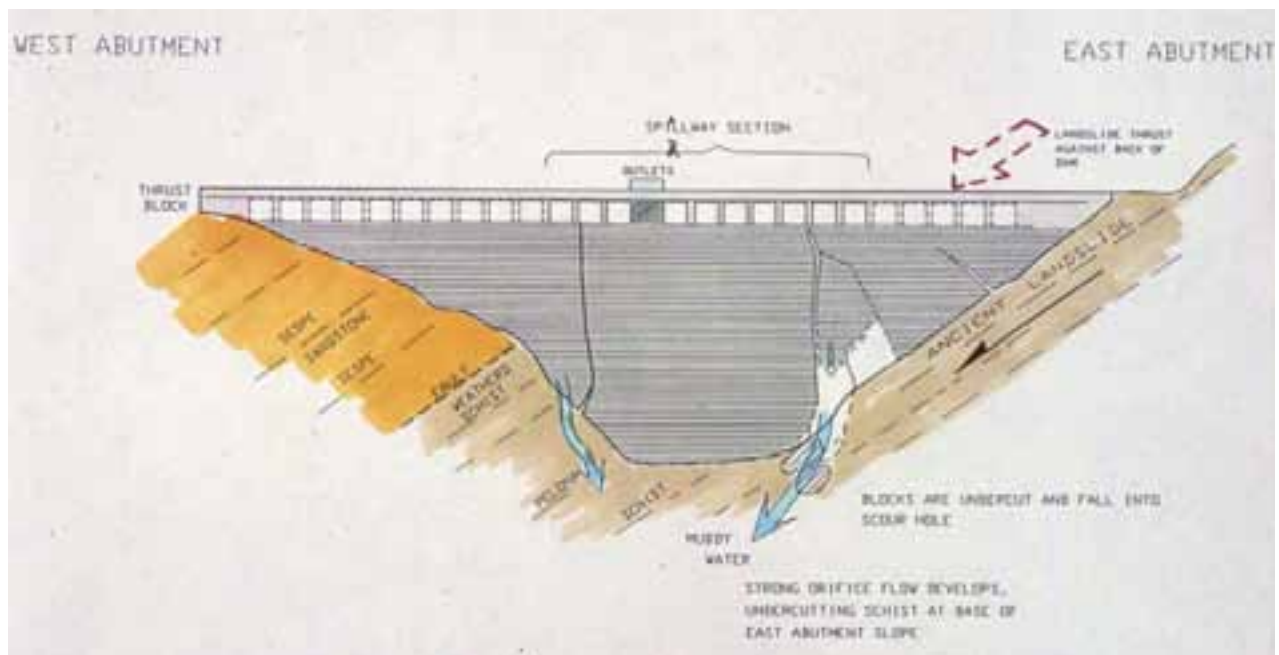
Le barrage est fondé en rive gauche, vallée et moitié de la rive droite sur des schistes, souvent fortement cisailés parallèlement à la pente gauche. En haut de rive droite, il est fondé sur des conglomérats rougeâtres.

La rupture s'est produite au premier remplissage. La hauteur d'eau maximale (seuil du déversoir) a été atteinte une semaine avant la rupture. De faibles fuites sont constatées dans le corps du barrage, mais les écoulements en fondation sont plus importants. Ces écoulements s'intensifient rapidement quelques heures avant la rupture.

Une douzaine de commissions ont étudié la rupture du barrage. Les conclusions diffèrent dans le détail, mais mettent toutes en avant l'effet prépondérant de la géologie du site, avec deux coupables possibles :

- la rive gauche, qui est un paléo-glissement, qui a été réactivé lors de la rupture et, semble-t-il, avant la rupture proprement dite ;
- les conglomérats gypsifères de la rive droite, possiblement sensibles à des phénomènes de contraction sous submersion.

On note en tous cas l'absence de drainage des deux rives et la construction sans coupure des écoulements (pas de bêche, pas de rideau d'injection).



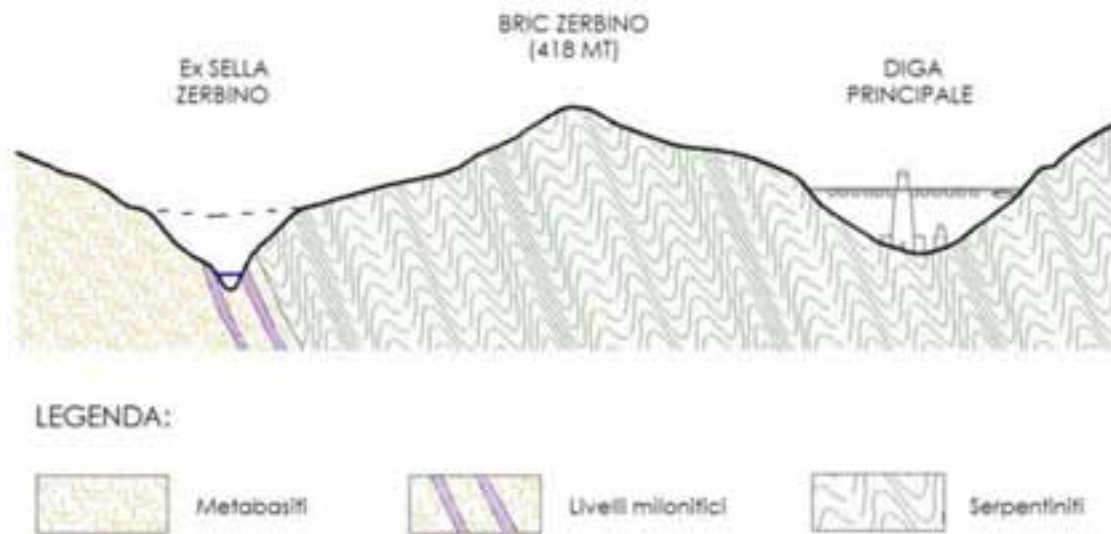
Graphique 8 : Saint-Francis - Contexte géologique du glissement rive gauche ([6])

### 1.8. Barrage de Zerbino (Italie, 1935), [7]

Le barrage de Zerbino était composé de deux structures : l'ouvrage principal (hauteur 47 m) et le barrage de col (hauteur 14 m). C'est le barrage de col qui a cédé.

La rupture s'est produite à l'occasion d'une crue exceptionnelle (plus de 4 fois la crue de dimensionnement), qui a submergé les deux barrages. La retenue a commencé à surverser par la crête à 12h30 (cote 324,50), a atteint la cote 326,67 à 13h15 ; la rupture du barrage secondaire est intervenue à 13h30, avec près de 3 m de lame déversante. Le barrage principal a tenu.

Les crues suivantes ont continué à approfondir le sillon du col secondaire, jusqu'à la configuration actuelle, où le lit y est descendu de 40-45 m.



*Graphique 9 : Zerbino - Contexte géologique des deux barrages ; topographie actuelle ([7])*

Il semblerait que la cause mécanique de la rupture soit l'affouillement au pied aval du barrage secondaire. La présence de niveaux de mylonites dans le rocher de type « métabasite » (ferromagnésien recristallisé) a rendu le rocher érodable.

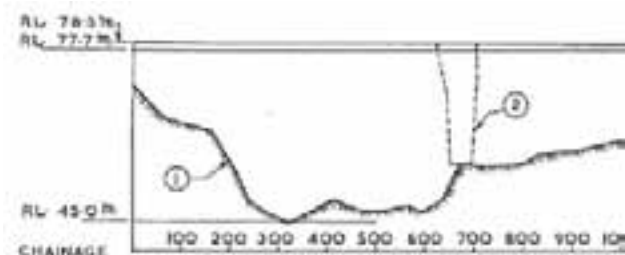
### 1.9. Barrage de Khadakwasla (Inde, 1961) [21]

Le barrage de Khadakwasla (hauteur 33 m, construit en 1879, Inde) a été détruit en 1961 par l'onde de la rupture du barrage de Panshet, situé à l'amont. C'est un barrage en maçonnerie de basalte au mortier de chaux ; la maçonnerie est rangée à la main.



La surverse par-dessus le barrage a atteint 2,70 m, pendant de nombreuses heures. Les témoins évoquent un « basculement ». La rupture s'est produite dans une zone d'approfondissement rapide de la cote de fondation ; une fissure verticale s'est ouverte au changement de pente.

On note que le profil du barrage est mince : largeur à la base 17,2 m. La densité des maçonneries est évaluée à 2,4. Des mesures de résistance à la compression et à la traction ont été effectuées, sur carottes de maçonneries (resp. 12 MPa et 600 kPa) et sur le mortier de chaux (resp. 500 kPa et 40 kPa). Le barrage n'est pas drainé.



*Graphique 10 : Khadakwasla - le barrage rompu et une élévation montrant le plot emporté*

Un recalcul 2D standard ne permet pas de retrouver la cote de rupture constatée. Plusieurs explications possibles : la difficulté à estimer la résistance des maçonneries, les effets de l'inclinaison rive-à-rive de la fondation, ou un plan de rupture en fondation plutôt que dans les maçonneries.

### 1.10. Barrage de Camara (Brésil, 17/06/2004), [1], [2]

Le barrage de Camara est un barrage poids de hauteur 50 m, en BCR peu dosé (spécifié à 80 kg/m<sup>3</sup>). Le BCR est complété par un masque amont en BCV, d'épaisseur très variable, et quasi-nulle par endroits. Le rocher de fondation est schisteux en rive gauche et granitique en vallée ; il a été traité par un voile d'étanchéité monolinéaire et un plan de forages de drainage.

Le barrage s'est rompu au premier remplissage, pour une cote de retenue 11 m (!) sous la crête. Des rapports d'interprétation de la rupture du barrage ont été publiés, sous l'égide du Ministère Public de Paraíba

Les causes de la rupture sont décrites comme suit :

- essentiellement, un plan de glissement géologique en rive gauche, insuffisamment exploré et traité. Ce plan de glissement a conduit à une situation défavorable, à la fois topographique et géologique.
- accessoirement, une qualité de réalisation insuffisante et la présence d'une galerie de visite de dimensions conséquentes par rapport à la section du barrage.

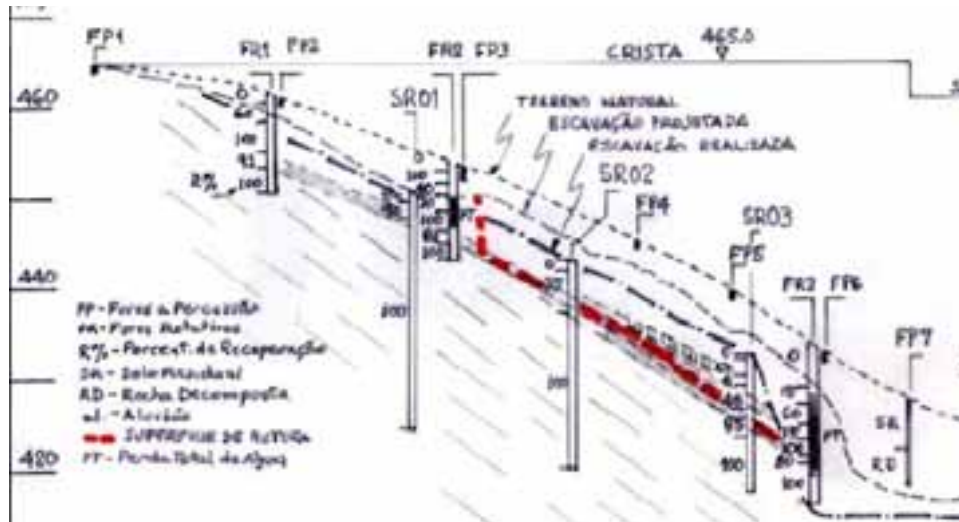
Les photographies ci-dessous illustrent la surface de glissement, située 10 m sous le terrain naturel et 4 m sous la cote d'excavation en rive. Cette surface est pratiquement plane, parallèle à la rive ; le plan de glissement présente très peu d'aspérités.



**Graphique 11 : Camara - La surface de glissement rive droite ([1])**

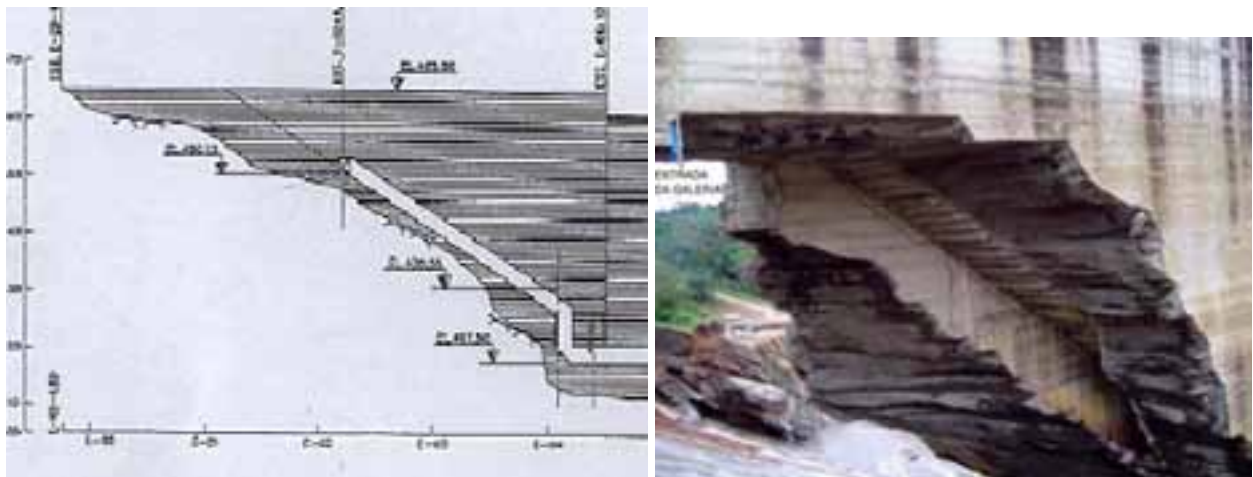
Lors de la mise en eau, des artésianismes significatifs se sont développés sur cette rive. La galerie a été inondée ; plusieurs drains ont été qualifiés de « ne fonctionnant pas ».

Le schéma ci-dessous est un profil en long de la rive gauche, où figurent notamment la surface de rupture (en rouge) et le profil des excavations (« escavação realizada »). Notons deux traits topographiques défavorables : l'escarpement en pied de rive, et la fondation sur une surface très inclinée.



Graphique 12 : Camara - Profil des excavations rive gauche ([2])

Sur une bonne partie de la rive gauche, la surface de rupture dans le corps du barrage coïncide avec la galerie de visite. En particulier à l'amorce du volume emporté côté vallée. La galerie a pu provoquer des faiblesses mécaniques (plans de fissures verticaux amont-aval à ses extrémités, traction en face amont du barrage) ; il est également possible que, pour des raisons constructives, le BCR soit moins bon à l'accostage sur la galerie).

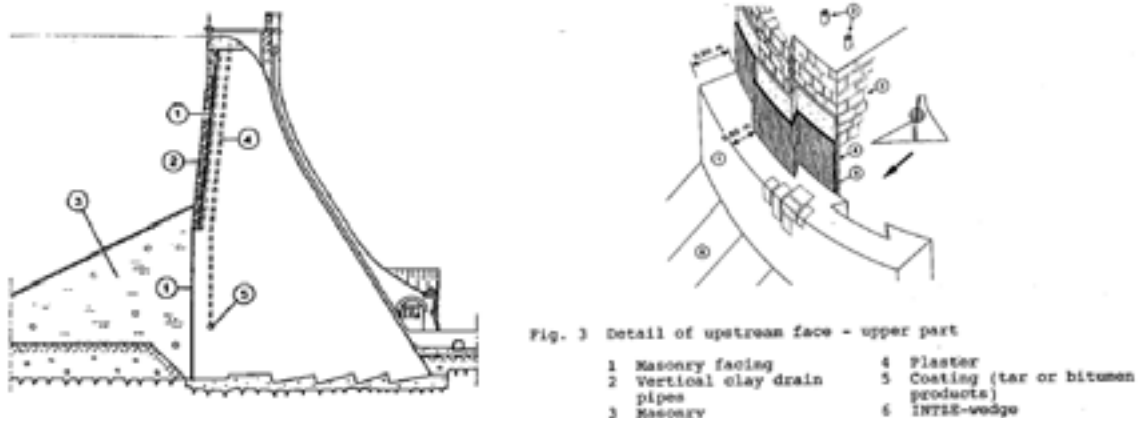


Graphique 13 : Camara - Situation de la galerie rive gauche ([2])

### 1.11. Autres ruptures

#### 1.11.1. Faits de guerre : Mohne et Eder (1943), [14]

Le barrage Mohne est un barrage poids en maçonnerie, de hauteur 40 m, construit en 1908-1913. La largeur en crête est 6 m (34 m à la base). Le profil type est de type Intze (pas de prise en compte des sous-pressions ; critère de stabilité : la résultante passe dans le tiers central ; parement amont soigneusement étanché et drainé).



Graphique 14 : Profil Intze classique ([14])

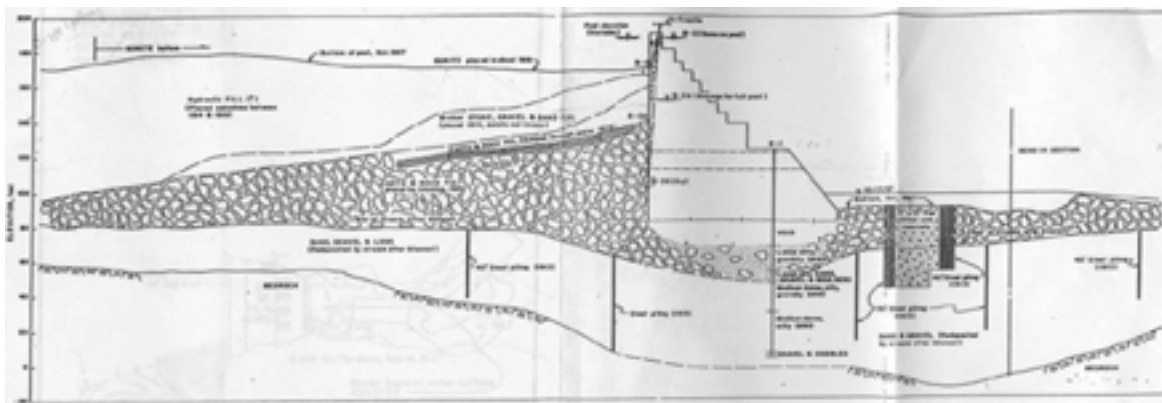
Au moment de l'attaque, la retenue était pleine. Deux bombes ont explosé à proximité du parement, à quelques mètres sous le niveau de l'eau. Cela a créé une brèche de largeur 76 m et de profondeur 22 m.

Le barrage Eder est un barrage poids en maçonnerie de hauteur 41 m, construit en 1908-1913. La largeur en crête est 6 m (35 m à la base). Une bombe a atteint l'objectif, créant une brèche de « 25 m de diamètre ».

On peut penser que l'effet du bombardement a été de déstructurer l'étanchéité amont, amorçant une fissure qui a ensuite modifié le profil des pressions interstitielles dans le barrage, ou saturé le réseau de drainage.

#### 1.11.2. Fondation meuble : Puentes (1802), El Wha (1912), [3]

Ces barrages se sont rompus après érosion interne de la fondation alluviale.



Graphique 15 : ElWha - coupe-type du barrage ([18])

#### 1.11.3. Xuriguera

Le barrage de Xuriguera (hauteur 42 m, Espagne, [12]) a été détruit par les très fortes pluies sur le bassin du Llobregat, le 24/02/1944. Les causes détaillées de la rupture ne sont pas détaillées par la littérature examinée. En tous cas, la rupture s'est produite pour la plus forte cote rencontrée par l'ouvrage, et il se peut qu'il y ait eu submersion. La rupture a été amorcée en rive droite.



*Graphique 16 : Xuriguera - le barrage rompu*

*1.11.4. Chikkahole (Inde, 1972) [21]*

Le barrage de Chikkahole (hauteur maximale 30 m, Inde) est un barrage en maçonnerie à la chaux, mise en place à la main. La largeur à la base est de 21 m. Les résistances à la compression et à la traction du mortier ont été mesurées dans les gammes respectives suivantes :  $[1 - 5]$  MPa et  $[0,15 - 0,4]$  MPa. Le barrage est fondé sur des gneiss altérés, qu'il a été jugé nécessaire de renforcer par injections de consolidation..



Le barrage a été détruit en 1972 par submersion, provoquée par une très forte crue et un dysfonctionnement de l'évacuateur. La rupture est intervenue 6 ans après la mise en eau. Ce n'est pas la section de plus grande hauteur, mais la rive droite qui a été emportée.

*Graphique 17 : Barrage de Chikkahole rompu*

Les auteurs invoquent le rôle potentiellement néfaste des injections de la fondation et de la maçonnerie. Les injections de fondation auraient fissuré le barrage en rive droite ; ces fissures, détectées lors de la construction, ont motivé des injections du corps du barrage. Ces injections auraient elles-mêmes fragilisé le barrage en créant des plans de faiblesse horizontaux.

Les conditions hydrauliques lors de la rupture ne sont pas clairement documentées : très forte crue, mais y a-t-il eu submersion ?

Le plan de glissement n'est pas non plus précisé : corps de la maçonnerie, ou fondation.

## 2. ELEMENTS D'INTERPRETATION

### 2.1. *Sur la fragilité des barrages en maçonnerie*

Les ruptures documentées, et rapportées ci-dessus, ont concerné des barrages en béton et maçonnerie dans des proportions comparables. En réalité, si l'on ajoute les nombreuses ruptures mal documentées, on constate que la plupart ont concerné des barrages maçonnés, et que la plupart sont intervenues avant 1930.

Cette plus grande proportion d'accident concernant les barrages en maçonnerie ne provient pas nécessairement d'une moins grande résistance des ouvrages maçonnés. En réalité, si les barrages en maçonnerie ont davantage cédé, c'est parce qu'ils sont généralement plus minces et moins bien drainés que les barrages en béton : les ruptures des barrages de Bouzey, Austin, Saint-Francis (et la rupture de Malpasset) ont progressivement (1900-1960) conduit à épaissir le profil des barrages et à drainer les fondations plus efficacement et plus en profondeur.

Les ruptures sont presque toutes intervenues au premier remplissage ou à l'occasion d'une crue ayant amené le plan d'eau à des cotes non atteintes précédemment ; deux exceptions :

- le barrage de Saint-Francis : la retenue est restée au niveau de retenue normale une semaine avant la rupture,
- et surtout le barrage de Bouzey, exploité pendant 5 ans à retenue haute avant de rompre.

Seule cette dernière rupture pourrait éventuellement être attribuée à un vieillissement de l'ouvrage. Une autre explication pourrait provenir de l'hiver 1895 très froid, qui a pu fragiliser les maçonneries (fissuration thermique, effet de la glace sur l'étanchéité amont, fissuration des maçonneries sous le surcroît de poussée exercé par l'expansion thermique de la glace). Aucune autre rupture ne peut être attribuée à une perte progressive de résistance ou de densité des maçonneries.

### 2.2. *Sur le mode de rupture*

Quinze ruptures documentées sont relatées.

#### 2.2.1. *Rupture dans le corps de la maçonnerie*

Deux ruptures (Fergoug, Bouzey II) se sont produites lors du premier remplissage (ou à niveau maximal atteint). Dans les deux cas, l'explication première de la rupture a été considérée comme provenant des tractions qui ont pu se développer en parement amont, favorisant les infiltrations. Dans les deux cas également, la géométrie de la rupture n'est pas strictement horizontale, mais plonge à l'approche du parement aval. Une qualité médiocre des maçonneries est rapportée dans ces deux cas.

On peut rapprocher de ces deux cas les ruptures par faits de guerre des barrages de Mohne et Eder, pour lesquels c'est également la maçonnerie qui a cédé. Et il est possible que le mécanisme de rupture ait commencé par un affaiblissement du parement amont (perte de la résistance du parement, destruction de l'étanchéité, saturation du drainage). La surface de rupture n'est pas horizontale mais, comme à Bouzey, plongeante à l'approche du parement aval.

Notons également la fissure du barrage en maçonneries de Bhandardara [21], explorée en détail. Cette fissure plonge vers l'aval et vers les rives.

#### 2.2.2. *Rupture par glissement sur la fondation*

Trois ruptures (Bouzey I, Austin Ia, Tigra) se sont faites par glissement sur la fondation, ou dans la fondation à faible profondeur sous le barrage, le long d'une surface horizontale. On notera que dans les trois cas, la fondation est gréseuse, à pendage horizontal, et intercalée (ou accompagnée) de matériaux argileux ou marneux.

Les autres ruptures par glissement sur la fondation se sont amorcées sur les plots de rive (Cheurfas I, Saint-Francis, Camara, Xuriguera) ou sur un plot implanté sur fondation inclinée (Khadakwasla).

Dans le cas de Cheurfas I et Saint-Francis, des faiblesses particulières de la fondation, non identifiées à la conception, sont en cause.

Dans les autres cas, la schistosité du rocher a pu être déterminante.

Rupture de la fondation

Deux ruptures se sont produites par érosion interne de la fondation alluviale (Puentes, ElWha).

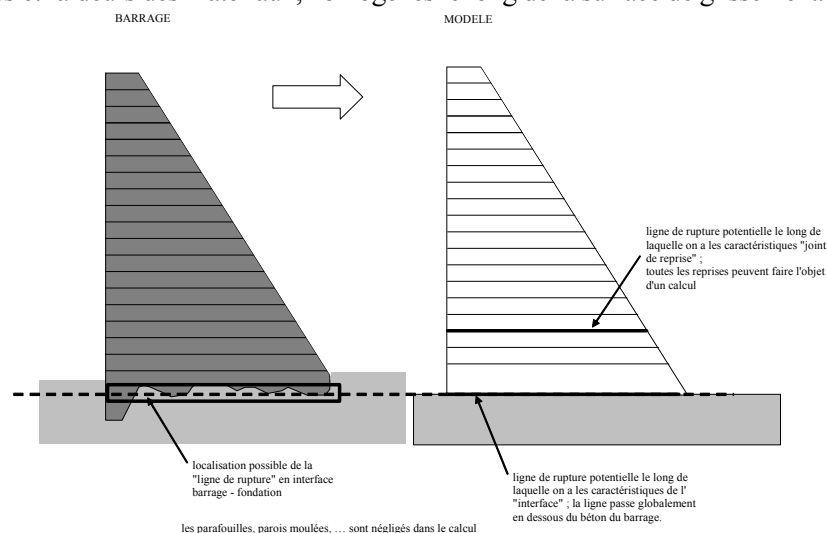
Une rupture a semble-t-il été provoquée par affouillement aval (Zerbino).

### 3. NOTE SUR LES CRITERES DE PROJET ET METHODES DE CALCUL

#### 3.1. 4.1 L'approche classique

L'approche classique fait des hypothèses sur :

- la géométrie de la rupture (horizontale, modélisable en 2D) ;
- la répartition des contraintes (répartition et action des sous-pressions, linéarité des contraintes effectives) ;
- les résistances et raideurs des matériaux, homogènes le long de la surface de glissement.



**Graphique 18 : Modélisation « standard », [19]**

En dehors des trois cas de glissement sur un plan en fondation (Bouzey I, Austin Ia, Tigra), ce schéma de rupture n'est pas tout à fait représentatif.

Pour les ruptures dans le corps maçonné du barrage (Fergoug, Bouzey II, Mohne, Eder), les écarts entre modèle et mécanismes sont divers : géométrie non plane des surfaces de rupture dans le corps de la maçonnerie, variations des résistances mécaniques le long de cette surface (parements du barrage, remplissage), sous-pressions qui ne suivent pas forcément l'hypothèse de Terzaghi. Le modèle trouve davantage de justification pour les barrages en béton, avec l'effet des couches ; notons cependant que la seule rupture intéressant le corps d'un barrage en BCR (Camara) n'a pas suivi ce modèle.

Pour les ruptures en fondation ou sur la fondation :

- barrages de Saint-Francis, Camara, Xuriguera, Khadakwasla : le modèle 2D n'est pas représentatif du comportement des plots de rive, où les effets 3D sont potentiellement défavorables ;
- barrages de Cheurfas I, Saint-Francis, Puentes, ElWha, Zerbino : les modes de rupture ne ressortent pas de l'approche classique.

### 3.2. La « mesure » des paramètres de résistance

Un rapport du Club Européen relatif aux barrages-poids fait l'inventaire de mesures de résistances (à la traction, au cisaillement) pratiquées sur des chantiers de barrage ou par investigations sur des barrages existants ([15]). Les mesures concernent le béton conventionnel uniquement (pas le BCR, ni les maçonneries).

Une synthèse est proposée, complétée par les données récemment exposées par Hydro-Québec ([16]).

Cette synthèse utilise la nomenclature suivante. Par béton-béton et béton-rocher, on entend respectivement les interfaces de reprises de bétonnage et les interfaces entre béton et rocher.  $R_t$  représente la résistance à la traction ;  $c'$  et  $\phi'$  les cohésion et angle de frottement.

| Réf.                    | Ouvrages                                 | Echelle de l'essai                                                                          | Résultats des essais                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EPRI (USA)              | 17 barrages, en service contextes variés | Carottage                                                                                   | $R_t$ , Résistance à la traction ( <b>béton – béton</b> )<br>En moyenne : 80-90% de $R_t$ béton<br>Cohésion et angle de frottement, $C, \phi'$ ( <b>béton – béton</b> )<br>Valeurs basses à 90%<br>Résistance de pic : 1 MPa, 57°<br>Résistances résiduelles : 0 MPa, 48°<br>$R_t$ (béton – rocher)<br>0,3 – 1,3 MPa<br>$C', \phi'$ (béton – rocher)<br>Valeurs basses à 90%<br>Résistance de pic : 0,3 – 1,1 MPa ; 53-68°<br>0 MPa pour marnes<br>Résistances résiduelles : 0 MPa ; 13-32° |
| Pacelli et al. (Brésil) | 6 barrages pendant leurs constructions   | Carottes ou pavés section 40 * 40 cm <sup>2</sup>                                           | $R_t$ (béton – béton)<br>Sans traitement : 40-80% de $R_t$ béton<br>Avec traitement : 50 à 100% de $R_t$ béton<br>$C, \phi'$ (béton – béton)<br>Sans traitement : 40% de la résistance au cisaillement du béton<br>Avec traitement : 50-100%                                                                                                                                                                                                                                                |
| Forrest , Bishoff (USA) | Synthèse essais différentes sources      |                                                                                             | $R_t$ (béton – béton)<br>Sans traitement : 30 à 80% de $R_t$ béton<br>Avec traitement : 50 – 100% de $R_t$ béton                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Lo et al. (Canada 1994) | 30 barrages en service                   | Carottage                                                                                   | $R_t$ (béton – rocher)<br>0,2 – 2,6 MPa<br>$C, \phi'$ (béton – rocher)<br>Résistance de pic : 2,2 MPa, 62°<br>Résistance résiduelle : 0, 32-39°                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Hydro-Québec (2011)     | 6 barrages en service                    | Carottage ; essais de cisaillement sur interface non liée (alors que en général elle l'est) | $\phi'$ (béton – béton)<br>moyennes des mesures sur un barrage<br>pic : 55 – 65° ; résiduel : 42 – 55°<br>$\phi'$ (béton – rocher)<br>pic : 43 – 55° ; résiduel : 39 – 52°<br>$\phi'$ (rocher – rocher) gneiss, granite, schiste calcaire<br>pic : 44 – 50° ; résiduel : 40 – 49°                                                                                                                                                                                                           |

**Tableau 1 : Barrage-poids, Mesures de résistances aux interfaces**

La plupart des valeurs concernent l'interface béton – béton, pour les barrages classiques. Aucune des ruptures documentées dans cet article ne relève de ce cas de figure. Les mesures aux interfaces béton-rocher ne sont pas non plus directement utilisables pour les calculs : les ruptures qui se sont produites sur la fondation sont davantage dans le rocher (à faible profondeur) que véritablement à l'interface.

Mais, même si ces résultats ne sont pas directement utilisables, ils montrent que les niveaux de résistance sont élevés : cohésions et résistances à la traction de plusieurs centaines de kPa. Dans un rocher fissuré mais de bonne qualité, les modèles de type Hoek&Brown font également état de cohésions et résistances à la traction significatives.

Cette résistance doit pouvoir être mobilisée :

- dans le corps du barrage, y compris pour les barrages en maçonnerie (avec, pour la maçonnerie, une qualité de mortier probablement inférieure, mais un effet favorable de l'agencement des moellons et blocs : les surfaces de rupture potentielles présentent des aspérités décimétriques);
- à l'interface avec la fondation et dans la fondation, sauf circonstances géologiques particulières.

En situation habituelle, et pour un barrage bien construit avec des matériaux de qualité sur une fondation de qualité, les résistances disponibles sont probablement significativement plus fortes que les résistances utilisées dans les calculs.

Deux autres arguments plaident dans ce sens :

- certains barrages, avec un profil standard, subissent des situations nettement plus sévères que ce qui est pris en compte par le calcul : retenues chargées en sédiment, retenues avec forte prise en glace. Les sollicitations associées peuvent être considérables, notamment pour les petits barrages. Aucun cas de rupture dans ces circonstances n'est pourtant rapporté ;
- si on s'en tient aux calculs, plusieurs barrages, et plusieurs ouvrages du même type (barrages vannés en rivière, barrages RTM) ont des profils instables.

L'accidentologie des barrages-poids et les expérimentations mécaniques tendent à faire penser que les méthodes de calcul habituelles sont largement conservatrices dans les cas standards. Les accidents proviennent plutôt de circonstances particulières, mal couvertes par les calculs.

#### **4. SITUATIONS PARTICULIERES A RISQUES**

##### **4.1. Fondation inadéquate ou particulièrement défavorable**

La première situation à risque est celle d'une fondation inadéquate. Parmi les cas rapportés ici :

- la fondation meuble : érodable de Puentes ou ElWha, argileuse aux Cheurfas I ;
- les appuis géologiquement instables de Saint-Francis.

L'accidentologie met également en exergue deux situations particulièrement défavorables :

- des fondations en alternance subhorizontale de grès et marnes (ou grès et argiles) ;
- des plans de schistosité peu rugueux, lorsque ceux-ci sont parallèles aux appuis (Camara).

Ces circonstances géologiques génèrent une surface de rupture peu résistante, et favorisent le développement des sous-pressions le long de cette surface.

##### **4.2. Barrages en maçonnerie et anciens barrages en béton**

Les barrages anciens (maçonnerie surtout, mais également béton) font partie des ouvrages à risques, pour deux raisons spécifiques.

La première raison est l'ancienneté de la conception de ces ouvrages. Le drainage en profondeur de la fondation et le drainage des maçonneries était moins recherché qu'il ne l'est désormais. Par ailleurs, aux XIX<sup>ème</sup> siècle et au début du XX<sup>ème</sup> siècle, pour les barrages d'une certaine hauteur, la technologie privilégiait systématiquement les ouvrages en maçonnerie aux ouvrages en remblai. Il existe donc un parc de barrages en maçonneries sur fondations de roches tendres et/ou argileuses.

La seconde raison tient à la qualité de construction, et éventuellement à son vieillissement. La résistance des maçonneries (ou du béton) et la pérennité des joints de mortier est incertaine, et probablement hétérogène. Des défauts de qualité sont avérés ou suspectés pour tous les ouvrages ayant cédé dans la masse : Fergoug, Bouzey II, Camara.

Les ruptures constatées présentent également des traits communs relatifs à la fissuration des maçonneries ou du béton.

Dans les barrages en maçonnerie, le parement amont procure à la fois un rabattement des sous-pressions et une résistance à la traction plus forte que dans la masse du barrage. S'il vient à rompre (ou vieillir : effet du gel par exemple), le schéma de comportement du barrage est bouleversé. Il y a une fragilité associée à ce rôle particulier que joue le parement, fragilité spécifique aux barrages en maçonnerie. Cette explication a été avancée pour expliquer les ruptures de BouzeyII, Fergoug, Eder et Möhne, et Chikkahole.

On peut également mentionner l'effet significatif de la fissuration verticale traversante, amont-aval. Ces fissures sont fréquentes ; elles se développent par exemple par retrait thermique post-construction. Ces fissures ne modifient pas le schéma résistant classique, 2D, des barrages poids, et sont donc régulièrement ignorées. L'examen de l'accidentologie laisse cependant penser qu'elles jouent un rôle : un barrage fissuré perd en monolithisme. Le plot le moins bien fondé ne peut reporter une partie des efforts sur ses voisins. L'effet est sensible lorsque la fondation présente une faiblesse localisée. Il est très marqué pour les plots de rive.

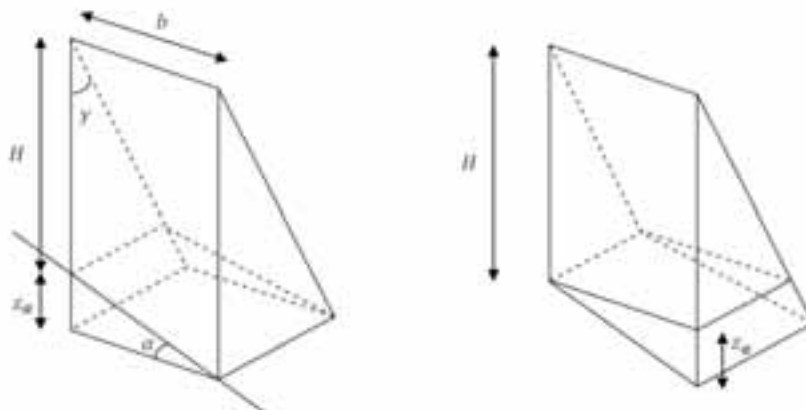
#### 4.3. Plots de rive avec schistosité défavorable

Le retour d'expérience des accidents montre une certaine prévalence de ruptures qui intéressent les plots de rive. Des éléments de calcul et d'analyse sont donnés ci-dessous, qui montrent que :

- un plot de rive, sur fondation inclinée, est moins stable qu'un plot sur fondation horizontale ;
- ce résultat est sans incidence si le barrage est monolithique ;
- un examen particulier est donc nécessaire dans le cas de plots de rive sans monolithisme : plots disjoints ou barrage fissuré.

##### 4.3.1. Quelques éléments de calculs

Par « plot de rive », on entend un plot de barrage fondé sur une rive de la vallée, avec un plan de fondation qui plonge de la rive vers la vallée. Un plot de rive peut se voir restituer une fondation en gradins horizontaux (schéma de gauche, bloc droit – également valable pour une succession de gradins, en escalier), ou suivant la topographie (schéma de droite, bloc incliné). Mais ce qui importe est surtout l'orientation du plan de rupture potentiel : une fondation en gradin peut correspondre au schéma de droite, si la géologie présente des plans de schistosité parallèles à la rive.



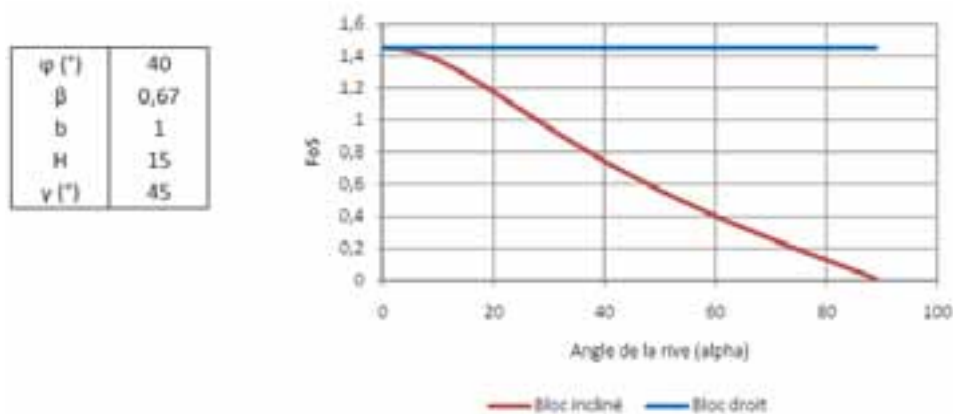
Graphique 19 : Blocs de rives ; sur fondation en gradins ou sur fondation inclinée

Le calcul en barrage-poids conduit à des différences de comportement entre ces deux schémas. Le schéma de gauche ressort du calcul 2D standard. Le schéma de droite, de glissement le long d'un plan incliné, en diffère :

- le poids du barrage, projeté sur la surface inclinée, présente deux composantes : une composante parallèle (dirigée vers la vallée) et une composante perpendiculaire (qui pilote la résistance au glissement). La composante résistante est plus faible que dans le schéma standard ;
- Les sous-pressions sont exercées sur une surface plus importante.

Ces deux différences vont dans le même sens, d'une augmentation des sollicitations et d'une diminution de la résistance. Les résultats sont donnés ici, en termes de facteur de sécurité (FoS), pour un angle de frottement de  $40^\circ$ , un rabattement des sous pressions ( $\beta$ ) de  $\frac{2}{3}$ , un plot théorique de largeur 1 m, et un profil simple pour la formulation analytique : triangulaire, pente de 1H/1V, hauteur 15 m.

L'évolution du facteur de sécurité est donnée en fonction de l'inclinaison, vers la vallée, du plan de glissement.



Graphique 20 : Blocs de rives ; stabilité au glissement selon inclinaison de la surface de rupture

#### 4.3.2. Effet du monolithisme

Dans l'évaluation de la stabilité, il faut tenir compte de l'interaction entre plots adjacents. Le « plot de rive » peut trouver également à s'appuyer sur le plot adjacent immédiatement en dessous. La composante « vers la vallée » du poids propre crée une compression à l'interface ; cette compression entre les deux plots confère une résistance au cisaillement.

Dans le cas où cette transmission d'effort est possible, la stabilité d'ensemble du barrage est identique, que l'on considère des plots de rive sur fondation inclinée ou en gradins. Le calcul habituel 2D est applicable, et l'effet de l'inclinaison des rives ne joue pas.

La transmission d'effort ne se fait pas si la composante « vers la vallée » du poids propre est équilibrée par cisaillement sur la fondation plutôt que par appui sur le plot voisin. En pratique, la transmission des efforts ne peut pas se faire si le monolithisme du barrage n'est pas assuré. C'est le cas de plots disjoints, ou d'un barrage avec fissures verticales amont-aval.

## 5. CONCLUSIONS

Le retour d'expérience sur l'accidentologie des barrages-poids est difficile : les ruptures ne sont pas très nombreuses, et surtout, elles sont peu documentées. Il y aurait un grand intérêt à collecter davantage d'informations pour enrichir l'interprétation qui peut en être faite. En effet, les enseignements que l'on tire de cet exercice ne sont pas tous évidents.

En premier lieu, on constate que les ruptures selon le mode habituel de calcul ne sont pas la majorité. On peut d'ailleurs penser que ce modèle et les paramètres pris en compte sont conservatifs, lorsque la qualité

de la construction du barrage et de la géologie de fondation sont bonnes. Ce qui ne signifie en aucun cas qu'il y a lieu d'être plus audacieux : les ruptures de barrages rigides sont particulièrement dangereuses pour l'aval, et il faut conserver des coefficients de sécurité importants.

La plupart des ruptures se sont produites par des mécanismes que le modèle habituel de calcul ne couvre pas. Plusieurs situations caractéristiques sont identifiées :

- la géologie est la première cause. Plusieurs ruptures proviennent d'un contexte géologique inadéquat, parfois mal interprété à la conception. Le retour d'expérience met, en outre, l'accent sur une situation géologique particulière : les alternances de bancs subhorizontaux de grès et marnes (ou grès et argile) ;
- les barrages anciens (maçonnerie, béton) sont à risque si le matériau du barrage est de qualité médiocre et si le barrage est mal drainé. Une circonstance aggravante est intervenue dans pratiquement toutes les ruptures recensées : la fissuration verticale dans le sens amont-aval, qui fait perdre le monolithisme du barrage. Il semble qu'il faille accorder une attention particulière aux barrages maçonnés si leur résistance repose beaucoup sur les performances d'un parement amont mince : le vieillissement ou la fissuration de ce parement peut amener soudainement à la rupture ;
- les plots de rive des barrages-poids sont, sous certaines conditions, nettement moins sûrs que les plots de vallée. Ces conditions sont les suivantes : (1) la construction ou la géologie conduisent à former des surfaces de glissement inclinées vers la vallée et (2) le barrage, par fissuration ou fractionnement entre plots, n'est pas une structure monolithique.

## REMERCIEMENTS

Plusieurs idées développées dans ce document proviennent, plus ou moins directement, de discussions avec des confrères – discussions parfois fort anciennes. En particulier, et de manière non exhaustive, M. Lino, sur les tenants et aboutissants du calcul des barrages-poids, E. Bourdarot, sur la singularité de calcul des plots de rives, F. Lempérière, sur l'interprétation des ruptures des barrages de Chikkahole, Eder et Möhne et sur la gravité particulière des ruptures de barrages-poids, B. Goguel, sur l'intérêt porté à l'accidentologie des barrages-poids notamment algériens.

Bien entendu, ce qui est écrit dans ce document n'engage que les auteurs.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Barbosa et al - Universidade Federal da Paraiba – Barragem de Camara – 26/11/04
- [2] Dr. Milton Assis Kanji –Paracer técnico sobre as causas da ruptura da barragem cámara – 16/11/04
- [3] CIGB, Lessons from dam incidents, 1974
- [4] CEATI International Dam Safety Interest Group Workshop, March 24-25, 2009 in Los Angeles Austin
- [5] F B de Mas, Cours de navigation intérieure, Ecole des Ponts et Chaussées, 1905
- [6] J. David Rogers, Karl F. Hasselmann, University of Missouri-Rolla ; Reassessment of Saint-Francis dam failure,
- [7] Vittorio Bonaria et al, Il disastro di Molare del 1935 in Valle Orba (AL): un Vajont dimenticato, Periodico trimestrale della SIGEA, Società Italiana di Geologia Ambientale, 1/2011
- [8] M. Lévy, Quelques considérations sur la construction des grands barrages, CR Académie des Sciences, 5 août 1895
- [9] M. GIGNOUX et R. BARBIER, Géologie des Barrages et des aménagements hydrauliques, Masson 1955, Cheurfas
- [10] Etude sur les barrages en maçonneries et murs de réservoirs, La Houille Blanche, H. Bellet, 1905
- [11] Rupture du barrage de l'oued Fergoug, Rapport de la Commission technique, La Houille Blanche,
- [12] Pr Dr G Gomez Laa, Surveillance des barrages, Colloque technique Maintenance des vieux barrages, 1993

- [13] G. P. Sims, Le vieillissement des barrages en maçonnerie, Colloque technique Maintenance des vieux barrages, 1993
- [14] P. Rissler, Les barrages en maçonnerie du type Intze en Allemagne, Colloque technique Maintenance des vieux barrages, 1993
- [15] Sliding Safety of Existing Gravity Dams - Final Report, Giovanni Ruggeri, Chairman of the European Working Group
- [16] Hydro-Québec – presentation au CFBR groupe Barrages Poids, 8 avril 2011.
- [17] <http://sigoise.free.fr>
- [18] Gregg A. Scott, P.E. Potential Failure Mode Analysis Concrete Dam Failures, USBR, Novembre 2007
- [19] CFBR, Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids, 2006
- [20] Lino, M., Modélisation des barrages-poids, Colloque CFBR, 2001
- [21] Murthy Y.K., Mane P.M., Pant B., Tensile failures in some stone masonry gravity dams in India, 13ème Congrès des Grands Barrages, New Dehli, 1979, Q49R31.



## APPORTS DE L'ANALYSE DES EVENEMENTS IMPORTANTS POUR LA SURETE HYDRAULIQUE (EISH) DANS LES ETUDES DE DANGERS (EDD) DE BARRAGES

*Contributions from analysis carried out on important events for hydraulic  
safety to risk assessment studies for dams*

**Eric Brandon**

Bureau d'Étude Technique et de Contrôle des Grands Barrages  
(MEDDTL/DGPR/SRNH/STEEGBH/BETCGB)  
44 avenue Marcelin Berthelot, 38030 GRENOBLE Cedex 02, France  
Courriel : [eric.brandon@developpement-durable.gouv.fr](mailto:eric.brandon@developpement-durable.gouv.fr)

**Fabien Rival**

Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels  
(MEDDTL/DGPR/SRT/SDRA/BARPI)  
2 rue Antoine Charial, 69426 LYON Cedex 03, France  
Courriel : [fabien.rival@developpement-durable.gouv.fr](mailto:fabien.rival@developpement-durable.gouv.fr)

### MOTS CLÉS

ARIA, accidentologie, incident, événement précurseur, scénario de défaillance, retour d'expérience, analyse de risques, mesure de maîtrise des risques, barrière de sécurité

### ABSTRACT

*The analysis requested in risk assessment studies for French dams must include lessons learnt from events that occurred in the past on dams which present common features with the studied dam from either technical or organisational points of view. The paper describes a source of information usable for this purpose : the analysis of important events or precursor events for hydraulic safety (IEHS or PEHS), reported in France in application of a ministerial decree of 21 May 2010. In addition to the real-time events declaration method implemented since 2006 and based on a severity classification scale, it is now required to provide within the year additional elements of analysis on causes, circumstances and lessons learnt from the event. Since January 2010, the data collected on dam events and particularly IEHS feeds the ARIA database (analysis, research and information on accidents), managed by the Ministry of Sustainable Development. For each event, a summary is available on the Internet: [www.aria.developpement-durable.gouv.fr](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr). Two examples of summaries extracted from ARIA are detailed to illustrate their possible contributions to the risk assessment studies for dams. The longer experience in the field of classified industrial installations is then tackled to illustrate the benefit from reviewing past accidents. In all concerned fields of activity, ARIA is an event-related database that is not aimed at producing statistics (small size of the sample, partial representativeness, bias resulting from the selection of events), its main interest being qualitative (identification of failure scenarios and safety barriers).*

### RÉSUMÉ

*L'analyse de risques demandée dans une EDD de barrage doit comporter un volet accidentologie et retour d'expérience tiré notamment des événements survenus sur des ouvrages présentant des similitudes techniques ou organisationnelles avec le barrage étudié. L'article présente un vecteur d'information exploitable à cette fin : l'analyse des événements déclarés en France pour les barrages autorisés et les barrages concédés, en application de l'arrêté interministériel du 21 mai 2010 (EISH et PSH). Au-delà de la déclaration « à chaud » déjà pratiquée depuis 2006 sur les barrages concédés avec une classification en fonction de la gravité, il est désormais prévu de fournir sous un an des éléments d'analyse complémentaires sur les causes, les circonstances et les enseignements tirés de l'évènement. Depuis janvier 2010, les informations recueillies sur les événements relatifs aux barrages et en premier lieu les EISH viennent alimenter la base de données ARIA (analyse, recherche et information sur les accidents), gérée par le ministère du Développement durable. Un résumé des événements est consultable via le site Internet [www.aria.developpement-durable.gouv.fr](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr). Deux exemples de résumés d'EISH tirés d'ARIA sont détaillés pour illustrer leurs apports possibles dans une EDD. L'expérience plus ancienne des installations classées est ensuite présentée pour appuyer l'intérêt d'un tel recours à l'accidentologie. Dans les différents domaines qu'elle aborde, ARIA est une base événementielle sans vocation à une utilisation statistique directe (taille réduite de l'échantillon, problèmes de représentativité, biais de sélection), son apport étant avant tout qualitatif (identification de scénarios de défaillance et de barrières de sécurité).*

## INTRODUCTION

En application de l'article R. 214-115 du code de l'environnement, environ 620 études de dangers (EDD) de barrages (classes A et B) doivent être réalisées pour fin 2014. Conformément à la définition réglementaire qui en est donnée à l'article R. 214-116 du code de l'environnement, l'EDD d'un barrage « explicite les niveaux des risques pris en compte, détaille les mesures aptes à les réduire et en précise les niveaux résiduels une fois mises en œuvre les mesures précitées ». Le plan et le contenu de l'EDD sont définis par arrêté du 12 juin 2008 [1].

Pour pouvoir faire une telle démonstration de la maîtrise des risques liés à un ouvrage, le rédacteur d'une EDD doit s'appuyer sur différents types de données d'entrée servant de base à une analyse de risques : une description de l'ouvrage et de son environnement, l'identification des potentiels de dangers, le système de gestion de la sécurité du responsable d'ouvrage, la caractérisation des aléas naturels et une étude accidentologique accompagnée du retour d'expérience tiré des événements répertoriés.

L'analyse des EDD remises à ce jour à l'administration (120 barrages des classes A et B concernés fin mai 2011) met notamment en évidence un défaut récurrent concernant l'utilisation de la rubrique 7 de l'EDD (étude accidentologique et retour d'expérience). Comme déjà souligné à l'occasion du colloque CFBR-AFEID de novembre 2010 [2], le volet « retour d'expériences » reste à développer dans la plupart des études : cette partie doit d'une part faciliter l'identification de scénarios accidentels potentiels pour le barrage étudié et d'autre part permettre d'apporter des indications claires sur les enseignements tirés des accidents ou incidents recensés.

Au-delà du retour d'expérience (REx) sur les incidents propres au barrage objet de l'EDD qui peuvent être peu nombreux, l'apport principal de cette rubrique repose sur les événements recensés sur d'autres ouvrages en France ou à l'étranger présentant des similitudes avec l'ouvrage étudié. Ces similitudes peuvent porter sur :

- la nature de l'ouvrage lui-même (barrage-poids en maçonnerie, barrage voûte en béton, barrage en remblai...) ;
- mais aussi des composants très précis de l'ouvrage (masque amont, vanne de vidange, évacuateur de crue vanné ou non, systèmes automatisés de mesure de cote ou de renvois d'alarme...) ;
- ou encore l'organisation de l'exploitant (modes d'exploitation, maintenance...).

La difficulté de l'exercice demandé pour cette rubrique de l'EDD réside souvent dans :

- la sélection d'un nombre restreint d'événements pertinents et le choix du juste niveau de description de ceux-ci, en particulier lorsqu'il s'agit d'événements touchant d'autres barrages ;
- l'accès aux informations qualifiées qui peut se révéler difficile pour des maîtres d'ouvrages disposant d'un parc d'ouvrages relativement réduit.

En règle générale, sur le premier point, la position à privilégier est de sélectionner quelques accidents ou incidents sur lesquels une réflexion approfondie est menée dans l'EDD en se positionnant clairement sur les enseignements tirés pour l'ouvrage étudié. Il n'est pas satisfaisant de se limiter simplement à des statistiques mondiales ou à une liste brute d'accidents sans les analyser.

Concernant le second point, il est souvent regretté par la profession l'absence de base de données accidentologiques ou incidentologiques partagée au niveau national ou international. La communication [2] rappelait l'existence d'informations accessibles via quelques revues ou sites web spécialisés (cas de la rupture du barrage de Taum Sauk survenue en 2005) qui peuvent constituer une première source d'accidents génériques potentiellement utilisables sur de nombreuses EDD. Le présent article s'attache à développer une autre possibilité d'information mutualisable au sein de la profession, quels que soient les moyens dont disposent les responsables d'ouvrages. Il s'agit d'exploiter les événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) et les événements précurseurs pour la sûreté hydraulique (PSH) déclarés en France en application de l'arrêté interministériel du 21 mai 2010 [3]. Après déclaration, ces événements sont traités par l'administration et rendus accessibles à un public plus large sous forme de résumés consultables via une interface web.

Pour illustrer les possibilités offertes pour les EDD de barrages, l'article présente d'abord le cadre du dispositif de déclaration et d'analyse des EISH et des PSH ainsi que la base ARIA du ministère du Développement durable (base accidentologique gérée par le BARPI). Il s'appuie ensuite sur deux événements récents impliquant des barrages et déclarés en EISH, dont la connaissance et l'analyse via la base ARIA peuvent venir enrichir la rédaction d'EDD d'autres ouvrages. Un parallèle est également fait avec les pratiques dans le domaine des installations classées.

## **1. DISPOSITIF DE DECLARATION ET D'ANALYSE DES EISH ET PSH**

### **1.1. Définition des EISH et des PSH**

Après plusieurs années de pratique faisant suite à une circulaire du 23 juillet 2006 [4], un bilan du dispositif de déclaration des EISH a été dressé en 2009 par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère du Développement durable (MEDDTL) dans le cadre d'un groupe de travail réunissant l'administration et des exploitants hydroélectriques. Dans la logique du décret du 11 décembre 2007 [5], le dispositif initial de 2006 qui concernait exclusivement les barrages concédés a alors été élargi pour couvrir à la fois les ouvrages relevant du régime de la concession et ceux relevant du régime de l'autorisation (barrages, dont ceux constituant des digues de canaux navigables, et digues de protection des crues).

L'arrêté interministériel du 21 mai 2010 [3] (ministère du Développement durable et ministère de l'Intérieur) a complété le dispositif en définissant deux types d'événements devant être déclarés par les exploitants : les EISH et les PSH.

#### *1.1.1. Les EISH*

De manière générale, sont qualifiés d'EISH des incidents ou des accidents :

- ayant conduit à des conséquences perceptibles par des personnes externes à l'entreprise exploitante ;
- ou qui se sont traduits par un non-respect d'obligations réglementaires.

L'arrêté du 21 mai 2010 [3] prévoit que le responsable (propriétaire, exploitant ou concessionnaire) « déclare les événements à caractère hydraulique intéressant la sûreté hydraulique relatifs à une action d'exploitation, au comportement intrinsèque de l'ouvrage ou à une défaillance d'un de ses éléments, lorsque de tels événements ont au moins l'une des conséquences suivantes :

- atteinte à la sécurité des personnes (accident, mise en danger ou mise en difficulté) ;
- dégâts aux biens (y compris lit et berges de cours d'eau et retenues) ou aux ouvrages hydrauliques ;
- pour un barrage, une modification de son mode d'exploitation ou de ses caractéristiques hydrauliques (cote du plan d'eau ...).

Cette obligation née du décret du 11 décembre 2007 s'applique à tous les ouvrages de classe A, B, C ou D au sens de l'article R. 214-112 du code de l'environnement. Dans le cas des barrages concédés, les EISH concernent l'ensemble du périmètre de la concession (y compris les galeries d'amenée, conduites forcées...).

Une gradation de l'importance de ces événements en fonction de leurs conséquences est introduite dans l'arrêté du 21 mai 2010 [3], sur la base d'une échelle de cotation présentée dans la suite de cet article.

#### *1.1.2. Les PSH*

On qualifie de PSH des événements qui n'ont pas entraîné de conséquences perceptibles (non-classés comme EISH) mais qui portent sur des composants de l'ouvrage jouant un rôle important en terme de

maîtrise des risques ou dont la défaillance est susceptible d'entraîner un accident. L'analyse de ce type d'évènement présente un intérêt dans la mesure où dans d'autres circonstances il aurait pu entraîner des conséquences plus importantes.

La définition extraite de l'arrêté du 21 mai 2010 [3] est la suivante :  
« Événements précurseurs ou évolutions pouvant avoir un impact en termes de sûreté hydraulique. Sont concernés les dysfonctionnements liés aux défaillances de « barrières de sécurité », identifiées dans une étude de dangers, pouvant entraîner la perte de fonctions de sécurité du type « retenir l'eau », « maîtriser la cote de la retenue à l'amont de l'ouvrage » ou « maîtriser le débit relâché à l'aval ».  
Les PSH sont notamment destinés à alimenter une base de données et à faciliter la réalisation et la lecture critique de l'étude accidentologique requise dans les études de dangers des barrages. »

La déclaration d'un évènement considéré comme PSH requiert l'existence préalable d'une analyse de risques sur l'ouvrage concerné, permettant de juger de la criticité de la défaillance constatée. Le dispositif de déclaration des PSH concerne exclusivement les barrages de classes A ou B, pour lesquels une EDD formalisant l'analyse de risques est obligatoire.

## **1.2. Une double vocation : « communication d'urgence / pédagogie » et « REx / accidentologie »**

Dans leur logique initiale (circulaire du 23 juillet 2006 [4]), les EISH avaient principalement un rôle de communication d'urgence et de pédagogie vis-à-vis du public sur les dangers que la présence ou le fonctionnement d'une installation hydraulique peut générer. Ce dispositif était alors issu des réflexions qui avaient suivi l'accident du Drac ; le 4 décembre 1995, six enfants et leur accompagnatrice ont péri noyés suite à un lâcher d'eau de 25 m<sup>3</sup>/s par les vannes d'évacuation des crues du barrage de Notre-Dame-de-Commiers alors que la classe traversait le lit de la rivière dans une zone d'accès interdit.

Cette volonté de communication et de pédagogie s'exprime aujourd'hui au travers de l'échelle de gravité utilisée pour la déclaration « à chaud » des évènements. Par ailleurs, l'arrêté du 21 mai 2010 [3] met également en avant d'autres aspects jusqu'alors peu développés : l'analyse post accidentelle et le retour d'expérience voulus par les EDD. Il s'agit en particulier de l'analyse des causes et des circonstances, ainsi que des mesures prises ou envisagées pour faire en sorte qu'un même évènement ait moins de chances de se produire.

### **1.2.1. Déclaration « à chaud » : classification PSH / EISH jaune / orange / rouge**

En fonction de la gravité de ses conséquences, un évènement donné est classé en PSH ou en EISH. La classification en EISH se décline selon une codification à trois couleurs et un délai de déclaration adapté aux besoins éventuels de communication autour de l'évènement. La figure 1 ci-dessous présente les différentes classes d'évènements impactant la sécurité des barrages prévues par l'arrêté du 21 mai 2010 [3]. Celui-ci comprend également une définition des classes d'EISH (jaune, orange, rouge) pour les incidents ou les accidents relatifs aux digues de protection des crues et de protection des submersions marines. Ce point n'est pas développé dans le présent article.

Voici quelques illustrations d'évènements classables impliquant des barrages :

- EISH rouges : décès d'un pêcheur emporté à l'ouverture d'un évacuateur de crues, rupture d'une vanne ;
- EISH orange : débit non maîtrisé à l'aval d'un barrage provoqué par l'abaissement intempestif du clapet de surface avec évacuation d'un camping ;
- EISH jaunes : dépassement de la cote de RN (retenue normale) hors période de crue, ouverture totale d'une vanne d'un barrage créant un sur-débit de 30 m<sup>3</sup>/s dans le tronçon court-circuité ;
- PSH : indisponibilité du système de mesure de la cote de retenue, non-démarrage d'un groupe électrogène d'alimentation des vannes d'un évacuateur (indisponibilité prolongée).

gravité croissante

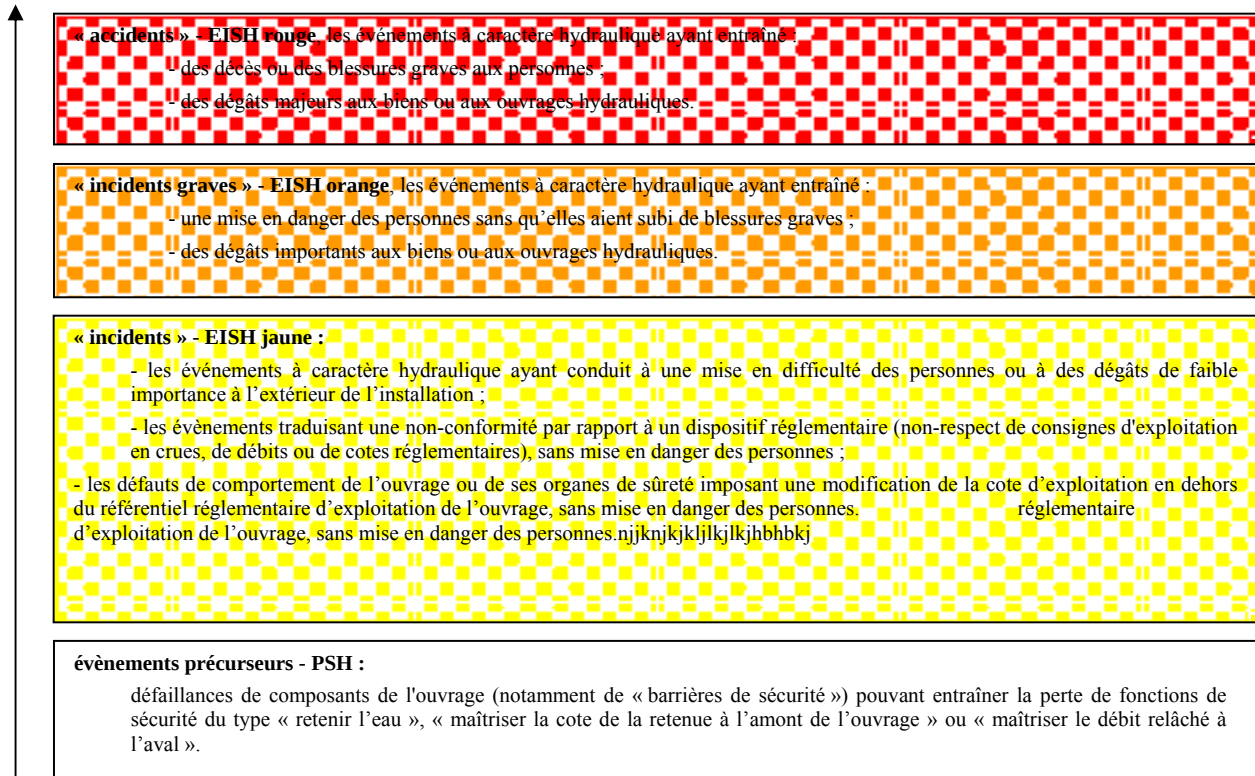


Figure 1 : Echelle de gravité des événements concernant un barrage et mettant en cause ou susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens (EISH et PSH), arrêté du 21 mai 2010 [3]

On notera que certains accidents mortels, incidents impliquant des personnes mises en difficulté ou en danger, accidents de navigation ou encore accidents de circulation... ne sont pas à considérer comme des EISH dès lors que l'ouvrage hydraulique n'est pas concerné, que ce soit du point de vue d'un phénomène qui ne serait pas lié à une action d'exploitation, ou d'un événement qui n'affecterait pas l'ouvrage.

Les délais de déclaration afférents à ces différentes classes fixés par l'arrêté du 21 mai 2010 [3] sont les suivants (à compter de la date à laquelle le responsable de l'ouvrage a pris connaissance de l'événement) :

- EISH rouge : de façon immédiate ;
- EISH orange : dans les meilleurs délais, sans toutefois excéder une semaine ;
- EISH jaune : dans un délai d'un mois ;
- PSH : dans un délai d'un an (analyse comprise).

La classification de l'évènement est proposée à l'administration par le responsable de l'ouvrage, selon un modèle de fiche-type présenté ci-après (cf. § 2.2.2) résultant des réflexions du groupe de travail organisé en 2009 (évoqué au § 2.1). Pour les EISH, l'administration valide ou modifie ensuite le niveau de classification et le notifie au responsable d'ouvrage, accompagné du délai au terme duquel doit être transmis un rapport d'analyse qui précise les circonstances de l'évènement, analyse ses causes et indique les mesures prises ou envisagées pour éviter qu'il ne se reproduise. Dans la plupart des cas, ce rapport peut *a minima* prendre la forme de la fiche « analyse » présentée ci-après.

### 1.2.2. Analyse post-accidentelle : apports pour l'accidentologie

#### Un mode de déclaration en deux temps pour intégrer aussi l'analyse des événements

Afin de répondre à la logique d'analyse et de retour d'expérience voulue par les EDD, la déclaration des événements doit désormais intervenir en deux temps : d'abord une déclaration « à chaud » accompagnée d'un classement de l'évènement en fonction de la gravité des conséquences constatées (tel que présenté

au § 2.2.1), suivie dans un délai maximal d'un an d'une analyse « à froid » qui vient compléter les premiers éléments communiqués sur la description des causes, des circonstances et des enseignements tirés de l'évènement. Pour les PSH, cette décomposition n'est pas nécessaire et on se limite à une analyse « à froid ».

Cette séparation entre actions immédiates et de long terme vise à inciter au développement de l'analyse des incidents rencontrés sur un ouvrage pour en tirer un retour d'expérience, d'abord pour l'ouvrage lui-même mais aussi pour d'autres ouvrages pouvant présenter des similitudes techniques ou organisationnelles.

Pour les barrages, les réflexions du groupe de travail de 2009 sur les EISH [6] ont conduit à proposer des modèles de fiches correspondant à chacune des deux phases de déclaration d'un EISH (figure 2 et 3). Celles-ci peuvent d'ores et déjà servir de support pour la déclaration des événements à l'administration.

| Fiche DECLARATION<br>d'événement important pour la sûreté hydraulique (EISH) d'un<br>barrage |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Nom de l'ouvrage / aménagement                                                               |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Nom de la concession (si loi 16/10/1919)<br>ou de l'aménagement                              |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Code identifiant de l'ouvrage<br>(renseigné par le service de contrôle)                      |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Code concession (si loi du 16/10/1919)<br>(renseigné par le service de contrôle)             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Société/Entité responsable de l'ouvrage                                                      |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Date de rédaction                                                                            |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Rédacteur                                                                                    |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Relecture effectuée le                                                                       |  | Par                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| DESCRIPTION DE L'EVENEMENT                                                                   |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Date de l'EISH (ou si elle n'est pas connue, date de sa constatation) :                      |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Lieu :                                                                                       |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Localisation GPS (latitude / longitude) des tronçons d'ouvrages concernés :                  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Evénement constaté par :                                                                     |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Description :                                                                                |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Conséquences :                                                                               |  | Types de conséquences<br>(cocher la ou les cases concernées) :                                                                                                                                                                                                                     |  |
|                                                                                              |  | <input type="checkbox"/> dégâts aux biens<br><input type="checkbox"/> atteinte aux personnes<br><input type="checkbox"/> cote retenue non-maîtrisée<br><input type="checkbox"/> débit aval non-maîtrisé<br><input type="checkbox"/> modification des caractéristiques de l'ouvrage |  |
| Mesures immédiates prises :                                                                  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
|                                                                                              |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| Proposition de classement:                                                                   |  | Jaune <input type="checkbox"/> Orange <input type="checkbox"/> Rouge <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                      |  |
| Justification:                                                                               |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| À envoyer au service du contrôle - fax:                                                      |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |

Figure 2 : Modèle-type de fiche « déclaration » d'EISH de barrage

| Fiche ANALYSE<br>d'événement important pour la sûreté hydraulique (EISH) d'un<br>barrage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Date de l'EISH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                     |
| Nom de l'ouvrage / aménagement                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                     |
| Nom de la concession (si loi 16/10/1919)<br>ou de l'aménagement                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                     |
| Code identifiant de l'ouvrage<br>(renseigné par le service de contrôle)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                     |
| Code concession (si loi du 16/10/1919)<br>(renseigné par le service de contrôle)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                     |
| Société/Entité responsable de l'ouvrage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                     |
| Date de rédaction                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                     |
| Rédacteur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                     |
| Relecture effectuée le                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Par                                                                                                                                                 |
| ANALYSE DES CAUSES et RETOUR D'EXPERIENCE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                     |
| <b>Types de causes / circonstances</b><br>(cocher les cases concernées) :<br><input type="checkbox"/> exploitation normale (turbinage, lâchers...)<br><input type="checkbox"/> aléas naturels (crues, glissements, séismes...)<br><input type="checkbox"/> travaux (en cours, en préparation ou remise en service)<br><input type="checkbox"/> non-respect de consignes (y compris dû à une défaillance matérielle)<br><input type="checkbox"/> génie civil<br><input type="checkbox"/> géologie (fondations, appuis...)<br><input type="checkbox"/> vannerie<br><input type="checkbox"/> conduite / galerie<br><input type="checkbox"/> automatismes / contrôle-commande<br><input type="checkbox"/> télécommunications<br><input type="checkbox"/> alimentation électrique (perte d')<br><input type="checkbox"/> défaut d'entretien<br><input type="checkbox"/> organisationnel / humain (dont maintenance)<br><input type="checkbox"/> intrusions (dont chute / accident navigation) | Préciser les composants concernés de l'ouvrage et les modes de défaillance rencontrés<br>(possibilité de joindre un rapport d'analyse des causes) : |
| Retour d'expérience / Enseignements tirés / Mesures prises ou envisagées :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                     |

A envoyer au service du contrôle - fax:

Figure 3 : Modèle-type de fiche « analyse » d'EISH de barrage

Concernant les PSH, les informations attendues lors de la déclaration correspondent à une fusion des deux fiches EISH barrages. Des fiches équivalentes existent pour la déclaration des EISH relatifs aux digues.

Identification des thématiques concernées (conséquences / causes / circonstances)

Pour faciliter l'exploitation des événements déclarés, des thématiques ont été pré-identifiées sur les deux fiches de déclaration, sous forme de cases à cocher : pour les types de conséquences et les types de causes / circonstances.

Concernant les conséquences, on retrouve d'une part les principaux paramètres intéressant la classification des événements (dégâts aux biens, atteinte aux personnes, modification des caractéristiques de l'ouvrage) et d'autre part la perte éventuelle de fonctions de sécurité généralement identifiées dans les EDD de barrages (cote de retenue non-maîtrisée, débit aval non-maîtrisé). Le cas de la rupture d'un ouvrage (barrage, vanne, conduite...) serait la combinaison de plusieurs de ces items.

Du point de vue des causes et des circonstances, des grandes familles ont été définies. Elles comprennent d'une part trois types de circonstances qui peuvent être combinées entre elles : exploitation normale, exploitation couplée à un aléa naturel (notamment une crue), exploitation liée à une phase de travaux. D'autre part, des grandes familles de causes ont été identifiées :

- sur le plan organisationnel et humain ;
- et par domaines techniques : génie civil, géologie (fondations, appuis...), vannerie, conduite / galerie, automatismes / contrôle-commande, télécommunications, alimentation électrique.

La logique souhaitée est que le renseignement de la fiche fasse apparaître les différents éléments impliqués dans le déroulement d'une séquence accidentelle, qu'ils soient situés au niveau d'un événement initiateur, d'un événement intermédiaire ou de l'événement redouté lui-même (par exemple, rupture d'ouvrage ou ouverture intempestive d'une vanne).

Les retours d'expérience tirés des événements déclarés intéressent autant l'administration (missions de contrôle et communication) que les responsables d'ouvrages (partage d'expérience entre exploitants, préparation d'EDD). La mutualisation des données accidentologiques ou incidentologiques est développée aux § 3 et 4 de cet article.

### **1.3. Quelques chiffres**

Pour donner un ordre d'idée, le nombre d'EISH déclarés entre 2006 et 2010 (pour les seuls barrages concédés) est resté stable et situé à une moyenne d'environ 40 événements par an.

Suite à la parution de l'arrêté du 21 mai 2010 [3], compte tenu du nombre de barrages concédés et autorisés en France, on peut prévoir à terme une fourchette d'environ 80 à 100 EISH par an. Concernant les PSH, le nombre est beaucoup plus incertain. A terme, ce sont 620 barrages soumis à EDD qui devraient faire remonter annuellement des déclarations. Enfin, en matière de digues, le recul sur le sujet reste encore insuffisant pour avoir une idée du volume annuel d'EISH.

## **2. PRESENTATION DE LA BASE ARIA**

Au sein de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère du Développement durable, le Bureau d'Analyse des risques et Pollutions Industriels (BARPI) est chargé depuis 1992 de rassembler et diffuser les informations et le retour d'expérience en matière d'accidents technologiques ou industriels. Une équipe d'ingénieurs et de techniciens assure à cette fin le recueil, l'analyse, la mise en forme des données et enseignements tirés, ainsi que leur enregistrement dans la base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents).

ARIA recense des incidents et accidents qui ont – ou auraient pu – porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, la nature et l'environnement. L'essentiel des 40 000 événements français et étrangers enregistrés résultent de l'activité d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) ou susceptibles de l'être (usines, ateliers, dépôts, chantiers, carrières, élevages...). Les événements impliquant des barrages ou digues ont été intégrés en 2010 : la base en comporte 103 au 1<sup>er</sup> juillet 2011 dont 60 survenus après le 1<sup>er</sup> janvier 2010, parmi lesquels 38 ont donné lieu à une déclaration EISH.

### **2.1. Objectifs du retour d'expérience**

L'analyse et la synthèse de l'expérience acquise vise, par la capitalisation et la diffusion des connaissances, à permettre de réduire continuellement le risque d'accident sans toutefois pouvoir l'éliminer complètement, comme nous le rappellent épisodiquement des accidents dramatiques tels l'explosion de Toulouse en 2001 ou la tempête Xynthia en 2010. Ce travail peut être découpé en trois volets complémentaires formant un cycle : la connaissance des phénomènes, leur prise en compte dans la stratégie de réduction du risque et l'analyse de l'efficacité des mesures mises en œuvre.

La présentation des phénomènes constitue le point de départ du retour d'expérience : elle consiste à décrire les causes, le déroulement et les conséquences des accidents, ainsi que les mesures prises pour les gérer. Dans ARIA, elle prend la forme d'un résumé factuel pour chaque accident, permettant aux acteurs de la prévention d'ancrer leurs positions sur des éléments partagés issus de situations passées réelles.

Dans un second temps, l'exploitation de l'ensemble des accidents connus permet l'identification de scénarii génériques et la définition de pistes d'amélioration. Ce travail, fondé sur la production de

recommandations en concertation entre industriels, bureaux d'étude et administrations, ainsi que leur diffusion à grande échelle, fournit des éléments partagés au bénéfice de l'ensemble des acteurs de la profession mais également des parties prenantes de la décision publique : riverains, associations, élus. Il ouvre des voies de progrès dans :

- la connaissance précise des phénomènes : nature, amplitude des conséquences, validation des modèles prédictifs ;
- la meilleure caractérisation des événements : circonstances, causes, chronologie de l'accident et de l'intervention ;
- la réduction du risque à la source par l'identification des équipements ou des aspects organisationnels ou humains porteurs de risque ;
- l'appréciation de l'efficacité des mesures de maîtrise des risques : barrières de sécurité et dispositifs de protection ayant joué leur rôle ou au contraire défailli ;
- le perfectionnement des stratégies et moyens de lutte contre les sinistres : matériels, plans de secours...

Les enseignements tirés de cette analyse permettent de mieux cerner les possibilités et les limites des mesures de prévention et servent de base à la recherche de nouvelles priorités de réduction du risque à explorer, ainsi que d'un équilibre entre prévention et mitigation des risques. Leur large diffusion répond à la demande sociétale d'une vigilance partagée entre industriels, experts, autorité régaliennne et société civile, élément clé d'une gestion des risques efficace et globale : réduction à la source, gestion des crises, information du public, réparation des dommages.

## **2.2. Mise à disposition des informations**

Les accidents sont intégrés dans ARIA sous la forme de résumés concentrant le maximum de données pertinentes. Les exigences sociales de sécurité et de transparence ont conduit en juin 2001 à l'ouverture sur Internet de la base ARIA ([www.aria.developpement-durable.gouv.fr](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr)) ; les professionnels et le public peuvent désormais interroger la base à l'aide d'un moteur de recherche. En plus des résumés, plusieurs centaines de fiches détaillées et illustrées présentent très précisément des accidents particulièrement intéressants en termes de retour d'expérience sur : le déroulement des événements, leurs conséquences, circonstances, les mesures prises à court ou moyen terme, les causes avérées ou présumées, les suites données ou les enseignements tirés. Afin d'encourager les efforts de partage des informations, le principe de l'anonymat s'applique à l'ensemble des accidents figurant dans les publications liées à ARIA ; seul le nom de la commune est communiqué pour permettre les recherches par critères géographiques.

Des analyses par thème ou par secteur industriel incluant des recommandations techniques sont également disponibles. Les principales rubriques sont traduites en anglais.

Dans le cadre d'une démarche de partenariat, l'administration consulte aujourd'hui périodiquement les organismes professionnels de secteurs d'activité stratégiques (chimie, pétrole notamment) pour enrichir et compléter les résumés.

Si les professionnels et le public peuvent désormais réaliser eux-mêmes les extractions par Internet, le BARPI remplit toujours une mission d'appui dans la définition des règlements relatifs aux installations classées auprès du Conseil supérieur de la prévention des risques technologiques (CSPRT) et constitue un pôle de compétence au service de l'administration pour appuyer les évolutions réglementaires sur le retour d'expérience et fournir un appui opérationnel aux services déconcentrés de l'Etat.

## **2.3. Organisation de la collecte des données**

### **2.3.1. Circuit de collecte dans le cas général**

La base ARIA a initialement été conçue pour rassembler des informations sur les accidents industriels, en particulier pour les activités visées par la nomenclature des installations classées. Les services

administratifs de l'Inspection des installations classées exerçant le contrôle des établissements ont constitué dès la création de la base un canal privilégié de collecte d'informations et d'analyses techniques des événements survenus en France.

Pour un balayage plus exhaustif, une revue quotidienne des registres d'intervention des services de secours est venue compléter le dispositif. La lecture complémentaire des rapports périodiquement diffusés par divers organismes de veille spécialisés (cellules dédiées du ministère du Développement durable et du ministère de l'Intérieur, établissements publics, associations, syndicats professionnels), ainsi que de la presse, permet également de recouper les informations et d'élargir le périmètre de collecte des données à l'international ; 16 % des accidents enregistrés depuis 1992 sont survenus à l'étranger.

Ce mode d'alimentation de la base de données conduit :

- pour la France, à l'examen d'une gamme élargie d'événements décrits par les services d'inspection et portant sur l'ensemble des installations classées ou susceptibles de l'être ;
- à l'étranger, à une concentration de l'attention sur les accidents les plus médiatisés, qui sont bien souvent les mieux analysés par les intervenants locaux.

### 2.3.2. *Spécificités des EISH et PSH*

Afin d'assurer un retour d'expérience le plus large possible dans le domaine de l'hydraulique, le périmètre de saisie dans ARIA inclut les événements :

- ayant fait l'objet d'une déclaration EISH ou, dans certains cas, PSH ;
- ou vérifiant les critères, mais en attente de déclaration ;
- ou survenus à l'étranger, et par nature non-déclarés ;
- ou survenus sur un ouvrage n'entrant pas dans la nomenclature « loi sur l'eau » mais apportant un retour d'expérience transposable.<sup>2</sup>

Les informations sur les EISH / PSH français répertoriés dans ARIA, qui proviennent de différentes sources sont colorées en fonction de leur origine :

- services de contrôle et leur appui technique (DDT(M), DREAL, BETCGB, Cemagref...) ;
- services de secours (SDIS)
- médias.

En effet, les services de contrôle s'intéressent en premier lieu aux causes de l'accident dans une perspective de prévention à la source, les services de secours privilégient la chronologie des faits et apportent des enseignements précieux sur la cinétique de développement du sinistre et les difficultés d'intervention rencontrées, les médias reflètent enfin le regard de la société sur l'événement. En outre, certaines organisations internationales diffusent des informations relatives aux accidents survenus à l'étranger.

A la fin de chaque bimestre, les résumés d'accidents issus de la synthèse de l'ensemble des éléments collectés sont soumis aux services de contrôle et aux appuis techniques (BETCGB et Cemagref) pour être relus, modifiés ou complétés le cas échéant. Les textes sont alors mis en ligne en accès libre sans mention du nom des exploitants ni des ouvrages et peuvent par la suite être enrichis à tout moment par de nouvelles informations : précisions sur les conséquences différées, modification des mesures de sécurité à la suite de l'accident... Dans l'avenir, les organismes professionnels qui le désirent pourront demander à être associés aux relectures et contribuer ainsi à l'alimentation de la base, comme c'est déjà le cas dans le domaine de la chimie ou des industries pétrolières.

---

<sup>2</sup> Entrent dans cette catégorie les bassins de retenue d'effluents industriels en grande quantité et à forte teneur en liquide : résidus de concentration ou de transformation de minerais, de fabrication de TiO<sub>2</sub>, de phosphogypses, fines de lavage du charbon ou de granulats concassés, résidus papetiers, cendres volantes de centrales thermiques, terres de lavage de végétaux, effluents de féculeries, sucreries et autres industries agro-alimentaires.

Bien que la totalité des EISH déclarés soit intégrée, le recensement des événements français et étrangers n'est bien sûr pas exhaustif ; ARIA ne peut donc pas être utilisée comme un outil de traitement statistique sur l'accidentologie.

#### 2.4. Conditions d'une intégration réussie des EISH / PSH dans ARIA

Dans un avenir proche, la réussite de l'intégration du retour d'expérience du volet « barrages et digues » de la base ARIA sera fonction de :

- l'implication des acteurs de terrain (services de contrôle), associés à l'alimentation de la base et à la validation des résumés produits ;
- le niveau de détail dans la description des causes par l'exploitant : au-delà des aspects techniques, les questions relatives aux facteurs organisationnels et humains, comme aux mesures de maîtrise des risques méritent ainsi la plus grande attention ;
- la précision du recueil d'éléments circonstanciels, notamment des informations dont disposaient les acteurs lors du déroulement des événements ;
- la mise en valeur du retour d'expérience positif, c'est-à-dire des améliorations techniques et organisationnelles apportées à moyen terme pour améliorer la défense en profondeur des installations après les premières mesures correctives, sans mention du nom de l'exploitant.

Dans un second temps, la valorisation des éléments tirés du retour d'expérience sera à la mesure de :

- la contribution des organismes professionnels concernés à la réalisation et la diffusion d'analyses d'accidentologie ;
- la stratégie mise en place pour partager l'information avec les acteurs de la profession et agir pour lutter contre les risques identifiés ;
- l'efficacité de la diffusion des enseignements pour la sensibilisation et l'information de la société.

### 3. EXPLOITATION DE L'ACCIDENTOLOGIE

La totalité des résumés d'accidents de la base ARIA est accessible en ligne par l'intermédiaire du moteur de recherche du site public, via la rubrique « Accès à la base de données » (figure 4) :



### 3.1. Deux exemples impliquant des barrages

Il est possible de cibler la recherche sur les ouvrages hydrauliques en appliquant le filtre principal permettant de sélectionner seulement le type d'événement « BARRAGES » (figure 5).

La recherche peut ensuite être affinée en employant un critère supplémentaire : mots clés, produits impliqués, conséquences, types de défaillances... Deux exemples sont présentés ci-après : un premier portant sur un composant de barrage (« vanne ») et un second sur un événement redouté central (« rupture »).

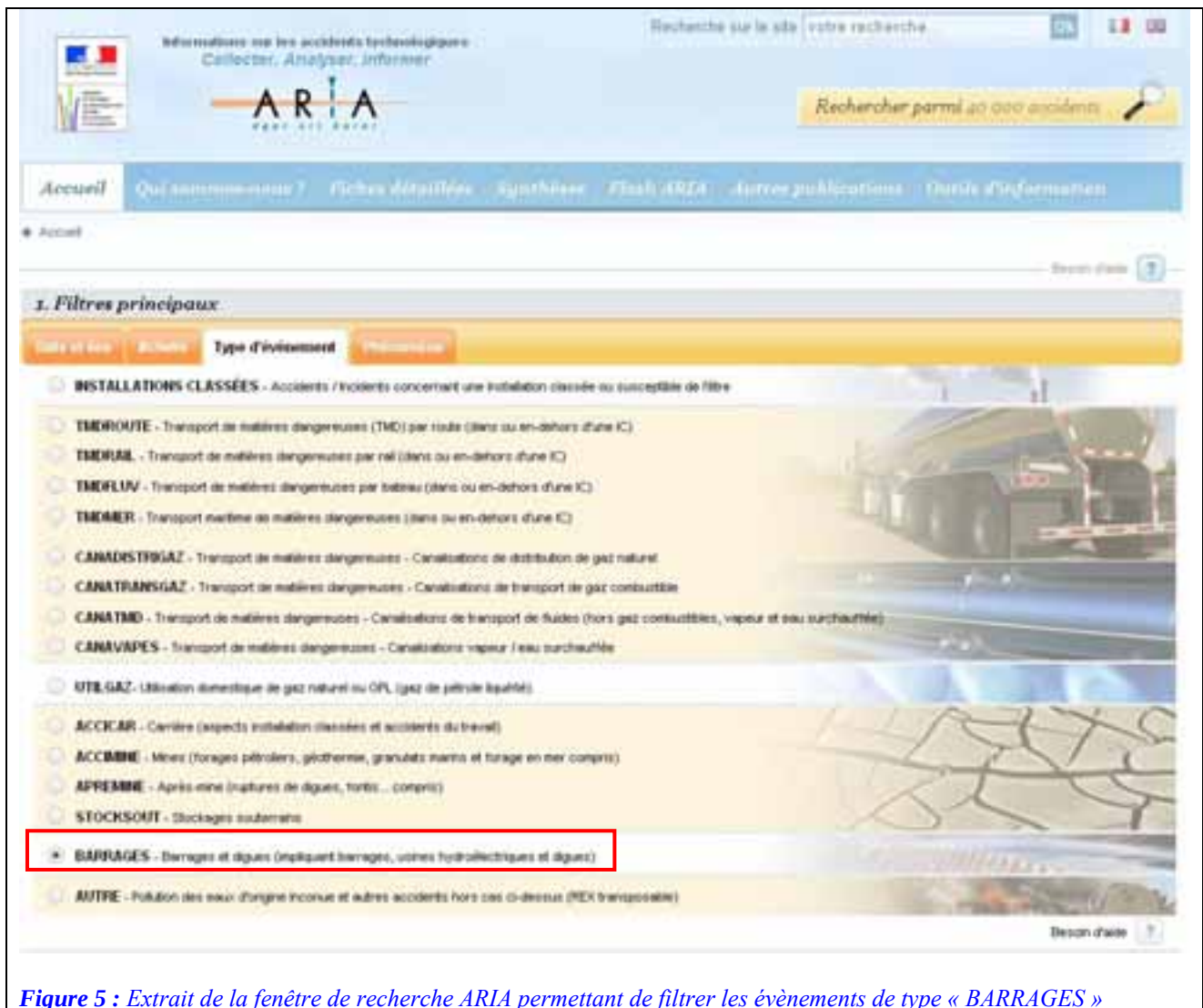


Figure 5 : Extrait de la fenêtre de recherche ARIA permettant de filtrer les événements de type « BARRAGES »

### 3.1.1. Un exemple de recherche par type d'ouvrage ou de composant

Le mot-clé « vanne » est ici spécifié comme filtre complémentaire pour la recherche (figure 6).

2. Filtres complémentaires

Résumé Principales faiblesses du produit Conséquences Distances Coordonnées d'urgence européenne

Taille du résultat maximum ou égal à : 1000 caractères

Contient tous les mots :

vanne

Et ne contient aucun des mots :

Tapez votre ou vos mots-clé / expressions ici en les séparant par des " ; " :

Figure 6 : Extrait de la fenêtre de recherche ARIA permettant de saisir un mot-clé

La requête fournit une liste d'accidents, dont le n° 39371 et son résumé analytique :

**ARIA 39371 - 09/11/2010 - 08 - RETHEL**

35.11 - Production d'électricité

Dans une centrale hydroélectrique au fil de l'eau sur l'AISNE, une défaillance d'automatisme impose la régulation manuelle de la cote de retenue par un prestataire ajustant le niveau de la vanne segment unique (largeur 32 m) sur place 2 fois par jour.

Alors que la Meuse est en crue, la cote dépasse sa valeur normale (70,2 mNGF) le 7/11 et continue de monter malgré deux ouvertures de quelques centimètres de la vanne les 7 et 8/11. Le 9/11 au matin l'opérateur constate une surverse à la cote 70,5 mNGF. Les efforts exercés par l'eau sur la vanne excèdent la capacité motrice du circuit hydraulique, entraînant un blocage. Le niveau continue de monter. La mairie est alertée. Les pompiers vident 2 caves d'habitations inondées au voisinage du barrage et une trentaine de gendarmes établit un périmètre de sécurité sur les berges ; 2 experts de la sécurité civile sont dépêchés sur les lieux.

A 16h15, un PC opérationnel est installé, rassemblant les services de la sous-préfecture de Rethel, du ministère de l'écologie, le SDIS et le maire. Deux grues de 40 t sont mises en place pour manœuvrer la vanne. Les passerelles de l'ouvrage sont emportées à 18 h. Le risque de rupture du barrage lors du relevage de la vanne conduit le sous-préfet à ordonner à 19 h l'évacuation de 250 personnes : 1 habitante à la santé précaire est hospitalisée et l'opération est terminée vers 20h30. La cote est à cet instant de 71,42 mNGF, soit 1,07 m au dessus de la crête du barrage. Après reconnaissance de l'absence de riverain en aval, le levage est réalisé sans encombre et la vanne est consignée en position complètement ouverte. Les habitants accueillis dans une salle municipale rejoignent leur domicile vers 21 h.

L'expertise engagée par l'exploitant pointe des déformations importantes de la vanne et une insuffisance du ferrailage des appuis. La panne d'automatisme imposant la régulation manuelle remontait à juin 2010 : suite à une défaillance du codeur des mesures de position de la vanne en rive droite et en rive gauche, elles apparaissaient comme différentes entraînant le déclenchement d'une alarme en continu. L'exploitant avait alors inhibé le canal de transmission par lequel transitait également le signal émis par le capteur « niveau trop haut » de l'eau : l'alarme de dépassement de ce dernier à la cote 70,35 mNGF dans la nuit du 8 au 9/11 n'a pas été relayée.

Suite à l'accident les automatismes sont rénovés, des capteurs de niveau hauts indépendants de l'automate de commande sont installés et les ferrailages de la vanne sont réparés. L'exploitation du barrage reprend le 13/05 après 1 mois de travaux au cours duquel l'équilibre écologique en amont du cours d'eau est mis à mal par l'étiage sévère. La cote de retenue du barrage est abaissée de 70 cm et la production hydroélectrique est suspendue.

Un riverain déclare dans la presse avoir signalé le débordement de la rivière à la gendarmerie vers 7 h du matin. Averti vers 13 h, le maire juge son information par l'exploitant trop tardive. Une inondation avec évacuation de personnes avait eu lieu dans la même zone en 1993.

L'exploitant propose le classement de l'événement en EISH jaune

La base ARIA comporte également un module photographique (photos 1 à 4) :



**Photos 1 à 4 :** Surverse du barrage de Rethel, mise en place des grues pour ouvrir la vanne (09/11/2010)  
et état de l'aménagement à l'issue de l'intervention (Crédit photos : DREAL Champagne Ardenne)

#### Commentaires sur l'apport de l'analyse menée autour de cet événement :

Le barrage concerné par cet événement qui est de classe D n'est pas soumis à EDD. On pourrait donc s'interroger *a priori* sur l'intérêt d'étudier un tel événement pour l'EDD d'un barrage de classe A ou B. Il s'agit là d'un cas assez représentatif de la fraction importante des EISH déclarés n'impliquant pas de grands barrages. En raison des moyens importants mobilisés sur les grands barrages et du nombre plus élevé de petits ouvrages, les séquences accidentelles exploitables en termes de retour d'expérience proviennent principalement de ces derniers. Voici quelques-unes des pistes de réflexion que le résumé ARIA n° 39371 pourrait amener à développer pour l'EDD d'autres ouvrages :

- de manière générale, étudier les risques de blocage et/ou de rupture de vannes ;
- de manière plus spécifique, étudier les risques de blocage propres aux vannes segment de longueur importante et/ou manœuvrées par vérin ;
- regarder si une vanne est dimensionnée pour supporter une surverse et/ou pour être manœuvrée sous un cas de charge correspondant à un déversement de plusieurs centimètres sur la vanne elle-même ;
- étudier le niveau d'indépendance des voies de transmission des informations provenant du barrage, et en particulier des alarmes ;
- étudier l'intérêt de mettre en place une barrière de sécurité reposant sur des capteurs de niveaux hauts indépendants de l'automate de commande de vanne ;
- disposer de consignes de surveillance et de consignes de crues adaptées à la cinétique de la crue elle-même. Ceci peut d'ailleurs être associé à une analyse critique sur le choix des seuils de calage des capteurs utilisés par les automatismes du barrage ;
- disposer de consignes provisoires adaptées à une situation dégradée de fonctionnement, notamment à une manœuvre semi-manuelle de vannes, régulière et fréquente (plusieurs fois par jour) ;
- s'interroger sur le niveau de compétence requis pour des intervenants externes auxquels des missions impactant la sécurité des ouvrages hydraulique sont confiées ;
- estimer le temps d'évacuation d'enjeux identifiés à l'aval d'un barrage.

On remarquera que les éléments d'analyse intégrés dans ARIA combinent à la fois des informations techniques provenant de professionnels du monde de l'hydraulique et d'autres issues de services de secours et des médias.

### 3.1.2. Un exemple de recherche par événement redouté central (ERC)

Une nouvelle interrogation de la base ARIA en recherchant par mot-clé l'ERC « rupture » retourne parmi d'autres l'évènement suivant :

#### **ARIA 39950 - 19/02/2011 - 54 - LANEUVEVILLE-DEVANT-NANCY**

##### *52.22 - Services auxiliaires des transports par eau*

Vers 13h30, la digue en berge droite du canal de la MARNE au RHIN cède à la suite de la rupture de l'aqueduc datant de 150 ans permettant au FRAHAUT de passer sous le canal pour se jeter dans la MEURTHE. Des canalisation d'eaux usées et des fibres optiques sont brisées. Le bief (70 000 m<sup>3</sup> d'eau sur 1,6 km entre les écluses 25 et 26) se vide dans la MEURTHE ; les eaux usées se diluent dans la rivière qui n'est pas à l'étiage. Toute navigation est impossible sur 1 km environ en amont et en aval et le niveau des canaux voisins est surveillé. La municipalité interdit par arrêté l'accès au chemin de halage et une patrouille de police surveille les berges, de nombreux badauds venant voir les dégâts. L'exploitant du canal demande aux propriétaires de bateaux dans le port de Nancy de mettre leurs embarcations en sécurité en prévision d'une baisse de niveau d'eau de 50 cm. Des pêcheurs équipés d'appareils électriques vident les écluses de la faune aquatique.

Une canalisation temporaire d'eaux usées est mise en place et le débit du FRAHAUT détourné vers le canal pour l'alimenter et éviter l'échouage des bateaux-logements. Un nouvel aqueduc en béton est construit dans un batardeau provisoire et la digue est restaurée (rideau de palplanches et remblai). Le canal débarrassé des encombrants est remis en eau pour alimenter le port de plaisance de Nancy et le port de marchandise de Frouard. La navigation est rétablie le 16 mai. Le coût des réparations est estimé à plusieurs centaines de milliers d'euros. L'accident est survenu alors que le canal était en chômage pour 2 mois depuis le 13/02.

#### Commentaires sur l'apport de l'analyse menée autour de cet événement :

Comme dans le cas précédent, cet événement concerne un ouvrage non-soumis à EDD. Pourtant, son analyse peut permettre d'enrichir la réalisation d'EDD d'autres ouvrages. Pour en illustrer l'apport, voici plusieurs pistes de réflexion que le résumé n° 39950 pourrait amener à développer :

- étudier le cas de rupture d'un barrage en remblai présentant un important linéaire d'ouvrage, au niveau de points singuliers et notamment d'ouvrages traversants ;
- envisager un mode de défaillance d'ouvrages traversants (type aqueduc) par affaissement du terrain sous-jacent ou effondrement de l'ouvrage lui-même ;
- regarder le niveau de prise en compte des ouvrages traversants dans les calculs de stabilité d'un barrage en remblai ;
- prendre en compte l'ancienneté d'un aqueduc et sa technique de mise en œuvre dans l'étude des modes de défaillance de celui-ci. L'aqueduc objet de l'EISH présenté datait d'il y a 150 ans et était réalisé en maçonnerie. Pour de nouveaux ouvrages, comme c'est le cas ici, une technique de réalisation en béton est généralement utilisée
- s'interroger sur le niveau de surveillance habituellement pratiqué sur des zones à ouvrage traversant ;
- évaluer l'impact économique d'une rupture d'ouvrage ;
- évaluer le délai de remise en état d'un ouvrage.

La compréhension du mécanisme de rupture mis en jeu pourrait être facilitée par l'ajout d'informations sur les caractéristiques géométriques du remblai, la structure initiale de l'aqueduc et les propriétés géotechniques des matériaux de remblai et de fondation qui n'ont pour l'heure pu être recueillies.

Les photos 5 à 9 ci-dessous illustrent l'évènement décrit.



*Photos 5 à 9 : Visualisation de la brèche dans le remblai et de l'aqueduc en béton, après réhabilitation  
(Crédit photos : Guillaume Kiffer, février et mai 2011)*

### **3.2. Pratiques de l'accidentologie dans les ICPE**

#### **3.2.1. Un exemple de prise en compte du retour d'expérience dans l'EDD d'un site industriel**

Parmi les installations visées par la nomenclature des ICPE, certaines sont susceptibles de générer des risques ou des nuisances importants. Leur exploitation est soumise à ce titre à une autorisation préfectorale rendant nécessaire une EDD par laquelle l'exploitant démontre qu'il atteindra un niveau de risque aussi bas que possible, conforme aux meilleures technologies disponibles, et économiquement acceptable. L'EDD intègre une description précise des installations et de leur environnement, une identification des substances employées, un inventaire des sources de risque internes (organisation du travail, procédés...) et externes (agressions naturelles, effets domino...), une description des phénomènes dangereux susceptibles de se produire (caractérisés en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité de

leurs effets et de cinétique), ainsi qu'une cotation de gravité des accidents correspondants vis-à-vis des enjeux vulnérables. Les mesures de maîtrise des risques sont présentées en détail et leur efficacité justifiée. L'étude décrit également les moyens de secours publics et privés disponibles en cas d'accident.

La description des scénarii accidentels envisagés dans l'EDD intègre le retour d'expérience tiré de l'accidentologie disponible : des résumés d'accidents y sont systématiquement joints afin de démontrer la prise en compte du retour d'expérience externe à l'entreprise du pétitionnaire. Les bureaux d'études, qui réalisent 30 % des visites du site du BARPI sur Internet, citent largement les résumés ARIA ne comportant pas le nom de l'exploitant. La base peut être interrogée à l'aide d'un moteur de recherche selon plusieurs critères :

- localisation (date et lieu) ;
- activité (classement nomenclature d'activités française – NAF) ;
- type d'événement (installations classées, transports et canalisations, mines et carrières, gaz, barrages et digues) ;
- phénomène mis en œuvre (incendie, explosion, rejet, chute / rupture, effet domino) ;
- mot-clé ;
- ...

Si la rubrique accidentologique obligatoire des EDD se réduit parfois à la simple citation d'événements sans analyse satisfaisante, elle fournit un réel apport dans la majorité des cas. Dans la suite de ce paragraphe, nous allons présenter l'usage de l'accidentologie disponible dans le cas d'un site de chimie fine soumis à autorisation avec servitudes (AS), régime ICPE le plus contraignant. Pour ce type d'installations, l'EDD doit être réexaminée tous les 5 ans. A l'occasion d'une révision intervenue en 2007, l'industriel qui exploitait le site existant a actualisé son analyse. Pour cela, après avoir décrit le fonctionnement de l'usine, les potentiels de dangers et les mesures de maîtrise des risques déjà mises en œuvre, il a extrait de la base ARIA une liste d'accidents dans des sites industriels présentant des similitudes avec le sien (figure 7) :

### 7.2. Retour d'expérience externe

L'analyse des accidents référencés par la base BARPI depuis 1993, indique en majorité des fuites issues d'une défaillance d'équipement (pompes, canalisation,...) lors des opérations de transferts (dépotage, transfert vers les ateliers...). Ensuite, viennent les événements faisant intervenir le triangle du feu. Il s'agit des incendies et des explosions des citernes de stockages de produits inflammables. Enfin, arrivent les événements relatifs aux débordements de citernes. Les événements concernant les fuites de cuves et les réactions d'incompatibilités sont rares.

| Evénement | Fuite sur équipement | Feu   | Débordement | Fuite de cuve | Réaction d'incompatibilité | Total |
|-----------|----------------------|-------|-------------|---------------|----------------------------|-------|
| Fréquence | 43,5%                | 30,4% | 15,2%       | 6,5%          | 4,3%                       | 100%  |

Figure 7 : Exemple d'utilisation de la base ARIA dans le cadre d'une EDD d'installation classée

L'exploitant a relevé dans l'accidentologie disponible une réaction d'incompatibilité faisant l'objet du résumé ARIA n° 29036 : le mélange involontaire d'hypochlorite de sodium (eau de javel) et d'acide chlorhydrique entraînant un dégagement de chlore, gaz particulièrement toxique (figure 8) :

| Référence BARPI | Date     | Accident                                                        | Causes                                                                                                | Conséquences                                                                    | Existence du danger sur le site<br>[XXX] | Mesures existantes ou prévues                                                                             |
|-----------------|----------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 29036           | 26/01/05 | Emission de chlore suite à réaction incompatible entre produits | Le transporteur a effectué une mauvaise connexion sur une canalisation pourtant clairement identifiée | Dispersion de chlore gazeux, plusieurs employés incommodés et habitants évacués | OUI                                      | Formation du personnel, poste de dépotage javel identifié et mis à l'écart, buse d'arrosage de la citerne |

Figure 8 : Exemple d'analyse d'un événement issu de la base ARIA et prise en compte pour le site industriel étudié

En supposant le dépotage complet d'une citerne de 23 m<sup>3</sup> d'hypochlorite de sodium dans une cuve d'acide chlorhydrique (hypothèse majorante), il évalue dans l'EDD les distances d'effets irréversibles sur les personnes, ainsi que les distances d'exposition létale. En dépit de l'ensemble des mesures de maîtrise des risques existantes permettant d'abaisser la probabilité de l'accident « dégagement de chlore », le niveau de risque reste trop élevé. L'exploitant décide d'agir sur la gravité de l'accident en limitant le volume gazeux émis. Le transfert précédemment effectué en une seule fois sous la surveillance d'un opérateur pouvait conduire au dépotage complet d'un camion-citerne de produit incompatible. La nouvelle procédure consiste à effectuer un premier déversement de 10 secondes, suivi d'un temps d'observation de la situation ; en l'absence de dégagement gazeux et après autorisation du correspondant hygiène, sécurité et environnement, le produit restant est transféré. L'exploitant évoque également un dispositif instrumenté asservissant l'autorisation de continuer le dépotage à l'absence de déviation détectée. Ces mesures devraient permettre d'abaisser significativement les distances d'effets irréversibles et létaux sur la population avoisinante, et par conséquent d'abaisser fortement le niveau de risque résiduel.

Si l'EDD était produite aujourd'hui, elle pourrait être enrichie des enseignements de l'accident étranger ARIA n° 35830 dont les conclusions n'étaient pas encore connues au moment de la rédaction (figure 9). Il s'agit du dépotage accidentel d'acide chlorhydrique dans une cuve d'hypochlorite de sodium entraînant un important dégagement gazeux causant des blessures graves suivies du décès du livreur, ainsi que le confinement des riverains.



Figure 9 : Extrait de la fenêtre de consultation du résumé n° 35830 de la base ARIA

Pour cet accident, une analyse détaillée a été produite et mise en ligne sur le site ARIA, comme en témoigne la petite icône à mi-hauteur à droite sur la figure 9. Deux mesures de maîtrise des risques mises en place par l'exploitant allemand pourraient compléter l'EDD :

- l'adaptateur de livraison de l'hypochlorite de sodium a été équipé d'un pas de vis à gauche, jouant le rôle de détrompeur ;
- un contrôle de la canalisation d'hypochlorite par une électrode pH a été ajouté.

### 3.2.2. Implication des organismes professionnels dans le retour d'expérience

#### Contribution à la collecte des données

La rédaction des résumés dans ARIA et leur amélioration forment un processus continu impliquant un ensemble d'acteurs. Le BARPI se charge de recenser les événements et de préparer les textes sur la base notamment de documents de presse, des rapports des services de secours ainsi que des informations fournies par l'administration déconcentrée. Chaque bimestre, les résumés des accidents sont adressés aux administrations, ainsi qu'aux organismes professionnels qui en ont fait la demande, pour être corrigés et complétés au besoin. L'Union des industries chimiques (UIC) et le Groupe d'étude de sécurité des industries pétrolières et chimiques (GESIP) contribuent par exemple à la consolidation et au renforcement de la base au travers des commentaires recueillis auprès de leurs adhérents.

#### Analyse et valorisation des productions

Au-delà de l'EDD, une politique complète de gestion des risques suppose également une bonne communication entre les acteurs, qu'ils soient publics ou privés, professionnels ou riverains. Les efforts conjoints de l'administration et des syndicats professionnels représentant les entreprises d'ingénierie et les exploitants conduisent régulièrement à la rédaction de recommandations concrètes spécifiques à un type d'activité, suivie de leur large diffusion dans les entreprises concernées et auprès du public afin d'identifier des voies partagées d'amélioration de la sécurité et de tendre à une meilleure compréhension et connaissance du risque par la société civile. On mentionnera à titre d'exemple :

- le CD Prévention des accidents impliquant du chlore (Syndicat français des halogènes et dérivés – SHD, INERIS et ministère du Développement durable), avril 2005 ;
- la plaquette Travaux par points chauds dans les silos de matières végétales (Organisation professionnelle unitaire de la coopération agricole – COOP de France et ministère du Développement durable), 2007 ;
- la rédaction simultanée en septembre 2007 :
  - du *Référentiel professionnel DT 85 de bonnes pratiques de maîtrise des risques dans les installations de chimie fine* (UIC)
  - et du *Guide d'évaluation des EDD dans le secteur de la chimie fine à l'attention de l'inspection des installations classées* (ministère du Développement durable)
- la rédaction simultanée en mai 2008 :
  - du *Guide SFEPa n°9 de bonnes pratiques en pyrotechnie* (Syndicat des fabricants d'explosifs, de pyrotechnie et d'artifices – SFEPa)
  - et du *Guide pour la maîtrise des risques dans le secteur de la pyrotechnie à l'attention de l'inspection des installations classées* (ministère du Développement durable)
- l'étude *Accidents et incidents dans les activités d'élevage* (Assemblée permanente des chambres d'agriculture – APCA et Ministère du Développement durable), novembre 2010.

La mise en ligne gratuite de certaines de ces productions répond au désir sociétal de transparence sur la connaissance des risques et des mesures à prendre pour les réduire.

## 4. CONCLUSIONS

La mise en place progressive des dispositions réglementaires de déclaration des événements impliquant la sécurité hydraulique a permis de systématiser la collecte et l'analyse des EISH et PSH. Leur intégration dans la base accidentologique ARIA du ministère du Développement durable a ouvert un nouveau canal de diffusion des enseignements dont ils sont porteurs. Au travers de deux incidents de barrages récents dont les résumés sont consultables en ligne via l'interface web d'ARIA, cet article illustre l'apport de l'accidentologie dans la préparation des EDD de barrages.

Les événements sélectionnés montrent qu'en raison de similitudes des composants ou de l'organisation avec ceux rencontrés sur des grands barrages, les incidents survenus sur de petits ouvrages sont porteurs

de nombreux enseignements transposables. L'analyse des éléments contenus dans les deux résumés met ainsi en lumière des scénarios de défaillance, des causes, des circonstances et des mesures prises pour maîtriser les risques pouvant être mis à profit dans les EDD des barrages de classe A ou B.

De manière plus générale, la précision des résumés est fonction des informations disponibles et du niveau des analyses menées : les événements saisis n'ont donc pas tous le même apport pour une EDD. Par ailleurs, le circuit d'alimentation de la base (services de secours, administrations, médias) ne garantit pas un recensement exhaustif des accidents ou incidents de barrages en France et à l'international ; ARIA est une base événementielle dont peuvent être tirés des indicateurs de tendance sans valeur statistique qui donne essentiellement des éléments qualitatifs. Comme le montre l'expérience engrangée dans les installations classées, les résumés peuvent être utilisés pour identifier des scénarios de défaillance ou d'accidents potentiels à prendre en compte dans les EDD, ainsi que des mesures possibles de maîtrise des risques (barrières de sécurité) issues du retour d'expérience. Dans un avenir proche, la montée en puissance de la déclaration des PSH dont les plus instructifs figureront dans ARIA constitue une voie de progrès prometteuse pour les barrages.

La base ARIA est conçue de façon à fournir une information des professionnels et du public dans un format homogène pour l'ensemble des secteurs d'activités couverts par la DGPR (ICPE, mines et carrières, ouvrages hydrauliques, transport de matières dangereuses, usages du gaz). Son existence n'exclut pas celle d'autres bases accidentologiques spécifiques à une profession et dotées de leurs propres finalités, avec lesquelles elle peut interagir avantageusement, comme c'est le cas dans certains secteurs d'activité (industries chimique et pétrolière notamment).

Enfin l'utilité du retour d'expérience lié aux barrages ne se limite pas au processus de réalisation de l'EDD, qui intervient au maximum à un pas décennal, mais doit s'exprimer dans les échanges réguliers entre responsables d'ouvrage et services de contrôle, que ce soit par exemple à l'occasion des inspections périodiques, dans l'aide à l'analyse d'un incident ou d'une anomalie comportementale de l'ouvrage ou encore dans l'aide à l'appréciation des risques liés à une phase de travaux.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] *Arrêté interministériel du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu. Journal Officiel de la République Française du 19 juin 2008.*
- [2] *Brandon, E. (2010). Retour d'expérience tiré de la lecture critique des premières études de dangers (EDD) de barrages en France. Colloque CFBR AFEID « Sécurité des barrages et nouvelle réglementation française - Partage des méthodes et expériences », 9 novembre 2010, Lyon.*
- [3] *Arrêté interministériel du 21 mai 2010 définissant l'échelle de gravité des événements ou évolutions concernant un barrage ou une digue ou leur exploitation et mettant en cause ou étant susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens et précisant les modalités de leur déclaration. Journal Officiel de la République Française du 11 juin 2010.*
- [4] *Circulaire du 24 juillet 2006 relative à la déclaration et au traitement des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) survenant dans les zones situées sur les ouvrages des aménagements hydroélectriques concédés par l'Etat ou à proximité de ceux-ci.*
- [5] *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 et modifiant le code de l'environnement. Journal Officiel de la République Française du 13 décembre 2007.*
- [6] *STEEGBH, Rapport d'étape du groupe de travail national « événements importants pour la sûreté hydraulique », octobre 2009.*

## Thème 3

### ETUDES DE CAS





## RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ETUDES DE DANGERS DANS LE SECTEUR DU GPL FEEDBACK ON THE SAFETY STUDIES IN THE LPG SECTOR

Thierry Tixier

[thierry.tixier@apsys.eads.net](mailto:thierry.tixier@apsys.eads.net)

Pierre. Sécher

[pierre.secher@apsys.eads.net](mailto:pierre.secher@apsys.eads.net)

22, quai Galliéni – 92158 SURESNES Cedex  
Téléphone : +00 (01) 42 048 181, Fax : +00 (01) 42 045 708

### MOTS CLÉS

GPL, EDD, Analyse de risques, MMR.

### RÉSUMÉ

*Le secteur du GPL<sup>(1)</sup> en France représente à peu près 6 000 sites industriels. Ces sites sont soit soumis à Déclaration (< 50 tonnes), soit à Autorisation (entre 50 tonnes et 200 tonnes) ou à Autorisation avec Servitude (Seveso seuil haut) si la capacité de stockage dépasse 200 tonnes.*

*Les centres emplisseurs ou les relais vrac GPL sont des installations relativement simples assez proches d'un barrage. Il n'y a pas de fabrication en tant que telle. L'activité est essentiellement constituée de phases transitoires qui consistent à remplir des stockages (sphères, réservoirs cylindriques, cavité enterrée) à partir d'une alimentation par pipe, bateau, wagon ou camion gros porteurs, puis ensuite à remplir soit des bouteilles (activité de produits conditionnés), soit des camions (petits et gros porteurs), soit plus rarement des wagons (activité vrac).*

*Le contenu des études de dangers (EDD) GPL a fortement évolué au cours de ces dernières années. Les EDD ont également influé sur les techniques de stockage vis-à-vis des risques identifiés. L'apparition, il y a une vingtaine d'années, des réservoirs sous talus (sphères ou cylindres) a permis de se prémunir du risque de BLEVE<sup>(2)</sup> avec un coût non négligeable pour les industriels. La réglementation française a évolué en parallèle.*

*Les EDD GPL sont, comme pour toute étude de dangers, articulées autour de l'analyse des risques et de la modélisation des conséquences des phénomènes dangereux.*

*Le risque principal des sites GPL est évidemment la perte de confinement qui peut, en fonction des conditions d'exploitation et environnementales, conduire à un jet enflammé ou à une explosion (UVCE<sup>(3)</sup>).*

*La modélisation des phénomènes dangereux a également évolué au cours du temps. En ce qui concerne l'explosion aérienne de nuage de gaz inflammables, nous sommes passés de l'approche de l'équivalent TNT de M. Lannoy d'EDF (courbe de détonation) à l'approche multi-energy du TNO (courbe de déflagration).*

*L'EDD GPL définit enfin les MMR/EIPS<sup>(4)</sup> (création de fiches barrières de sécurité), leur conditions de fonctionnement, d'exploitation (maintenance) et leur fiabilité. Ces barrières de sécurité sont d'autant plus importantes du fait de l'absence d'exploitant la nuit et le week-end.*

*Gaz de Pétrole Liquéfié*

*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*

*Unconfined Vapour Cloud Explosion*

*Mesure de Maitrise des Risques / Élément Important Pour la Sécurité*

## GLOSSAIRE

EDD : Etude de dangers

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

BLEVE :Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

PCIG : Probabilité, Cinétique, Intensité et Gravité

MMR : Mesures de Maitrise des Risques

UVCE :Unconfined Vapour Cloud Explosion

VCE : Vapour Cloud Explosion

EIPS : Elément Important Pour la Sécurité

TNT : TriNitroToluène (explosif de référence pour calculer les effets de surpression)

MMRI : Mesure de Maitrise des Risques Instrumentée

SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs

SEL : Seuil des Effets Létaux

SEI : Seuil des Effets Irréversibles

SIL : Safety Integrated Level (Niveau de fiabilité d’une chaîne instrumentée de sécurité selon la norme CEI61511)

IR : Infra Rouge

UV : Ultra Violet

TNO : Netherlands Organization for Applied Scientific Research

## 1. INTRODUCTION

Le secteur du GPL en France représente à peu près 6 000 sites industriels.

Ces sites se divisent en :

- dépôts bouteilles,
- centres emplisseurs (remplissage de bouteilles),
- relais vrac (distribution du GPL en vrac régionalement).

Seuls les deux derniers sont l'objet de la présente présentation (les dépôts bouteilles ne présentent que peu d'intérêt en matière d'étude de dangers du fait de la capacité unitaire des bouteilles et par l'absence d'opérations susceptibles de créer des pertes de confinement).

Ces sites sont soit soumis à Déclaration (Quantité stockée < 50 tonnes), soit à Autorisation (Quantité stockée entre 50 tonnes et 200 tonnes) ou à Autorisation avec Servitude (Seveso seuil haut) si la capacité de stockage dépasse 200 tonnes.

Les centres emplisseurs ou les relais vrac sont des installations relativement simples assez proches d'un barrage. Il n'y a pas de fabrication en tant que telle. L'activité est essentiellement constituée de phases transitoires qui consistent à remplir des stockages (sphères, réservoirs cylindriques, cavité enterrée) à partir d'une alimentation par pipe, bateau, wagon ou camion gros porteurs, puis ensuite à remplir soit des bouteilles (activité de produits conditionnés), soit des camions (petits et gros porteurs), soit plus rarement des wagons (activité vrac).

## 2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ETUDES DE DANGERS GPL

Le contenu des études de dangers (EDD) GPL a fortement évolué au cours de ces dernières années.

L'évolution des textes réglementaires peut se caractériser par deux grandes révolutions :

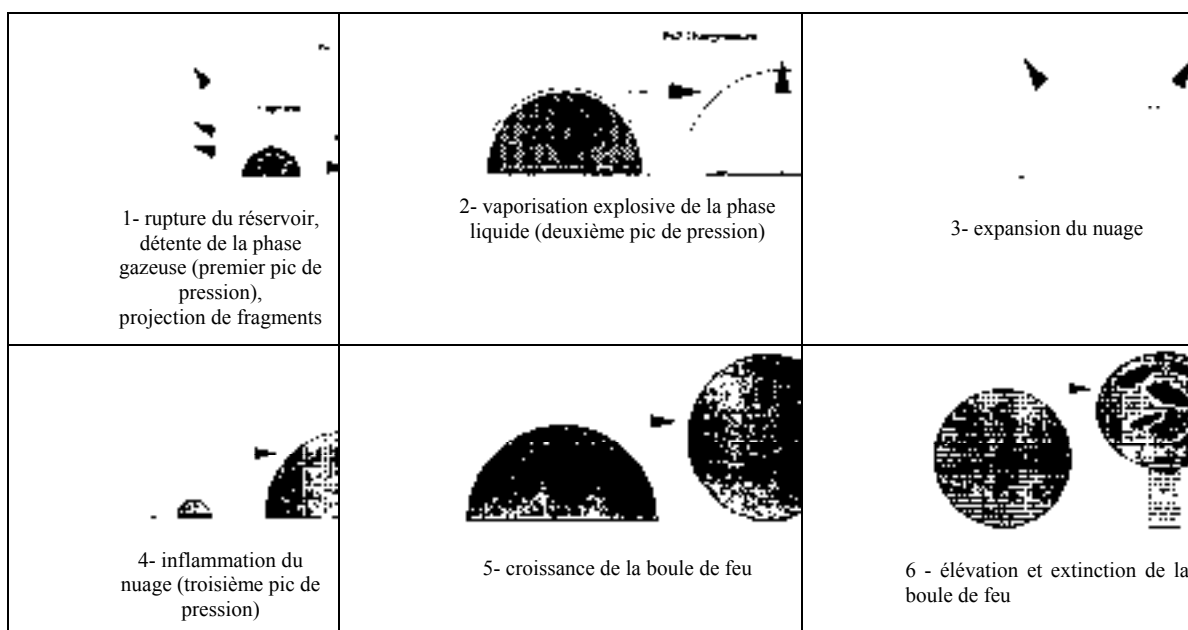
1. La directive Seveso 2 (1996) qui a introduit les aspects organisationnels dans les EDD au travers de l'exigence de la mise en place d'un système de management de la sécurité. Même si les grands groupes n'ont pas attendu cette directive pour mettre en place des systèmes de management de la sécurité, Seveso 2 a modifié notablement les relations entre l'administration et les exploitants. Au travers de l'EDD, les industriels se doivent d'expliquer comment la sécurité est gérée sur leur site et notamment comment ils peuvent garantir que les barrières de sécurité fonctionneront en cas de besoin.
2. L'arrêté du 29 septembre 2005 dit arrêté PCIG (Probabilité, Cinétique, Intensité et Gravité) a introduit les aspects probabilistes dans les EDD qui étaient purement déterministes. Du scénario majeur « rupture de la tuyauterie donnant le plus gros débit massique » nous sommes passés à la notion d'aléa et de vulnérabilité avec une certaine exhaustivité dans l'identification des phénomènes dangereux d'un site. Concrètement, des 4 scénarios majeurs qui permettaient de caractériser les conséquences autour d'un site GPL, l'EDD actuelle identifie plus d'une trentaine de phénomènes dangereux avec pour chacun son aléa et sa vulnérabilité.

Les EDD ont également fait évoluer les techniques de stockage au regard des phénomènes dangereux identifiés. L'apparition, il y a une vingtaine d'années, des réservoirs sous talus (sphères ou cylindres) a permis de se prémunir du phénomène de BLEVE avec un coût non négligeable pour les industriels. Le phénomène de BLEVE très spécifique à l'industrie du GPL mais qui concerne tous les stockages de gaz liquéfié sous pression correspond à l'ouverture brutale d'un réservoir soumis à un incendie avec libération instantanée à la pression de rupture dudit réservoir d'une masse de gaz très importante avec des effets de surpression et des effets thermiques résultant de l'inflammation de cette masse de gaz.

Ce sont les accidents de la raffinerie ELF de Feyzin en 1966 puis celui de Mexico en 1984 qui ont mis en lumière ce phénomène de BLEVE.



**Etapes de développement d’un BLEVE « chaud »** (d’après S. Shield, 1993)

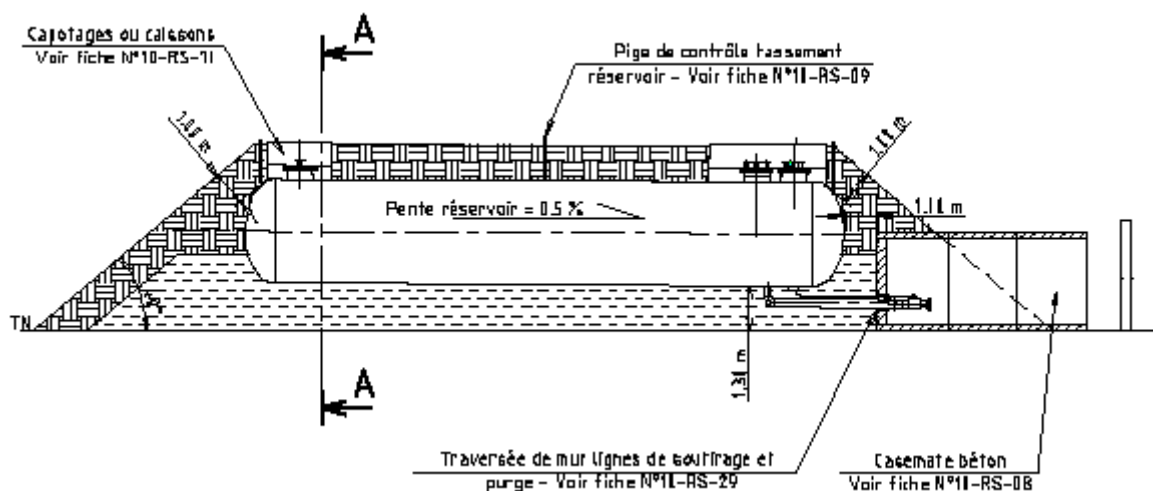


Pour se prémunir de ce phénomène, deux solutions ont été mises en avant par les exploitants dans leurs EDD :

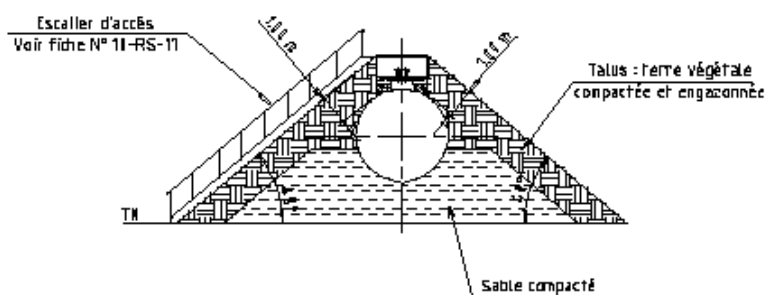
- L’arrosage des réservoirs (protection contre les effets thermiques),
- La mise sous talus des réservoirs (protection contre les effets dominos : effets thermiques et mécaniques des projections).

La réglementation française a donc évolué en parallèle des connaissances techniques, en définissant précisément un débit d’arrosage des réservoirs aériens (10 litres/m<sup>2</sup>/minute) et la notion de réservoir sous talus de terre (1m de terre en tout point autour du réservoir) ou matériau équivalent (A ce jour seul le

matériau « TEXSOL » a obtenu l'équivalence 1 m de terre. Le TEXSOL est un mélange de sable concassé intimement lié par des fibres synthétiques (120 km de fils par mètre cube de sable) qui est projeté à l'aide d'une machine spécifique sur les réservoirs).



COUPE SUIVANT A-A



### Les analyses de risques

Les EDD GPL sont, comme pour toute étude de dangers, articulées autour de l'analyse des risques et de la modélisation des conséquences des phénomènes dangereux.

L'analyse des risques doit prendre en compte la succession de phases transitoires que peut présenter l'exploitation d'un stockage de GPL, y compris l'absence d'activité (stockage mis en sécurité la nuit et le week-end).

Les méthodologies d'analyse des risques peuvent être simples et ont souvent une trame générique à l'intérieur de la même entreprise, du fait de la ressemblance entre chacun des sites. L'analyse générique est ensuite déclinée à chacun des sites, en tenant compte des particularités. Des analyses détaillées de type AMDEC ont déjà été conduites sur des sites GPL. Elles ne présentent pas obligatoirement un grand intérêt dans la réalisation d'une EDD (rapport coût/efficacité) mais sont une première étape incontournable dans des études de sûreté de fonctionnement (notamment sur la démonstration des niveaux de confiance des barrières instrumentées de sécurité ou MMRI).

L'analyse de risques d'un site GPL se décompose classiquement en :

- une analyse préliminaire des risques mettant en œuvre une méthodologie d'analyse de type inductive (Situation dangereuse, Causes, Conséquences, Moyens de prévention, Moyens de protection),
- une modélisation de l'intensité des phénomènes dangereux afin de caractériser ceux dont les conséquences sortent des limites du site ou qui par effet domino peuvent impacter des installations dont les effets sortent des limites du site,
- une analyse détaillée des risques mettant en œuvre une méthodologie d'analyse déductive (couple arbre de défaillances / arbre d'événements représentée au travers d'un nœud papillon) uniquement sur les phénomènes dangereux dont les conséquences sortent des limites du site ou qui par effet domino peuvent impacter des installations dont les effets sortent des limites du site.



#### La modélisation de l'intensité des phénomènes dangereux

Le risque principal des sites GPL est évidemment la perte de confinement qui peut, en fonction des conditions d'exploitation et environnementales, conduire à un jet enflammé ou à une explosion (VCE ou UVCE). Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est une explosion de gaz à l'air libre. Dans le cas d'un gaz inflammable, tel que les GPL, cette explosion produit :

- des effets thermiques,
- des effets de pression
- des effets de type projections.

Le phénomène dangereux type BLEVE, spécifique aux gaz liquéfiés sous pression, est la conséquence d'une augmentation de température et donc de pression dans un réservoir de stockage, due à un incendie (jet enflammé par exemple).

La modélisation des phénomènes dangereux a également évolué au cours du temps. En ce qui concerne l'explosion aérienne de nuage de gaz inflammables, nous sommes passés de l'approche de l'équivalent TNT de M. Lannoy d'EDF (courbe de détonation) à l'approche multi-energy du TNO (courbes de déflagration en fonction du niveau de confinement).

L'idée centrale de cette méthode est qu'une explosion de gaz produit des effets d'autant plus importants qu'elle se développe dans un environnement encombré ou turbulent dans lequel la flamme peut se propager rapidement, et qu'en dehors de ces zones, les effets de pression associés à la propagation de la flamme sont minimes. Pour une situation réelle où la dimension maximum du nuage explosif a été préalablement estimée, on repère les endroits où la densité d'obstacles ou le degré de turbulence du nuage sont susceptibles d'être importants et on modélise l'explosion globale par une succession d'impulsions de pression engendrées par la propagation de la flamme à travers ces zones. En fait, tout se passe comme s'il n'y avait pas une, mais plusieurs explosions. On associe à chaque explosion « élémentaire » un indice de violence (sur une échelle de 1 à 10 pour la méthode Multi-Energy) qui représente la surpression maximum qui peut être obtenue dans la zone associée. Outre ces considérations géométriques la réactivité propre du gaz inflammable doit être prise en considération.

Les distances d'effets calculées ne sont pas liées directement à la quantité de produit rejeté, ni au volume des nuages inflammables formés, mais bien au volume des zones d'encombrement et de confinement. Aussi, des scénarios différents, mettant en jeu des débits de fuite et des quantités de produits différents conduisent aux mêmes distances d'effets si les nuages inflammables formés couvrent les mêmes zones encombrées.

Les méthodes basées sur l'équivalent TNT sont inadaptées au calcul des effets d'un UVCE, et ne sont pas forcément majorantes. Pour mémoire, elles sont à la base des formules de l'Arrêté Ministériel du 9 novembre 1989 pour le calcul des distances d'isolement autour des réservoirs sous talus.

L'approche 3D utilisée pour à la fois le calcul de la masse explosive, mais également pour la propagation de l'onde de surpression incidente, est en cours de développement et de validation (réticence de l'administration).

Pour le phénomène de BLEVE, la modélisation permet actuellement de prendre en compte l'aspect dynamique de la boule de feu pour les aspects thermiques, mais également les effets de surpression.

### La gravité

Les zones d'intensité des phénomènes dangereux dont les conséquences sortent des limites du site se situent entre 50 m et 300 m pour les effets de surpression (UVCE de 50 à 200 mbar) et entre 100 m et 800 m pour les effets thermiques (BLEVE et Jet enflammé).

La gravité (nombre de personnes potentiellement impactées dans les zones d'intensité) est calculée classiquement selon les recommandations de la circulaire du 10 mai 2010. Autour des sites GPL, le nombre de personnes impactées peut varier de manière significative selon la configuration du site (zone urbanisée, zone industrielle, zone portuaire). On peut néanmoins donner à titre informatif les ordres de grandeur suivants :

- entre 1 et 10 personnes pour le seuil SELS (Seuil des Effets Létaux Significatifs)
- entre 1 et 10 personnes pour le seuil SEL (Seuil des Effets Létaux)
- entre 10 et 100 personnes pour le seuil SEI (Seuil des Effets Irréversibles)

Les définitions des seuils sus-mentionnés sont données en annexe 1.

### Les barrières de sécurité

L'EDD GPL définit enfin les MMR/EIPS. Les Mesures de Maitrise des Risques ou MMR (l'appellation EIPS ou Élément Important Pour la Sécurité est l'ancienne appellation des barrières du temps de l'approche purement déterministe des EDD, elle tend à disparaître au profit de la notion de MMR) représentent l'ensemble des barrières de prévention et de protection qui pour un phénomène dangereux

donné concourent à la réduction de la probabilité d'occurrence (barrière de prévention) et/ou de l'intensité (barrière de protection) dudit phénomène dangereux.

Pour l'ensemble de ces barrières, l'administration a maintenant une exigence de démonstration du niveau de fiabilité (ou niveau de confiance des barrières). Pour ce faire des fiches barrières viennent compléter le contenu de l'EDD. Ces fiches barrières regroupent pour un équipement donné :

- sa description,
- ses conditions de fonctionnement,
- ses conditions d'exploitation,
- ses contraintes en termes de maintenance,
- son niveau de fiabilité.

Un exemple de fiche barrière est donné en annexe 2.

Sur les sites GPL, une attention particulière est portée aux MMRI car la sécurité du site pendant les phases d'exploitation et en dehors de ces phases (nuit et week-end) est basée sur deux systèmes de sécurité instrumenté :

- la détection gaz (explosimètres)
- la détection flamme (détecteurs IR ou UV)
  - Les actions associées (via, la plupart du temps, un automate programmable de sécurité) sont la mise en sécurité du site par :
- la fermeture de toutes les vannes d'isolement (y compris clapet de fond des réservoirs),
- le démarrage du GMPI (Groupe Moto Pompe Incendie),
- l'arrosage des réservoirs et poste de dépotage (si existant),
- l'arrêt des installations.

Pour ces MMRI, en plus des fiches barrières, on s'oriente vers une démonstration du niveau de confiance selon la norme CEI6511 (niveau de SIL)

### **3. CONCLUSION SUR LES ETUDES DE DANGERS GPL**

Les EDD GPL sont relativement classiques en termes de contenu du fait des exigences réglementaires de plus en plus bordées par de nombreux arrêtés et circulaires (voir en ce sens la dernière circulaire du 10 mai 2010 (121 pages) récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003).

La particularité des EDD GPL tient dans la simplicité des sites (réservoirs de stockage et postes de chargement/déchargement) et leur mode d'exploitation (succession de phases transitoires).

Le phénomène dangereux de BLEVE est également spécifique des études des dangers pour ce secteur d'activité.

## ANNEXE 1

Nous présentons ci-après les différents effets recherchés ainsi que les seuils qui leur sont associés.

D’une manière générale, en accord avec l’arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l’évaluation et à la prise en compte de la probabilité d’occurrence, de la cinétique, de l’intensité et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations soumises à autorisation (dit « arrêté PCIG »), il sera recherché les zones d’effets suivantes :

- la zone des effets irréversibles pour les individus exposés qui délimite la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- la zone des effets létaux, correspondant au décès potentiel de 1 % des individus exposés qui délimite la « zone des dangers graves pour la vie humaine » ;
- la zone des effets létaux significatifs, correspondant au décès potentiel de 5 % des individus exposés qui délimite la « zone des dangers très graves pour la vie humaine ».

### **Valeurs de référence relatives aux seuils d’effets thermiques**

Pour les effets sur les structures :

- 5 kW/m<sup>2</sup> seuil des destructions de vitres significatives ;
- 8 kW/m<sup>2</sup> seuil des effets dominos<sup>4</sup> correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures ;
- 16 kW/m<sup>2</sup> seuil d’exposition prolongée sur les structures correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures hors structures béton ;
- 20 kW/m<sup>2</sup> seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton ;
- 200 kW/m<sup>2</sup> seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

Pour les effets sur l’homme :

- 3 kW/m<sup>2</sup> ou 600 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3.s</sup>, seuil des effets irréversibles (SEI) délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- 5 kW/m<sup>2</sup> ou 1 000 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3.s</sup>, seuil des effets létaux (SEL) délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » ;
- 8 kW/m<sup>2</sup> ou 1 800 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3.s</sup>, seuil des effets létaux significatifs (SELS) délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine ».

### **Valeurs de référence relatives aux seuils d’effets de surpression**

Pour les effets sur les structures :

- 20 mbar comme limite de la zone des destructions significatives de vitres ;
- 50 mbar comme limite de la zone des dégâts légers aux structures ;
- 140 mbar comme limite de la zone des dégâts graves aux structures ;
- 200 mbar comme limite des effets dominos<sup>5</sup> ;
- 300 mbar comme limite de la zone des dégâts très graves aux structures.

---

<sup>4</sup> Seuil à partir duquel les effets domino doivent être examinés. Une modulation est possible en fonction des matériaux et des structures concernés.

<sup>5</sup> Seuil à partir duquel les effets domino doivent être examinés. Une modulation est possible en fonction des matériaux et structures concernés.

Pour les effets sur l’homme :

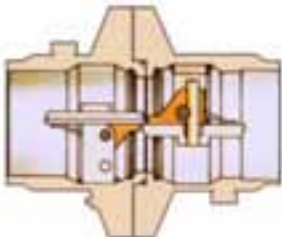
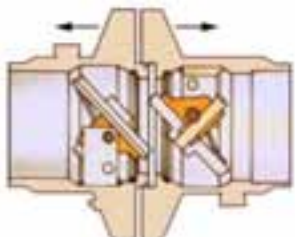
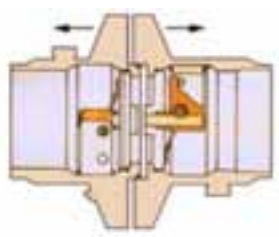
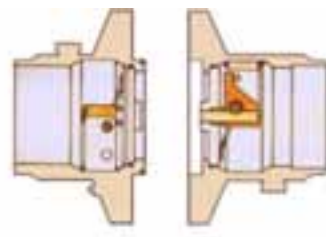
- 20 mbar défini comme le seuil des effets irréversibles délimitant la zone des effets indirects par bris de vitre sur l’homme ;
- 50 mbar défini comme le seuil des effets irréversibles (SEI) délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- 140 mbar défini comme le seuil des premiers effets létaux (SEL) délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » ;
- 200 mbar défini comme le seuil des effets létaux significatifs (SELS) délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine ».

En complément, vous trouverez ci-dessous l’échelle d’appréciation de la gravité des conséquences humaines d’un accident à l’extérieur des installations telle qu’elle est définie dans l’annexe 3 de l’« arrêté PCIG »

| NIVEAU DE GRAVITÉ<br>des conséquences | ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL<br>des effets létaux significatifs | ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL<br>des effets létaux | ZONE DÉLIMITÉE PAR LE SEUIL<br>des effets irréversibles<br>sur la vie humaine            |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Déastreux.                            | Plus de 10 personnes exposées (1).                             | Plus de 100 personnes exposées.                  | Plus de 1 000 personnes exposées.                                                        |
| Catastrophique.                       | Moins de 10 personnes exposées.                                | Entre 10 et 100 personnes.                       | Entre 100 et 1 000 personnes<br>exposées.                                                |
| Important.                            | Au plus 1 personne exposée.                                    | Entre 1 et 10 personnes exposées.                | Entre 10 et 100 personnes exposées.                                                      |
| Sérieux.                              | Aucune personne exposée.                                       | Au plus 1 personne exposée.                      | Moins de 10 personnes exposées.                                                          |
| Modéré.                               | Pas de zone de létalité hors de l'établissement                |                                                  | Présence humaine exposée à des<br>effets irréversibles inférieure à<br>« une personne ». |

(1) Personne exposée : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

## ANNEXE 2

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------|
| <b>FICHE BARRIERE DE SECURITE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | Page :                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  | Date :                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  | Référence :                    |
| ① Nom de la barrière de sécurité :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | Boîtier de rupture "Flip-Flap" |
| ② Fonction de sécurité de la barrière                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  | Isoler une fuite non enflammée |
| <b>③ Principe :</b><br>Les boîtiers de rupture sont prévus pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>- être des points de rupture privilégiés en cas de sollicitation anormale du bras,</li> <li>- isoler les deux parties du bras arrachées par la fermeture automatique de clapets de part et d'autre du point de rupture.</li> </ul> La quantité de gaz relâchée en cas d'arrachement de bras est, de ce fait, très limitée.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |                                |
| <b>④ Type de barrière</b><br>Barrière de prévention <input type="checkbox"/> Barrière organisationnelle <input type="checkbox"/> Barrière passive<br>Barrière de protection <input checked="" type="checkbox"/> Barrière technique <input checked="" type="checkbox"/> Barrière active                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                                |
| <b>⑤ Efficacité de la barrière :</b> 100%, les deux parties du boîtier étant prévues pour être étanches après arrachement.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |                                |
| <b>⑥ Technologie existante :</b><br>Le boîtier de rupture est maintenu par des boulons d'assemblage calibrés pour une certaine charge de rupture. Au delà de cette charge, les deux parties du boîtier se séparent, isolant de part et d'autre le bras de chargement/déchargement.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>&gt;&gt; 1 Les deux clapets sont maintenus ouverts dans la veine de liquide, en opposition par l'action du ressort qui leur est associé, permettant une perte de charge minimale.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>&gt;&gt; 2 Lorsque la séparation des deux demi-corps intervient, les deux clapets se dégagent l'un par rapport à l'autre.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>&gt;&gt; 3 La fermeture se fait en deux temps par action du ressort. Rotation de 90° des clapets autour de leurs axes.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>&gt;&gt; 4 Etanchéité par application des clapets sur leurs sièges respectifs. Ceux-ci sont appliqués sur leurs sièges avant que ne soit dégagé totalement le joint de corps. La séparation effective des deux demi-corps assurant ainsi l'étanchéité amont/aval même en cas d'arrachement partiel axial ou angulaire.</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div> |  |                                |
| Extrait de la fiche descriptive du dispositif anti-arrachement FLIP-FLAP de Gardner Denver France                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                |
| <b>⑦ Recommandations :</b><br>➤ <u>Recommandations de conception (et si applicable temps de réponse)</u>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |                                |
| Le fonctionnement du boîtier de rupture pourrait être entravé par des impuretés. Il est donc recommandé de s'assurer de l'absence d'impuretés dans le GPL.<br><br>Pour le chargement, un filtre placé en amont des pompes permet de réduire la probabilité de présence                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                                |

|  |                                   |             |
|--|-----------------------------------|-------------|
|  | <b>FICHE BARRIERE DE SECURITE</b> | Page :      |
|  |                                   | Date :      |
|  |                                   | Référence : |

d'impuretés dans le GPL.

Dans le cas du déchargement, le GPL contenu dans la citerne a également été chargé à l'aide d'une pompe munie d'un filtre. La probabilité de présence d'impuretés dans le GPL lors du déchargement est donc faible.

Le temps de réponse du système anti-arrachement est instantané (inférieur à 1s).

Exemple des caractéristiques du boîtier de rupture Flip-Flap de marque Perrolo.

Le boîtier de rupture est certifié DIN 50049.3.1.B : mise en pression.

Les boîtiers s'assemblent à la canalisation (selon la norme NF E 03-004) par vissage puis soudage à des manchettes de raccord.

L'ensemble du boîtier de rupture est conçu pour résister à des températures comprises entre -25°C et +100°C.

Le boîtier de rupture est résistant à une pression de service maximale de 21 bar. La pression d'épreuve est de 31.5 bar.

Le boîtier est fabriqué en inox.

🔧 Recommandations d'installation (et si applicable résistance aux contraintes spécifiques)

A installer à l'extrémité du bras, au plus près de la citerne.

Les goudjons de rupture sont calibrés suivant les conditions les plus contraignantes d'exploitation (couple de serrage des goudjons de 10.8Nm), définies par l'exploitant. Dans la plupart des applications, ils sont calibrés pour une charge de rupture comprise entre 350 et 500kg.

🔧 Recommandations de maintenance et de tests

Tous les 15 jours, un contrôle visuel est réalisé (étanchéité avec serrage des goudjons si nécessaire)

Un contrôle trimestriel sans ouverture du boîtier consiste à vérifier :

- l'étanchéité des corps et l'absence de jeu entre les deux ½ corps, sans ouvrir le boîtier ;
- le serrage des boulons à la clé dynamométrique.

Tous les ans, le boîtier de rupture est ouvert. Les joints de corps sont changés et le basculement des clapets est contrôlé (contrôle réalisé par le constructeur).

Les goudjons sont remplacés annuellement en même temps qu'une opération de maintenance de changement des joints de corps.

**Registre de vérification** : Les contrôles sont répertoriés dans la GMAO.

⑧ **Retour d'expérience** :

Une étude de fiabilité des barrières de sécurité a permis de récolter des données sur le retour d'expérience. Ces données correspondent à une période d'exploitation a minima de 7 ans pour les éléments de barrière étudiés.

|  |                                   |             |
|--|-----------------------------------|-------------|
|  | <b>FICHE BARRIERE DE SECURITE</b> | Page :      |
|  |                                   | Date :      |
|  |                                   | Référence : |

35 dysfonctionnements des boîtiers de rupture ont été constatés sur un total de 419 tests. Cela correspond à un retour d'expérience de  $8.35 \cdot 10^{-2}$  défaillances par opération. Ceci correspond à un niveau de confiance de 1.

Origine des défaillances :

- 2 fois : pivot cassé
- 1 fois : présence de fil de fer
- 32 fois : clapet grippé

**⑨ Détermination du niveau de confiance :**  
**(au sens du document « Évaluation des Barrières Techniques de Sécurité » DRA-039 (Ω-10) de l'INERIS)**

Le niveau de confiance est déterminé soit par la base de données de fiabilité du retour d'expérience soit par la base de données du projet ARAMIS.

Le retour d'expérience permet d'estimer le niveau de confiance des boîtiers de ruptures Flip-Flap à 1.

Le projet ARAMIS ne donne pas d'estimation du niveau de confiance pour cet équipement.

Selon le retour d'expérience présenté ci-dessus (§ ⑨) et la base de données ARAMIS, le niveau de confiance est :

**Niveau de confiance :**    0 ☐    0,5 ☐    1 ☒    2 ☐    3 ☐    4 ☐



## ETUDE DE DANGERS DU BARRAGE DU CHEYLARD (ARDECHE)

### *CHEYLARD dam risk assessment*

**Laurent Vidal, Bachir Touileb**

6, rue de Lorraine, 38130 Echirolles

Téléphone : +33 (0)4 76 334 000, Fax : +33 (0)4 76 334 094,

[laurent.vidal@arteliagroup.com](mailto:laurent.vidal@arteliagroup.com),

[bachir.touileb@arteliagroup.com](mailto:bachir.touileb@arteliagroup.com)

**Lopez Christine, Michel Marino**

2, rue André Bonnin, 69316 Lyon

[c.lopez@cnr.tm.fr](mailto:c.lopez@cnr.tm.fr), [m.marino@cnr.tm.fr](mailto:m.marino@cnr.tm.fr)

### **MOTS CLÉS**

Etude de dangers, réduction des risques, gravité, criticité, onde de submersion

### **ABSTRACT**

*Risk Assessment of Cheylard Dam*

*Compagnie Nationale du Rhône (CNR), by means of its subsidiary company CN'Air, was awarded, since January 1st, 2010, the operation of Cheylard dam, on Eyrieux river (Ardèche department). CN'Air specializes in renewable energy including wind, photovoltaic as well as hydropower. Right after this attribution, CN'Air retained the services of Sogreah Consultants, Artelia Group, for the assignment of three integrated studies aiming the fulfillment of the actual by laws requirements. Such studies involved a dam audit (DA) covering the entire powerplant, a risk assessment of the dam (DRA), and an environmental impact assessment (EIA). Although somehow foreseeable, it is found that the conduct of all three studies by the same leading team provides several advantages, especially in the actual context of the French Dam Safety Bill of December 11th, 2007. The risk assessment demonstrates that the risks associated to the existence and the operation of Cheylard dam fall within an intermediate category. Some risk reduction measures were identified and raised to the operator, with the aim of their effective implementation. The results of the DRA that were presented early 2011 to the DREAL, that is the control agency, benefited from relevant comments that were successfully implemented.*

### **RÉSUMÉ**

*Etude de dangers du barrage du Cheylard*

*La Compagnie Nationale du Rhône (CNR), par l'intermédiaire de sa filiale CN'Air, assure l'exploitation, depuis le 1er janvier 2010, du barrage du Cheylard sur la rivière Eyrieux (département de l'Ardèche). CN'Air se spécialise dans les énergies renouvelables telles que l'éolien, le photovoltaïque et l'hydroélectricité. A la suite de cette attribution, la société CN'Air a confié à la société Sogreah, Groupe Artelia, la réalisation d'un ensemble de prestations comprenant un audit sur l'état du barrage et de ses équipements, une étude de dangers du barrage suivant le décret du 11 décembre 2007, ainsi qu'une étude d'impact environnemental. Sogreah a réalisé l'intégralité de cette étude de dangers, y compris la modélisation de l'onde de submersion selon un scénario de rupture du barrage ou de ses organes vannés. L'étude de dangers du barrage du Cheylard conclut à un niveau de criticité intermédiaire. Des mesures de réduction des risques permettant de diminuer la criticité de certains scénarii ont été envisagés et programmés. Des mesures sans influence directe sur la criticité des scénarii de défaillance ont notamment été prises. Cette étude de dangers a été présentée à la DREAL en début d'année 2011.*

## 1. INTRODUCTION

Le barrage du Cheylard, situé sur la rivière Eyrieux, dans le département de l'Ardèche (07), est un barrage à contreforts, portant des dalles planes et raccordé aux rives par des culées poids. La première mise en eau de ce barrage date de 1983. La crête de ce barrage, située à près de 23 mètres au-dessus du terrain naturel, est déversante sur toute sa largeur. Ce seuil déversant permet le passage d'un débit de 2400 m<sup>3</sup>/s, correspondant à la crue millénale, à la cote des plus hautes eaux. Par sa hauteur qui excède 20m, le barrage appartient à la classe A. Les vides situés entre les contreforts, appelés «cellules», abritent le local de commande, les trois groupes de production hydroélectrique, la conduite de débit réservé, ainsi que la vanne de vidange de fond. L'ensemble de ces équipements est regroupé en rive droite.

Depuis 2010, suite à une mise en concurrence organisée par le Syndicat Départemental d'Equipement de l'Ardèche (SDEA), propriétaire de l'ouvrage, la société CN'Air, filiale à part entière de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), est attributaire d'un bail emphytéotique de 32 ans pour l'exploitation de ce barrage. Le Cheylard est un aménagement autorisé du fait de la capacité installée qui demeure en-deça de 4500 kW. CN'Air se spécialise dans la production d'énergie éolienne, photovoltaïque et de petite hydroélectricité. L'exploitation du barrage était assurée par EDF (Electricité de France) depuis 1992.

La société CN'Air a fait appel à la société Sogreah, pour réaliser l'audit du barrage et de ces équipements [4], ainsi que l'étude de dangers [3] et l'étude d'impact environnemental [5]. L'audit du barrage dresse ainsi l'inventaire et l'état du génie civil du barrage et des principaux équipements hydromécaniques, électriques et de contrôle-commande du barrage.

Dans un premier temps, les principales caractéristiques du barrage et de ces équipements seront présentées. L'étude de dangers du barrage du Cheylard s'est déroulée dans le cadre particulier d'un changement d'exploitant. L'influence positive de la réalisation simultanée d'un audit et une étude d'impact sera mise en évidence. L'analyse de risque telle que réalisée dans l'étude de dangers sera ensuite présentée. Il y sera notamment discuté de la manière d'estimer la gravité des événements.

## 2. PRESENTATION DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT



*Graphique 1 : Photo du barrage du Cheylard, vue de l'aval*

### **2.1. Retenue**

La retenue s'étend sur 2,5 km en amont, lorsque le plan d'eau est à sa cote normale d'exploitation. L'extrémité de la retenue atteint alors la commune du Cheylard. Dans ces conditions, la surface de la retenue est de 408 ha et son volume (avant alluvionnement) était de 3,15 Mm<sup>3</sup>. En 2010, un relevé bathymétrique met en évidence une accumulation importante dans la retenue. Le volume d'eau retenu est ainsi estimé à 1,82 Mm<sup>3</sup>. La retenue est alimentée par un bassin versant d'une superficie de l'ordre de 369 km<sup>2</sup>.

### **2.2. Barrage et fondation**

Les cellules du barrage communiquent entre elles pour évacuer les eaux de drainage.

La structure génie civil est pourvue d'un système d'auscultation complet : repères planimétriques, repères de nivellement, pendules, piézomètres et points de mesure des fuites. La structure génie civil est ainsi régulièrement auscultée et inspectée, et son état est jugé satisfaisant.

Le barrage est bâti sur du granite en rive gauche et du gneiss fissuré en rive droite. Une faille rive gauche – rive droite est présente en aval des contreforts.

### **2.3. Evacuateur de crue**

La partie supérieure de l'ouvrage est déversante sur 132 m, pour une longueur totale de l'ordre de 166 m. La capacité d'évacuation de cet évacuateur est de 2400 m<sup>3</sup>/s à la cote des Plus Hautes Eaux (PHE). La lame d'eau au-dessus du seuil est alors de l'ordre de 4,5m. Ce débit correspond à une crue de période de retour de millénale.

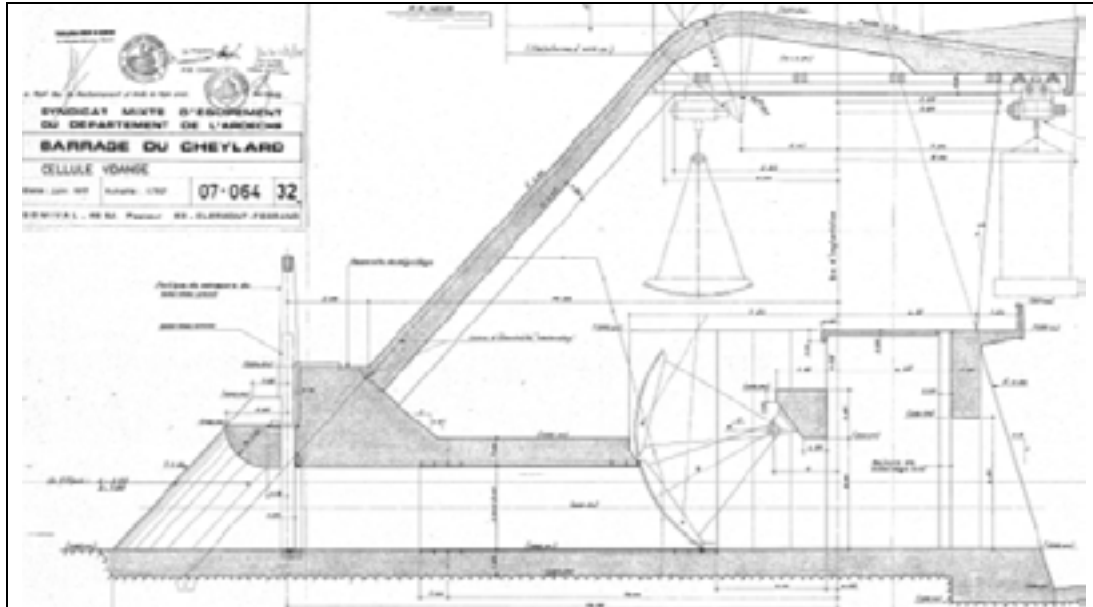


*Graphique 2 : Barrage du Cheylard en déversement*

## 2.4. Vidange de fond

La fonction de vidange de fond est assurée par une vanne secteur en partie inférieure du barrage. Elle ne participe pas à la fonction d'évacuation des crues. Sa capacité d'évacuation des eaux est de  $145\text{m}^3/\text{s}$  à la cote normale d'exploitation.

Cette vanne est manœuvrée par un vérin hydraulique. La centrale oléo-hydraulique alimentant le vérin est alimentée par le réseau 20 kV ERDF. En secours, un groupe thermique, sert à la sécurité du fonctionnement.



Graphique 3 : Plan de la vidange de fond.

## 2.5. Groupes hydrauliques et débit réservé

Le barrage du Cheylard est équipé de trois turbines de type Kaplan simple réglage ; deux groupes identiques de 1MW et un groupe de 380kW. Ce dernier est dimensionné pour turbiner le nouveau débit réservé. En été ou quand le débit entrant est inférieur au débit minimum du plus petit des groupes, le débit est transféré à l'aval par un robinet à jet creux. Lors de la construction du barrage, l'aménagement d'un groupe additionnel a été prévu ; une conduite traversant le parement amont du barrage, identique à celle des deux groupes de 1MW, est obstruée par un fond plein.

L'arrêté du 12 juin 2008 [1] définit le périmètre de l'ouvrage incluant le barrage et ses ouvrages de sécurité. Selon l'arrêté, il n'est pas requis d'inclure les organes de production d'énergie dans le périmètre de l'étude de dangers. Cependant, dans le cas du barrage du Cheylard, les groupes et leurs conduites d'amenée ont été inclus dans le périmètre en tant qu'organes traversant le corps du barrage. Leurs ruptures et les conséquences du débit libéré à l'aval ont ainsi été étudiées.

## 2.6. Environnement de l'ouvrage

Une base de loisir aquatique est située aux abords de la retenue. Cependant, cette base nautique ne comporte pas d'accès à l'eau. Les activités touristiques sont nombreuses autour de la retenue, en période estivale notamment. Cependant, toute activité touristique, y compris la baignade est interdite sur la retenue.

A l'aval du barrage, une dizaine de petits aménagements et installations hydroélectriques équipent la rivière Eyrieux. Aucun camping ne se trouve à l'aval du barrage du Cheylard, à proximité de la rivière Eyrieux.

### 3. CONTEXTE

Dans le cadre d'un renouvellement d'autorisation, l'exploitant du barrage est tenu de réaliser une étude de dangers, conformément au décret du 11 décembre 2007 [2]. Ce renouvellement est associé à une politique d'augmentation de la production électrique. Cette augmentation peut notamment passer par une modification du mode d'exploitation de l'ouvrage, ce qui entraîne la réalisation d'une étude d'impact. En effet, dans le cas du barrage du Cheylard, CN'Air entrevoit une exploitation incluant la réalisation d'éclusées. Il s'agit d'une modification de l'exploitation car l'ouvrage a été jusque-là conduit comme une centrale au fil de l'eau.

La société CN'Air a confié à Sogreah la réalisation de l'étude d'impact et de l'étude de dangers. Sogreah avait de plus préalablement réalisé un audit du barrage et de ces équipements.

Au terme de ces études, il est possible d'affirmer que la centralisation des trois études au niveau d'un seul bureau d'ingénieurs conseil procure de multiples avantages. Une telle organisation a notamment permis de limiter les phases d'investigations sur site. A titre d'exemple, les données relatives à l'état des équipements collectées lors de l'audit ont pleinement servi à la réalisation de l'étude de dangers. Le travail réalisé pour l'audit a quant à lui permis, du point de vue de l'étude de dangers, d'avoir une excellente compréhension du fonctionnement du barrage et de ces modes d'exploitation.

Dans le contexte du renouvellement, la quantité de documents en la possession de l'exploitant concernant le barrage et son historique était relativement limitée. Le registre du barrage issu du précédent exploitant n'était par exemple pas en la possession de l'exploitant au moment de la réalisation de l'étude de dangers. Sans remplacer ces sources d'information, la réalisation en parallèle de l'étude de dangers de l'audit et de l'étude d'impact a vraisemblablement facilité sa réalisation. La transversalité dégagée par le travail d'une équipe pluridisciplinaire, en parallèle sur des différentes études, a ainsi contribué à la réalisation de ces études dans les délais impartis par l'Administration.

### 4. ETUDE DE DANGERS

La méthodologie poursuivie dans le cadre de la présente étude de dangers est conforme au plan et au contenu requis par l'arrêté du 12 juin 2008, ainsi qu'au guide de lecture mis à la disposition de la profession. CNR dispose de procédures écrites pour la réalisation des études de dangers qui ont particulièrement servi, puis enrichies dans le cadre de la réalisation de l'une des toutes premières études de dangers réalisées en France. Dès 2008, CNR s'était engagé dans les études de dangers des barrages de Génissiat et de Donzère-Mondragon.

L'analyse de risques proprement dite comprend trois phases. La première consiste en une analyse préliminaire de risque permettant d'identifier de manière la plus exhaustive possible les événements redoutés. Seuls les événements redoutés plausibles et dont les conséquences sont significatives sont conservés pour la seconde phase de l'analyse de risque. Cette phase consiste à détailler pour chaque événement redouté les différents scénarii pouvant mener à cet événement. En utilisant la méthode probabiliste des nœuds papillons, la probabilité d'occurrence de chacun des scénarii est ainsi estimée. La dernière phase de l'étude de risque consiste en l'estimation des conséquences des événements redoutés ; ces conséquences sont estimées en termes de débit libéré à l'aval et en termes de personnes exposées.

#### 4.1. Analyse des aléas naturels

Les aléas naturels sont des phénomènes inévitables touchant l'ouvrage. Les plus importants sont les crues et les séismes. L'évacuateur de crue du barrage du Cheylard a été dimensionné pour permettre le passage d'une crue de période de retour millénale, soit  $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ . A partir des données hydrologiques, le débit de la crue de période de retour 5000 ans a été extrapolé à  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ . La cote de danger, défini par l'arrêté du 12 juin 2008 comme la cote susceptible de mettre l'ouvrage en danger a été fixée comme la cote atteinte lors d'une crue d'occurrence 2000 ans, cote à partir de laquelle l'écoulement sur le seuil déversant n'est plus maîtrisé par les bajoyers latéraux.

Le barrage du Cheylard est situé en zone d'aléa sismique faible suivant la carte de l'aléa sismique de la France édité par le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'aménagement du territoire. La valeur de l'accélération à prendre en compte pour cette zone est supérieure à celle qui avait été utilisée dans la note de calcul de conception de 1976 [6]. Cette note de calcul va être mise à jour conformément aux valeurs actuelles d'accélération. Cette nouvelle note de calcul n'était pas disponible lors de la réalisation de l'étude de danger, le risque sismique a été pris en compte dans cette étude en tenant compte de cette absence de données actualisées.

Le gel est un aléa naturel de moins grande ampleur que les crues ou les séismes. Il a cependant été pris en considération car susceptible de conduire à l'éclatement des conduites. En 1985, lors d'un épisode de froid particulièrement intense où des températures exceptionnelles de -22°C avaient été enregistrées pendant trois semaines, la conduite du débit réservé avait ainsi éclaté sous l'action du gel.

#### 4.2. Analyse préliminaire des risques

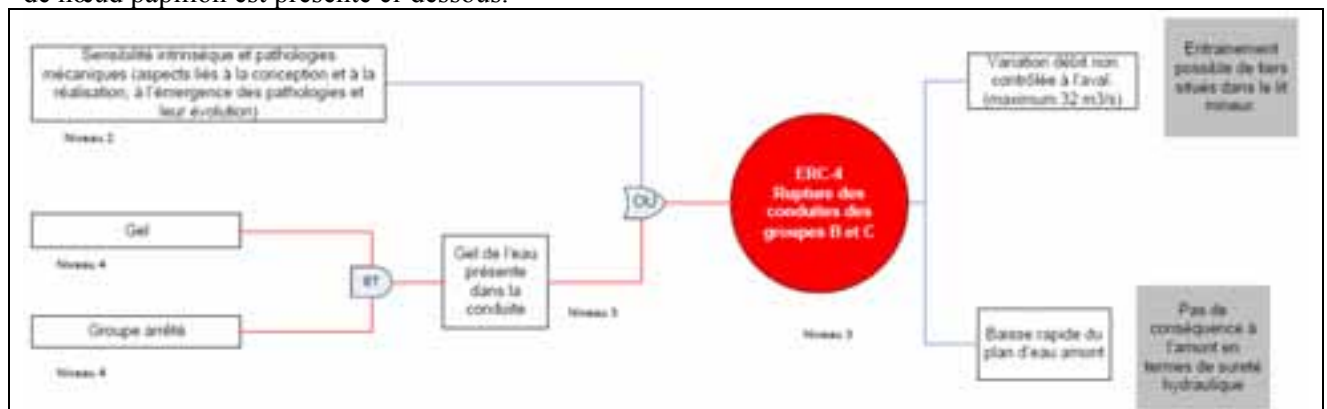
L'analyse préliminaire de risque (APR) explore de manière exhaustive toutes les possibilités de défaillances du barrage, de ses organes de sécurité ainsi que – dans le cas du Cheylard – des conduites traversant le corps du barrage. Cette analyse est basée sur la fonction de l'organe potentiellement défaillant, de son mode de défaillance et des conséquences de cette défaillance. A ce stade de l'étude, pas moins de 36 événements ont été étudiés.

Les événements invraisemblables ou présentant des conséquences négligeables du point de vue de l'étude de dangers ont été écartés. Au terme de cette phase de l'étude, et comme c'est souvent le cas, le nombre total d'événements retenus s'est réduit à six (6) comme indiqué ci-après :

- 1) Rupture du barrage ;
- 2) Rupture de la vanne de vidange de fond ;
- 3) Ouverture intempestive de la vanne de vidange de fond ;
- 4) Rupture des conduites des groupes B et C ;
- 5) Rupture des groupes B et C ;
- 6) Rupture du fond plein.

#### 4.3. Analyse détaillée des risques

Pour chacun des événements retenus, une analyse probabiliste du risque est réalisée en utilisant la méthode du nœud papillon. Chacun des événements retenus figure au centre d'un nœud papillon et constituent l'événement redouté central (ERC). L'ensemble des scénarii pouvant mener à cet ERC constitue l'arbre de défaillance. Chacun des scénarii est initié par un, ou plusieurs événements initiateurs. Les conséquences de l'ERC constituent l'arbre d'événement ou arbre des conséquences. La probabilité d'occurrence des événements initiateurs, combinée par des connecteurs logiques et éventuellement décotée par des barrières de prévention donne la probabilité d'occurrence de l'ERC. Dans l'étude de danger du barrage du Cheylard, l'échelle de probabilité comporte cinq niveaux allant d'une probabilité d'occurrence extrêmement faible (niveau 0) à une forte probabilité d'occurrence (niveau 4). Un exemple de nœud papillon est présenté ci-dessous.



Graphique 4 : Exemple de nœud papillon.

#### **4.4. Estimation des conséquences**

Pour chaque ERC, les conséquences à l'aval et à l'amont du barrage sont analysées. Si les conséquences à l'amont du barrage sont limitées à la baisse de la cote de la retenue, les conséquences pour l'aval sont plus importantes. Elles dépendent du débit libéré par l'ERC et de sa cinétique. L'Arrêté du 12 juin 2008 [1], définissant le plan et le contenu de l'étude de dangers des barrages et des digues, indique que la gravité des conséquences devra être évaluée en termes de victimes humaines potentielles et de dégâts aux biens. Ce même Arrêté précise également qu'une étude de propagation de l'onde sera fournie pour l'accident correspondant à la rupture de l'ouvrage et, si nécessaire, pour d'autres accidents présentant un niveau de risque convenable.

Dans le cadre de l'étude de dangers du barrage du Cheylard, la gravité des ERC est évaluée en termes de nombre de personnes exposées. L'échelle de gravité, comporte cinq niveaux, comme l'échelle de probabilité. Une rupture par effacement total du barrage, pour une retenue à la cote normale d'exploitation a été modélisée. Ce scénario, plus critique que celui d'une rupture par plot a été privilégié. Il en résulte qu'au total près de 400 personnes sont potentiellement impactées. En complément de ce scénario, l'onde de submersion consécutive à la rupture de la vanne de vidange de fond a également été modélisée. La débitance de cette vanne est inférieure au débit de la crue d'occurrence décennale. Il résulte de la simulation que la rupture de la vanne n'entraîne aucun débordement au-delà du lit mineur de l'Eyrieux. Suite à ces résultats, l'onde de submersion consécutive à la rupture des organes de débitance inférieure à celle de la vidange de fond, n'a pas été modélisée.

#### **4.5. Réduction du risque**

La criticité de chacun des ERC est ensuite évaluée en tenant compte à la fois de sa probabilité d'occurrence et de sa gravité. L'étude de dangers conclut ainsi à un niveau de criticité intermédiaire de quatre ERC. Ce niveau de criticité intermédiaire correspond à un niveau pour lequel les actions à conduire par l'exploitant de l'ouvrage doivent conduire à un niveau de risque aussi bas qu'il est raisonnablement possible compte tenu des mesures et des techniques existantes.

Des mesures de réduction des risques seront mises en place par l'exploitant. Elles permettront le passage de deux ERC à un niveau de criticité acceptable. La mise en place de procédure lors de l'essai des vannes et la modification d'une armoire de commande par l'ajout d'un bouton d'arrêt d'urgence sont des mesures qui permettront de réduire la probabilité d'occurrence de scénarii liés à des erreurs humaines. La mise en place d'une procédure de grand froid permettra quant à elle de prévenir la rupture par le gel des conduites.

L'étude de danger a par ailleurs été pour l'exploitant, une aide dans sa politique de gestion des risques. Des mesures sans influence directe sur la criticité des scénarii de défaillance, ont ainsi été prises. Il s'agit principalement d'études et expertises complémentaires qui permettront d'affiner la prochaine étude de danger et permettront le cas échéant de passage des deux autres ERC à niveau de criticité acceptable.

#### **4.6. Remise du dossier**

Début 2011, cette étude de dangers a été présentée à la DREAL. Suite à cette présentation, la DREAL a formulé un nombre limité de remarques, soulignant notamment l'importance de l'analyse fonctionnelle.

A la lumière de ces remarques, des compléments ont été effectués, et l'étude de dangers a été officiellement transmise par la société CN'Air au service de contrôle.

## 5. CONCLUSIONS

L'étude de dangers du barrage du Cheylard constitue, avec l'audit du barrage et de ses équipements un ensemble intégré de prestations qui a été réalisé par Sogreah pour le compte de la société CN'Air. Dans le cadre d'un renouvellement d'autorisation, la centralisation des études au sein d'un seul et même bureau d'étude constitue un élément essentiel de la réussite.

Au terme de l'étude de dangers, il s'avère que le barrage du Cheylard présente des scénarios de niveau intermédiaire. Des mesures de réduction des risques ont permis de réduire la probabilité d'occurrences de deux ERC.

Toute étude de dangers doit être réalisée dans le cadre d'une équipe incluant l'ensemble des intervenants. L'expertise et l'exploitation doivent aller de pair de sorte à ce que l'étude puisse capter, sans a priori, chacun des éléments qui en d'autres occasions pourrait être considéré anodin, voire secondaire.

L'étude de dangers actuelle a constitué pour l'exploitant une aide appréciable dans le cadre de sa politique globale de gestion des risques.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier

L'ensemble des intervenants du Syndicat Départemental d'Equipement de l'Ardèche (SDEA), de la DDT de l'Ardèche, de la DREAL, ainsi que le personnel de la CN'Air qui est responsable de la surveillance du barrage et de l'opération de la centrale du Cheylard pour leur participation active tout au long de la réalisation de ces études.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de danger des barrages et des digues et en précisant le contenu. Version consolidée au 24 juin 2008. *Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement durables*
- [2] Décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement. Version consolidé au 01 janvier 2008. *Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables*.
- [3] Etude de dangers – Barrage du Cheylard – N°1360847 – Mars 2011 – *Sogreah*
- [4] Audit des ouvrages et des équipements – Centrale du Cheylard – Barrage de Collange – Juin 2010 – *Sogreah*
- [5] Etude d'impact environnemental – Renouvellement d'installation d'exploitation des installations hydroélectriques du Cheylard – décembre 2010 – *Sogreah*
- [6] Barrage du Cheylard – Dossier principal – Documents particulier – Note de calcul – Mars 1976

# ETUDE DE DANGERS DU CANAL DE CURBANS

*Dams safety study of channel of Curbans*

Cécile DUBIEN - Bureau Veritas  
[cecile.dubien@fr.bureauveritas.com](mailto:cecile.dubien@fr.bureauveritas.com)

François DELORME - EDF DPIH CIH  
[francois.delorme@edf.fr](mailto:francois.delorme@edf.fr)

## MOTS CLES

Etude de dangers, canal, méthodologie, analyse des risques, gravité, probabilité, cinétique, mesures de réduction des risques.

## RESUME

Implanté en rive gauche de la Durance, le canal de Curbans s'étend de la retenue d'Espinasses (en aval de la centrale de Serre-Ponçon), jusqu'à la galerie souterraine d'amenée à la centrale de Curbans. Il peut être isolé de la retenue d'Espinasses par trois vannes d'entrée canal, ouvertes en fonctionnement normal. De type trapézoïdal, le canal de Curbans a une longueur de 5 250 mètres, une largeur de 9 mètres en plat-fond et de 43 à 50 mètres en crête. La hauteur maximale de ses digues au-dessus du terrain naturel est de 25 mètres en rive gauche et de 23 mètres en rive droite ce qui fait de l'ouvrage de Curbans un barrage de classe A par référence au 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 et modifiant le code de l'environnement et qui définit « les classes des barrages de retenue et des ouvrages assimilés, notamment les digues de canaux, ci-après désignés "barrage" [...] ». Le canal de Curbans est exploité par le personnel du groupement d'usines EDF de Serre-Ponçon et téléconduit depuis le Centre de Conduite EDF de Sainte-Tulle.

L'EDD du canal de Curbans constitue la première EDD de canal réalisée par EDF. Elle a été élaborée en associant l'Exploitant, pour l'apport des données d'entrée sur l'ouvrage, son exploitation et son environnement, les spécialistes de l'ingénierie d'EDF, pour la connaissance de l'ouvrage, de son histoire, et des pathologies avérées ou potentielles, et le Bureau Veritas pour l'application de la méthodologie à cette EDD, déployée en groupe de travail avec les différents contributeurs, et la rédaction de l'étude. Elle a été remise à l'Administration au début de l'année 2010. La particularité de cette EDD est de s'appliquer à un ouvrage hydraulique de grand linéaire sous charge d'eau permanente, et faisant l'objet d'un programme de maintenance lourde décidé par EDF. Ainsi l'EDD a permis d'évaluer :

la robustesse des mesures de sécurité transitoires mises en place par l'exploitant ;

l'efficacité des mesures de réduction de risques qu'apportera la mise en œuvre du programme de réhabilitation en cours ;

l'intérêt des études complémentaires (essentiellement hydrauliques) envisagées.

Enfin, l'évaluation des gravités des conséquences a fait l'objet d'études spécifiques développées par EDF et appliquées à la configuration particulière de cet ouvrage de grand linéaire.

## ABSTRACT

Established in left bank of Durance, channel of Curbans goes from the lake of Espinasses (downstream from the power station of Serre-Ponçon) to a power tunnel towards the power station of Curbans. It can be isolated from the lake of Espinasses by three gates opened in normal conditions. The channel of Curbans, of trapezoidal shape has a 5 250 m length, a 9 m width in the bottom and from 43 to 50 m in crest. The maximum height of its embankments above the natural ground is 25 m in left bank and of 23 m in right bank which makes the work of Curbans a dam of class A in reference to the decree n° 2007-1735 of December 11th, 2007 relating to the safety of hydraulic works and to the "Comité Technique Permanent des Barrages et des Ouvrages Hydrauliques" and changing the "code de l'environnement" and which defines « the classes of the dams and assimilated works, notably the embankments of channels, below indicated "barrages" ».

The channel of Curbans is operated by the personnel of the "EDF GU" of Serre-Ponçon and managed for the operation since the "Centre de Conduite EDF" of Sainte-Tulle. The safety evaluation study ("étude de dangers" or "EDD") of the channel of Curbans constitutes the first EDD of channel performed by EDF. It was organised by linking the operators of the channel, for the provision of the entrance data on the scheme, its operation condition and its environment, the specialists of CIH (EDF engineering), for the knowledge of work design and behaviour, its history, and existing or potential pathologies, and Bureau Veritas for the methodology. It was delivered to the Administration at the end of 2010.

This EDD is particular because it concerns a hydraulic work of large linear under load of permanent water. Furthermore a program of heavy maintenance has been decided by EDF. Thus EDD allowed assessing:

the validity of the temporary safety measures set up ;

the effectiveness of the measurements for risks reduction which the implementation of the rehabilitation program under progress will bring ; the interest of supplementary studies considered (mainly hydraulic).

Finally, specific studies developed by EDF and applied to the particular shape of this type of work with large linear were applied to assess the seriousness of consequences.

## 1. INTRODUCTION – PRESENTATION DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT

### 1.1. L'ouvrage de Curbans :

Implanté en rive gauche de la Durance, d'orientation Est-Ouest, le canal de Curbans s'étend depuis la retenue d'Espinasses qui permet la démodulation <sup>6</sup> de la centrale de Serre-Ponçon située juste en amont jusqu'à la galerie souterraine d'amenée à la centrale de Curbans.

Il constitue le premier maillon de la chaîne de la Durance. La centrale de Curbans qu'il alimente, représente environ 130 MW sur les 2 000 MW du gisement Durance-Verdon.

Construit entre 1963 et 1965 et mis en service entre 1966 et 1969, le canal de Curbans transite un débit de 220 m<sup>3</sup>/s. Le volume d'eau contenu est de 1 million de mètres cubes.

De type trapézoïdal, le canal de Curbans a une longueur de 5 250 mètres (y compris ses ouvrages bétonnés d'entrée et de sortie), une largeur de 9 mètres en plat-fond et de 43 à 50 mètres en crête.

La hauteur maximale de ses digues <sup>7</sup> au-dessus du terrain naturel <sup>8</sup> est de 25 mètres en rive gauche et 23 mètres en rive droite.

L'altitude de la crête, qui à l'origine était à la cote 658,5 NGF <sup>9</sup>, est par endroits plus basse de 15 à 20 cm maximum, en particulier dans la partie aval rive droite du canal, en raison du tassement des remblais et de la fondation.

La largeur de la crête est, en rive gauche, d'environ 4 mètres sur toute la longueur. En rive droite, elle est de 4 m en partie amont puis élargie à 13 mètres du PM <sup>10</sup> 3 350 au PM 4 350 et à 30 mètres à partir du PM 4 350 jusqu'à l'ouvrage d'entonnement en galerie au niveau du PM 5 125. La largeur en pied de digue est de 84,5 mètres environ.

Le canal est entièrement réalisé en remblai du PM 1 850 au PM 2 850 et en déblai/remblai sur le reste de son tracé.

Ses digues sont constituées d'alluvions limoneuses et/ou de brèches limoneuses.

La nature des matériaux de fondation est alluvionnaire dans la partie du tracé où le canal suit le fond de la vallée de la Durance. Elle est gypseuse dans le tronçon compris entre les PM 2 830 et 4 690.

Les digues et la fondation du canal sont revêtues d'une ou de deux couches d'étanchéité en béton bitumineux de 5 cm (théorique).

Le drainage et l'évacuation des eaux d'infiltration sont constitués, dans la partie amont du canal, par le terrain naturel et/ou une couche drainante, et, dans la partie aval du canal, à partir du PM 2 850 par un système de buses perforées en partie supérieure qui collectent et drainent l'eau vers trois exutoires équipés d'appareil de mesure des fuites et d'alarme de niveau haut retransmises par voie Télécoms à l'Exploitant.

En fin de canal, un dispositif permet d'évacuer de façon périodique, par l'ouverture de vannes de purge, les cailloux et graviers accumulés dans le piège à graviers.

<sup>6</sup> Un bassin de démodulation est destiné à amortir les variations de débit en sortie d'usine.

<sup>7</sup> Les digues du canal ne sont pas des digues au sens d'ouvrages de protection contre les inondations mais sont à considérer comme des barrages. La dénomination « barrage latéral de canal » serait plus opportune. Le terme « digues » est cependant utilisé dans cette étude, par habitude d'usage.

<sup>8</sup> Définition de la hauteur au-dessus du terrain naturel selon le CTPBOH : plus grande hauteur mesurée verticalement entre la crête de l'ouvrage et le terrain naturel à l'aplomb de cette crête.

<sup>9</sup> NGF : mètres selon le référentiel altimétrique Lallemand.

<sup>10</sup> PM = Point Métrique. Le PM 0 est situé en sortie de l'ouvrage d'entrée en béton armé et le PM 5 125 au début de l'ouvrage de sortie en béton armé.

Le canal de Curbans peut être isolé de la retenue d'Espinasses par fermeture de trois vannes plates dites « vannes d'entrée canal » qui, en fonctionnement normal, sont ouvertes en position horizontale au-dessus de l'eau. Chaque vanne est manœuvrable au moyen d'un treuil à crémaillère entraîné par un moteur électrique mais l'automatisme des vannes prévoit une fermeture enchaînée des trois vannes.

Le niveau de l'eau du canal peut être diminué soit par turbinage par les groupes de la centrale de Curbans, soit par ouverture d'une vanne dite « vanne de restitution » située à l'usine de Curbans et qui restitue l'eau en aval, dans la retenue de la Saulce, avec un débit de 80 m<sup>3</sup>/s.

Le canal de Curbans est exploité par le personnel du groupement d'usines de Serre-Ponçon et téléconduit depuis le CCH de Sainte-Tulle. Son exploitation est coordonnée avec la production de la centrale de Serre-Ponçon, située en amont.

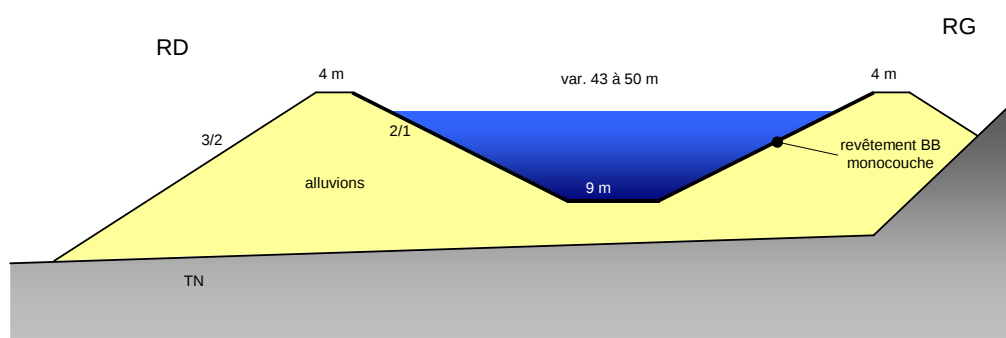
Des mesures de niveau et des seuils d'alarme sont répartis en sortie de Serre-Ponçon, au niveau de la retenue d'Espinasses et à la naissance du canal, ainsi qu'à l'extrémité aval au niveau de Rochebrune. Ces mesures permettent de suivre en continu le niveau de l'eau dans les ouvrages et d'alerter l'exploitant en cas de niveau haut ou très haut, bas ou très bas. Les alarmes qu'elles déclenchent sont retransmises par voies Télécoms à l'usine de Serre-Ponçon, à l'usine de Curbans et au CCH<sup>11</sup> de Sainte-Tulle, ainsi qu'au domicile des agents d'astreinte (3 niveaux d'astreinte permanents).

En cas de détection d'une situation dangereuse, une vidange du canal peut être lancée.

### 1.2. Spécificités de l'ouvrage de Curbans :

Comparé à un barrage, l'ouvrage de Curbans présente des spécificités qui sont :

- ses digues (au sens « barrages latéraux ») ne sont pas homogènes sur tout le linéaire ; leurs caractéristiques géométriques (largeur), la nature de leur fondation, la nature de leurs matériaux constitutifs, le type et l'état de leur étanchéité, leurs dispositifs de drainage sont variables ;
- il n'est pas équipé de vidange de fond. Cependant, pour le canal de Curbans, la fonction « vidange rapide » peut être assurée soit par turbinage par les groupes de la centrale de Curbans, soit par ouverture de la vanne dite « vanne de restitution » située à l'usine de Curbans et qui restitue l'eau en aval, dans la retenue de la Saulce.
- 



*Coupe schématique du canal de Curbans dans la partie amont du canal*

<sup>11</sup> CCH : Centre de Conduite Hydraulique (centre de conduite à distance des installations hydroélectriques).



*Le canal de Curbans vu vers l'amont avec, au fond, la retenue d'Espinasse et le barrage de Serre-Ponçon*



*Vannes d'entrée canal ouvertes, vues de la retenue d'Espinasse en amont du canal*



*Vue rive droite largeur 4 m*



*Vue rive droite crête élargie*

### **1.3. L'environnement du canal de Curbans :**

Le canal de Curbans est situé sur un territoire dédié à l'agriculture (vergers). Il longe le hameau de Gréoliers, en amont rive gauche, le hameau du Plan, en rive droite au PM 3 150, et la commune de Rochebrune, à l'extrémité aval rive droite. A cette population permanente s'ajoutent les pêcheurs et touristes en période estivale.

Il est traversé par les ponts d'Espinasses, dont le tablier passe au dessus des vannes d'entrée, de Bréziers au PM 3 150 et de Rochebrune au PM 4 640.

#### Eléments naturels :

Les cycles de gel/dégel (vieillessement accéléré du revêtement), la nature géologique des sols (risque d'effondrement de type « fontis »<sup>12</sup>), la végétation (cause de fissuration, infiltration et érosion interne) et le séisme sont des éléments naturels qui pourraient être à l'origine d'un événement dangereux.

<sup>12</sup> Effondrement du sol en surface, causé par la déliquescence souterraine progressive des terrains porteurs. Dans une cavité enfouie, naturelle ou anthropique (*i.e.* creusée par l'homme : carrière, mine, tunnel, etc.), la pression des terrains de recouvrement et/ou la circulation de fluides peuvent provoquer la détérioration du ciel et des piliers de soutènement, ce qui peut occasionner à terme deux types d'effondrements en surface : des effondrements localisés (les fontis au sens classique) ou des effondrements généralisés.



Plan localisant le canal de Curbans dans son environnement

### 1.3.1. Spécificités de l'ouvrage de Curbans :

Pour l'ouvrage de Curbans, par comparaison à un barrage, les enjeux (zones d'occupation humaine) sont situés latéralement au canal, sur toute sa longueur.

## 2. PERIMETRE DE L'ETUDE DE DANGERS

Le périmètre du canal de Curbans, au sens du décret, s'étend des vannes de prise d'eau, en sortie, rive gauche, de la retenue d'Espinasses, jusqu'à la grille d'entrée dans la galerie souterraine en béton armé. Ce périmètre comprend :

- le canal constitué de :
  - ses « digues »<sup>13</sup> ;
  - ses fondations ;
  - son radier (plat fond) qui comporte :
    - ✖ des clapets de décharge pour les zones où la nappe est plus haute que le fond du canal (partie amont) ;
    - ✖ des trappes de fin de vidange en fond de canal ;
  - ses structures en béton armé d'entrée et de sortie avec pour l'ouvrage de sortie :
    - ✖ un « piège à gravier » ou dégraveur ;
- les vannes de prise d'eau, situées en sortie, rive gauche, de la retenue d'Espinasses ;
- les ouvrages et exutoires de drainage.

## 3. METHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES ET D'IDENTIFICATION DES SCENARIOS DE DEFAILLANCE

### 3.1. Démarche de l'étude de dangers :

L'étude de dangers du canal de Curbans s'inscrit dans une démarche réglementaire (Décret du 11/12/2007 ; articles R214-115 à R214-117 du Code de l'Environnement). Son contenu est conforme à l'arrêté du 12 juin 2008.

Elle a pour objet d'analyser les risques que présente l'ouvrage pour la sécurité publique, directement ou indirectement en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'ouvrage.

L'étude de dangers a été réalisée en prenant en compte une cote d'exploitation limitée à RN – 50 cm. Cette mesure (dite « DMP 14 ») décidée par EDF vise à garantir une revanche suffisante malgré les tassements effectifs et permet par ailleurs de maîtriser l'évolution des phénomènes liés aux infiltrations). Il s'agit d'une mesure provisoire d'exploitation en sûreté s'inscrivant dans le contexte des travaux de réhabilitation programmés depuis plusieurs années pour 2011 (et réalisés à ce jour).

### 3.2. Potentiel de dangers du canal de Curbans :

Le potentiel de dangers du canal de Curbans est constitué par la non maîtrise du confinement de l'eau par les digues du canal. Il résulterait de la libération de tout ou partie de l'eau due à :

- une rupture totale ou partielle des digues ;
- une surverse par-dessus les digues.

---

<sup>13</sup> Le terme « digues » est utilisé dans cette EDD par habitude d'usage. Il ne s'agit pas de « digues » au sens d'ouvrage de protection contre les inondations. Les « digues » en question ne relèvent pas du décret de décembre 2007 et sont considérées comme des barrages. La dénomination « barrage latéral de canal » est aussi employée.

<sup>14</sup> Un « Dispositif et Moyen Particulier » est une mesure provisoire pour garantir un niveau de sécurité acceptable d'un ouvrage.

Ces situations à risques sont évaluées dans cette étude par l'analyse des risques de défaillances des fonctions de sécurité assurées par l'ouvrage.

Le potentiel de dangers est fonction :

- pour une rupture totale ou partielle :
  - de la taille de la section effacée (volume d'eau libérable ; celui-ci étant au plus égal au volume d'eau retenue dans le canal soit 1 million de m<sup>3</sup> dans la mesure où les vannes d'entrée canal peuvent être fermées à temps, sinon de l'ordre de 7 millions de m<sup>3</sup> avec la retenue d'Espinasses à sa cote normale (657 NGF) ;
  - de la cinétique de l'ouverture de cette section ;
- pour une surverse :
  - de la cinétique et du volume d'eau déplacé.

### **3.3. Méthodologie d'analyse des risques :**

La méthodologie d'analyse des risques suivie est articulée en quatre étapes :

1. Analyse de l'accidentologie : l'examen des incidents et accidents déjà produits sur des ouvrages similaires au niveau mondial et de ceux survenus sur l'ouvrage considéré a pour objectif de cerner les risques potentiels que peut présenter l'ouvrage de Curbans.
2. Identification des risques intrinsèques à l'ouvrage : il s'agit, à partir de la connaissance de l'ouvrage, de sa conception et réalisation, de son état et comportement au moment de la rédaction de l'étude de dangers, d'identifier les sensibilités de l'ouvrage qui pourraient être à l'origine ou contribuer à la survenue d'un événement accidentel.
3. Analyse Préliminaire des Risques (APR) : cette étude vise à dresser un inventaire exhaustif des défaillances possibles de l'ouvrage et de ses organes, pour les conditions normales d'exploitation. Ces défaillances sont caractérisées par un niveau d'occurrence et de gravité, évaluées de façon qualitative à titre d'experts et justifiées, ainsi que par leur cinétique. Ces évaluations permettent d'identifier les événements accidentels jugés significatifs, appelés « Evénements Redoutés Centraux » (ERC) qui, de ce fait, font l'objet d'une Analyse Détaillée des Risques (ADR).
4. Analyse Détaillée des Risques :
  - a. Les ERC identifiés par l'APR sont développés sous forme d'arbres causes-conséquences, dits « nœuds papillon ». Ces arbres « nœud papillon » permettent de détailler, en amont, les causes et sous-causes possibles conduisant à l'ERC et, en aval, les phénomènes dangereux qui en découlent. Chaque branche ou chemin de l'arbre correspond à un scénario. Les barrières de sécurité ou Mesures de Maîtrise des Risques (MMR) sont symbolisées par des barres verticales pour formaliser le fait qu'elles s'opposent au développement accidentel, soit de façon préventive (en diminuant l'occurrence des causes de l'ERC), soit de façon protectrice ou limitative (en réduisant les conséquences de l'ERC).
  - b. La probabilité d'occurrence des événements redoutés centraux et la robustesse des MMR sont quantifiées. A l'issue de cette étape, les scénarios les plus vraisemblables pour chaque ERC sont mis en évidence.
  - c. La gravité des phénomènes dangereux, résultant des événements redoutés centraux, est évaluée en nombre de personnes potentiellement exposées.
  - d. Enfin, les ERC sont positionnés dans une matrice gravité X occurrence ou « matrice de criticité », qui permet, d'une part de se prononcer quant au niveau de risque de l'ouvrage, d'autre part de pointer les ERC « critiques » pour lesquels l'exploitant propose des Mesures de Réduction du Risque (MRR).

### **3.4. Application de la méthodologie d'analyse des risques à l'ouvrage de Curbans :**

Après analyse de l'accidentologie relative à ce type d'ouvrage et des historiques d'incidents qu'a connus l'ouvrage, examen des sensibilités intrinsèques à l'ouvrage du fait de sa conception, de son dimensionnement, de sa construction, de son état et de son comportement, l'analyse préliminaire a permis d'identifier deux événements redoutés centraux (ERC) qui sont :

- l'ouverture d'une brèche (ERC1) ;
- la surverse (ERC2) (sans ouverture de brèche).

Ces deux ERC correspondent à une défaillance de la fonction « retenir l'eau » du canal.

Chacun de ces ERC génère deux phénomènes dangereux (PhD) de gravité et probabilité potentiellement différentes, selon que le canal est isolé ou non de la retenue d'Espinasses par fermeture des vannes d'entrée.

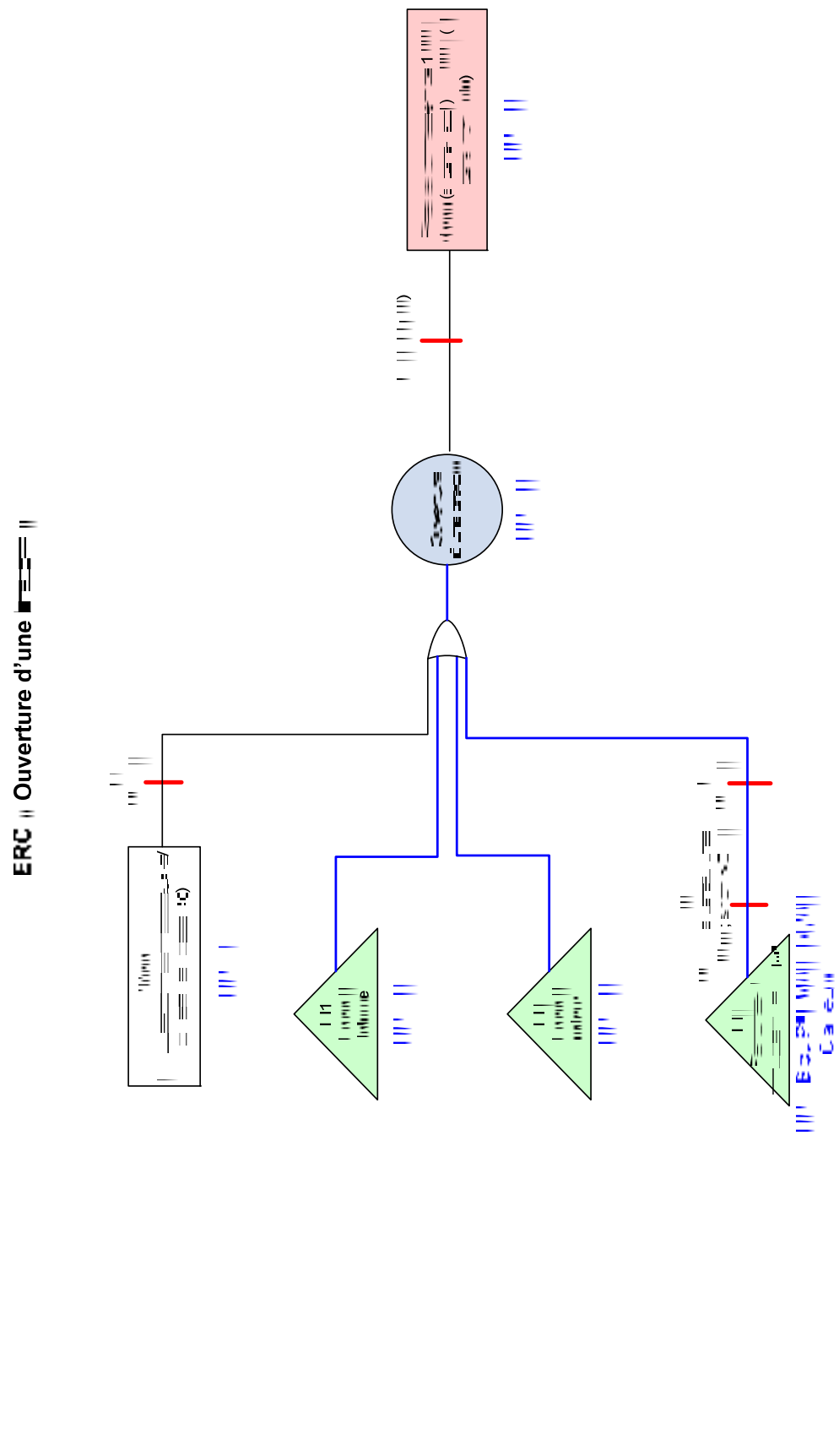
Dans le cas d'un canal (linéaire de plusieurs mètres à kilomètres), une brèche ou une surverse, et les phénomènes dangereux qui en découlent, peuvent se produire en tout point mais avec une probabilité et/ou une gravité plus ou moins élevées, fonctions de la nature de la digue où l'événement se produit et des enjeux potentiellement exposés. Il existe donc autant d'événements redoutés que de sections (ou tronçons) homogènes.

L'exercice, nouveau par rapport aux cas des barrages, qui a donc été réalisé dans le cadre de l'EDD de Curbans, a été d'identifier des sections (ou tronçons) homogènes puis, pour chaque tronçon homogène recensé, d'évaluer les enjeux potentiellement exposés (commune de Rochebrune, hameau de Bréziers, ...). Exemple de tronçons identifiés :

- En RD, du PM 4 300 au PM 5 200 :
  - enjeux : commune de Rochebrune ;
  - caractéristiques ou « sensibilités » du canal : revanche déficitaire (18 cm au PM 4 700 – Rochebrune) ;
- En RG, du PM 0 au PM 1 500 :
  - enjeux : hameau et camping des Gréoliers ;
  - caractéristiques ou « sensibilités » du canal : largeur de crête faible de l'ordre de 4 m ; pas de collecte des eaux d'infiltration (drains).

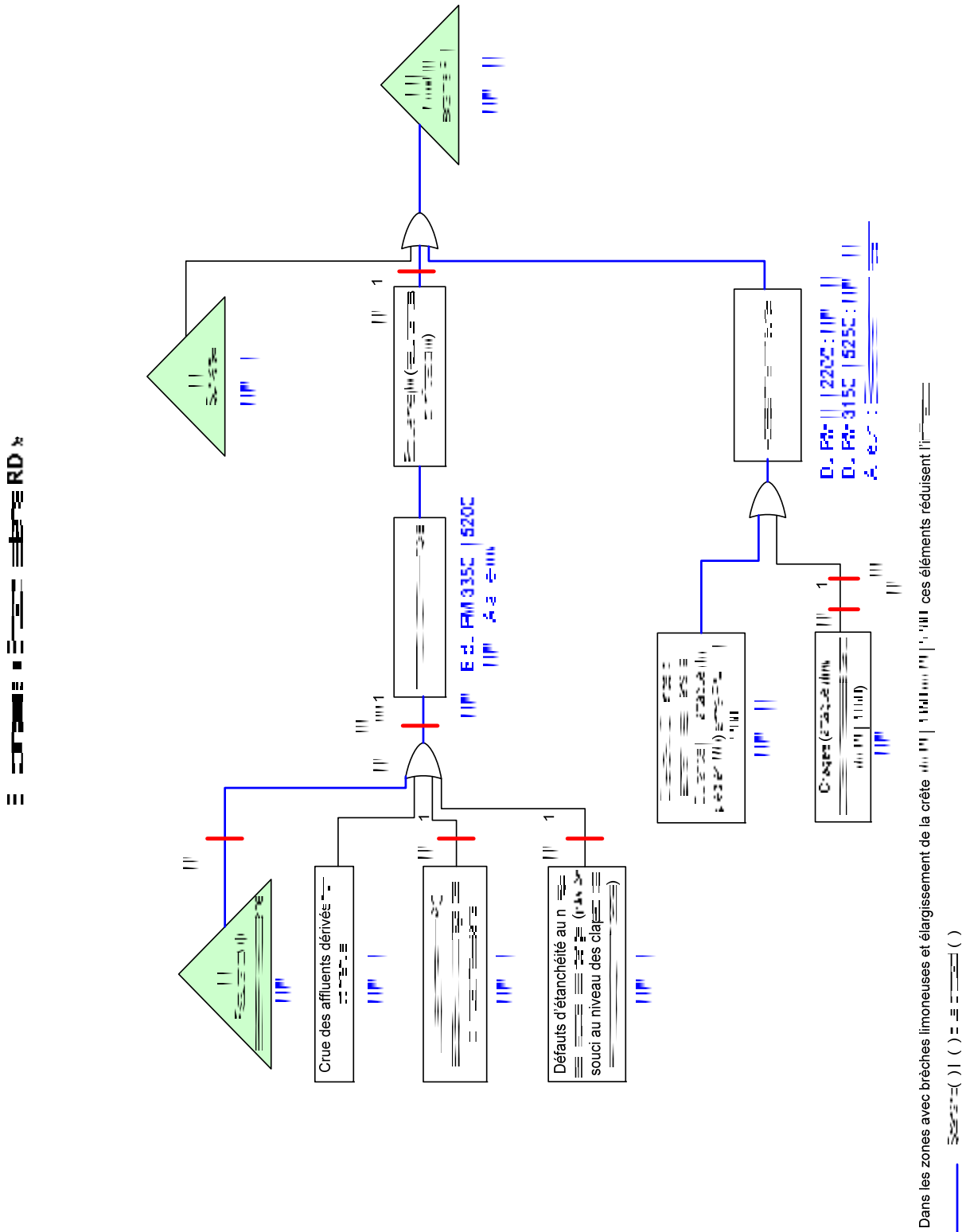
L'analyse détaillée des risques, représentée sous forme de nœuds papillon, a considéré ces différents tronçons et évalué, pour chacun d'eux, compte tenu de leur caractéristiques, la probabilité d'occurrence des différents initiateurs et les niveaux de confiance des barrières s'opposant au déroulement accidentel.

Des extraits du nœud papillon relatif à l'ERC « ouverture d'une brèche », qui illustre la démarche, sont présentés en pages suivantes.



NP : Niveau de probabilité, coté de A (peut se produire pendant la vis de l'ouvrage) à E (extrêmement improbable)

NC : Niveau de confiance caractérisant la robustesse d'une barrière et traduisant la décote apportée par cette barrière



En termes d'intensité des effets, les modélisations effectuées ont considéré une ouverture de brèche par érosion interne (phénomène de renard).

Bien que le débit relâché à la brèche, évalué par les calculs, s'avère inférieur au débit de la crue décennale, le nombre de personnes potentiellement exposées peut atteindre 150 personnes si la brèche se produit au niveau de la commune de Rochebrune, du PM 4 300 à 5 200.

### 3.5. Bilan de l'analyse des risques :

L'analyse des risques a permis d'identifier et d'évaluer la criticité (avant réalisation des travaux de réhabilitation) de sept phénomènes dangereux ; ces PhD correspondent à l'un des phénomènes suivants associés à un tronçon du canal. Ils sont reportés dans la matrice de criticité ci-dessous :

- ERC1 : relâchement d'un débit d'eau suite à une ouverture de brèche par érosion interne ;
- ERC1-surverse : relâchement d'un débit d'eau suite à une surverse sans ouverture de brèche ;
- ERC2 : relâchement d'un débit d'eau suite à une ouverture de brèche suite à une surverse.

| Grille de criticité   |                                                   |                         |                             |                                |              |
|-----------------------|---------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------|
| Gravité \ Probabilité | E<br>Possible mais<br>extrêmement peu<br>probable | D<br>Très<br>improbable | C<br>Improbable             | B<br>Probable                  | A<br>Courant |
| 5                     |                                                   |                         |                             |                                |              |
| 4                     |                                                   |                         | ERC1-surverse<br>Tronçon A  | ERC1<br>Tronçon D              |              |
| 3                     |                                                   |                         | ERC2<br>Tronçon D           | ERC1<br>Tronçon B              |              |
| 2                     |                                                   |                         | ERC2<br>Tronçon C           | ERC1<br>Tronçons A, C,<br>E, F |              |
| 1                     |                                                   |                         | ERC2<br>Tronçons A, E,<br>F |                                |              |

| Niveau de gravité | Echelle en équivalence crue <sup>15</sup>                                        | Echelle en nombre de personnes impactées |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 5                 | Débit $\geq Q_{10000} = 4\,300 \text{ m}^3/\text{s}$                             | $\geq 1\,000$                            |
| 4                 | $Q_{1000} \leq \text{Débit} < Q_{10\,000} = 4\,300 \text{ m}^3/\text{s}$         | $\geq 100$ et $< 1\,000$                 |
| 3                 | $Q_{100} \leq \text{Débit} < Q_{1000} = 3\,100 \text{ m}^3/\text{s}$             | $\geq 10$ et $< 100$                     |
| 2                 | $Q_{10} \leq \text{Débit relâché} < Q_{100} = 1\,900 \text{ m}^3/\text{s}$       | $\geq 1$ et $< 10$                       |
| 1                 | Débit relâché $<$ débit de la crue décennale $Q_{10} = 690 \text{ m}^3/\text{s}$ |                                          |

<sup>15</sup> Débit de crue de la Durance au droit du barrage d'Espinasses. Etude hydrologique de référence de la Durance, basée sur l'étude des crues à Serre-Ponçon, réalisée par la DTG – 1974

Cette analyse confirme que des mesures pérennes de réduction du risque (MRR) doivent être mises en place vis-à-vis des scénarios dimensionnant (c'est-à-dire les plus vraisemblables) d'ouverture de brèche ou de surverse (sans rupture) au droit de zones habitées (commune de Rochebrune (tronçon D), hameau du Plan (tronçon B)).

Pour rappel :

| Niveau d'occurrence (NP) | E                                                                                                                                             | D                                                                                                                                   | C                                                                                                                                                                                                                        | B                                                                                     | A                                                                                                                                                                |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                          | Possible mais extrêmement peu probable                                                                                                        | Très improbable                                                                                                                     | Improbable                                                                                                                                                                                                               | Probable                                                                              | Courant                                                                                                                                                          |
| <b>Qualitative</b>       | N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations | S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité | S'est déjà produit dans 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 | S'est déjà produit et/ou peut se reproduire pendant la durée de vie de l'installation | S'est produit sur site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctrices |

#### 4. MESURES DE REDUCTION DES RISQUES / ETUDES COMPLEMENTAIRES DECIDEES – LIEN AVEC LE PROGRAMME DE REHABILITATION DEJA DEFINI ET PLANIFIE

En quarante ans d'exploitation, le canal de Curbans a révélé des pathologies (principalement des dégradations du revêtement d'étanchéité) ayant conduit à diverses campagnes d'investigations, de maintenance, qui ont conduit à décider d'une reprise complète du revêtement, avec renforcement du dispositif de surveillance, pour 2011. Dans l'intervalle, la cote d'exploitation a été limitée dans la cadre d'un DMP à 50 cm sous la RN ».

L'analyse des risques de l'EDD a permis de confirmer :

- la robustesse des mesures d'exploitation transitoires (DMP) mises en place.  
L'EDD démontre que l'abaissement de la cote d'exploitation (- 50 cm par rapport à la RN) accompagné d'un suivi renforcé permettent de maîtriser les risques d'exploitation du canal.
- l'efficacité des mesures de réduction de risques mises en œuvre dans le cadre de la campagne de travaux en cours.  
L'EDD permet de montrer que les points de faiblesse de l'ouvrage ont bien été cernés et que les travaux de reprise sont adaptés pour in fine réduire l'occurrence des deux ERC identifiés par l'EDD : ouverture d'une brèche (= rupture d'un barrage latéral de canal) et surverse.

Au-delà des travaux prévus, l'EDD a proposé des études complémentaires (principalement hydrauliques) que l'exploitant s'est engagé à réaliser.

#### REMERCIEMENTS

La présente note a été établie en utilisant largement des extraits de l'étude de dangers de Curbans. Nos remerciements vont à tous les contributeurs à cette EDD.

## **BARRAGES DU PAS DU RIOT ET DU GOUFFRE D'ENFER, EXEMPLES D'ETUDES DE DANGERS DE 2 BARRAGES SUCCESSIFS, DONT L'UN DOIT FAIRE L'OBJET DE TRAVAUX DE CONFORTEMENT.**

*Pas du Riot and Gouffre d'Enfer dams, Risk studies examples of 2 successive dams with one of them under rehabilitation.*

**Caroline VARON<sup>16</sup>, Arnaud DUCROUX, Alexandre MOY** - Safège Ingénieurs Conseils  
Parc de l'Ile – 15/27 rue du Port, 92000, Nanterre Cedex, France  
{[caroline.varon](mailto:caroline.varon@safège.fr) ; [arnaud.ducroux](mailto:arnaud.ducroux@safège.fr) ; [alexandre.moy](mailto:alexandre.moy@safège.fr)}@safège.fr

**Valérie CHASSIGNOL**  
Ville de Saint Etienne – Direction Voirie et Infrastructures – 5 rue Auguste Guitton – 42 000 Saint Etienne - France  
[valerie.chassignol@saint-etienne.fr](mailto:valerie.chassignol@saint-etienne.fr)

**Daniel PANCHER** - DDT 42 / SAP / Cellule Risques  
2 rue Grüner Allée B - 42007 Saint-Etienne cedex 1 - France  
[daniel.pancher@loire.gouv.fr](mailto:daniel.pancher@loire.gouv.fr)

### **MOTS CLÉS**

Etude de dangers ; barrages en cascade ; révision spéciale.

### **ABSTRACT**

*The Furan stream, which is passing underground through the town of Saint-Etienne, incorporates 2 masonry gravity dams upstream, class A, constructed in the late 19's: The Pas du Riot dam, 36m high, belonging to the Saint Etienne town, and the Gouffre d'Enfer, 52m high, property of the French State.*

*These two gravity dams are situated 2km apart. The Pas du riot dam is the most upstream. This dam presents divers problems of stability and spillway capacity. It is actually under a special revision and will be strengthened in short-term.*

*SAFEGE is in charge of the risk study realisation for these two gravity dams. It was interesting to:*

*In one hand, to show the interaction between these two studies, especially the consideration of the Pas du Riot failure in the Gouffre d'Enfer analysis while taking into account that these dams do not have the same owner.*

*In the other hand, to evaluate the benefit of Pas du Riot Risk study within the framework of the special revision and rehabilitation works.*

### **RÉSUMÉ**

*La rivière Furan, qui traverse la ville de Saint Etienne, est barrée dans sa partie amont par 2 barrages poids en maçonnerie, de classe A, construits à la fin du XIXème siècle : le barrage du Pas du Riot, 36 m de hauteur, appartenant à la ville de Saint Etienne, et le barrage du Gouffre d'Enfer, 52 m de hauteur, propriété de l'État. Ces deux barrages sont distants de 2 km, le barrage du Pas du Riot étant situé le plus en amont. Ce dernier présente des défauts de stabilité et un sous dimensionnement de l'évacuateur de crues. Il fait d'ailleurs l'objet actuellement d'une révision spéciale et sera conforté à court terme.*

*SAFEGE est en charge de la rédaction des études de dangers de ces deux barrages. Il était donc intéressant*

*D'une part, de montrer l'interaction entre ces deux études, notamment la prise en compte des risques de défaillance du Pas du Riot dans l'analyse de risques du Gouffre d'Enfer, les deux ouvrages n'ayant pas le même Maître d'Ouvrage;*

*D'autre part d'évaluer les bénéfices de l'EDD du Pas du Riot dans le cadre de la révision spéciale et des travaux de confortement.*

---

<sup>16</sup>Auteur correspondant

## 1. INTRODUCTION

Les barrages du Gouffre d’Enfer et du Pas du Riot sont situés en amont de la commune de Saint Etienne, département de la Loire, sur les rives du Furan, affluent de la Loire. Tous deux ont été construits en maçonnerie dans la deuxième moitié du XIXème siècle, le Gouffre d’Enfer, l’aîné des deux, est d’ailleurs l’un des premiers barrages poids arqués maçonnés d’Europe.

Financé par l’Etat, le Gouffre d’Enfer devait à l’origine satisfaire plusieurs objectifs :

- Alimenter en eau potable la ville de Saint Etienne qui était en pleine croissance industrielle,
- Protéger la ville contre les inondations du Furan,
- Maintenir un débit constant en évitant l’étéage du cours d’eau lors de la période estivale qui mettait au chômage les nombreuses usines utilisant la force hydraulique.

Ce barrage montra vite ses limites face à l’évolution rapide de la démographie et la ville de Saint Etienne décida et finança 3 ans plus tard (sans aide de l’Etat) la réalisation d’un second barrage identique au premier 2,2 km en amont : le barrage du Pas du Riot.

Aujourd’hui, le barrage du Gouffre d’Enfer est toujours propriété de l’Etat, mais a été complètement vidé depuis 2003 et est utilisé comme retardateur de crues, ou lorsque le barrage du Pas du Riot est vide pour alimenter en eau la Ville de Saint Etienne. Le barrage du Pas du Riot est toujours propriété de la Ville de Saint Etienne et est exploité comme ressource pour l’eau potable.

Tous deux classés A, ils doivent faire l’objet d’une étude de dangers. C’est le bureau d’études SAFEGE qui a été désigné pour réaliser ces études, à l’issue de deux appels d’offres distincts. Il était donc intéressant d’examiner les points communs, les différences, mais surtout les interactions entre ces deux ouvrages. C’est l’objet du présent article.

## 2. LE BARRAGE DU GOUFFRE D’ENFER

### 2.1. Périmètre de l’étude de dangers du barrage du Gouffre d’Enfer

Le périmètre de l’étude de dangers du barrage du Gouffre d’Enfer est délimité par :

- le barrage en lui-même ;
- sa fondation ;
- la retenue qu’il crée ;
- les ouvrages de sécurité :
  - La prise d’eau;
  - La vidange de fond, qui se confond partiellement avec la prise d’eau ;
  - Le dispositif d’évacuation des crues, composé de :
    - l’évacuateur principal,
    - l’évacuateur secondaire situé en RD qui rejoint le canal de dérivation (Fausse rivière).



Figure 1 : Vue aérienne du Barrage du Gouffre d'Enfer (Source Geoportail)

Il est à noter l'existence d'un canal de dérivation dit « La Fausse Rivière », conçue initialement pour dériver les eaux du Furan pendant la phase de construction. Aujourd'hui cet ouvrage n'est plus en service, et n'est pas entré dans le périmètre de l'étude.

## 2.2. Description générale de l'ouvrage

Le barrage du Gouffre d'Enfer est un ouvrage de type poids de 52 m de hauteur par rapport à la fondation pour une longueur en crête de 102 m. Le corps du barrage est construit en blocs de maçonnerie, associés avec du mortier (environ 44% de mortier de chaux et 55% de moellons). Le barrage repose sur des fondations stables composées de granite et de gneiss.

La capacité sous la cote de l'ancienne retenue normale de l'ouvrage (sous la cote du déversoir : 778,3 m) est 1,105 Mm<sup>3</sup>.

À l'origine, aucun dispositif de drainage n'était mis en place sur le barrage du Gouffre d'Enfer. Suite à différentes études menées depuis 1976 (cf. paragraphe 2.4 - Faits marquants), il est apparu nécessaire de mettre en place un réseau de drainage pour supprimer les problèmes de sous-pressions et assurer la stabilité de l'ouvrage. Deux types de drains sont maintenant en place sur cet ouvrage : Drains de fondations et drains d'élévation. Ceux de fondation réduisent la sous-pression sous le barrage tandis que les drains d'élévation drainent le corps du barrage afin d'éliminer les pressions interstitielles trop importantes entre les blocs de maçonnerie. Les eaux de drainage sont collectées et mesurées dans des chambres situées en risberme aval rive droite et rive gauche.

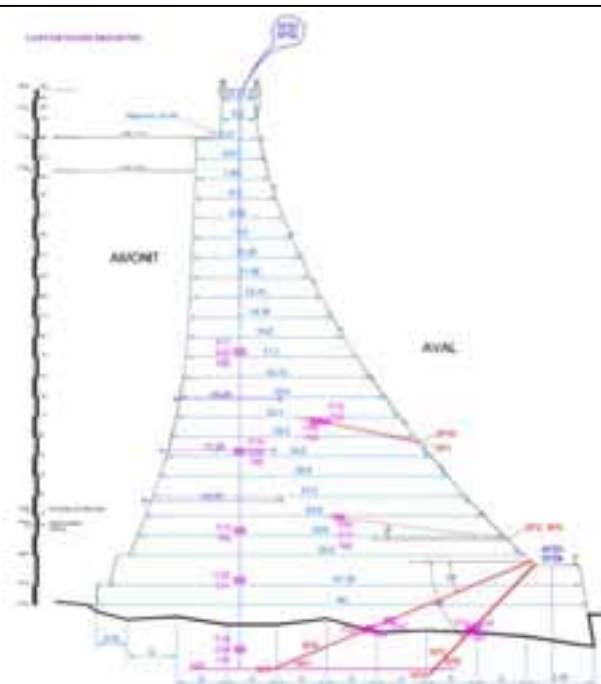


Figure 2 : Coupe type de l'ouvrage

L'évacuateur de crues principal est composé d'un déversoir en arche, suivi d'un coursier enterré (tunnel supérieur) traversant l'appui rive droite du barrage et débouchant dans le canal de dérivation de manière transversale.

L'évacuateur secondaire consiste en un déversoir latéral à seuil épais, il fonctionne uniquement pour des crues exceptionnelles et déverse directement dans le canal de dérivation rive droite de manière transversale. Il permet de passer les fortes crues et de les amortir.

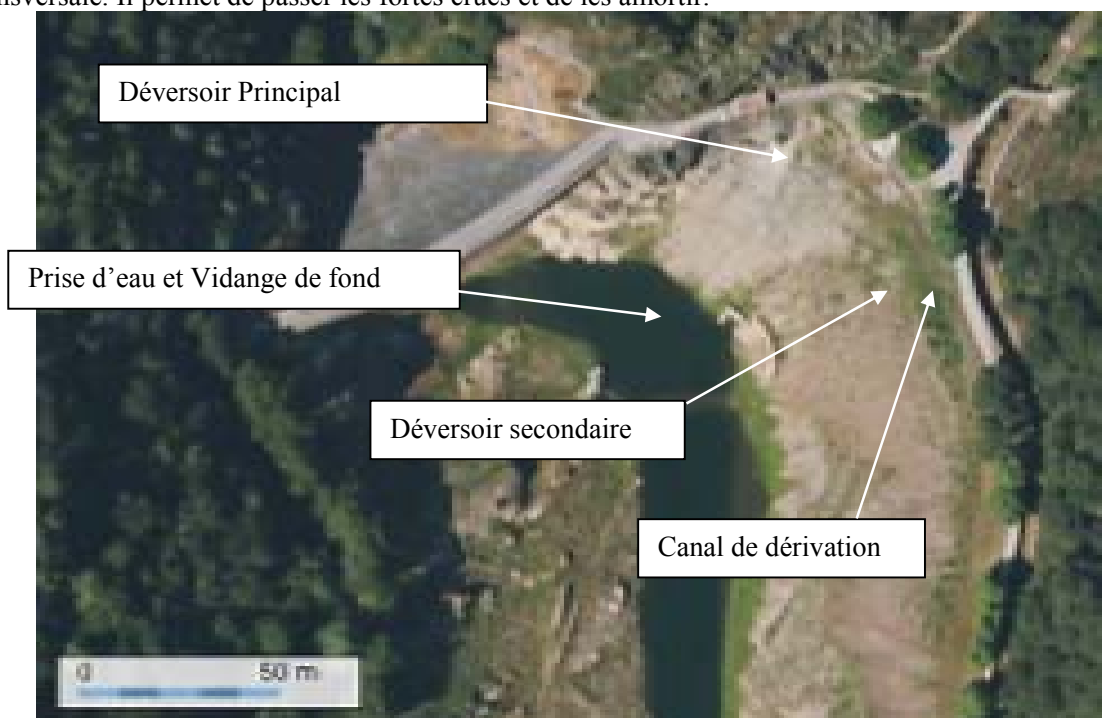


Figure 3 : Vue aérienne détaillée du barrage de Gouffre d'Enfer (Source Geoportail).



Figure 4 : Photographie de l'évacuateur principal



Figure 5 : Photographie de l'évacuateur secondaire

Le barrage du Gouffre d'Enfer a la particularité d'avoir son système de vidange et celui de prise confondus. Le système général est composé de plusieurs vannes et conduits. Les organes de vidange et de prise du réservoir se trouvent dans le tunnel inférieur situé dans l'axe du tunnel supérieur à la côte génie civil du radier à 740.49 m.

Cette galerie traversant l'appui rive droite du barrage de manière rectiligne possède d'amont en aval :

- Deux vannes d'extrémité amont ne comportant aucune grille.
- Deux conduites Ø400 de prise d'eau d'une longueur d'environ 12 mètres jusqu'à la chambre des vannes amont. Un bouchon maçonné de 8.8m de long a été mis en place afin d'obtenir l'étanchéité.
- Dans cette chambre, les deux conduites Ø400 sont donc équipées de deux vannes motorisées de sectionnement.
- Ces deux conduits Ø400 alimentent ensuite un seul tuyau d'adduction Ø700 qui parcourt le massif de part en part pour arriver à la chambre des vannes aval.
- Au niveau de la chambre des vannes aval, un conduit Ø600 de vidange est raccordé en T sur le tuyau d'adduction et équipé d'une vanne manuelle.
- Une conduite Ø200, piqué sur le conduit Ø600 de vidange, permet d'alimenter le cours d'eau avec un débit réservé.

Par ailleurs, la conduite d'adduction Ø700 continue son parcours jusqu'au brise charge de Corbières où une conduite forcée est mise en place jusqu'à l'usine de Solaure. Cette conduite ne fait pas partie du périmètre de l'étude. Le débit maximal de la vidange de fond a été estimé à  $1,5\text{m}^3/\text{s}$  pour un temps de vidange de l'ordre de dix jours.

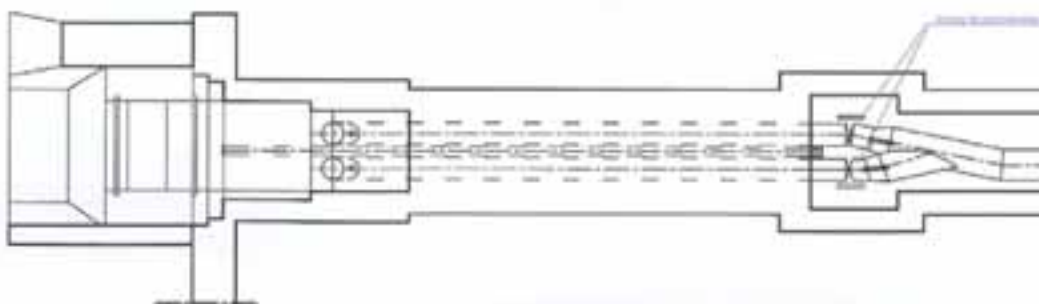


Figure 6 : Coupe longitudinale amont, vue de dessus de l'ouvrage de vidange

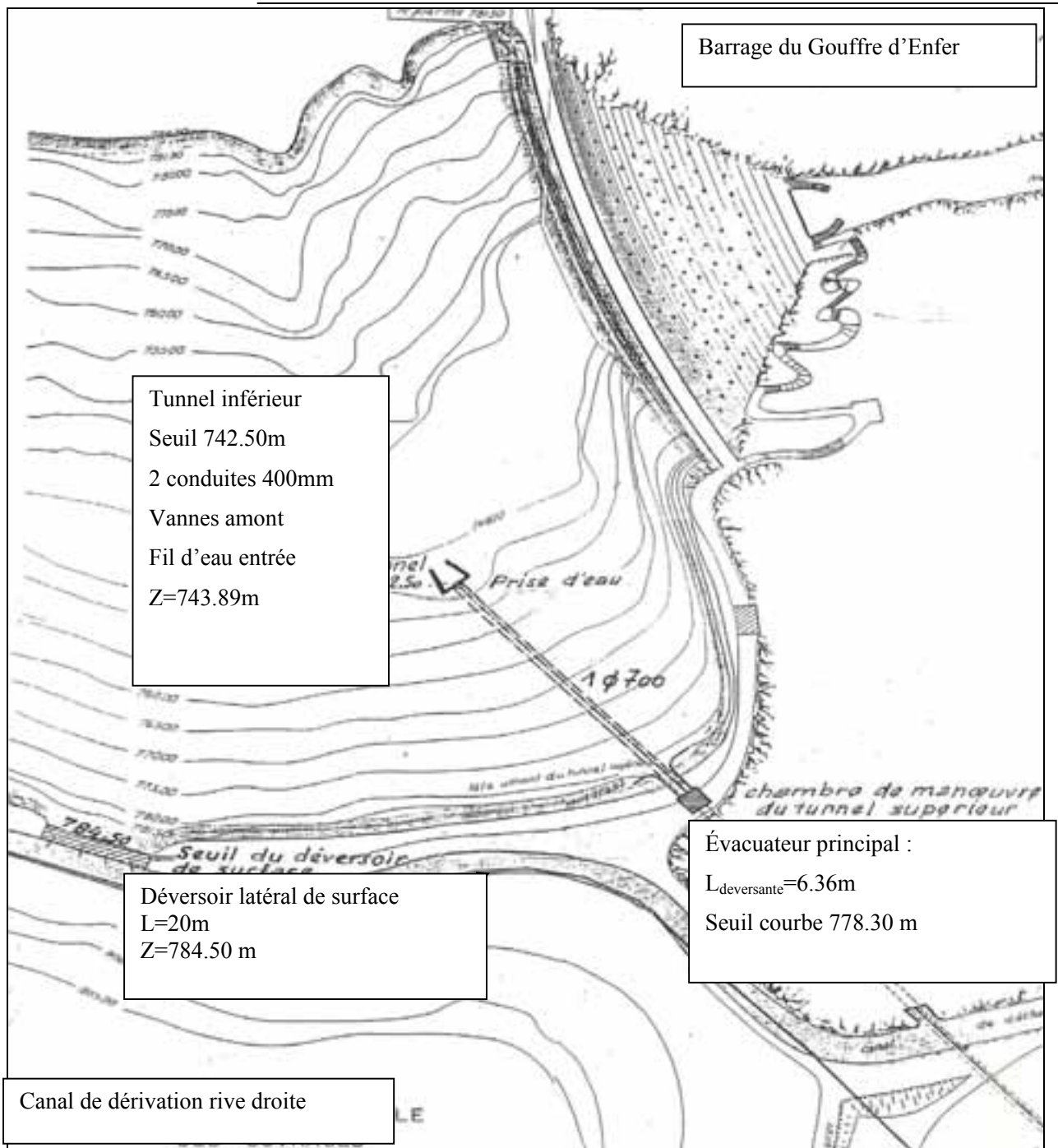


Figure 7 : Plan schématique d'ensemble de l'ouvrage (Source Coyne et Bellier)

### 2.3. Mode de fonctionnement et d'exploitation

Aujourd’hui, le barrage est maintenu vide pour assurer un volume de stockage en cas de crue et protéger la ville de Saint Etienne. La vanne de vidange est maintenue ouverte en toute circonstance pour retarder les crues et éviter de solliciter l’ouvrage de manière trop importante.

Les principes d'exploitation sont donc les mêmes en période de crues et en période normale. La seule différence réside dans la fréquence des mesures d'auscultation et les visites de contrôles qui sont bien évidemment plus fréquentes lors du passage d'une crue.

#### **2.4. Faits marquants**

Aucun fait marquant n'a été enregistré avant la visite décennale du 19 octobre 1976 réalisée par Coyne et Bellier. Cette inspection a en revanche mis en évidence une insuffisance de drainage sous le barrage. La mise en place de drains de fondations était nécessaire afin de diminuer les sous-pressions. Des travaux d'entretien, de réparation et de réfection ont été également recommandés.

La seconde visite du 15 Septembre 1978 a conclu aux mêmes recommandations et a proposé des compléments sur les travaux de réfection (étanchéité de peau, mise en place de piézomètres et étude géologique des fondations).

Lors de la révision spéciale en 1980, la mise en place de 3 drains au droit des forages inclinés depuis le pied aval a été effectuée. Ces travaux ont permis de soulager les contraintes de sous pressions sur l'ensemble des fondations.

Ensuite en 1985 une autre batterie de travaux importants a été réalisée :

- Aménagement de la conduite de vidange 600 mm à l'extérieur de la galerie inférieure en remplacement de la conduite  $\square$  200 mm.
- Mise en place de cellules de mesures dans chacun des 2 forages réalisés en 1980 pour ausculter les pressions interstitielles.
- Et surtout construction d'un nouvel évacuateur de crues permettant de passer un débit de pointe plus important.

Par la suite, en 2006/2007, seuls des travaux de contrôle de végétation et de maintenance ont été réalisés.

En revanche, d'importants travaux ont été menés sur le barrage entre septembre 2009 à juin 2010. Ils ont comporté le rejointoiement de la maçonnerie du parement amont et la création de 19 drains supplémentaires depuis le parement aval du barrage (drains d'élévation et de fondations) ainsi que la mise en place de 18 nouvelles cellules de pressions interstitielles dans le corps et la fondation de l'ouvrage. Un réaménagement des anciens drains a aussi été entrepris.

Autrefois utilisée exclusivement pour l'adduction en eau potable, la retenue fut exploitée pour retarder les crues du Furan avec une retenue maintenue à la cote 770,0m (RNE) correspondant à 580 000 m<sup>3</sup> stockés jusqu'en 2006 quand la DDE a demandé que la vanne de vidange de fond soit maintenue pleinement ouverte. La cote de retenue normale d'exploitation provisoire est donc maintenant de 742,50m ce qui correspond au fil de l'eau de la conduite de fond du barrage.

#### **2.5. L'environnement de l'ouvrage**

L'accès au barrage se fait soit par un chemin routier étroit et boisé soit par des sentiers. Le bassin versant, de 22,3 km<sup>2</sup> est occupé principalement par des territoires forestiers, quelques terrains agricoles et le barrage du Pas du Riot ! Le relief est important et les berges sont pentues.

La retenue possède un canal de dérivation prenant son origine à la Vantellerie et servant d'exutoire aux évacuateurs de crues. Ce canal intègre la conduite forcée du Pas du Riot. La Vantellerie est un ouvrage répartiteur des débits situé à l'amont de la Fausse rivière et du réservoir. Elle permettait soit d'envoyer l'eau du Furan vers le réservoir, soit de la faire transiter dans cette fausse rivière. Elle est aujourd'hui particulièrement dégradée et ne fonctionne plus. Le canal rejoint le Furan en aval du barrage après une chute de 40m de hauteur sur le rocher du versant (appelée « Grande Cascade »).

En aval du barrage, se trouve l'agglomération stéphanoise.

## 2.6. Surveillance de l'ouvrage

L'ouvrage est surveillé et entretenu quotidiennement par un garde-barrage habitant sur le site.

## 2.7. Aléas naturels

Le site se caractérise par :

- Une sous-estimation connue des débits de crues ;
- Des périodes de gel sévère et de neige (site en altitude) ;
- Des risques d'impacts de foudre élevés,
- Des risques de feu de forêt.

# 3. LE BARRAGE DU PAS DU RIOT

## 3.1. Périmètre de l'étude de dangers du barrage du Pas du Riot

Le périmètre de l'étude de dangers du barrage du Pas du Riot est délimité par :

- le barrage en lui-même ;
- sa fondation ;
- la retenue qu'il crée ;
- les ouvrages de sécurité :
  - la prise d'eau couplée avec la vidange de fond ;
  - l'évacuateur de crues.

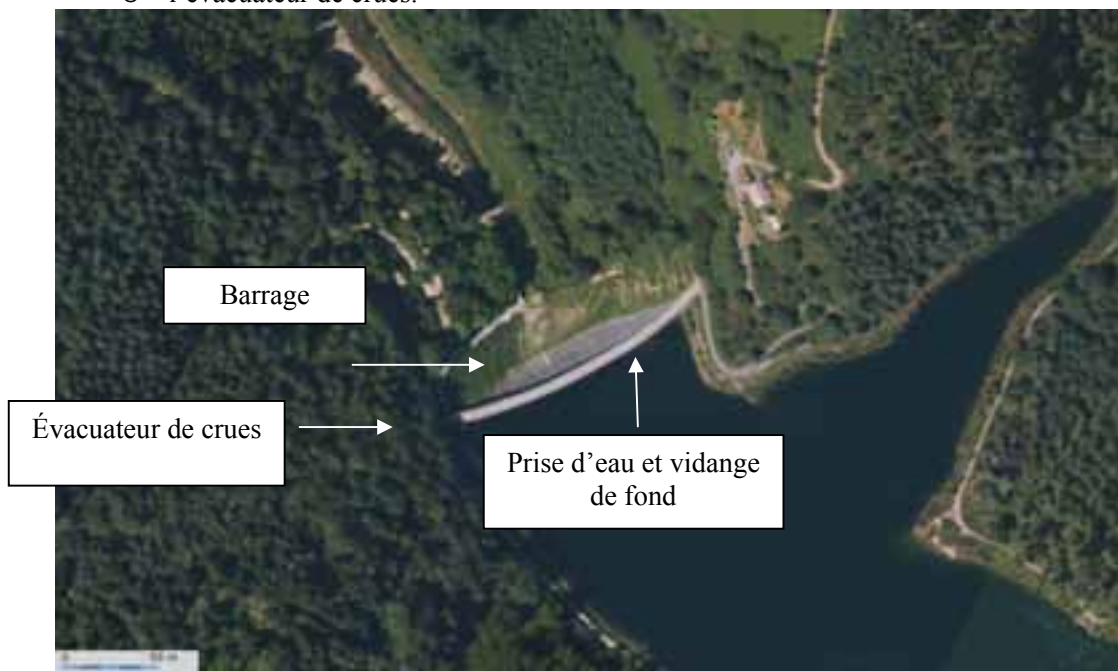


Figure 8 : Vue aérienne du Barrage du Pas du Riot (Source Geoportail)

### 3.2. Description générale de l'ouvrage

C'est un barrage poids de 36 m de hauteur, en maçonnerie de moellons granitiques et gneissiques, implanté selon une courbe plane de 360 m de rayon.



Figure 9 : Parement aval du Barrage du Pas du Riot (Source SAFEGE)

Le profil type se compose : d'un radier sub-horizontal encastré dans la roche gneissique de fondation, du corps du barrage proprement dit et d'un massif rectangulaire supportant la route à une voie. Le barrage est actuellement équipé de

- 7 repères de nivellement et 3 bornes de visée,
- 19 piézomètres dans le corps de l'ouvrage (17 en fonctionnement),
- 14 cellules de pressions au contact fondation/maçonnerie,
- 6 points de mesure des drains et 14 points de mesures de barbacanes.

L'évacuateur de crues, situé en rive gauche, est constitué d'un déversoir latéral avec un seuil de 6 mètres de long calé à la cote 847,80 NGF. Les eaux sont évacuées dans un chenal latéral maçonné. Sa pente moyenne est de 0,5%. A la traversée du barrage, ce canal est limité par un orifice en forme d'arche de pont de 6 m de largeur, de 3,12 m de hauteur dans l'axe de la voute et de 2,15 m de hauteur aux appuis. Au delà, le chenal se prolonge sur 30 m, puis se poursuit par un chenal maçonné en cascades. Ce chenal rejoint, à 35 m environ en aval du barrage, le chenal maçonné de la vidange de fond.



Figure 10 : Seuil de l'évacuateur (Source SAFEGE)



Figure 11 : Coursier de l'évacuateur (Source SAFEGE)

Les organes de prise d'eau et de vidange du barrage sont situés dans une galerie courbe de 86 m de longueur, contournant le barrage dans son appui rive droite. Située à la cote 827 NGF, cette galerie renferme, de l'amont vers l'aval :

- Une grille de protection ;
- deux conduites en fonte Ø 400 mm et de 28 m de longueur, jusqu'à la chambre des vannes. L'étanchéité de cette partie amont est assurée par un bouchon en maçonnerie de ciment de 22,0 m de longueur ;
- dans la chambre des vannes, ces deux conduites sont équipées de deux vannes de garde en série Ø 400 mm (deux vannes manuelles amont VM1 et VM1 et deux vannes électriques aval VE1 et VE2) ;
- à l'aval de la chambre des vannes ces deux conduites se raccordent sur une conduite Ø 600 mm ;
- un piquage Ø 150 mm sur cette conduite permet le passage du débit réservé via une vanne de restitution (V3) ;
- à l'aval de la galerie, cette conduite se divise en deux branches Ø 600 mm. Une branche sert de vidange de fond et est équipée de 2 vannes manuelles en série Ø 600 mm V4 et V5. L'autre branche dessert l'ouvrage brise charge situé au pied du barrage du Gouffre d'Enfer.

Le débit maximal évacué par la vidange de fond est de 1,73 m<sup>3</sup>/s pour la cote du plan d'eau à 847,80 NGF. Le débit maximal de la prise d'eau est de 0,90 m<sup>3</sup>/s.

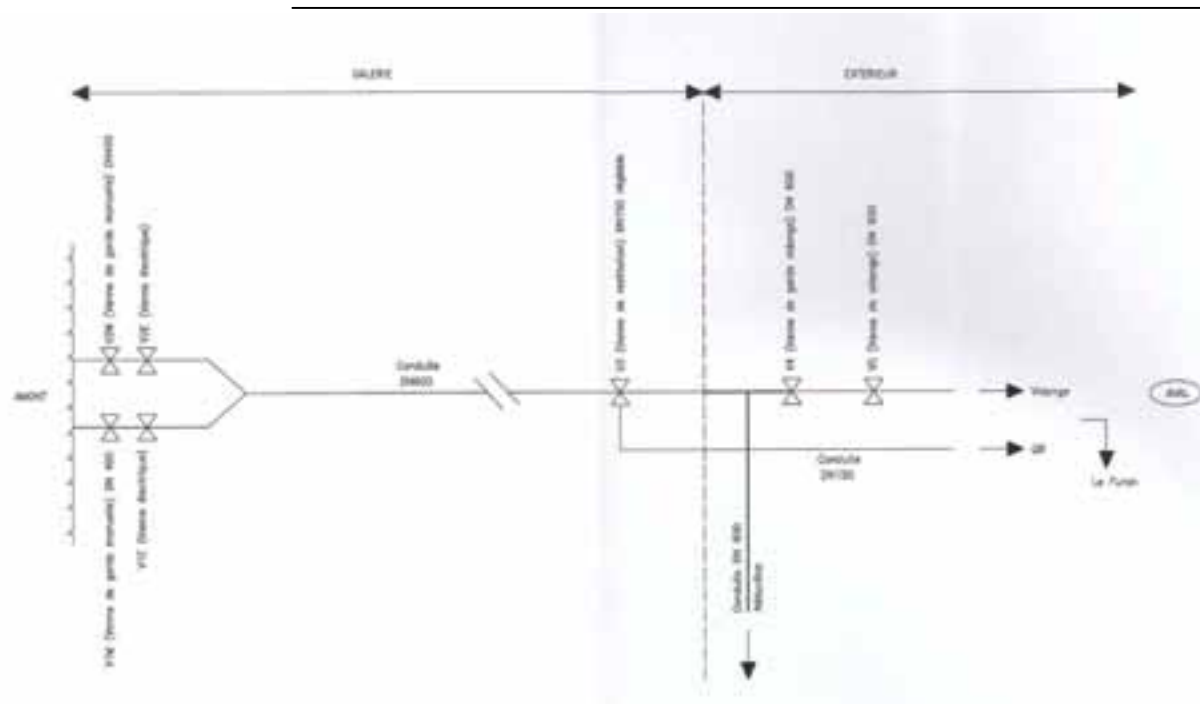


Figure 12 : Schéma récapitulatif des organes de prise d'eau et de vidange

### 3.3. Mode de fonctionnement et d'exploitation

La Ville de Saint-Etienne, Maître d'ouvrage du barrage, a délégué l'exploitation de l'ouvrage à la Société Stéphanoise des Eaux, qui assure l'alimentation en eau potable de la ville de Saint-Etienne. Les modalités de l'exploitation de l'ouvrage sont décrites dans les consignes écrites du barrage.

Globalement, l'exploitation de l'ouvrage est effectuée suivant les besoins en eau potable de la Ville de Saint-Etienne, et l'utilisation ou non de la ressource de la retenue du barrage de Lavalette.

En cas de crue, le seuil libre permet une gestion simple du niveau du plan d'eau, sans aucune manœuvre. Cependant, un dispositif d'alerte et de surveillance de l'ouvrage en cas de crues est défini dans les consignes écrites de l'ouvrage. L'ouvrage est ainsi toujours surveillé par du personnel sur place en cas de crue.

### 3.4. Faits marquants

En 1978, la Ville de Saint-Etienne, exploitante de la retenue a effectué la pose de la conduite forcée Ø 600 mm d'adduction et de vidange de fond.

En 1992, suite à l'avis du CTPB sur le dossier de révision spéciale, les travaux suivants ont été réalisés :

- Baisse de la cote de retenue par arasement du seuil de l'évacuateur de crues (passage du niveau RN de 851,80 au niveau 847,80 m NGF),
- Recalibrage de l'évacuateur de crues,
- Rejointoiement du parement amont,
- Forage de drains courts de pied,
- Installation d'un dispositif d'auscultation complémentaire.

Depuis plusieurs années, c'est le niveau élevé de la piézométrie qui est préoccupant en raison de son impact sur les conditions de stabilité de l'ouvrage. Ceci a amené à la mise en révision spéciale de l'ouvrage et des études de confortement sont en cours.

### 3.5. L’environnement de l’ouvrage

L’accès au barrage se fait soit par un chemin routier boisé soit par des sentiers. Le bassin versant, de 19,7 km<sup>2</sup> est identique au Gouffre d’Enfer en termes d’occupation. Le relief est important mais les berges sont un peu moins pentues que celles du Gouffre d’Enfer.

En aval du barrage, se trouvent le barrage du Gouffre d’Enfer puis l’agglomération stéphanoise.

### 3.6. Surveillance de l’ouvrage

L’ouvrage est surveillé et entretenu par l’Exploitant.

### 3.7. Aléas naturels

Comme pour le Gouffre d’Enfer, le site se caractérise par :

- Une sous-estimation connue des débits de crues ;
- Des périodes de gel sévère et de neige (site en altitude) ;
- Des risques d’impacts de foudre élevés,
- Des risques de feu de forêt.

## 4. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES RISQUES POUR CES DEUX BARRAGES

### 4.1. Méthodologie utilisée

Dans les deux études, la sûreté de fonctionnement a été modélisée par la méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs effets) puis une représentation des scénarios de défaillance et de rupture par la méthode des Arbres d’Evènements.

La gravité de chaque mode de défaillance par rapport aux enjeux identifiés est ensuite évaluée selon 4 niveaux de gravité définis ci-après.

| Classe | Niveau   | Description                                                                |
|--------|----------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Mineur   | Défaillance ayant un impact faible sur l’environnement                     |
| 2      | Marginal | Défaillance ayant un impact faible sur les biens                           |
| 3      | Sérieux  | Défaillance ayant un impact fort sur les biens                             |
| 4      | Majeur   | Défaillance qui génère potentiellement une atteinte à la vie des personnes |

Figure 13 : Classes de gravité

Certains modes de défaillance sont probabilisables. Lorsque cela ne peut être le cas, l’attribution de probabilités d’occurrence est réalisée à l’aide de relations disponibles dans la littérature permettant de traduire un jugement d’expert en termes quantitatif de probabilité, telles que celle présentée dans la figure suivante :

| Appréciation experte de la probabilité d'occurrence | Appréciation Qualitative correspondante                                                                                                                                                      | Niveau de fréquence |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Extrêmement peu probable                            | N'est pas possible au vue des connaissances actuelles mais non rencontrées au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installation                                                | 1                   |
| Très peu probable                                   | S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures réduisant significativement sa probabilité                                                                      | 2                   |
| Peu probable                                        | S'est déjà produit dans le secteur d'activité au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité | 3                   |
| Moyennement Probable                                | S'est déjà produit et ou peut se reproduire, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité                     | 4                   |
| Probable                                            | S'est déjà produit et / ou peut se reproduire pendant la durée de vie de l'ouvrage                                                                                                           | 5                   |
| Très probable                                       | S'est déjà produit et / ou peut se reproduire pendant la durée de vie de l'ouvrage malgré des mesures correctrices                                                                           | 6                   |

Figure 14 : Définition des niveaux de fréquence

Les probabilités d'occurrence et les niveaux de gravité associés aux différents modes de défaillance sont ensuite regroupés dans une grille de criticité, permettant de fournir un indice de risque.

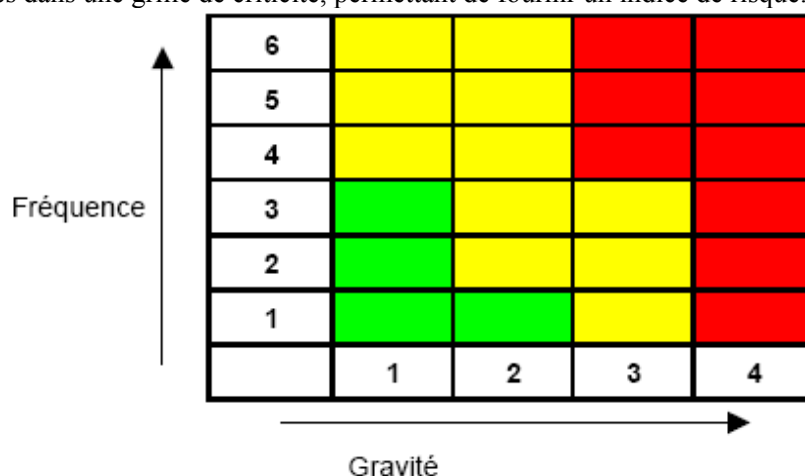


Figure 15 : Exemple de grille de criticité

Cette grille permet ainsi de hiérarchiser facilement les modes de défaillance en fonction de leur criticité. Ce classement permet de mettre en évidence les points faibles du barrage en termes de sûreté de fonctionnement. En synthèse, les différents scénarios d'accident sont positionnés les uns par rapport aux autres en fonction de leur vraisemblance et de l'importance des conséquences, en mettant en évidence les scénarios les plus critiques.

#### 4.2. Barrage du Gouffre d'Enfer

Les caractéristiques du barrage et l'analyse fonctionnelle interne menée ont amené à étudier les scénarii de défaillance suivants :

- Scénario n°1 : Augmentation des pressions interstitielles / Sollicitations hydrostatiques excessives.
- Scénario n°2 : Perte de la capacité de drainage
- Scénario n°3 : Glissement du barrage et/ou de la fondation sous sollicitation sismique.
- Scénario n°4 : Défaillance de l'évacuateur des crues.
- Scénario n°5 : Sollicitations hydrauliques excessives (cas de défaillance du Pas du Riot).
- Scénario n°6 : Défaillance de l'ouvrage de vidange.
- Scénario n° 7 : Défaillance de la fondation de l'ouvrage (Poinçonnement ou perte de la capacité portante, Tassement excessif).

Les résultats obtenus peuvent être synthétisés à travers le tableau ci-après.

| Description                                                                                  | Gravité | Fréquence | Classement |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------|------------|
| <b>Augmentation des pressions interstitielles / Sollicitations hydrostatiques excessives</b> | 3       | 1         | B          |
| <b>Perte de la capacité drainante</b>                                                        |         |           |            |
| Défaillance du drainage                                                                      | 2       | 5         | B          |
| Fissures liées à la défaillance                                                              | 3       | 4         | C          |
| Lachure liées à la défaillance                                                               | 2       | 2-4       | B          |
| Rupture liée à la défaillance                                                                | 4       | 1         | B          |
| <b>Glissement du barrage et/ou de la fondation sous sollicitation sismique</b>               | 3       | 1         | B          |
| <b>Défaillance du système d'évacuation des crues</b>                                         |         |           |            |
| Obstruction de l'évacuateur de crues                                                         | 2       | 6         | B          |
| Fissures liées à la défaillance                                                              | 2       | 3         | B          |
| Lachure liées à la défaillance                                                               | 3       | 4         | C          |
| Rupture liée à la défaillance                                                                | 4       | 1-4       | A-C        |
| <b>Sollicitations hydrauliques excessives</b>                                                |         |           |            |
| Rupture du Pas du Riot entraînant la rupture directe du Gouffre d'Enfer                      | 4       | 5         | C          |
| <b>Défaillance de l'ouvrage de vidange</b>                                                   |         |           |            |
| Défaillance de l'ouvrage de vidange                                                          | 2       | 6         | B          |
| Fissures liées à la défaillance                                                              | 2       | 5         | B          |
| Lachure liées à la défaillance                                                               | 2       | 3-5       | B          |
| Rupture liée à la défaillance                                                                | 4       | 1-4       | C          |
| <b>Défaillance de la fondation / Poissonnement / perte de capacité portante</b>              |         |           |            |
| Perte de la capacité portante                                                                | 3       | 5         | C          |
| Lachure liées à la défaillance                                                               | 2       | 3         | B          |
| Instabilité de l'ouvrage liée à la défaillance                                               | 3       | 3         | B          |
| Rupture liée à la défaillance                                                                | 4       | 2-3       | C          |

#### 4.3. Barrage du Pas du Riot

Les résultats obtenus pour le barrage du Pas du Riot peuvent être synthétisés à travers le tableau ci-après.

| Description                                                                                  | Gravité | Fréquence | Classement |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------|------------|
| <b>Augmentation des pressions interstitielles / Sollicitations hydrostatiques excessives</b> |         |           |            |
| Fissures liée à la défaillance                                                               | 3       | 2         | B          |
| Lachures d'eau liée à la défaillance                                                         | 3       | 2         | B          |
| Rupture du corps du barrage                                                                  | 4       | 1         | C          |
| <b>Perte de la capacité drainante</b>                                                        |         |           |            |
| Perte du drainage par colmatage                                                              | 2       | 3         | B          |
| Augmentation des sous-pressions                                                              | 3       | 4         | B          |
| Rupture liée à la défaillance du drainage de fondation                                       | 2       | 4         | C          |
| <b>Défaillance de la fondation / Poiconnement / perte de capacité portante</b>               |         |           |            |
| Rupture liée à la défaillance                                                                | 4       | 1         | C          |
| <b>Défaillance du système d'évacuation des crues</b>                                         |         |           |            |
| Lachures d'eau liée à la défaillance                                                         | 2       | 2         | B          |
| Augmentation incontrôlée pouvant mener à la rupture de l'ouvrage                             | 3       | 4         | C          |
| <b>Défaillance de l'ouvrage de vidange</b>                                                   |         |           |            |
| Défaillance de l'ouvrage de vidange                                                          | 2       | 3-4       | B          |

On retrouve bien dans ce tableau de synthèse les principales pathologies rencontrées sur le barrage du Pas du Riot : sous-pressions trop élevées, manque de drainage, sous-dimensionnement de l'évacuateur de crues.

## 5. CONCLUSIONS

Lors de la rédaction du présent article, les études de dangers des barrages du Gouffre d’Enfer et du Pas du Riot étaient en cours de finalisation avant leur transmission officielle aux services de l’Etat. Elles ne sont donc pas achevées.

Il en ressort néanmoins quelques points importants à signaler :

- La sûreté de fonctionnement du barrage du Gouffre d’Enfer dépend principalement de la sûreté de fonctionnement du barrage du Pas du Riot. Or la sécurité de celui-ci est aujourd’hui mise à mal par des sous-pressions trop élevées et un sous-dimensionnement de l'évacuateur de crues.
- La réduction des risques sur le barrage du Gouffre d’Enfer passe alors par la réduction des risques sur le barrage du Pas du Riot. Cela sera bientôt chose faite par la réalisation d’importants travaux de confortement sur ce dernier.
- Ces travaux de confortement amèneront à une évolution des conclusions de l’étude de dangers du Pas du Riot et de l’étude de dangers du Gouffre d’Enfer.
- Ce lien montre par ailleurs qu’il était indispensable de parfaitement connaître l’état du barrage du Pas du Riot pour mener l’étude de danger du barrage du Gouffre d’Enfer.
- Fort de ce lien et des nombreuses similitudes existantes entre ces deux barrages (conception, environnement, ...), il était intéressant pour les deux maîtres d’Ouvrages de faire réaliser les deux études de dangers par le même prestataire, bien que cela n’ait pas été prévu initialement. Une telle organisation permet d’optimiser la connaissance de l’environnement de ces ouvrages, les risques liés à l’ouvrage amont, les conséquences des dysfonctionnements à l’aval. C’est pourquoi, il semble judicieux de regrouper les études de dangers de barrages ayant de telles similitudes, même quand les Maîtres d’Ouvrages sont différents. Il est alors recommandé de mettre en place des groupements de commande, permis par le Code des Marchés Publics.

- Concernant l’étude de dangers du barrage du Pas du Riot, celle-ci a été menée peu après le diagnostic de sûreté et en parallèle des études de conception des travaux de réhabilitation. Les conditions de stabilité et de fonctionnement des organes de l’ouvrage, en particulier son évacuateur de crues, ont été parfaitement appréhendées dans le cadre du diagnostic. Les mesures à prendre ont été définies dans le cadre d’une mission de maîtrise d’œuvre. Dans ce contexte particulier, il convient d’admettre que les apports de l’étude de dangers ont été mineurs, la décision de la mise en révision spéciale ayant été prise avant le démarrage de l’étude de dangers. Celle-ci n’a donc finalement, pour le moment, qu’un simple objectif de répondre à une obligation réglementaire. On peut donc s’interroger sur l’enchaînement des différentes études dans un contexte où la révision spéciale est déjà actée.

---

## RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES PREMIERES ETUDES DE DANGERS DES AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES DE LA CNR ET LA SHEM

**Bernard BARTHELEMY, Jacques DE SAINT SEINE**

Compagnie Nationale du Rhône  
2 Rue A.Bonin, 69316 LYON Cedex 04  
[b.barthelemy@cnr.tm.fr](mailto:b.barthelemy@cnr.tm.fr), [j.desaintseine@cnr.tm.fr](mailto:j.desaintseine@cnr.tm.fr)

**Eric DOMPS, Claire BERNARD**

SHEM  
1 Rue Louis Renault, BP 13383, 31133 BALMA Cedex  
[eric.domps@shem.fr](mailto:eric.domps@shem.fr), [claire.bernard@shem.fr](mailto:claire.bernard@shem.fr)

### MOTS CLES

Barrage, hydroélectricité, sûreté hydraulique, sécurité, risques, criticité, méthodologie.

### RESUME

*La CNR a construit et exploite 18 aménagements hydroélectriques de basse et moyenne chute construits de 1949 à 1987 entre la frontière Suisse et la mer Méditerranée. Dans le cadre de l'application de la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques, la CNR a proposé un programme de réalisation d'études de dangers pour les 18 aménagements, dont elle a la responsabilité. Ce programme s'étend de 2008 à 2014. Il a conduit en premier lieu, pour 2008-2009, à la réalisation des dossiers relatifs aux aménagements de Donzère-Mondragon et de Génissiat, puis pour 2010 à ceux de Belley, Péage de Roussillon et Montélimar, 5 autres étant en cours en 2011.*

*L'organisation de la réalisation de ces études s'est faite dans la perspective de s'approprier la méthodologie et la démarche d'élaboration, en vue de la réalisation des études restantes et de leur renouvellement périodique.*

*La SHEM a construit et exploite 52 aménagements hydroélectriques de haute, moyenne et basse chute construits entre 1902 et 2008 dans les Pyrénées et le Massif Central, dont 9 barrages de type A et 2 de type B selon la nouvelle réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques. Dans le cadre de l'application de cette nouvelle réglementation, la SHEM a proposé un programme de réalisation d'études de danger pour ces 11 aménagements. Ce programme s'étale de 2008 à 2013. Il a conduit en premier lieu, à la réalisation des dossiers relatifs aux aménagements des Marèges, Petite Rhue et Grande Rhue.*

*Pour ce faire, la SHEM, en collaboration avec l'INERIS, a construit une méthodologie pour la réalisation de ces études.*

*Après avoir rappelé la méthodologie développée par les 2 entreprises, l'article présente les retours d'expérience, du point de vue de chaque concessionnaire, sur les premières études réalisées et souligne quelques problèmes spécifiques rencontrés.*

## **1. PREAMBULE**

Le présent article, après avoir rappelé la méthodologie développée par la SHER et la CNR, présente les retours d'expérience, du point de vue de ces concessionnaires.

Malgré les différences de taille, d'organisation et les distinctions notables dans les caractéristiques des parcs d'ouvrages qu'elles exploitent, il est intéressant de noter que des études de dangers portées par ces 2 structures ont abouti à des constats en termes de difficultés et de bénéfices similaires.

## **2. INTRODUCTION**

Concessionnaire du Rhône et producteur indépendant d'électricité, la CNR aménage et exploite le fleuve depuis 1934 selon la triple mission que lui a confiée l'Etat : produire de l'hydroélectricité, développer la navigation et favoriser l'irrigation et autres usages agricoles.

Dans ce cadre, elle aménage le Rhône de centrales hydroélectriques, barrages, écluses, stations de pompage ; ouvre un axe fluvio-maritime entre Lyon et la Méditerranée et réalise des zones industrielles et portuaires complétées d'infrastructures dédiées à la plaisance et aux loisirs.

Acteur majeur du marché de l'énergie depuis sa libéralisation en 2001, la CNR est aujourd'hui le 2<sup>ème</sup> producteur français d'électricité et le 1<sup>er</sup> d'énergie exclusivement renouvelable avec un mix hydraulique, éolien et photovoltaïque développé en et hors vallée du Rhône.

Les recettes issues de la vente de son énergie lui permettent de mener ses missions de concessionnaire, des missions d'intérêt général en faveur de la communauté rhodanienne et une stratégie industrielle ambitieuse fondée sur l'entretien et le développement de sa production.

La Compagnie Nationale du Rhône s'appuie sur ce modèle économique singulier baptisé modèle Rhône, pour inscrire son action dans une perspective à long terme, dans une logique de développement durable.

18 aménagements sont implantés sur le Rhône depuis la frontière suisse jusqu'à la mer (voir **schéma 1**). Les mises en service se sont étalées sur une quarantaine d'années, entre 1948 (Génissiat) et 1986 (Sault-Brénaz).

La CNR, exploite un parc industriel performant qui se compose de :

- 19 barrages,
- 19 usines hydroélectriques,
- 8 petites centrales hydroélectriques (dont 3 dans la vallée du Rhône),
- 7 mini-centrales hydrauliques
- 14 écluses à grand gabarit,
- 3 écluses de plaisance,
- 400 km de digues,
- 32 stations de relevage,
- 29 sites industriels et portuaires,
- 13 parcs éoliens (dont 5 dans la vallée du Rhône),
- 2 centrales photovoltaïques.



*Schéma 1 : Implantation des sites CNR*

La société hydroélectrique du Midi (SHEM) est une entreprise française productrice d'électricité, filiale de GDF-SUEZ au sein de la Branche Energie France. Son siège est situé à Balma (31).

Héritière de l'ancienne compagnie des chemins de fer du Midi créée en 1923, elle exploite, au cœur du grand Sud-Ouest, un outil de production composé de 54 usines hydro-électriques et de 12 barrages. Ces barrages et usines se situent dans la chaîne des Pyrénées (Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Pyrénées-Orientales), le Massif Central (Aveyron, Cantal, Corrèze, Tarn, Tarn-et-Garonne) et la vallée du Lot (voir **schéma 2**). Ils sont coordonnés en 9 groupements (dont 7 dans les Pyrénées et 2 dans le Massif Central).



Schéma 2 : Implantation des sites de la SHEM

La SHEM exploite trois types d'installations : les usines au fil de l'eau, les usines d'éclusées journalières ou hebdomadaires, et les usines de lac (parmi lesquelles on retrouve les usines alimentées par les barrages objets des études de dangers).

Les effectifs de la SHEM (260) sont répartis entre les 9 groupements, l'atelier de Laruns, le siège central à Balma et à Lyon pour les services de Téléconduite.

Les employés des services centraux de Balma (environ 70) sont un appui pour les exploitants sur site. 35 personnes travaillent dans les domaines techniques en assistance à la maîtrise d'ouvrage, comme en maîtrise d'œuvre.

### 3. PRISE EN MAIN DES ETUDES DE DANGERS

La parution le 11 décembre 2007 du décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 *relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques* a introduit l'obligation de réaliser des études de dangers pour tout barrage de classe A ou B et digue de classe A, B ou C. Les études de dangers constituent alors une nouveauté dans le domaine de l'hydraulique que les acteurs de ce domaine devaient préalablement assimiler.

La parution 6 mois après de l'arrêté du 12 juin 2008 *définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues en définissant le contenu*, a apporté un premier éclairage sur le travail à engager et les exigences de la réglementation. Avec la circulaire du 31 octobre *relative aux études de dangers* et son *guide de lecture des études de dangers des barrages* joint, des précisions substantielles ont permis une plus grande compréhension des attentes de l'administration.

En parallèle à la publication de ces textes, la CNR s'est employée à analyser leur contenu afin de s'approprier les attentes et la méthodologie à mettre en œuvre. Pour l'aider dans cette tâche, elle s'est adjoint les services d'une société extérieure rompue à cet exercice dans des domaines différents, domaine

industriel et domaine des infrastructures. La société Aries Management a été choisie pour l'aider dans la compréhension des textes, des attentes, de la méthodologie, des enjeux.

Dès le premier trimestre 2008, la SHEM a choisi de commencer à travailler à l'élaboration d'une méthodologie pour la réalisation de ces études de dangers sur son parc d'ouvrages. Pour cela, elle s'est rapprochée des experts de l'INERIS. Cette association entre des spécialistes de l'analyse de risques dans divers domaines (pétrochimie, transport gazier,...) et des techniciens barragistes de la SHEM a permis d'aboutir, au dernier trimestre 2008, à une méthodologie générale.

La SHEM a choisi de travailler en concertation avec les services de l'état (DREAL et BETCGB) en leur présentant les étapes de cette méthodologie. Chaque étape de cette démarche a été détaillée et explicitée au cours d'une réunion collégiale. Durant cette session de travail en commun, les remarques de l'administration ont été discutées puis, intégrées à la méthodologie proposée par la SHEM.

#### 4. ORGANISATION

A la CNR, après cette première phase de prise de contact avec les études de dangers, une organisation permettant d'engager les premières études a été retenue en s'appuyant sur les principes suivants :

- Portage de la maîtrise d'ouvrage des études de dangers par la direction du patrimoine fluvial et industriel ;
- Appui d'un assistant à maîtrise d'ouvrage extérieur à la CNR, chargé d'apporter un regard critique sur le travail réalisé et d'éviter les dérives par rapport au cahier des charges fixé ;
- Portage de la réalisation des études par la direction de l'ingénierie de la CNR en vue d'une appropriation des méthodes et dans la perspective d'une réalisation plus autonome des études suivantes ;
- Appel à un prestataire extérieur associé à la direction de l'ingénierie apportant la compétence « analyse de risques » ;
- Appui interne du service DG-Risques permettant d'assurer la cohérence transversale avec d'autres approches d'analyse de risques déjà entreprises dans d'autres domaines (navigation par exemple).
- Le logigramme suivant résume l'organisation mise en place pour les premières études (voir schéma 3)

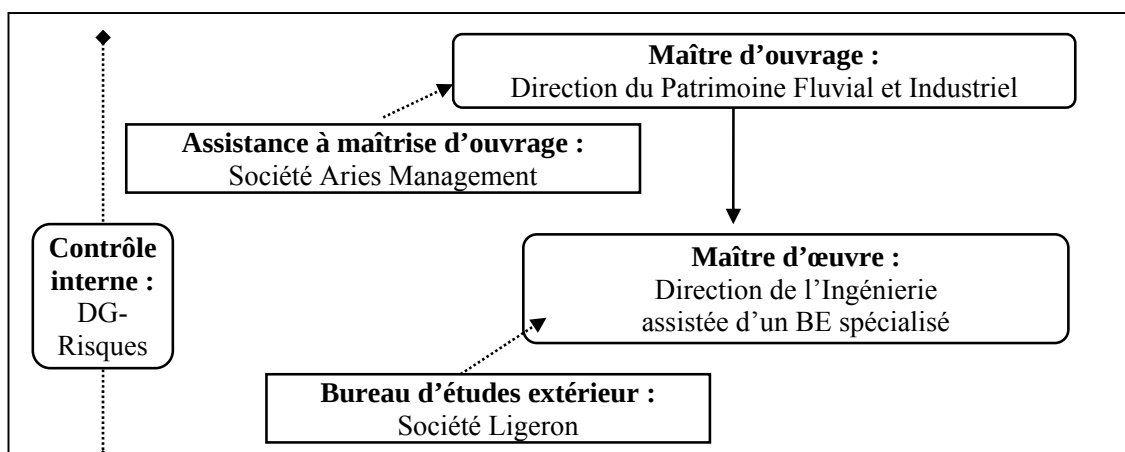


Schéma 3 : Organisation CNR des premières études de dangers

Par la suite, cette organisation s'est modifiée pour y intégrer un Comité de Suivi et de Validation en remplacement du contrôle interne et par l'abandon de l'assistance à maîtrise d'ouvrage, dont la mission ne trouvait sa pleine justification que pendant les premières études.

A la SHEM, les études de danger sont réalisées par le Pôle Sûreté, spécialiste des problématiques sûreté barrage. Cette entité, intégrée au Département de la Stratégie Industrielle, intervient en tant qu'assistant du Maître d'Ouvrage, représenté par la Direction de la Production.

Pour cette mission, le Pôle Sûreté s'appuie :

- Sur les compétences des départements Exploitation (agents d'exploitation en usine et services centraux) et Maintenance et Travaux (en charge de la maîtrise d'œuvre pour des opérations de rénovation et grosse maintenance sur ces ouvrages et matériels),
- Sur une prestation confiée à l'INERIS qui l'assiste en assurant la mise en forme de l'étude de dangers en application de la méthodologie définie et en apportant la compétence « analyse de risque ».

## 5. PERIMETRE DES ETUDES DE DANGERS

La question de la détermination du périmètre des études de dangers des barrages s'est posée très rapidement. Ce périmètre peut varier selon le type d'aménagement.

A la CNR, comme l'illustre le schéma ci-dessous d'un aménagement type, la proximité du barrage, des digues bordant le canal d'amenée, de l'écluse et de l'usine hydroélectrique, leur rôle similaire dans la retenue de la masse d'eau et leur étroite dépendance a conduit à proposer un périmètre étendu à l'ensemble de l'aménagement.



*Schéma 4 : Aménagement type CNR*

Pour autant, chaque ouvrage classé de cet ensemble fait l'objet d'une analyse préliminaire des risques indépendante.

A la SHEM, l'intégralité du parc soumis à EDD est constituée d'ouvrages de montagne. Dans ce type d'aménagement, le barrage est globalement indépendant du reste de l'aménagement (galerie d'amenée, conduite forcée, usine hydroélectrique). La difficulté principale réside dans la définition de la frontière avec les équipements de production au niveau de la prise d'eau usinière.

Pour ses aménagements, la SHEM a retenu comme faisant partie intégrante du périmètre de ces études, les éléments suivants :

- Le barrage lui-même : mur, fondation, appuis,
- La retenue : volume d'eau, fond et berges,
- Les galeries de dérivation jusqu'à l'amont de la vanne,
- Les organes de sécurité : évacuateurs de crue, vidange de fond,
- Les équipements de prise d'eau jusqu'à la vanne de prise (ouvrage d'amenée et usine de production hors du champ d'étude),
- Les équipements de piquage des débits réservés jusqu'à la première vanne d'isolement,
- Les locaux annexes : locaux de commande des vannes et organes cités ci-dessus, les locaux des éventuelles alimentations secours)

Un exemple (voir **schéma 5**) représentatif est celui du barrage de Fabrèges dans la vallée d'Ossau (64) :



*Schéma 5 : Exemple du barrage de Fabrèges*

## 6. PROGRAMMATION DES ETUDES

Le premier programme de réalisation des études de dangers a été établi à la demande de l'administration en juin 2007, soit environ 6 mois avant la publication du décret et un an avant celle de l'arrêté qui précisait le contenu des études. Dans ces conditions, on comprend aisément la difficulté qu'il y avait alors d'appréhender complètement les exigences réglementaires et d'engager concrètement leur réalisation.

Pour la CNR, les critères qui avaient présidé à l'élaboration de ce premier programme étaient :

- De prioriser les aménagements dans lesquels un ouvrage était classé « 70.15 », car à notre sens, ils préfiguraient ceux qui seraient classés en A dans la nouvelle réglementation pour lesquels le délai de réalisation était plus court ;
- D'assurer une répartition géographique aussi équilibrée que possible afin d'atténuer la charge de mobilisation des exploitants internes, mais également celle des services instructeurs de l'administration.

Ainsi, ce programme initial prévoyait la réalisation en 2008 des études de dangers des aménagements de Génissiat sur le haut-Rhône (en amont de Lyon) et de Donzère-Mondragon sur le bas-Rhône (en aval de Lyon), puis celle des autres études à raison d'environ 3 aménagements par an.

Malgré la préparation et les réflexions préalables, les difficultés inhérentes au démarrage et à la mobilisation des équipes, conjuguées aux premiers écueils, ont retardé les premières études qui ont été livrées au tout début de 2010.

Le constat du retard pris dans le déroulement de la première partie du programme projeté a rendu inéluctable son recalage. Après concertation avec l'administration et avec son accord, un second programme a été mis au point dans le respect des exigences réglementaires. En application de celui-ci, les études des 3 aménagements de Belley, Péage de Roussillon et Montélimar ont été livrées en tout début d'année 2011 et celles de 5 autres aménagements entreprises pour une remise en 2011.

Pour la SHEMA, outre le premier planning proposé au STEEGBH, en plus des critères de classement supposé et des échéances programmées pour les Revues Périodiques de Sûreté, le planning de renouvellement de concession a également été pris en compte. Les premières études ont donc concerné des ouvrages classés A et dont la fin de concession était prévu en 2012 comme entre autres le barrage des Bouillouses (RPS en 2009), les barrages de la Vallée d'Ossau (RPS de Fabrèges en 2009) et les barrages SHEMA de la vallée de la Dordogne. Après des échanges avec l'administration, des délais ont été convenus avec le Service de Contrôle.

A ce jour, 8 études ont été rendues : Barrages de :

1. Marèges (19) : 29/05/2009
2. Petite Rhue (15) : 31/12/2009
3. Grande Rhue (15) : 15/03/2010
4. Fabrèges (64) : 25/05/2010
  
5. Bouillouses(66) : 08/10/2010
6. Artouste (64) : 23/02/2011
7. Bious (64) : 06/09/2011
8. Caillaouas (65) : 13/10/2011

Malgré cette entente entre la SHEMA et le Service de Contrôle pour un planning prévisionnel, le respect des délais s'est trouvé être une réelle difficulté, même pour les dernières études, pour lesquelles les équipes de la SHEMA et de l'INERIS possédaient déjà plus d'expérience.

Le programme convenu avec l'administration prévoit encore 2 nouvelles remises d'études avant la fin de 2011 (Barrages de l'Oule-65 et Sainte-Engrâce-64) puis deux autres avant la fin de 2012 (Orédon-65 et Touluch-12).

Ces études doivent être remises à jour tous les dix ans : pour la prochaine échéance, la SHEMA envisage d'avancer les travaux pour certaines études de manière à répartir la charge de travail sur plus de 4 ans.

## **7. DEROULEMENT ET DIFFICULTES RENCONTREES**

L'engagement d'un programme d'études couvrant un spectre aussi large d'ouvrages, d'équipements, de matériels, mais aussi de modes de fonctionnement ne se déroule pas sans difficultés. Nous avons relevé quelques unes de ces difficultés rencontrées par la SHEM et la CNR et qui font l'objet des commentaires ci-dessous.

### **7.1. Quantification des études complémentaires**

Parmi les difficultés rencontrées nous citerons la réalisation des études complémentaires. Celles-ci résultent pour l'essentiel de la réalisation de notes de calcul complémentaires correspondant à des situations mises en exergue par l'étude de dangers et dont la prise en compte ne se justifiait pas lors de la conception. Il s'agit par exemple de la vérification de la résistance d'une digue pour des niveaux situés au-delà de la crue de projet et dont la tenue conditionne le niveau de criticité.

Ces situations, qui ne peuvent être identifiées que lors du déroulement de l'étude, nécessitent d'engager des moyens à un stade parfois avancé des réflexions ; Ces situations sont par nature imprévisibles et difficiles à quantifier en terme de délai, de coût, de mobilisation de compétences.

### **7.2. Mobilisation des participants à l'étude**

Pour les 2 entreprises, les études font appel à la connaissance et à la compétence qu'ont acquises les agents des équipes d'exploitation, des équipes d'ingénierie, des équipes de maintenance, au fil du temps. Elles couvrent une large gamme de compétences et de métiers : conduite des aménagements, électromécanique, contrôle-commande, informatique industrielle, hydraulique, géotechnique, structures, etc. Cette compétence est parfois détenue par un petit nombre de personnes. La sous-traitance en l'occurrence n'est d'aucun secours car cette connaissance est étroitement liée aux ouvrages ou équipements en place.

La mobilisation de ces agents s'est révélée tout à fait déterminante dans la conduite des études. Elle a parfois été une difficulté dans leur avancement. A la SHEM, les compétences techniques de ces agents ont été sollicitées au cours de réunions de travail collectif ou du fait de la petite taille des équipes, au coup par coup en fonction de l'avancée des réflexions. Avec l'expérience acquise des premières études, ces sollicitations pourront gagner en efficacité et en qualité par une meilleure planification et organisation.

Les dernières études entreprises ont montré la forte implication de ces agents.

### **7.3. Coût des études de dangers**

Les coûts initiaux ont été sous estimés, en raison du manque de références dans la conduite et la réalisation de telles études. Cette sous-évaluation tenait également à la difficulté d'appréhender les études complémentaires dont nous avons parlé plus haut et à l'importance des ressources humaines à mettre en œuvre.

### **7.4. Respect des échéances**

La difficulté à respecter les premières échéances fixées a pour première cause les dates tardives de parution des textes réglementaires qui ont suivi le décret 2007-1735. Les interrogations sur le niveau de précisions attendu des études et sur leur importance n'ont en effet été levées qu'à l'issue de la parution de la circulaire du 31 octobre 2008 concernant le guide de lecture.

A la CNR, pour ces premières études, une réflexion générale sur le contenu et les limites des études de dangers a été entreprise notamment sous l'angle juridique sur la portée et les conséquences des études de dangers.

En outre, le délai de réalisation plus important que prévu initialement et conditionné par la complexité de l'étude a nécessité le report des premières échéances. La prise en compte d'un délai plus réaliste a permis par la suite d'en corriger pour une large part les effets négatifs, en mobilisant davantage de moyens humains, en anticipant une partie de la réalisation des études futures, en sous-traitant des parties d'études pour lesquelles la CNR n'apporte pas de plus-value à des prestataires extérieurs. C'est le cas notamment de la vulnérabilité des zones susceptibles d'être noyées.

En outre, une des causes identifiées dans la difficulté de maîtrise des délais de publication des rapports réside également dans le processus de relecture et de validation interne des documents par des acteurs de compétences différentes à différents échelons de responsabilité. Le retour d'expérience sur ce point a conduit la CNR à mettre en œuvre un Comité de Suivi et de Validation de ces études. Ce comité est associé dès le démarrage des études à divers stades de leur avancement, ce qui permet de valider à l'avancement et de faciliter l'approbation finale. La mise en place de ce comité vise à garantir une meilleure maîtrise des délais de production mais également un meilleur partage du contenu des études.

A la SHEMA, la source majeure des retards à ce jour est la combinaison de :

- la taille de l'entreprise et le volume de personnel ayant les compétences pour mener ces études, la sous-traitance n'étant d'aucun secours en l'occurrence, car les compétences et connaissances nécessaires pour mener ces études sont étroitement liées aux ouvrages ou équipements en place
- le volume d'étude qui a dû être engagé immédiatement (renouvellement de concession)

La réactivité nécessaire au suivi de la prestation de l'INERIS (alimentation en données d'entrée, corrections régulières et validations de chaque partie,...) n'est pas optimisée. En effet, les effectifs du Pôle Sûreté restent également très engagés sur l'ensemble des autres sujets sûreté sur lesquels la SHEMA place également une exigence importante (rédaction des Revues Périodiques de Sûreté, montage des projets de recalibrage des évacuateurs de crue, rédaction des consignes réglementaires, suivi de l'auscultation et des projets d'implémentation des dispositifs d'auscultation,...).

## **8. BENEFICES OBTENUS**

Les premières réalisations des études de dangers n'ont pas conduit qu'à des difficultés. On peut mettre au crédit de ces études un certain nombre de points positifs dont nous commentons quelques-uns ci-après.

### **8.1. Mobilisation et implication des équipes**

Incertaine pour les premiers dossiers, la mobilisation et l'implication des équipes se sont manifestées de façon évidente au fil du temps. Après une période d'appropriation des méthodes et des enjeux par les participants, un intérêt manifeste est apparu qui a poussé chacun à apporter sa contribution.

### **8.2. Réappropriation et partage de la connaissance des ouvrages et des aménagements**

L'exercice d'analyse et de recherche d'éléments parfois anciens a conduit à se réapproprier collectivement la connaissance des ouvrages, des équipements et des modes de fonctionnement. Il a donné l'occasion d'une réflexion approfondie collégiale rassemblant les différents métiers autour d'un objectif commun. L'étude de dangers est ainsi apparue comme un élément fédérateur et comme un moyen de transmission et de partage des connaissances entre métiers différents et entre générations différentes.

A la SHEM, parmi les participants, les exploitants sur site ont été particulièrement sollicités. A travers l'étude de dangers, la synthèse des renseignements collectés constitue une source d'information complète et concentrée dans un seul document. Un travail de transmission de ces informations doit être aujourd'hui entrepris par le Pôle Sûreté envers ces agents par la présentation de l'étude de dangers, des éléments qui la constituent et de ses conclusions.

### **8.3.        *Appropriation des EDD comme outil de gestion de la maîtrise des risques***

En rationalisant l'approche de caractérisation et d'identification des risques, l'étude de dangers contribue à donner une cartographie, sinon exhaustive, du moins assez complète des risques adaptés aux enjeux. Cette perception globale par l'exploitant lui permet de considérer l'étude de dangers comme un véritable outil de gestion et de maîtrise des risques.

Pour la SHEM et ses ouvrages plus localisés, ces études ont permis de mettre en évidence, outre les risques de rupture, des risques d'importance bien moindre vis-à-vis des tiers mais qui peuvent aboutir à des incidents vis-à-vis de l'exploitation. Ces scénarios là, étudiés en marge de ces études, ont permis de confronter les opérations de maintenance et surveillance déjà mis en œuvre à la SHEM avec les causes de défaillance des matériels considérés dans ces scénarios.

### **8.4.        *Amélioration de la sûreté hydraulique***

L'étude de dangers constitue un outil de hiérarchisation des risques. Elle permet d'identifier et de prioriser des actions à mettre en œuvre et de favoriser ainsi l'amélioration continue de la sécurité des ouvrages hydrauliques. Elle a conduit notamment à l'élaboration de procédures nouvelles permettant d'améliorer la sûreté hydraulique.

Concrètement, cet apport se traduit à la SHEM, par exemple, dans les consignes de surveillance qui ont pu être complétées sur certains ouvrages pour améliorer la performance et le niveau de confiance attribué à certaines barrières ou encore dans l'implémentation de la définition de certains essais de vérification du bon fonctionnement des organes de sécurité.

## **9.        QUELQUES ASPECTS JURIDIQUES**

Le déroulement des premières études ont conduit à s'interroger sur quelques points singuliers, dont certains sont présentés ci-dessous, et qui illustrent les limites de l'étude de dangers au-delà desquelles le rédacteur ne peut s'engager seul.

### **9.1.        *Evaluation du risque par le concessionnaire pour les crues supérieures à la crue de projet***

Pour les crues supérieures à la crue de projet, la CNR considère qu'il ne lui appartient pas d'évaluer le risque associé au fonctionnement de ses ouvrages lors du passage de ces crues puisque les ouvrages dont elle a la concession n'ont pas été dimensionnés pour de tels événements. Par contre, et à l'attention du concédant, elle réalise l'analyse hydraulique de la propagation de ces crues et plus particulièrement de la crue décennale, en prenant en compte les ruptures éventuelles des digues de l'aménagement au droit des secteurs de déversement. C'est ensuite au concédant à considérer les risques associés et à juger de leurs acceptabilités.

### **9.2.        *Prise en compte des agressions extérieures***

La prise en compte des agresseurs extérieurs constitue un point particulier des études de dangers auquel le concessionnaire n'a pas nécessairement apporté une réponse satisfaisante.

A titre d'illustration, évoquons des cas rencontrés :

- Une usine chimique voisine du Rhône est classée SEVESO. Les effets d'une explosion susceptible d'apparaître dans cette usine peuvent impacter une digue située dans le périmètre d'influence de cette explosion.
- La probabilité de rupture d'un barrage SDEM a été démontrée comme étant très largement influencée par la probabilité de rupture d'un barrage amont, actuellement exploité par un autre concessionnaire

Comment le concessionnaire d'un ouvrage peut-il appréhender les effets sur son ouvrage qu'il connaît générés par un risque qu'il ne connaît pas ? A contrario, comment l'industriel qui connaît le risque qu'il génère peut-il appréhender ces effets sur un ouvrage qu'il ne connaît pas ? Quel doit être le rôle de l'Administration qui connaît l'un et l'autre dans une telle situation ?

### 9.3. Evolution de la criticité dans le temps

Considérons le cas d'une digue dont la rupture est susceptible de causer des atteintes aux personnes. Dans les limites de ses obligations, le concessionnaire faire la preuve de la maîtrise du risque.

Prenons une situation dans laquelle le croisement de la probabilité et de la gravité conduisent à un risque acceptable. L'urbanisation au delà des digues s'accroît avec le temps, entraînant ainsi un accroissement de la vulnérabilité et de la gravité. La criticité, à probabilité constante, peut ainsi progressivement passer du statut « risque acceptable » au statut « risque intermédiaire », puis au statut « risque inacceptable » (cf. flèche bleue dans **schéma 6** ci-dessous).

Ainsi le concessionnaire peut se retrouver dans une situation où il sera tenu de mettre en œuvre des actions de réduction d'un risque dont l'aggravation ne lui sera pas imputable ?

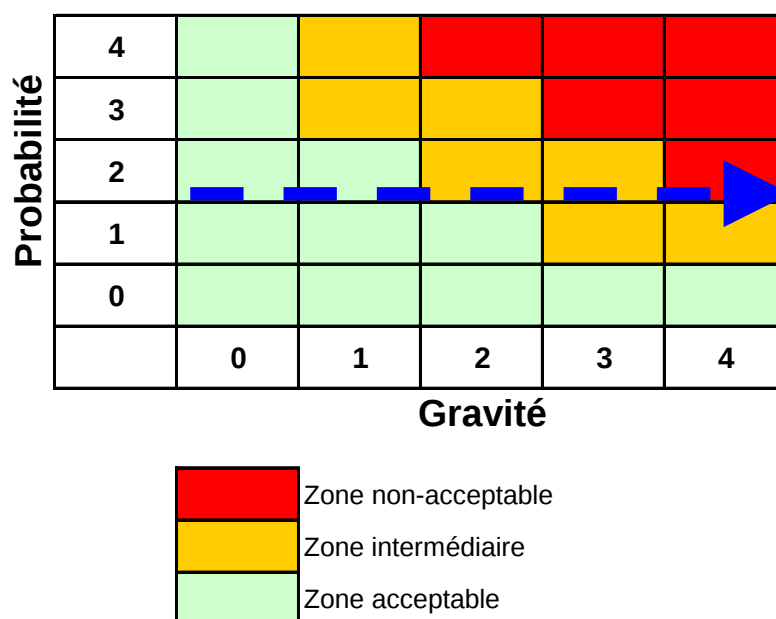


Schéma 6 : Evolution de la criticité

La question est alors posée du partage des responsabilités entre le Concessionnaire, le Concédant, les Collectivités et à s'interroger sur les limites respectives entre deux préoccupations légitimes mais antagonistes : la sécurité publique d'une part, le développement urbain d'autre part.

## 10. BILAN – CONCLUSION

Les premières études de dangers ont conduit la CNR et la SHEMA à découvrir puis traduire les exigences réglementaires et la méthodologie pour y répondre. Au-delà des difficultés de cet exercice, le bénéfice principal qui semble en résulter s'est concrétisé par la réappropriation par l'Exploitant de l'ensemble des risques hiérarchisés des aménagements et par la démarche d'amélioration de la sécurité hydraulique.

Il est intéressant de noter que des études de dangers portées par 2 structures de taille et d'organisation différentes, sur des aménagements de types différents ont abouti à des constats en termes de difficultés et de bénéfices aussi similaires.

A titre indicatif, voici quelques chiffres issus des premiers retours d'expérience de la CNR qui mettent en évidence l'importance du travail accompli.

- Coût moyen d'une étude de dangers dont le périmètre est l'aménagement (cet aménagement comprend en général 3 barrages : un barrage de retenue, un endiguement, un ensemble usine-déchargeur-écluse) : 135 k€ (hors coût du personnel de l'exploitant).
- Nombre de réunions interne pour une étude : 12 (dont 8 avec l'exploitant).
- Nombre de personnes mobilisées pour une étude : 10 à 12.
- Durée de réalisation : 10 à 12 mois.

Pour la SHEMA, de tels chiffres ne sont pas disponibles du fait de la taille de la structure. Toutefois, le nombre approximatif d'heures de travail nécessaires a pu être estimé (personnel SHEMA + INERIS cumulé, sans prendre en compte les études complémentaires, exceptée l'étude pour la définition de l'onde de submersion) en ayant aujourd'hui une expérience établie dans la nature et l'étendue des informations à récolter puis à analyser : on atteint environ 800 h par dossier, soit environ 100 homme-jour.



## EVALUATION DE LA PERTINENCE ET DE L'EXHAUSTIVITE DES ACTIONS DE MAINTENANCE SUR LES BARRIERES DE SECURITE

**Claire Bernard**

SHEM, 1 rue Louis Renault, BP 13 383, 31 133 Balma Cedex  
[claire.bernard@shem.fr](mailto:claire.bernard@shem.fr)

**Eric Doms**

SHEM, 1 rue Louis Renault, BP 13 383, 31 133 Balma Cedex  
[eric.doms@shem.fr](mailto:eric.doms@shem.fr)

### MOTS CLES

Barrage, sûreté hydraulique, maintenance, barrières de sécurité, réduction des risques, arbres de défaillance.

### RÉSUMÉ

*Depuis le début de ses travaux sur la méthodologie des études de dangers barrages en janvier 2009, la SHEM a publié 6 études pour des barrages de classe A.*

*Après avoir rapidement détaillé la méthodologie développée par la SHEM, l'article évoque plus spécifiquement la partie étude de réduction des risques. Notamment, y sont détaillés, les apports de cette méthodologie pour la détermination et l'amélioration de la performance des barrières de sécurité.*

*Les bénéfices de cet exercice en termes d'évaluation de la pertinence et de l'exhaustivité des actions de maintenance sur les barrières de sécurité sont démontrés. Des bilans, sur les organes hydromécaniques de sécurité ou sur les chaînes de transmission des alarmes, ont été dressés au travers d'arbres de défaillance et de synoptiques, mettant en évidence les modes communs de défaillance.*

*En concertation avec les agents en charge de la maintenance de ces éléments de sécurité, des correspondances ont pu être établies entre les pratiques en vigueur sur leurs installations et des compléments à mettre en place. Ces réflexions communes s'inscrivent dans une démarche d'échanges collaboratifs entre les rédacteurs des études de dangers (au niveau des services centraux de la SHEM) et le personnel sur site en charge de la maintenance.*

*A partir de ces travaux d'analyse, des actions de sensibilisation envers les contremaîtres et les chefs d'équipes en charge de la maintenance sur site vont être engagées. L'article décrit les outils qui seront mis entre les mains de ces agents en vue de leur implication dans les processus d'amélioration constante de leurs opérations de contrôle et d'entretien.*

### 1. PREAMBULE

Le présent article, après avoir présenté brièvement la société SHEM et ses travaux pour la rédaction des premières études de dangers, détaille la méthodologie développée, en précisant :

- les apports et bénéfices des étapes d'évaluation de la performance des barrières de sécurité,
- le rôle tout particulier de la maintenance dans les actions immédiates de réduction des risques,
- la nécessité d'une (ré)évaluation de la pertinence et de l'exhaustivité des actions de maintenance sur les barrières de sécurité,
- les actions de sensibilisation des personnels et outil méthodologiques utilisés à la SHEM pour favoriser ces démarches collaboratives de constante amélioration des actions de contrôle et d'entretien sur ces éléments.

## 2. PRESENTATION DE LA SHEM

La société hydroélectrique du Midi (SHEM) est une entreprise française productrice d'électricité, filiale de GDF-SUEZ au sein de la Branche Energie France. Son siège est situé à Balma (31).

Héritière de l'ancienne compagnie des chemins de fer du Midi créée en 1923, elle exploite, au cœur du grand Sud-Ouest, un outil de production composé de 54 usines hydro-électriques et de 12 barrages de classe A et B. Ces barrages et usines se situent dans la chaîne des Pyrénées (Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Pyrénées-Orientales), le Massif Central (Aveyron, Cantal, Corrèze, Tarn, Tarn-et-Garonne) et la vallée du Lot (voir schéma 2). Ils sont coordonnés en 9 groupements (dont 7 dans les Pyrénées et 2 dans le Massif Central).



*Schéma 1 : Implantation des sites de la SHEM*

La SHEM exploite trois types d'installations : les usines au fil de l'eau, les usines d'éclusées journalières ou hebdomadaires, et les usines de lac (parmi lesquelles on retrouve les usines alimentées par les barrages objets des études de dangers).

Les effectifs de la SHEM (260) sont répartis entre les 9 groupements, l'atelier de Laruns, le siège central à Balma et à Lyon pour les services de Téléconduite.

Les employés des services centraux de Balma (environ 70) sont un appui pour les exploitants sur site. 35 personnes travaillent dans les domaines techniques en assistance à la maîtrise d'ouvrage, comme en maîtrise d'œuvre.

## 3. METHODOLOGIE APPLIQUEE POUR LA REDACTION DES PREMIERES ETUDES DE DANGERS A LA SHEM

A partir du premier trimestre de 2008, la SHEM a choisi de commencer à travailler à l'élaboration d'une méthodologie propre. Elle s'est rapprochée pour cela des experts de l'INERIS. Cette association entre des spécialistes de l'analyse de risques dans divers domaines (pétrochimie, transport gazier,...) et des techniciens barragistes de la SHEM a permis d'aboutir, au dernier trimestre 2008, à une méthodologie générale.

Pour la rédaction des études, la SHEM et l'INERIS ont continué à travailler conjointement. Au cours des différentes étapes, le formalisme de l'INERIS et la connaissance des installations des agents de la SHEM a permis d'aboutir à des documents d'étude présentant une démarche argumentée et démonstrative.

### **3.1. Etape de collecte des données d'entrée**

Cette première tâche, très gourmande en temps passé, a été effectuée simultanément par :

- les agents du Pôle Sécurité au siège central (plans, études, notices fournisseur,...)
- les agents en charge de la maintenance et de l'exploitation des ouvrages sur site (plans, notices techniques, registres des ouvrages, registres d'exploitation, mémoire des anciens,...)

La SHEM, après la publication de ses premières études, a pu estimer ce travail à une charge voisine à minima de 50 hommes/jour pour un barrage de classe A.

Compte tenu des réflexions que ces études et analyses ont amenées au cours des séances de travail, la collecte s'est en fait étalée tout au long de la démarche de construction de l'Etude De Dangers.

Les recherches de données et analyse ont porté sur l'ensemble des éléments du périmètre de l'étude, comme sur les éléments de l'environnement de l'ouvrage sujet de l'étude.

Pour les barrages de la SHEM, principalement des lacs de montagne, le périmètre étudié pour ces études comprend notamment :

- la retenue : volume d'eau, fond et berges,
- le barrage en lui-même : structure, fondations et appuis ;
- les ouvrages de génie civil annexes (digue de fermeture...) ;
- les organes de sécurité : évacuateurs de crue, organes de vidange ;
- les éléments de surveillance de l'ouvrage : dispositif d'auscultation ;
- les équipements de l'ouvrage liés à l'exploitation : vannes de prise ;
- les installations annexes à l'ouvrage : locaux de commande des vannes...

L'intégralité des architectures :

- de la chaîne de transmission de l'information de cote ;
- de la chaîne de transmission des alarmes ;
- des alimentations principales et secours pour chacun des organes du barrage et de chaque matériel des chaînes suscitées

... sont décrites et représentées sur des schémas de principe. Ces synoptiques servent de base aux discussions menées dans le cadre de l'analyse de risque.

### **3.2. Etape d'analyse des risques et de définition des potentiels de danger et des accidents majeurs**

Dans le développement de leur méthodologie, l'INERIS et la SHEM ont défini avant les séances d'analyses de risques, les potentiels de dangers communs à tous les ouvrages de la SHEM sur la base de l'accidentologie mondiale et des événements survenus sur les ouvrages SHEM. Ont été identifiés :

- les dangers liés à l'existence de la retenue (libération de tout ou partie du volume de la retenue et/ou lâcher de sédiments accidentel liés à une éventuelle non maîtrise du débit à l'aval ou du niveau amont de la retenue) ;
- dans une moindre mesure, les risques liés à l'utilisation de produits sur des installations annexes aux barrages (ex : produits inflammables éventuellement stockés...)

Ont également été analysées les agressions externes potentielles. Parmi les agresseurs à considérer, une synthèse des données spécifiques disponibles en termes notamment :

- de géologie (topographie du site, stabilité des berges, conditions géologiques des fondations),
- de conditions météorologiques extrêmes,
- de risque avalanche ou de glissement de terrain dans les retenues,
- de crues...

... a permis de caractériser l'environnement de l'ouvrage considéré.

Sur la base de l'ensemble des éléments cités ci-dessus, les séances d'analyse de risque sont menées sous forme de groupe de travail pluridisciplinaire. Sont réunis :

- des exploitants de l'ouvrage étudié,
- des ingénieurs sûreté barrage du siège central de la SHEM,
- des ingénieurs spécialistes des études de risque de l'INERIS,
- des électriciens, spécialistes du contrôle-commande, mécaniciens et génie-civilistes de la SHEM.

En raisonnant par Evénement Redoutés Central (ERC) ou par organe fonctionnel, et pour tous les modes de fonctionnement de l'ouvrage (exploitation normale, en mode dégradé ou en période de crue, en phase de vidange ou de remise en eau, en période de maintenance ou d'opérations de travaux spécifiques), un inventaire exhaustif des séquences accidentelles est constitué.

L'ensemble de ces séquences sont caractérisées par leur terme source au droit du barrage (débit maximum relâché et gradient de débit correspondant). Ainsi, elles peuvent être regroupées selon les Phénomènes Dangereux (PhD) auxquelles elles aboutissent. Pour une représentation plus aisée, des nœuds papillons sont dessinés pour chaque Phénomène Dangereux.

### **3.3. Etape de caractérisation des dangers et des enjeux**

Dans le cadre de la mission confiée par la SHEM à l'INERIS, la comptabilisation des personnes susceptibles de subir les effets des phénomènes dangereux identifiés a été réalisée pour le cas majorant de l'onde de rupture de l'ouvrage. La méthodologie de comptage a été calquée sur les outils utilisés pour le comptage des enjeux pour les études de dangers des Installations Classées (règles disponibles dans les fiches jointes à la Circulaire réf : DPPR/SEI2/CB-06-0388 du 26/12/2006).

Pour la détermination des enjeux économiques et industriels, seules quelques stations de captage d'eau potable ont été identifiées dans l'environnement de nos ouvrages (montagne).

Les quantifications de conséquences des dangers potentiels sont faites sur la base de l'estimation de la cinétique et de l'intensité des effets des Phénomènes Dangereux identifiés par le groupe de travail, lors des séances d'analyses de risque.

Une hiérarchisation de ces PhD est établie en fonction de l'intensité et de la cinétique du terme source. Le Phénomène Dangereux majorant (rupture de l'ouvrage) est modélisé pour déterminer la gravité de ces conséquences. Pour les PhD de terme source inférieur, la gravité est appréciée de manière qualitative.

La méthodologie de détermination des gravités, établie conjointement par la SHEM et l'INERIS, est détaillée dans le document « Méthodologie pour la réalisation des études de dangers des ouvrages hydrauliques de la SHEM », rapport d'étude du 10/02/2009 réf : DRA-09-99524-01048A publié par INERIS [1].

### 3.4. Etape d'évaluation des mesures de réduction des risques (existantes et à mettre en place)

Au stade de la détermination de la probabilité d'occurrence des Phénomènes Dangereux identifiés après l'analyse de risques, l'inventaire des mesures existantes de réduction des risques est dressé. Tous les matériels et les actions (barrières) entrant en jeu dans les fonctions de sécurité suivantes sont étudiés :

- détecter un niveau haut dans le retenue ;
- maîtriser le niveau amont de la retenue.

Au cours des séances d'analyse de risques, l'ensemble des barrières est identifié puis représenté sur les nœuds papillons.

Ces matériels et/ou actions peuvent intervenir :

- soit dans une des deux fonctions citées ci-dessus : la détermination de leur performance est alors réalisée de manière fine selon des critères couramment utilisés pour les Installations Classées ;
- soit dans des séquences accidentelles sans être considérés comme assurant une fonction première de sécurité : la détermination de leur performance est menée proportionnellement à leur implication dans le déroulement d'un scénario accidentel, elle est menée de manière qualitative.

La démarche adoptée pour l'évaluation de la performance des barrières de sécurité mise en œuvre par la SHEM repose sur un raisonnement par **arbre de causes** sur la barrière de sécurité identifiée. L'objectif est de suivre une logique déductive en partant de l'évènement redouté « non réalisation de la fonction de sécurité » pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires.

Cette analyse permet de déterminer les faiblesses du système dans son état actuel. Elle est faite dans le but de proposer des modifications afin d'améliorer la performance de la barrière.

Ces recommandations peuvent être classées selon 2 catégories :

- essentielles et nécessaires pour assurer la performance de la barrière et/ou impliquant une modification des probabilités d'occurrence annuelle et/ou de la gravité des accidents majeurs,
- secondaires, représentant des axes d'amélioration de la sécurité sur le site ou des recommandations générales.

Cette hiérarchisation permet à la SHEM de prioriser ses actions pour améliorer sa maîtrise des risques.

Après cette présentation sommaire des étapes de travail de la SHEM pour la rédaction de ces études de dangers, la partie suivante de cet article présente de manière plus détaillée l'étape d'évaluation de la performance des barrières de sécurité et les bénéfices que la SHEM a tirés de cet exercice.

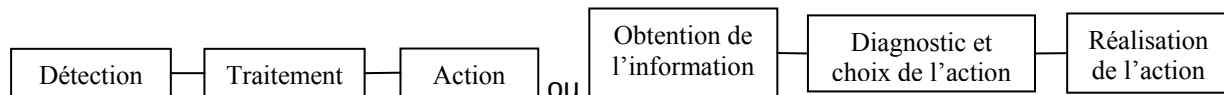
## 4. BENEFICES DE L'ETAPE D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES BARRIERES

D'une réponse à une attente réglementaire : « remettre une étude de dangers pour les barrages de classes A et B », l'exercice de rédaction de ces documents s'est transformé pour les agents de la SHEM, en une réelle interrogation des architectures des systèmes de sécurité en place sur son parc d'ouvrage.

#### 4.1. Présentation détaillée de la démarche d'évaluation

##### 4.1.1. Délimitation du périmètre de la barrière étudiée et découpage en schéma bloc fonctionnel

Parmi l'ensemble des éléments constituant une barrière (technique ou organisationnelle et humaine), il est nécessaire de distinguer les fonctions suivantes :



*Schéma 2 : Schéma générique d'une barrière technique de sécurité (gauche) et d'une barrière humaine de sécurité (droite)*

Pour chacune de ces fonctions, on détaille ensuite les éléments et/ou matériels constitutifs, cf exemple schéma 5 paragraphe 4.2.2 avec un niveau de détail suffisant pour guider les réflexions pour la recherche des défaillances de la barrière. Dans la suite du document, seules les barrières techniques seront mentionnées.

Pour une chaîne mécanique, le détail minimal est le sous-ensemble cinématique. Pour une chaîne d'éléments électriques, les schémas blocs dans les études de dangers de la SHEM détaillent chaque fonction électrotechnique.

##### 4.1.2. Détermination de l'arbre de défaillance

A partir du schéma bloc fonctionnel, l'arbre de défaillance de la barrière est dessiné. Il s'agit de représenter toutes les causes de non-réalisation de la fonction de sécurité, en répondant à la question : « qu'est-ce qui empêcherait la réalisation de cette fonction ? ». De manière plus concrète, sur un évacuateur de crue vanné, la question serait « qu'est-ce qui empêcherait l'ouverture de cet organe ? ». Toute la difficulté de l'exercice réside dans le recensement exhaustif des causes. Pour être le plus complet possible pour ces analyses, des séances de travail successives entre des agents de différents services sont menées : un triple regard enrichit la liste des causes élémentaires :

1. un arbre de défaillance premier jet est produit par les ingénieurs sûreté du siège en charge de la rédaction des EDD sur la base des explications fournies par les agents en charge de l'exploitant de ces matériels en groupement,
2. puis ce document passe dans les mains des spécialistes mécaniciens ou électriciens qui reprennent l'analyse sur la base des plans, notices techniques et leurs connaissances sur ces types de matériels,
3. enfin, le document revient vers l'exploitant et les ingénieurs sûreté du siège pour prise en compte et uniformisation du degré de détail de ces arbres.

Sur chacune des branches scénario de cet arbre de défaillances, il est intéressant de matérialiser les parades ou mesures (matériels ou actions préventives ou correctives) qu'il existe pour y remédier. Pour chacune de ces actions, l'exercice doit reposer sur :

- une interrogation sur les possibilités réelles de mise en œuvre de ces actions correctives et/ou des matériels dans les conditions du fonctionnement souhaité de la barrière (situation normale ou dégradée) ;
- une vérification que ces actions préventives assurent effectivement un contrôle exhaustif des problématiques de défaillances supposées.

Cette analyse permet de déterminer les faiblesses du système dans son état actuel. Elle a pour but également de proposer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système.

#### 4.1.3. Détermination du niveau de confiance par critères

Pour l'évaluation fine de la performance des barrières, la SHEMA s'est basée sur le guide INERIS Oméga 10 portant sur « l'Evaluation des Performances des Barrières Techniques de Sécurité » [2].

En premier lieu, avant de déterminer la performance de la barrière, il s'agit de s'assurer qu'elle vérifie les critères minimaux :

- indépendance : la barrière doit être indépendante de l'événement initiateur pouvant conduire à son intervention.
- utilisation adaptée à des fonctions de sécurité : conception simple, robustesse...

Lorsque ces conditions sont remplies, l'étude des performances est menée en analysant les 3 critères :

- Efficacité : dans son contexte d'utilisation et pour une durée de fonctionnement définie, on vérifie :

- son adaptation de son dimensionnement,
- sa résistance aux contraintes spécifiques (environnement, conditions d'exploitation...),
- son positionnement,
- son état de vétusté.

- Temps de réponse adapté vis-à-vis de la cinétique du scénario,

- Niveau de confiance : déterminé à partir des critères qualitatifs suivants :

- le concept est-il éprouvé ?
- la chaîne est-elle à sécurité positive/sécurité à manque ?
- existent-ils des tests de fonctionnement ?
- la mise hors service de la barrière est-elle possible ? (interventions intempestives, shuntage volontaire des sécurités)
- tolérance aux anomalies matérielles (principe de redondance).

Les performances ainsi déterminées permettent d'intégrer ou non les barrières existantes dans l'évaluation des probabilités d'occurrence des phénomènes dangereux. Cette démarche permet également de doter au mieux les barrières nouvellement proposées des éléments nécessaires à leur bonne performance.

Parmi les critères cités ci-dessus, sur le parc des ouvrages SHEMA déjà étudiés dans le cadre des EDD, les recommandations ont porté principalement sur la mise en sécurité positive de certaines chaînes et le l'amélioration des tests de fonctionnement.

## 4.2. Mise en application sur deux cas réels

### 4.2.1. Etude d'une chaîne de diffusion des alarmes (niveau haut)

Cette barrière intervient dans la fonction de sécurité « détecter un niveau haut ». Cette barrière peut se découper selon le schéma fonctionnel suivant :

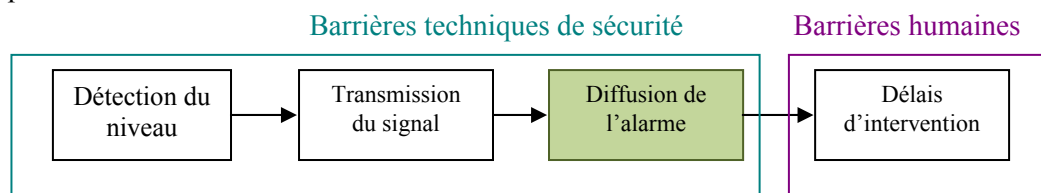


Schéma 3 : Intégration de la partie « diffusion de l'alarme niveau haut » dans la barrière « détecter un niveau haut »

La fonction concernée est la diffusion de l'alarme vers l'agent d'astreinte.

Le détail ci-après présente les éléments fonctionnels de cette chaîne en citant certaines fois les matériels constitutifs de la chaîne.

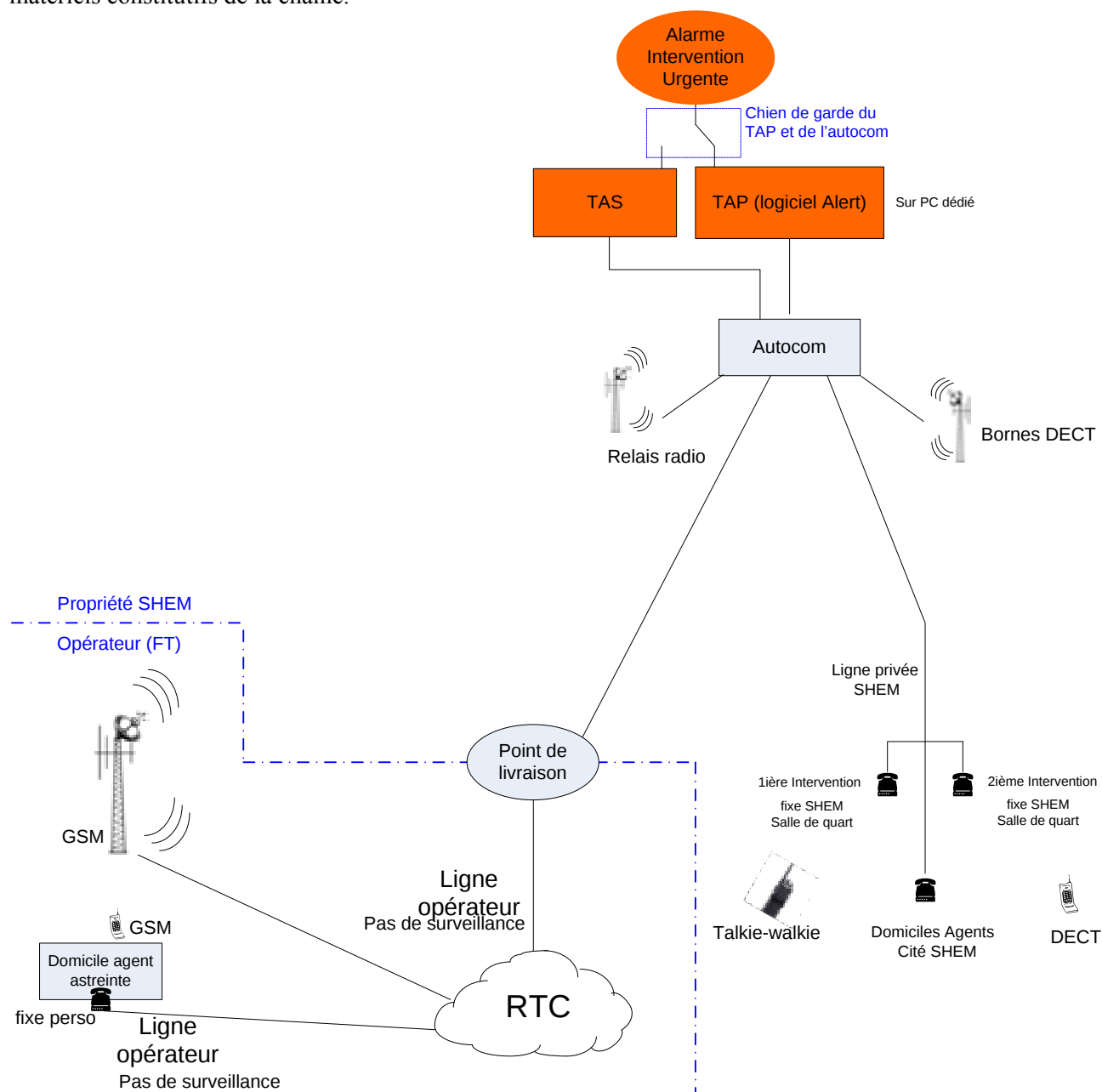


Schéma 4 : Détail des matériels intervenant dans la diffusion des alarmes

Au stade de découpage fonctionnel des matériels intervenants dans la chaîne de transmission des alarmes, il a clairement été identifié un mode commun de défaillance pour cette barrière : en l'occurrence il s'agit de l'autocommutateur. Bien que le système de Transmission d'Alarmes Principal - TAP (un logiciel sur un PC dédié de sécurité) soit équipé d'une boucle de sécurité positive (réalisée par un chien de grade qui garantit un basculement vers le Transmetteur d'Alarmes Secondaire - TAS), un dysfonctionnement de l'autocom entraînerait une absence totale d'alarme.

Sur cette chaîne, il est à minima nécessaire de retirer ce mode commun de défaillance. Il est possible par exemple de rajouter une liaison directe entre le TAS et un mode sûr de diffusion de l'alarme, tel qu'un relais radio.

Le découpage en éléments fonctionnels met en évidence les zones de convergence des scénarios de défaillances et permet d'en localiser efficacement les modes communs. Dans ce cas un arbre de défaillance, n'a pas été nécessaire pour identifier cette faiblesse. Il permet tout de même de mettre en évidence les scénarios pour lesquels les actions préventives et les tests de fonctionnement sont les seules parades.

#### 4.2.2. Etude d'une vanne évacuateur de crue de surface (vanne secteur, fonctionnement automatique à flotteur)

Cette barrière intervient dans la fonction de sécurité « maîtriser le niveau amont ». Cette barrière peut se découper selon le schéma fonctionnel suivant :

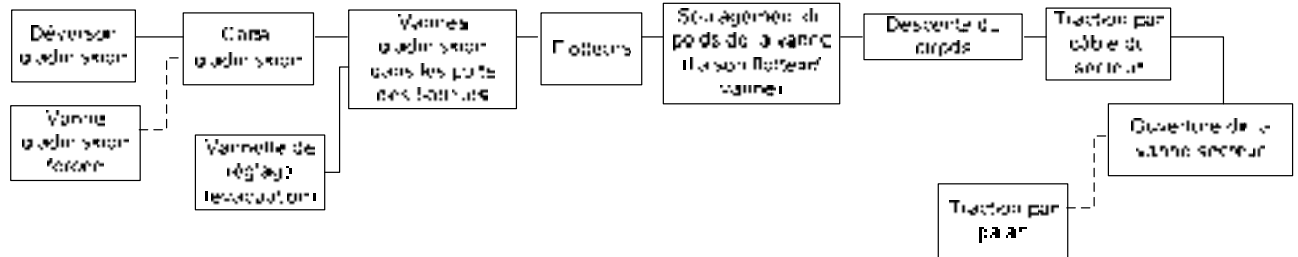


Schéma 5 : Schéma bloc fonctionnel des vannes secteur évacuateurs de crue de surface (dispositif d'ouverture automatique à flotteur)

Cet organe est constitué d'un déversoir équipé de 3 vannes segment automatiques. Les parties métalliques des vannes sont constituées de treillis. Le revêtement des vannes est en bois exotique. L'automatisme chargé d'actionner les vannes fonctionne sur le principe de flotteurs. Chaque vanne dispose de deux flotteurs installés dans les piles adjacentes. Lorsque le niveau amont s'élève au dessus de la RN, les puits des flotteurs sont alimentés par le déversoir avec l'eau de la retenue. La poussée hydrostatique qui en résulte allège la partie treillis de la vanne (vanne en liaison mécanique rigide avec la suspenste du flotteur). L'équilibre avec le contrepoids est rompu, le tablier s'ouvre. Les vannes d'admission dans les puits des flotteurs contrôlent cet équilibre. L'arbre de défaillance suivant a été réalisé pour la non-ouverture d'une des trois vannes secteur (les 3 vannes sont identiques) :

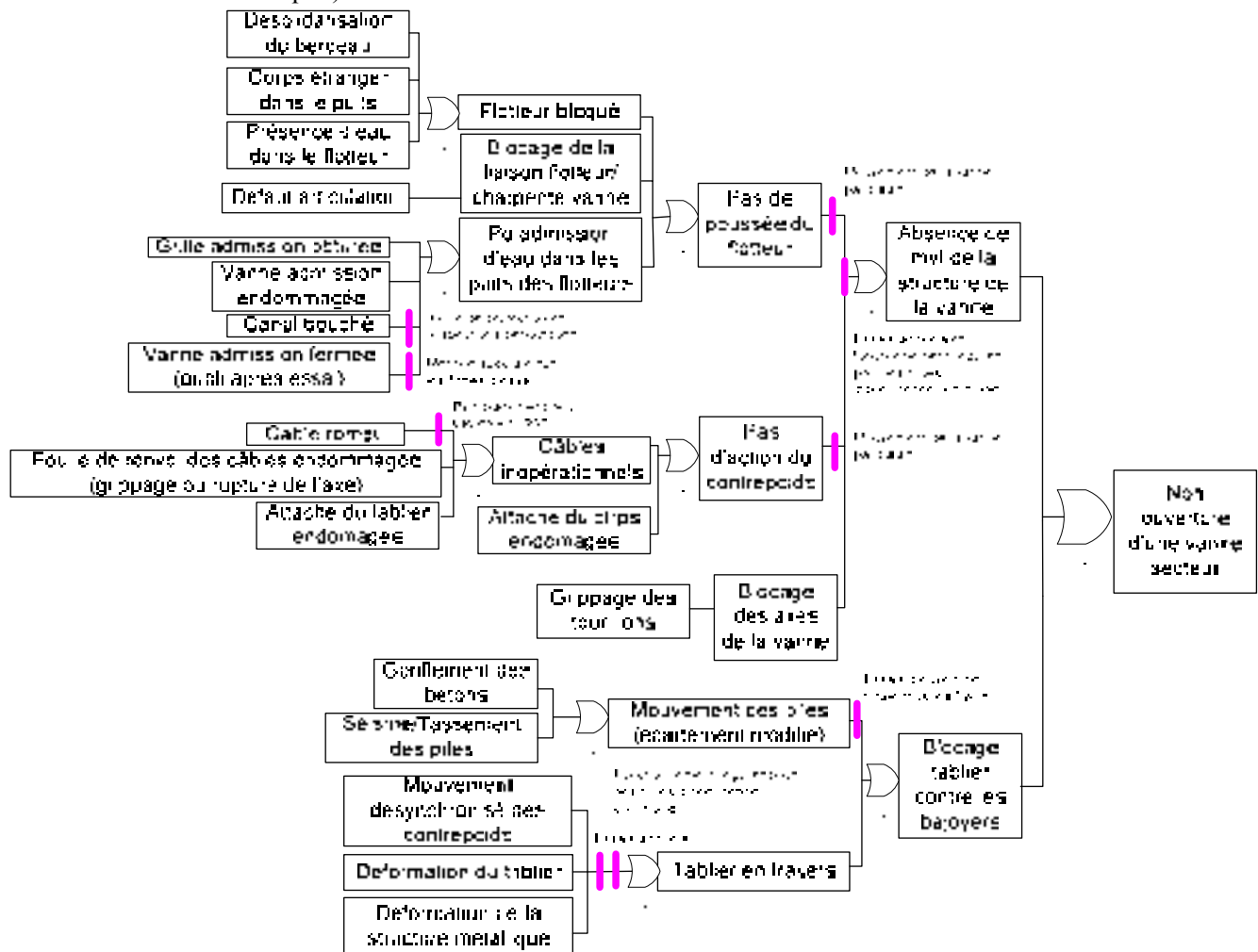


Schéma 6 : Exemple d'arbre de défaillances sur les vannes secteurs évacuateur de crue

Sur cet arbre, il est mis en évidence sur chaque branche correspondant à un scénario, matérialisées en violet, les actions préventives ou correctives qui sont réalisées sur cet organe pour parer à ses défaillances. On peut citer les tests de fonctionnement qui réapparaissent à plusieurs reprises sur différentes branches. On ne peut que rappeler l'importance de la définition des modalités de réalisation de ces tests (contenu, mode opératoire et périodicité).

La représentation sous forme d'arbre permet visuellement et rapidement de s'assurer qu'aucune des branches scénario n'a été laissée de côté quant à l'existence de parades. Elle peut amener à des recommandations quant à la mise en place de nouvelles actions ou nouveaux matériels, comme à des compléments de parades déjà existantes.

Cette démarche est également l'opportunité de réinterroger l'ensemble des conditions de réalisation des essais, des actions de maintenance.

## **5. NECESSITE D'UNE (RE)EVALUATION DE LA PERTINENCE ET DE L'EXHAUSTIVITE DES ACTIONS DE MAINTENANCE SUR LES BARRIERES DE SECURITE**

Dans le cadre de sa politique de maintenance, la SHEM prévoit un objectif d'amélioration constante des plans de maintenance. La démarche de détermination de la performance des barrières de sécurité peut s'inscrire dans cette politique. En effet, ces analyses détaillées pour les organes et éléments de sécurité des barrages sont l'occasion de vérifier l'intégralité du contenu des opérations de maintenance régulière et préventive comme les modalités de réalisation des essais et tests de fonctionnement.

### **5.1. Organisation de la définition et de la traçabilité des opérations de maintenance et des tests de fonctionnement à la SHEM**

Actuellement, la SHEM organise sa maintenance autour de plans de maintenance génériques, détaillés ensuite dans des fiches de maintenance ou d'essai pour chaque organe du barrage et selon les périodicités correspondantes. Le contenu de ces fiches de maintenance et d'essai est composé de modes opératoires et de listing d'opérations impératives. Les résultats des relevés de mesures effectuées durant ces opérations y sont tracés. Ces fiches ont été créées sur la base des bonnes pratiques métier communément réalisées sur les organes du parc SHEM.

Ces actions de maintenance courante, comme les tests de fonctionnement sont réalisées par les agents en charge de l'exploitation et de la maintenance des ouvrages de production. Une première analyse des données est réalisée par l'encadrement du groupement qui vise ces fiches. Le contrôle des paramètres de suivi est réalisé à l'usine par les contremaîtres des domaines respectifs. Les fiches compte-rendu sont ensuite transmises au siège central à Toulouse : les experts des domaines concernés (électriciens, mécaniciens, contrôle-commande et/ou télécommunication), ainsi que les ingénieurs sûreté analysent les résultats en deuxième regard.

Pour les opérations de maintenance plus lourde (souvent définie pour des périodicités pluriannuelles), ces chantiers peuvent être réalisés par les agents de l'atelier de mécanique, les équipes spécialisées des sections électrique et téléphonie de la SHEM. La SHEM a également déjà fait appel à des sociétés spécialisées dans les opérations de grosse maintenance qui possèdent des moyens particuliers pour les travaux de manutention lourde.

Ces opérations de grosse maintenance peuvent être initiées selon les plans de maintenance en vigueur à la SHEM ou suite à des observations issues des campagnes de maintenance courante et/ou de tests de fonctionnement.

|                                                                                   |                      |                                                   |  |                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
|  |                      | <b>Visite et Essais Annuels</b>                   |  | Date de mise à jour :<br><b>24/08/2011</b>                                                                                                                                                                                                                  | Nb Pages :<br><b>1/8</b> |
| Groupement de<br><b>LA CASSAGNE</b>                                               |                      | <b>Retenue et Prise d'eau</b>                     |  | Documents associés : Contrôle de surveillance du barrage (1.54)                                                                                                                                                                                             |                          |
| Barrage des Bousillouses                                                          |                      | Date de la dernière visite : ... / ... / ...      |  | Indisponibilité nécessaire :<br><input type="checkbox"/> Jours <input type="checkbox"/> Jours <input type="checkbox"/> Jours                                                                                                                                |                          |
| M-S-S-H<br>GGT                                                                    | Réglementaire<br>GGT | Intervenant(s) / Date :                           |  | Entretien à réaliser par :<br><input type="checkbox"/> Externe <input type="checkbox"/> Interne <input type="checkbox"/> A (S.E.U.)<br><input type="checkbox"/> B (U.S.) <input type="checkbox"/> C (C.M.S.T.) <input checked="" type="checkbox"/> D (SHEM) |                          |
| Liste du matériel spécifique :                                                    |                      | Valse hydraulique pour les essais des clapets EVC |  |                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |
| Respect de l'Environnement :                                                      |                      |                                                   |  |                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |
| Mesures de sécurité : EPI                                                         |                      |                                                   |  |                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |

**Rappel :** La visite s'effectue indépendamment de l'état de fonctionnement du groupe des Avenilles.

**1050 Organes de vidange**

o Essai vane de vidange

|                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Date : .....<br>Intervenant : .....<br>Cote avant l'essai : ..... heure : .....<br>Cote après l'essai : ..... heure : ..... | Préciser le type d'essai et sa date :<br>Année N-3 : <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 → date : .....<br>Année N-2 : <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 → date : .....<br>Année N-1 : <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 → date : ..... |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

☐ **Essai type 1 : ouverture partielle en charge**

Procédure :

- ☐ ouverture partielle (au 1/10<sup>ème</sup> de l'ouverture totale) de la vane de vidange.
- ☐ fermeture de la vane de vidange.
- ☐ RAS ☐ Anomalie :
- ☐ A la fin des essais, vérifier que l'installation est dans sa position d'origine.

☐ **Essai type 2 : ouverture totale hors charge (à réaliser à maximum 1 fois tous les 3 ans)**

Procédure : Attention pour cet essai le groupe de production doit être à l'arrêt

- ☐ fermeture totale de la vane de pied barrage
- ☐ ouverture totale de la vane de vidange
- ☐ fermeture de la vane de vidange
- ☐ ouverture de la vane de pied barrage.
- ☐ RAS ☐ Anomalie :
- ☐ A la fin des essais, vérifier que l'installation est dans sa position d'origine.

Gratage : ☐ RAS ☐ Insuffisant (dans ce cas là, y remédier)

Bruits éventuels : ☐ Non ☐ Oui (Préciser/ localiser) :

Bloques éventuels ou points durs : ☐ Non ☐ Oui (Préciser et localiser) :

Autres remarques :

☐ Transmettre cette fiche au Pôle Sécurité

| VALIDATION DE LA VISITE |             |                                                                  |                          |                                                     |     | AVE-VA-10-S-G-3       |                                                                  |
|-------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|-----|-----------------------|------------------------------------------------------------------|
| Réalisateur             |             |                                                                  | Vérifier & valider       |                                                     |     | Vice-Président Comité |                                                                  |
| NOM                     | DATE & VELA | Signature                                                        | Signature & date         | Signature & date                                    | NOM | DATE & VELA           | Signature                                                        |
|                         |             | Test <input type="checkbox"/><br>Préval <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> |     |                       | Test <input type="checkbox"/><br>Préval <input type="checkbox"/> |

Figure 1 : Exemple d'une fiche d'essai d'un organe de sécurité sur un barrage de la SHEM

D'autre part, un référentiel d'identification et de définition des Matériels Stratégiques pour la Sûreté Hydraulique a été défini à la SHEM. Il s'agit de tout ouvrage ou matériel qui en cas de défaillance occasionnerait des mouvements d'eau avec pour conséquence un impact sur les personnes, les biens ou l'environnement est identifié comme Matériel Stratégique pour la Sûreté Hydraulique (M-S-S-H) et ce sur l'ensemble de la chaîne des ouvrages hydroélectriques, depuis le barrage jusqu'aux ouvrages de restitution.

Sur chacune des fiches de maintenance, les opérations correspondant à des entretiens ou tests sur des MSSH sont matérialisés pour que les exploitants y accordent une priorité. Dans leurs objectifs annuels, les chefs de groupement sont tenus de réaliser 100% des actions de maintenance sur les MSSH.

## 5.2. *Vérification et interrogation des fiches de maintenance*

Suite à la démarche décrite dans les paragraphes précédents pour la détermination de la performance des barrières de sécurité, la nécessité d'une interrogation de la maintenance courante et des modalités d'essai s'impose. Les opérations de maintenance préventive comme les tests de fonctionnement apparaissent souvent sur les arbres de défaillances de ces barrières comme **les seules parades de confiance** pour s'assurer du fonctionnement correct et de la fiabilité des matériels considérés.

Dans cet objectif, la SHEM a entamé une révision des contenus de ses trames de visites, d'actions d'entretien et des tests de fonctionnement.

Il s'agit de vérifier la correspondance effective entre la nature, la périodicité et les conditions des opérations de maintenance et /ou tests prévus dans ces fiches avec les défaillances qui doivent être évitées.

A ce jour, les principaux apports au contenu de ces fiches ont été menés au coup par coup suite aux recommandations émises dans le cadre des études de dangers. Elles concernent essentiellement :

- des actions de mesures d'épaisseurs sur certains organes difficilement visitables ;
- des tests simples sur les chaînes d'alarmes (perte de l'information de cote, dysfonctionnement d'éléments sur la chaîne) ;
- des compléments d'enregistrement de paramètres physiques en continu au cours de manœuvres d'organes de sécurité...

Pour systématiser ces améliorations, la SHEM s'apprête à engager les analyses des modes de défaillances pour chacune des barrières et des éléments constitutifs de ces barrières. L'objectif final de cette démarche est de pouvoir s'assurer de l'exhaustivité et de la pertinence de ces fiches de maintenance ainsi que des actions d'entretien de périodicité pluriannuelle (grosse maintenance). Ce travail s'inscrit dans une volonté continue d'amélioration et de réduction des risques.

## 6. **ACTIONS DE SENSIBILISATION DES PERSONNELS ET OUTILS METHODOLOGIQUES EN PREPARATION A LA SHEM**

### 6.1. *Une démarche d'expertise et de sensibilisation auprès des personnels en charge de la maintenance et des essais*

Lorsque la mise en place de cette démarche de réinterrogation du contenu des fiches de maintenance et d'essai s'est imposée, il a fallu déterminer quels seraient les personnels qui allaient être chargés de cette mission et à quel moment ces travaux allaient être menés.

Pour la SHEM, il est nécessaire d'avoir parmi ces agents, des spécialistes des domaines mécanique, électrique, et du contrôle-commande selon les barrières étudiées pour amener l'expertise nécessaire avec le niveau de détail attendu. Les chargés d'affaires du siège central feront alors partie de ces équipes.

Les agents en charge de ces actions de maintenance et des tests de fonctionnement doivent également être intégrés dans cette démarche. En effet, leur bonne compréhension des fonctions de sécurité est le premier gage pour une réalisation optimale des opérations qu'ils mènent dans le but de fiabiliser le fonctionnement de la barrière.

L'idée est de les associer dès le début des réflexions et recherches de la démarche systématique de création des arbres de défaillances sur ces barrières. Ils peuvent ainsi avoir une attention recentrée sur le rôle de sécurité de la barrière, l'organe ou le matériel est alors considéré avec une attention particulière : cet élément ne fait pas simplement partie de la chaîne d'exploitation ou de production mais il revêt une dimension supplémentaire à maintenir pour garantir la sûreté de l'installation.

L'objectif de faire participer activement les exploitants à ces travaux s'inscrit également dans un souci de maintien du professionnalisme des équipes sur site. Les très nombreux départs à la retraite vont avoir lieu parmi les agents en poste dans les groupements d'usines.

Les situations de compagnonnage entre les agents du groupement en départ ou les experts du siège d'une part et les jeunes embauchés en usine d'autre part, constituent pour ces métiers, les meilleures options de formation. En effet, lorsqu'elles sont possibles, ces situations de travail collaboratif de personnels d'environnement distinct, apportent, une occasion :

- au jeune en apprentissage :
  - o de développer ses connaissances sur les matériels de son groupement,
  - o d'éveiller sa curiosité et ses capacités de diagnostic,
  - o de représenter au sein du groupement, un référent pour les questions concernant les opérations de maintenance courante et les essais ;
- à l'agent sur le départ :
  - o de transmettre ses connaissances et son expérience,
  - o de pérenniser les savoirs des équipes sur sites pour la gestion des situations d'urgence ;
- au chargé d'affaires et experts du siège :
  - o de centraliser, diffuser et faire bénéficier au parc SHEM d'une certaine uniformité des pratiques sur les matériels et organes similaires,
  - o de pouvoir améliorer de manière continue les plans de maintenance mis au point par les équipes du siège,
  - o de créer une situation de communication particulière avec les agents sur site autour d'une problématique métier, et par là-même de mieux appréhender les difficultés et sensibilités des personnels en usine ;
  - o de garantir une certaine qualité des rendus des opérations de maintenance qu'il pourra avoir à analyser dans le cadre des Visites Techniques Approfondies ou autres expertises,...

## **6.2. Outils méthodologiques en préparation**

Pour garantir l'efficacité de ces séances de travail collaboratif, une méthodologie doit être défini et appliquée par les acteurs de la démarche.

Des équipes trinômes constituées d'un chargé d'affaire du siège, d'un agent d'exécution et d'un contremaître auront pour mission de vérifier le contenu des fiches de maintenance et d'essai sur un organe ou un matériel ou encore une chaîne d'éléments particuliers en ayant au préalable bâti son arbre des défaillances.

Cette démarche sera inscrite dans la durée. En effet, il ne s'agit pas d'une démarche de productivité : la qualité des analyses et des rendus en est réellement la finalité première. Ainsi, des objectifs raisonnables seront déterminés pour chaque équipe.

Plusieurs équipes seront constituées dans chaque groupement, par métier principalement. Selon l'effectif du groupement et le parc des organes ou matériels de sécurité à analyser, un maximum de 2 équipes travaillera simultanément.

Un pilote de la démarche, basé au siège central, veillera à respecter un ordre chronologique des matériels et organes à étudier en premier lieu. Cette priorisation aura été défini au préalable en partenariat avec les ingénieurs sûreté du siège. Le but étant de mutualiser au maximum les travaux d'un groupement à l'autre.

L'ordre sera établi en fonction de l'avancement par le pilote, sur les 9 groupements d'usines de la SHEM, selon les objectifs suivants :

- traiter, dans un premier temps, à minima un élément de chacune des barrières communément identifiées dans les études de dangers :
  - o 1 évacuateur de crue,
  - o 1 organe de vidange,
  - o 1 chaîne de détection d'un niveau haut,
  - o 1 chaîne de transmission des informations et des alarmes,
  - o 1 organe de prise ;
- pour une même barrière, plusieurs types de matériels : par exemple : un organe de vidange :
  - o vanne de fond de type papillon,
  - o vanne secteur,
  - o vanne lunettes...
- et en fonction de la nature de leur commande principale et secours : par exemple
  - o commande hydraulique avec groupe motopompe et centrale à huile,
  - o commande électromécanique avec motoréducteur et chaîne d'engrenages,
  - o commande automatique par flotteurs, asservie au niveau d'eau...

Ce pilote coordonnera les échanges possibles entre équipes et groupements et vérifiera la cohérence de l'avancée des travaux. Il aura également en charge la communication transversale des avancées respectives de chaque équipe, dans le but de faire profiter l'intégralité des groupes de travail des apports des analyses des systèmes de caractéristiques voisines. En partant avec des échéances larges pour les premières études (il est difficile d'imaginer de terminer une analyse complète en moins de 3 mois), un réajustement pourra être opéré sur les délais.

Une attention particulière sera accordée à la définition et tests de fonctionnement des chaînes de transmission des alarmes. En effet, il s'agit d'une barrière pour laquelle les tests actuels sont peu tracés et couvrent souvent un périmètre trop limité. Le détail des analyses menées pour ces barrières identifiera les séquences à tester pour s'assurer de toutes les fonctionnalités de surveillance de cette chaîne.

Des points d'arrêt réguliers seront organisés entre les équipes et le pilote pour vérifier l'état d'avancement de la démarche. En fonction de leur progression, les agents seront invités à faire remonter leurs observations quant à la méthodologie appliquée. Leur ressenti sera collecté afin de mettre en place, au besoin et de manière transversale, des moyens (pédagogiques, informatiques,...) d'assistance.

Il pourra même être envisagé, en fonction des retours sur les premières expériences de ces analyses, d'utiliser ces travaux pour alimenter la base des exercices proposés aux agents de la SHEM dans le cadre des examens de vérifications des acquis pour le changement de poste (agent d'exécution vers chef d'équipe puis vers contremaître).

## 7. CONCLUSION

Plus qu'une réponse à une attente réglementaire, l'exercice de rédaction des études de dangers s'est transformé pour les agents de la SHEM, en une réelle interrogation des architectures des systèmes de sécurité en place sur son parc d'ouvrage.

Le travail en amont pour la détermination d'une méthodologie pour la rédaction de ces documents a permis d'en avoir une idée globale avant d'entamer les études techniques et de détail nécessaire à leur publication. Dès cette étape de réflexion avec les agents de l'INERIS, la SHEM a pu apercevoir dans l'exercice imposé de réels apports potentiels pour son métier. Tout au long des séances de travail pour la rédaction de ces dossiers, la SHEM s'est attachée à mettre en place :

- des attitudes systématiques de collecte de l'information auprès de chaque agent,
- des synoptiques et schémas de synthèse et de vulgarisation à tenir à jour pour les sujets relatifs à la transmission des alarmes et de l'information de cote,
- des attitudes interrogatives vis-à-vis des notions de sécurité positive et/ou de redondance pour chaque agent en charge de travaux de rénovation des barrières de sécurité,...

La SHEM, dans un souci d'amélioration constante de sa maîtrise des risques et consciente de l'importance de la qualité des actions de maintenance réalisée en groupement, souhaite développer une démarche de travail collaboratif entre les agents en usine et les experts du siège central. Elle vise à sensibiliser chaque intervenant sur ces barrières de sécurité. La vérification continue de la pertinence et de l'exhaustivité des actions de maintenance ou des tests de fonctionnement représente pour la SHEM une garantie supplémentaire d'une gestion durable et sécuritaire de son parc d'ouvrage.

## REMERCIEMENTS

Pour leur participation collaborative et constructive à la rédaction des premières études de dangers des barrages du parc SHEM ainsi que pour avoir permis le développement de ces réflexions, nous remercions l'ensemble des personnels de la SHEM en charge de la maintenance dans les groupements d'Artouste, de Marèges, du Louron et de La Cassagne. Nous remercions également les agents de la Direction des Risques Accidentels de l'INERIS dont Thibault Balouin et Agnès Vallée pour tous leurs conseils.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] T. Balouin (2009). *Méthodologie pour la réalisation des études de dangers des ouvrages hydrauliques de la SHEM*. Rapport d'études INERIS référencé DRA-09-99524-01048A en date du 10/02/2009.
- [2] Nguyen Thuy LE et Valérie de DIANOUS (2008). *Evaluation des Barrières Techniques de Sécurité - Ω 10*, rapport d'études INERIS référencé DRA-08-95403-01561B en date du 01/09/2008
- [3] *Politique de maintenance de la SHEM*, document interne, 07/2008.
- [4] S. Perez (2011), *Référentiel de Maintenance – Identification des Matériels Stratégiques pour la Sûreté Hydraulique*, document interne, juin 2011.



## **Thème 4**

# **APPORTS ET BILAN DES EDD**





## LES ETUDES SPECIFIQUES DE DANGER (ESD) TUNNELS ROUTIERS / LES EDD BARRAGES

### *Road tunnels/ Dams Safety Analysis Procedures in France*

**Claude. G. Bessière**

INGEROP - 168/172 Bd de Verdun – 92400 Courbevoie – France  
Téléphone : +00 (33) 1 49 04 56 70, Fax : +00 (33) 1 49 04 68 90, Courriel :  
[claude.bessiere@ingerop.com](mailto:claude.bessiere@ingerop.com)

#### **MOTS CLÉS**

Etudes spécifiques de dangers, identification des dangers, gravité et fréquence, choix des événements déclenchants, choix et déroulement de scénarios, préconisations.

#### **ABSTRACT**

*In France, legal prescriptions for road tunnels were deeply modified after the catastrophic fire of march 1999 in the Mont Blanc Tunnel. The owner and the operating team have now to submit a specific “safety file” used as a reference supporting the operation procedures. This file is approved by the local state authority, so giving a renewable authorization for operation for 6 years. The documentation produced takes into account the past 6 years operation period return of experience. The “Specific Danger Study” is the main part of the file. It considers the tunnel as a global system, including vehicles, transported goods, drivers and passengers, the infrastructure and its equipment, the operation team and the public services (people and procedures).*

*For simplification and quantification, at the dangers identification stage, a “gravity – occurrence matrix” is used as an help in the choice of initial event.*

*The analysis has not to be exhaustive, but must illustrate the articulation of the various material, human and organizational factors as well as their interactions. So the study covers not systematically the worse situation but, as it could mask lacks in the frequent risk management, usual cases are also treated. Generally 3 to 4 types of initial events are selected. Developed scenarii include confined conditions impact, human behaviour and safety procedures application.*

#### **RÉSUMÉ**

*La réglementation de la sécurité des tunnels routiers a profondément évolué suite à l'incendie de mars 1999 dans le tunnel du Mont Blanc. Les nouveaux textes prescrivent au maître d'ouvrage et à son exploitant, l'établissement d'un dossier de sécurité constituant une référence, support à l'exploitation. Celui-ci est soumis au Préfet, qui saisira si nécessaire la CNESOR pour avis. Sur cette base l'autorisation d'exploitation est donnée pour une durée de 6 ans. Un nouveau dossier intégrant le retour d'expérience de la période précédente doit être soumis pour son renouvellement.*

*Pièce maîtresse du dossier, l'ESD traite le tunnel comme un système global constitué par les véhicules, leur chargement, le comportement de leurs conducteurs et passagers, l'ouvrage, ses équipements, son environnement, l'exploitant et les services d'intervention et de secours (personnels et procédures). Afin de simplifier et quantifier l'analyse, au stade de l'identification des dangers avant l'étude des scénarios, une représentation du type matrice gravité – occurrence sert d'outil de débroussaillage aidant au choix des événements déclenchants. Ce n'est pas l'exhaustivité qui est visée, mais le caractère instructif quant à l'articulation des différents facteurs matériels et organisationnels et à la façon dont ils interagissent. On ne cherche donc pas systématiquement le contexte le plus défavorable qui pourrait conduire à masquer les défauts de gestion des risques les plus fréquents.*

*Les événements déclenchants sont rarement plus de trois ou quatre.*

*Les scénarios intègrent le développement des phénomènes en milieu confiné, le comportement des usagers et la mise en œuvre des dispositifs et procédures de sécurité.*

## 1. CONTEXTE ET SYNTHESE REGLEMENTAIRE

Les dispositions relatives à la sécurité dans les tunnels routiers, régies par la circulaire interministérielle n° 81-109 du 29 décembre 1981, ont profondément évolué à la suite de l'incendie de mars 1999 dans le tunnel du Mont Blanc qui a fait 38 victimes.

Ce premier sinistre a été suivi en mai 1999 par un accident en période de travaux dans le tunnel autrichien des Tauern, puis en octobre 2001 par un incendie dans le tunnel suisse du Saint-Gothard.

Opinion publique, média, élus et décideurs ont été extrêmement sensibilisés et soucieux de prendre en compte les enjeux de sécurité à tous les stades de la conception et de l'exploitation des tunnels.

Les facteurs de risque sont les véhicules et leur chargement, les caractéristiques de l'infrastructure, la capacité de l'exploitant à bien utiliser les équipements mis à sa disposition, et enfin le comportement des usagers et des services de secours.

Les textes publiés depuis lors sont par ordre chronologique, ce qui montre la fréquence récente des évolutions, alors que rien n'avait bougé pendant 18 ans :

- La circulaire 2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national remplaçant la circulaire précédente. L'instruction technique en annexe 2 à cette circulaire est toujours en vigueur et constitue le référentiel technique ;
- La loi 2002-003 sur la sécurité des infrastructures de transport ;
- La directive européenne 2004/54/CE sur les exigences de sécurité dans les tunnels du réseau routier transeuropéen, ainsi que la loi 2006-10 transposant cette directive en droit français ;
- Le décret 2005-701 sur la sécurité d'ouvrages du réseau routier national (créant la CNESOR – Commission Nationale d'Evaluation de la Sécurité des Ouvrages Routiers) et précisant le contenu d'un Dossier de Sécurité et sa procédure d'instruction) ;
- Le décret 2006 – 1354, qui liste les ouvrages du réseau routier transeuropéen, amende et complète le décret précédent ;
- La circulaire 2006-20, qui abroge la 2000-63, à l'exception de ses annexes.

Ces textes, transcrits dans le code de la voirie routière (articles L.118-1 et suivants) prescrivent au maître d'ouvrage, associé à l'exploitant pour les tunnels en service, l'établissement d'un dossier de sécurité ayant pour objectifs de constituer un dossier de référence en matière de sécurité, support à l'exploitation.

La composition du dossier de sécurité évolue suivant les différentes étapes de la vie de l'ouvrage.

Avant son envoi au Préfet le maître d'ouvrage doit faire intervenir un expert agréé indépendant dont l'avis porte sur l'ensemble du dossier de sécurité et est joint au dossier.

Le maître d'ouvrage prend en compte tout ou partie des conclusions de l'ESD et des remarques de l'Expert, et expose dans un rapport les dispositions qu'il se propose d'adopter.

Les différents volets à inclure dans le dossier de sécurité sont donc les suivants :

- La description de l'ouvrage
- L'étude prévisionnelle du trafic et de l'accidentologie
- L'Etude Spécifique de Danger (ESD)
- L'organisation de l'exploitation
- Le règlement de circulation dans l'ouvrage
- Le plan d'Intervention et de sécurité
- Le dispositif permanent de retour d'expérience
- La liste et l'analyse des incidents et accidents significatifs (pour les ouvrages en service)
- La liste et les enseignements des exercices de sécurité (pour les ouvrages en service)
- Le rapport de l'Expert
- Le rapport du maître d'ouvrage

Ce dossier est soumis au Préfet, qui saisit la CNESOR pour avis s'il le juge nécessaire.

C'est sur cette base que l'autorisation d'exploitation de l'ouvrage est donnée pour une durée de 6 ans.

Pour obtenir le renouvellement de cette autorisation, un nouveau dossier intégrant le retour d'expérience de la période précédente doit être soumis à nouveau.

## **2. LES ETUDES SPECIFIQUES DE DANGERS (ESD)**

Le contenu type de ces études fait l'objet du fascicule 4 du guide méthodologique des dossiers de sécurité, publié par le CETu en septembre 2003.

Pièce maîtresse du dossier de sécurité, l'ESD prend en compte le tunnel comme un système global constitué par les usagers, l'ouvrage lui-même avec ses équipements et son environnement, l'exploitant et les services d'intervention et de secours.

Elle est structurée selon le plan suivant :

- a) présentation du tunnel et de son environnement (se concluant par une analyse du respect des prescriptions de l'Instruction Technique annexée à la circulaire 2000-63) ;
- b) description fonctionnelle du tunnel ;
- c) identification des dangers et choix des scénarios ;
- d) étude de scénarios
- c) synthèse et conclusions

Afin de simplifier l'analyse et de la fonder sur des éléments quantitatifs, il est fait appel, au stade de l'identification des dangers, et donc avant l'étude des scénarios, à une méthode de représentation du type matrice gravité – occurrence, utilisée comme outil de débroussaillage aidant au choix des événements déclenchants retenus pour les études de scénarios.

### **2.1. Classes de gravité**

Les dégâts matériels au tunnel, la gêne au trafic occasionnée par sa remise en état, les destructions de véhicules, ne sont pas inclus dans l'analyse de l'ESD qui considère seulement les conséquences sur la sécurité des personnes, dans le tunnel et dans son environnement.

Les 5 classes de gravité à prendre en compte sont :

- I « mineur ou nul » = dégâts matériels
- II « significatif » = blessés légers
- III « critique » = blessés graves ou > 5 morts
- IV « catastrophique » = > 5 morts, < 50 morts
- V « catastrophe majeure » = > 50 morts.

## 2.2. Classes de fréquence

On utilise généralement 6 classes de fréquence :

- A Très fréquent = temps de retour < 1 an
- B Fréquent = 1 an < temps de retour < 10 ans
- C Occasionnel = 10 ans < temps de retour < 100 ans
- D Rare = 100 ans < temps de retour < 1000 ans
- E Très rare = 1000 ans < temps de retour < 10 000 ans
- F Extrêmement rare = 10 000 ans < temps de retour (le risque d'apparition pendant la vie de l'ouvrage peut être considéré comme nul)

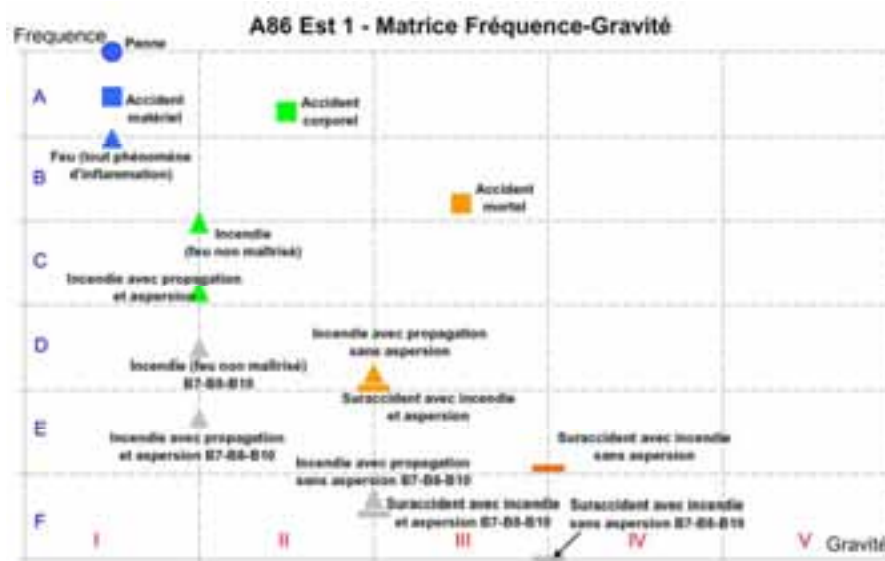
## 2.3. Choix des événements déclenchants

Ils seront rarement plus de trois ou quatre.

Il est conseillé de choisir des événements déclenchants standardisés en particulier en matière d'incendie, suivant la nature du trafic admis dans l'ouvrage, complétés par des événements spécifiques liés aux particularités du tunnel étudié (conditions atmosphériques, fortes déclivités, temps d'accès des services de secours, environnement urbain autoroutier très saturé...).

Les événements sont placés dans une matrice fréquence – gravité.

L'exemple ci-après est tiré des études menées pour le compte de COFIROUTE pour le tunnel concédé de bouclage de l'autoroute A86 à l'ouest de Paris (ce tunnel de 10,2 Km de longueur est réservé aux véhicules légers et comprend un échangeur intermédiaire enterré avec l'autoroute A13).



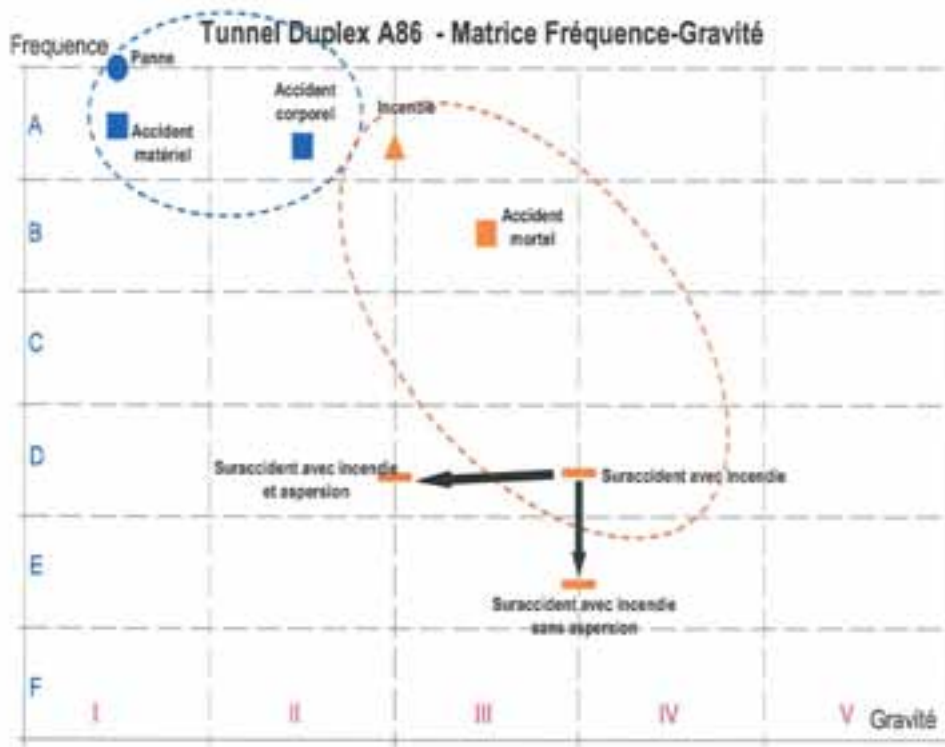
Graphique 1 : Exemple de matrice fréquence – gravité

Pour traiter les événements du type incendie, un système fixe d'aspersion de brouillard a été installé sur ce tunnel. Il a donc été nécessaire de décomposer la famille des événements de type incendie et suraccident avec incendie en deux cas de figure selon que ce système est activé ou non (voir graphique 2) ce qui met en évidence l'apport de ce système.



Graphique 2 : Matrice fréquence – gravité avec mise en évidence de l'apport d'un système additionnel

Au final, la matrice fréquence – gravité retenue est celle du graphique 3.



Graphique 3 : Matrice fréquence – gravité retenue

Cela permet de mettre en évidence des groupes d'événements, l'un concernant des événements « très fréquents » et dont la gravité n'est pas significativement différente de ce qu'elle serait à l'air libre, l'autre regroupant des cas allant de fréquent à rare, dont la gravité est comprise entre « critique » et « catastrophique ».

Dans l'exemple de tunnel présenté les événements déclenchants retenus ont été la panne (le plus fréquent), l'incendie (hypothèse de dimensionnement de l'infrastructure) et le suraccident avec incendie.

### 3. CHOIX ET DEROULEMENT DES SCENARIOS

Ce n'est pas l'exhaustivité qui est visée, mais le caractère instructif quant à l'articulation des différents facteurs matériels et organisationnels participant à la sécurité et à la façon dont ils interagissent. On s'attache notamment à ne pas viser systématiquement le contexte le plus défavorable qui pourrait conduire à masquer les défauts de gestion des risques les plus fréquents.

Face à certains scénarios extrêmes (par exemple explosion à la suite d'un accident ou d'un incendie impliquant une citerne de GPL), on ne peut que constater les conséquences quasi inéluctables. Les actions possibles sont exclusivement du domaine de la prévention (restrictions de circulation, de construction au-dessus du tunnel ...).

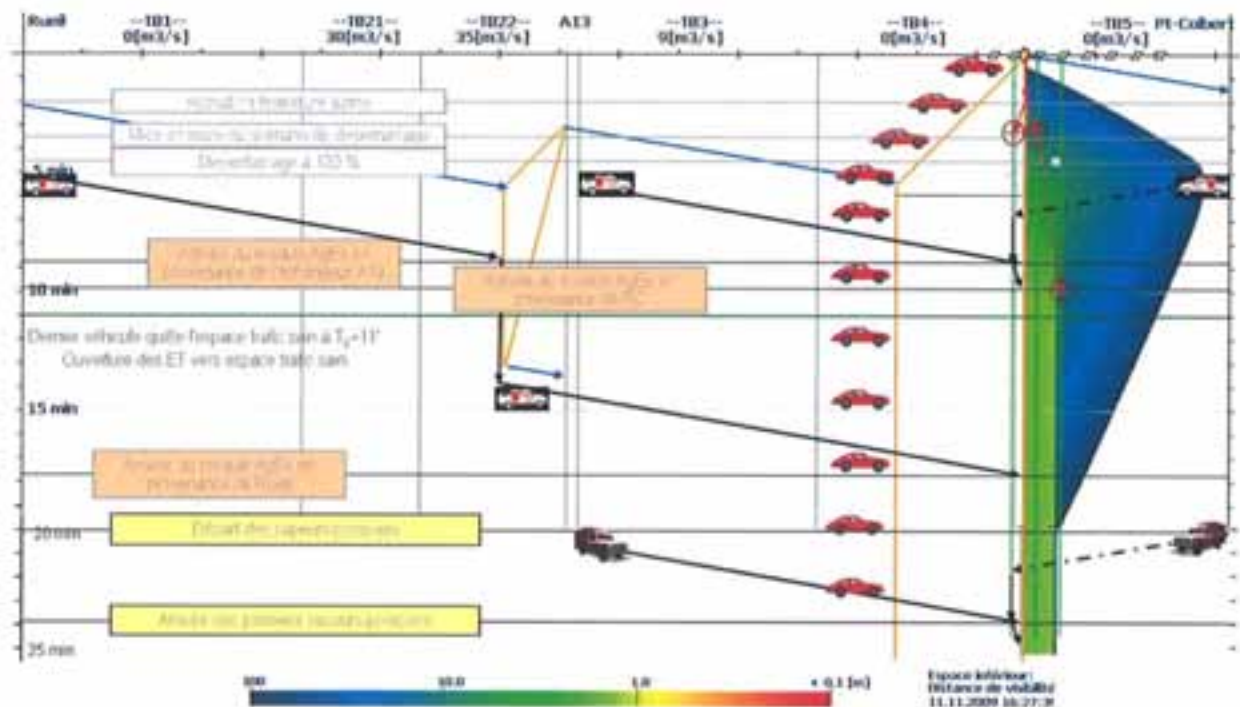
La durée des scénarios est en général à limiter aux premières minutes (de l'ordre de 30), les plus cruciales pour déterminer les conséquences sur la sécurité des usagers.

Les scénarios tiennent compte du développement des phénomènes en milieu confiné, du comportement des usagers, de la mise en œuvre des dispositifs et procédures de sécurité.

Dans l'exemple présenté précédemment, les événements déclenchants ne suffisent pas à définir un scénario, car pour chacun de ces événements de nombreux éléments contextuels (niveau de trafic, localisation, ...) ont une influence sur le niveau de gravité. Dans un souci de simplification, le nombre de circonstances étudiées est volontairement limité aux événements enveloppe, ou de maximum de vraisemblance, de manière à permettre une bonne lisibilité des résultats.

La liste des scénarios a été élaborée en faisant intervenir de manière croisée ces principaux paramètres. On est ainsi arrivé à traiter dans le dernier dossier produit (mars 2010) 3 scénarios de panne, 4 scénarios d'incendie simple en section courante du tunnel, 4 scénarios d'incendie simple dans les bretelles de l'échangeur enterré et 2 scénarios de suraccident avec incendie (en section courante du tunnel, avec et sans aspersion).

Le déroulement d'un scénario peut être résumé sur un graphique espace – temps (voir graphique 4) montrant à la fois les évolutions du trafic, les actions des usagers, de l'exploitant et des services de secours.



Graphique 4 : Exemple de graphique espace - temps

#### 4. CONCLUSIONS

Dans le cas d'un tunnel routier le comportement des usagers doit être pris en compte, et le type de danger est lié principalement au trafic, la conformité de l'infrastructure et de ses équipements étant analysée en préalable.

Contrairement aux barrages, les conséquences concernent beaucoup plus les personnes à l'intérieur de l'ouvrage que celles à l'extérieur.

Après 6 années de mises au point la réglementation est maintenant finalisée, et les maîtres d'ouvrage peuvent s'appuyer sur un référentiel officiel « Le guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers » publié par le Centre d'Etudes des Tunnels

[www.equipement.gouv.fr/cetu](http://www.equipement.gouv.fr/cetu)

Ce guide comprend 6 fascicules :

- Fascicule 0 Finalités du dossier de sécurité
- Fascicule 1 Modalités d'élaboration du dossier de sécurité
- Fascicule 2 Tunnels en exploitation « de l'état des lieux à l'état de référence »
- Fascicule 3 Les études des risques liés au transport des matières dangereuses
- Fascicule 4 Les études spécifiques des dangers (ESD)
- Fascicule 5 Le plan d'Intervention et de Sécurité (PIS)

Cette approche permet d'avoir une homogénéisation d'analyse de tous les ouvrages, et donc une vision globale au niveau national du niveau de sécurité de l'ensemble des tunnels routiers, au moins du réseau routier national.



## PARTAGE DE L'EDD AVEC LE RESPONSABLE DE L'OUVRAGE

Isabelle Penot<sup>1</sup> et Christine Girel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> EDF-DPIH-Unité de Production Méditerranée, Ingénieur Sûreté des Ouvrages,

<sup>2</sup> EDF-DPIH-CIH, Dépt. Projets, Pilote Opérationnel Projet EDD

La présente communication prolonge celle présentée au Colloque de novembre 2010, consacré au partage d'expériences et de méthodes sur la nouvelle réglementation pour la sécurité des barrages ; elle est enrichie du retour d'expériences de plus de 50 EDD supplémentaires livrées mais aussi, de l'instruction des premiers retours des services du contrôle sur les dossiers remis par les Responsables d'ouvrage. Un évènement important de l'année 2011 : l'ingénierie hydraulique d'EDF, composée du CIH et de DTG, a été agréée comme organisme intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques (Arrêté du 18 février 2010).

La pratique (plus de 100 EDD réalisées), confirme l'importance des contributions du Responsable de l'ouvrage dans le processus de réalisation d'une EDD de barrage ; elle confirme également le rôle déterminant des métiers de l'exploitation des installations hydroélectriques, aux cotés des métiers conventionnels de l'ingénierie. Ainsi, l'EDD consolide dans la vision sécuritaire qu'elle donne de l'ouvrage, les étapes majeures de sa réalisation, de sa maintenance, de sa surveillance et de son exploitation.

Le caractère intégrateur de l'EDD, en fédérant toutes les composantes de l'histoire du barrage, oblige l'organisme réalisant l'EDD à réunir toutes les compétences et tous les métiers qui y participent ; la constitution du dossier des données de l'ouvrage, la participation des exploitants de terrain aux groupes de travail de l'EDD, les étapes d'échanges et de partage avec les responsables de l'exploitation et de la maintenance, sont des pré requis à l'obtention d'une photographie juste, pesée et partagée par le Responsable de l'Ouvrage, servant ainsi de base solide à la maîtrise des risques potentiellement induits par la présence et l'exploitation d'un barrage.

Le Responsable de l'ouvrage (concessionnaire ou propriétaire) est comptable de l'image sécuritaire de l'ouvrage, projeté par l'EDD ; la participation des décideurs aux étapes clés de l'EDD (prises d'engagements), ainsi que leur implication pour partager l'EDD puis la porter, sont déterminantes :

- *Les données nécessaires à l'EDD* : un soin particulier doit être accordé à la qualité et à l'exhaustivité des données ; l'incertitude et le manque de données pénalisent, par défaut, le jugement porté sur les composants concernés de l'ouvrage et influent sur l'image de l'ouvrage projetée par l'EDD. Le REX EDD montre que la constitution du dossier des données de l'ouvrage est un exercice exigeant et contraignant, sans doute peu valorisant, mais indispensable pour justifier et qualifier le niveau de traçabilité de l'ouvrage.
- *L'exploitation et la surveillance de l'ouvrage* : ces deux fonctions font de l'exploitant le premier échelon de prévention des incidents et accidents susceptibles d'affecter le barrage, en exploitation normale ou en situation exceptionnelle (aléas naturels, agresseurs externes) ; elles sont analysées, évaluées et prises en compte dans l'EDD en tant que barrières de sécurité, comme le sont les autres barrières physiques identifiées. L'évaluation de l'efficacité de ces barrières implique la connaissance du système organisationnel et humain existant, une forte participation des intervenants concernés, la confrontation des expériences et une analyse au sein du GT EDD avec les Représentants du responsable de l'ouvrage
- *L'apport de l'exploitant au Rédacteur de l'EDD de barrage* : le rédacteur de l'EDD dépend d'une organisation qui est, par définition, indépendante fonctionnellement de celle de l'exploitant. Ainsi, chaque barrage ayant une histoire qui lui est propre et unique, l'apport de l'exploitant est indispensable dans le processus d'analyse des événements significatifs et d'en tirer les enseignements nécessaires (en terme d'initiateurs probants) pour la suite de l'EDD. Il appartient ensuite au rédacteur de l'EDD, de situer les événements retenus, jugés pertinents pour l'EDD, dans la typologie des accidents et incidents connus des barrages.
- *Le jugement de l'EDD et les engagements du Responsable de l'Ouvrage* : la participation effective des différents échelons opérationnels et décisionnels de l'organisation du Responsable de l'ouvrage (responsable de l'EDD), permet d'aider au partage du résultat de

l'EDD, traduit par la table de criticité (occurrences o gravités) et à la prise de décision d'éventuelles mesures de réduction des risques et/ou d'études complémentaires, si recommandées par l'EDD. En cas de difficultés, par définition aussi rares qu'inévitables, la recherche d'un consensus acceptables par les deux parties, démontre, s'il en était besoin, l'indispensable implication des décideurs dans le processus de l'EDD.

En conclusion, l'étude de dangers ne peut être le fruit d'un travail isolé, conduit indépendamment des acteurs qui vivent au quotidien avec l'ouvrage, mais au contraire le résultat du croisement des avis de nombreux spécialistes techniques et de l'exploitant. Le partage avec le Responsable de l'ouvrage est donc le gage de l'obtention de la description d'une situation la plus exacte possible et de l'acceptation des résultats de l'EDD, éléments déterminants pour la mise en œuvre d'une démarche de maîtrise des risques ciblée et efficace.

## L'UTILISATION PAR LES SERVICES DE CONTROLE DES ETUDES DE DANGERS DANS LE CONTROLE DES BARRAGES

*The use by government services of Dams Safety Analysis for the control of dams*

**Philippe Lamarsaude** - Sécurité des Ouvrages Hydrauliques - MEDDTL<sup>17</sup>/DREAL Limousin 87000 Limoges  
[philippe.lamarsaude@developpement-durable.gouv.fr](mailto:philippe.lamarsaude@developpement-durable.gouv.fr)

**Patrick Le Delliou**  
MEDDTL/Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages 38000 Grenoble  
[patrick.ledelliou@developpement-durable.gouv.fr](mailto:patrick.ledelliou@developpement-durable.gouv.fr)

### MOTS CLÉS

Analyse de risques, Sécurité des barrages, Etudes de dangers, Contrôle

### RÉSUMÉ

La réglementation (décret 2007-1735 du 11 décembre 2007) impose aux propriétaires de barrages de classes A et B de fournir une étude de dangers. Cela concerne environ 620 ouvrages. Si l'administration n'est pas tenue d'approuver formellement ces études, elle doit toutefois en signaler les manques graves et demander les compléments nécessaires. Les études reçues à ce jour n'ont pas justifié la mise en œuvre immédiate d'une telle action, les imperfections inhérentes à une première version feront l'objet de corrections au plus tard lors de la mise à jour. L'échéance de cette mise à jour est conditionnée principalement par la nécessité de pouvoir disposer d'une analyse du potentiel de dangers et des mesures de réduction de risques associées, afin de servir de point d'entrée pour la prochaine revue de sûreté. Ces études sont regardées avec attention par les services en charge du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques dans l'exercice permanent de leur fonction. Elles sont utilisées dans toutes les phases d'inspection: suivi des mesures de réduction des risques identifiées, approbation des modalités d'examen technique complet, analyse des éléments contenus dans les revues de sûreté, validation du plan d'action au travers de l'inspection décennale. Les barrières identifiées dans l'EDD font également l'objet de contrôles au travers des inspections annuelles. En particulier, l'ensemble des questions relatives au contrôle-commande des installations font l'objet d'une attention accrue. En outre, les barrières organisationnelles mises en avant par les études de dangers constituent des points d'inspection complémentaires. Les revues de sûreté (barrages de classe A) apportent actuellement des précisions et des compléments aux EDD, et sont l'occasion de finaliser le plan d'action sur la décennie à venir. Pourtant, il est indispensable que les deux documents aient le même niveau de qualité, et répondent chacun à leurs objectifs respectifs. Les mises à jour des EDD devront y veiller. En ce qui concerne les ouvrages de classe B, la réglementation ne prévoit pas de revue de sûreté. L'EDD doit être particulièrement complète et précise, et prendre en compte d'autres éléments de surveillance comme les visites techniques approfondies. Peu d'études pour ces ouvrages étant actuellement disponibles, il n'est pas possible d'en tirer un retour d'expérience.

### ABSTRACT

Dam Regulation (Decree 2007-1735 of 11 December 2007) requires owners of dams Class A and B to provide a dam safety analysis (DSA). This applies to about 620 works. If the administration is not required to formally approve these studies, it can report important deficiencies and ask for the necessary complements. The studies received so far did not justify the immediate implementation of such action, the imperfections of the first versions will be corrected in later updates. The delay of these update is mainly conditioned by the need to have an analysis of potential hazards and measures to reduce the risks to serve as an entry point for the next safety review. Standing in the exercise of their duties, these studies are carefully watched by the departments in charge of the control of the safety of hydraulic structures. They are used in all phases of inspection: follow-up measures to reduce identified risks, approving arrangements for full technical review, analysis of the elements contained in the safety review, validation of the action plan through the ten-year inspection. The barriers identified in the DSA are also checked through annual inspections. In particular, all matters relating to the control and monitoring facilities are the subject of increased attention. Furthermore, organizational barriers highlighted by the DSA are additional inspection points. Safety Reviews (dams of Class A) currently provide clarifications and additions to the DSA, and provide an opportunity to finalize the action plan for the next decade. However, it is essential that both documents have the same level of quality and meet all their objectives. The updates will have to ensure DSA. Regarding dams of Class B, regulations do not provide for safety review. DSA should be particularly complete and accurate, and consider other monitoring elements such as depth technical visits. Few studies for this class of dams are currently available, it is not possible to draw a feedback.

<sup>17</sup> Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

## **1. LES BENEFICIAIRES DE L'ETUDE DE DANGERS**

Imposées par le décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 [1] pour les barrages des classes A et B, les études de dangers (EDD) s'adressent à plusieurs intervenants et bien entendu à des titres très variés. Le responsable et son exploitant sont les premiers bénéficiaires des études, qu'il s'agisse d'avoir un document de synthèse sur le barrage, son environnement, les organisations en place, les risques potentiels, les conséquences des accidents éventuels... L'EDD met surtout en évidence les liens et les imbrications entre ces différents thèmes et tracent, pour le responsable de l'ouvrage, à la fois les points forts de la surveillance et les axes d'amélioration.

Pour les services de l'État chargés des contrôles de sécurité des ouvrages hydrauliques, généralement les DREAL, et notamment de la vérification de la mise en œuvre des prescriptions résultant du décret de 2007, l'EDD est un révélateur des fragilités potentielles des barrages et constitue un point de référence des questions qui méritent une attention particulière.

L'EDD peut également jouer un rôle important en dehors du cercle contrôlé/contrôleur. La mise en évidence des risques et des conséquences d'accidents potentiels et de leur vraisemblance d'occurrence peut apporter des réflexions complémentaires en terme d'organisation des secours et d'aménagement du territoire : prise en compte du risque par les aménagements situés en aval, qu'il s'agisse d'un autre barrage, d'une installation industrielle ou sensible...

L'EDD s'adresse également aux tiers en affichant, notamment au travers d'un résumé non technique, le niveau des risques liés aux installations, et en démontrant l'efficacité de l'organisation mise en place pour les limiter.

## **2. L'ETUDE DE DANGERS COMME OUTIL DU SERVICE DE CONTROLE**

Les études de dangers prévues par le décret du 11 décembre 2007 sont des outils de présentation argumentée des risques créés par la présence du barrage et de la gravité des phénomènes dangereux en estimant la probabilité de survenance de ces événements.

L'EDD constitue une opportunité supplémentaire d'identifier, de référencer la connaissance qu'a le propriétaire de l'ouvrage et notamment de rappeler les documents et les études pertinentes en terme de sécurité (voire de démontrer les insuffisances nécessitant des études complémentaires) : la détermination des aléas et notamment des crues, les études de stabilité sous différents cas de charges, les conditions de stabilité ultimes des ouvrages. De façon apparemment paradoxale, l'intérêt est plus fort encore pour les barrages de classe B qui étaient auparavant suivis et contrôlés de façon moins dense et pour lesquels la réglementation issue du décret de 2007 a renforcé notablement les prescriptions en matière de sécurité.

Le service du contrôle a ainsi les moyens de vérifier la cohérence entre le dossier dont dispose le maître d'ouvrage et les éléments dont il dispose. Il peut aussi engager le responsable du barrage à compléter tel ou tel point du dossier, à réactualiser telle ou telle étude de crue, de stabilité..., à mettre en adéquation le dossier de l'ouvrage avec de nouvelles prescriptions réglementaires...

L'analyse des risques qui constitue le cœur de l'étude de dangers permet de mettre en évidence les moyens et l'organisation mis en place par le propriétaire pour réduire les risques en étudiant leur efficacité et leur importance.

On met particulièrement en exergue l'identification de l'ensemble des barrières de sécurité qui concourent à obtenir le niveau de sécurité souhaité. Leur efficacité fait l'objet d'une estimation lors de l'élaboration de l'étude de dangers. Certaines d'entre elles peuvent avoir une influence déterminante sur les risques finaux et donc le contrôle de ces éléments constitue des points d'attention particulière.

L'EDD aborde des aspects qui faisaient jusqu'à présent l'objet d'une attention moindre : celui de la sécurité liée aux organes électromécaniques, des vannes au contrôle commande et automatismes en passant par les alimentations en énergie... C'est un des enseignements majeurs des premières études de dangers que d'avoir mis en évidence ces aspects ; ceci permet également d'orienter les contrôles sur ces organes spécifiques, sur l'organisation mise en place pour en assurer la maintenance, la fiabilité...

L'étude de dangers et notamment son chapitre 9 [2], trace les axes de progrès et les actions envisagées par le propriétaire (et surtout ceux sur lesquels il s'engage) pour maintenir les risques à un niveau acceptable, éventuellement pour les réduire. Le suivi de la mise en œuvre de ces actions et de délai de réalisation est un élément important du contrôle de la vie de l'ouvrage et de l'implication du responsable.

Inversement, l'EDD peut aussi alimenter la réflexion pour repérer des insuffisances importantes qui impliqueraient une éventuelle mise en révision spéciale de l'ouvrage.

En plus de constituer un élément de dialogue entre le responsable du barrage et le service de contrôle, l'étude de dangers est un outil de communication qui peut être utilisé par le service de contrôle vis-à-vis des autres intervenants du domaine, notamment pour ce qui concerne l'évaluation des conséquences d'un accident potentiel. Le vecteur privilégié de cette communication est constitué par le résumé non technique.

### **3. DECLINAISON DE LA PRATIQUE A LA DREAL LIMOUSIN**

La DREAL du Limousin assure le contrôle des ouvrages hydrauliques sur la région Limousin, mais également apporte son concours aux DREAL Poitou-Charentes, Auvergne, Centre (ouvrages concédés du département de l'Indre) et Midi-Pyrénées (ouvrages concédés du département du Lot). Ce sont donc 43 barrages de classe A et 25 barrages de classe B qui doivent disposer d'une EDD d'ici fin 2012 ou fin 2014 selon leur classe. A ce jour, 27 EDD ont été transmises au service. L'analyse des EDD est réalisée selon les préconisations de la circulaire [3].

L'EDD d'un barrage est consultée et utilisée dans diverses étapes du suivi d'un ouvrage :

#### Analyse critique de l'EDD :

Cette analyse est réalisée conjointement entre la DREAL et le service technique d'appui (BETCGB ou CEMAGREF)

Une attention particulière est portée sur

- La description de l'ouvrage et de son environnement
- L'appropriation par le rédacteur de l'EDD des diverses études citées (géologiques, de stabilité, hydrologiques sont les incontournables !). Le rédacteur doit se prononcer sur leur pertinence et leur validité. Il doit signaler les mises à jour ou compléments à y apporter et les inscrire dans les propositions du chapitre 9. Même si cela part d'une bonne intention, ce n'est pas l'objet de l'EDD de faire ou refaire des études manquantes ou obsolètes, car cela risque d'induire des confusions et d'abaisser la qualité de ces études.
- L'identification, la description et la justification des barrières
- Les mesures de réduction des risques proposées et leurs échéances de réalisation.

Cela conduit à des échanges, qui devraient être rapides, avec le gestionnaire de l'ouvrage pour éclaircir ou compléter des points particuliers : erreurs ou incohérences entre diverses descriptions d'un même objet, demande de schémas ou plans clairs et lisibles ... puis à acter par un courrier l'absence de remarques remettant fondamentalement en cause les conclusions de l'étude, des mesures de réduction

de risque proposées et leur échéance de réalisation (voire les critiquer). Ce courrier comporte une annexe listant les points ou questions devant faire l'objet d'analyse, d'amélioration ou de compléments lors de la prochaine mise à jour de l'EDD. Cette conclusion induit bien évidemment qu'aucun manquement grave n'ait été relevé dans l'étude présentée, justifiant son rejet.

#### Utilisation des EDD dans le cadre des inspections :

Dans le cadre des inspections périodiques des barrages, les barrières matérielles ou organisationnelles, les éléments sensibles du contrôle-commande et l'impact sur la sûreté des modes communs identifiés font l'objet d'une attention particulière. Le suivi des échéances de mise en œuvre du programme d'actions de réduction des risques est réalisé.

La revue de sûreté (barrages de classe A) s'appuie réglementairement sur l'EDD. Un croisement des deux documents est réalisé dans le cadre des inspections décennales. Il est constaté actuellement que la revue de sûreté apporte des précisions et des compléments à l'EDD, principalement dans les descriptions et analyses fournies par les bilans d'état. La concaténation des deux documents permet au service de contrôle d'avoir une vision satisfaisante du niveau de sûreté de l'ouvrage et des actions menées par le gestionnaire pour maintenir et améliorer ce niveau.

Il n'est pas souhaitable que cette situation perdure et qu'il soit nécessaire d'avoir en mains les deux documents, dont les finalités sont différentes, pour avoir une vision complète du barrage. Une amélioration sensible du niveau de qualité des EDD, dont la partie descriptive laisse trop souvent, par manque de précision, de nombreux points dans l'ombre, est attendue pour les études à venir, et, au plus tard, pour les mises à jour des études déjà produites.

Cette remarque est encore plus pertinente pour les barrages de classe B, dont la revue de sûreté n'est pas prévue réglementairement. Pour ces ouvrages, le service de contrôle sera attentif à la précision des renseignements et analyses contenues dans l'EDD, qui devra prendre en compte d'autres éléments de surveillance, comme les visites techniques approfondies.

Ne négligeons pas l'aspect "générique" que l'on peut trouver dans les EDD au travers des interrogations suscitées par des sujets transversaux tels que, par exemple, le contrôle et la maîtrise de la cote, la mise en œuvre et le suivi du Système de Gestion de la Sécurité. L'analyse de ces thèmes, au travers des EDD d'ouvrages gérés par le même exploitant, peut amener le service de contrôle à organiser des inspections ciblées sur un sujet précis. La mise en place de telles inspections est en cours de réflexion et serait un prolongement naturel à l'analyse critique des EDD.

#### Utilisation des EDD en cas d'incident :

Lors de la déclaration d'un incident, qu'il soit de niveau d'un EISH (événement impactant la sûreté hydraulique) ou PSH (précurseur pour la sûreté hydraulique), un retour vers l'EDD est impératif.

Soit l'évènement a été généré (au moins en partie) par la défaillance d'une barrière identifiée, soit il met en relief la fragilité d'un système.

Dans le premier cas, un retour d'expérience permettra de renforcer les mesures de contrôle appliquées à la barrière défaillante ou d'en redéfinir le rôle qui a pu être surévalué.

Dans le deuxième cas, il conviendra de s'interroger sur les mesures adaptées permettant la mise sous contrôle du système.

Cela conduira à alimenter le REX [2] de la prochaine mise à jour de l'EDD, à procéder à une réévaluation des mesures de réduction des risques, et à la mise en œuvre d'actions complémentaires.

#### Un piège à éviter :

La méthodologie même de l'EDD conduit, après l'identification et la description la plus complète possible des événements initiateurs, à isoler ceux conduisant au déclenchement de l'évènement

redouté. Cette focalisation, certes indispensable dans la démarche, ne doit pas servir de justification à négliger les actions de maintenance sur les objets ainsi écartés. Il ne faut pas perdre de vue que le bon état de l'ouvrage et son niveau de maintenance se jugent dans leur globalité, et que des défauts d'entretien ou de surveillance cumulés peuvent conduire à l'apparition d'un phénomène plus grave.

#### **4. CONCLUSION**

Les EDD sont l'occasion de réaliser une synthèse des connaissances sur un ouvrage et son environnement, et de l'actualiser au moins tous les 10 ans. Elles permettent de mettre l'accent sur les points sensibles impactant directement la sécurité et d'en améliorer la pertinence et la surveillance. Elles doivent identifier les mesures permettant d'accroître ce niveau de sûreté. Pour les ouvrages de classe A, elles alimentent la revue de sûreté, conduisant ainsi à l'appréciation portée sur le niveau de sûreté de l'ouvrage au travers de l'inspection décennale.

Ce n'en est toutefois qu'un élément d'appréciation, et ne doit pas faire oublier que le jugement porté par le service de contrôle s'appuie aussi, et surtout, sur les renseignements fournis par les rapports d'exploitation et de surveillance, les rapports d'auscultation, les visites techniques approfondies, mais également par la connaissance de l'ouvrage acquise au travers des inspections périodiques et les contacts réguliers avec les gestionnaires des ouvrages.

#### **RÉFÉRENCES**

- [1] Décret 2007-1735 du 11/12/2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement
- [2] Arrêté du 12/06/2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu
- [3] Circulaire du 31/10/2008 relative aux études de dangers de barrages et à un guide de lecture



## LIEN ENTRE LES ETUDES DE DANGERS ET LES REVUES DE SURETE DES BARRAGES A EDF

### *Connection between risks assessments reports and dam safety reviews at EDF*

**Marc Perez**

21 avenue de l'Europe 38 040 Grenoble Cedex

[marc.perez@edf.fr](mailto:marc.perez@edf.fr)

Téléphone : +33 (04) 76 202 112, Fax : +33 (04) 76 202 403

#### **MOTS CLÉS**

Défaillance, analyse de risques, examen technique complet, diagnostic, barrières de sécurité.

#### **ABSTRACT**

*The purpose of the safety review required every ten years for class A dams is to draw up a statement about the safety of the structure taking account of the danger study. There are some similarities between the approaches used for the two subjects, both of which deal with the intrinsic safety of dams. Considering the large safety stakes for large dams, the safety review is imposed to complete the danger study and to verify the justifications presented, particularly by inspecting normally immersed parts and parts that are difficult to access without special means. This paper describes relations between these approaches: specification of the scope of complete technical examinations before the safety review is produced, identification of data to be collected, diagnostic of dams and their safety devices so as to provide a special opinion about the risk assessment and any further information about measures to reduce risks.*

#### **RÉSUMÉ**

*La revue de sûreté, exigée tous les dix ans pour un barrage de classe A, a pour objectif de dresser un constat du niveau de sûreté de l'ouvrage en tenant compte de l'étude de dangers. Une certaine similitude existe entre ces démarches traitant toutes les deux de la sécurité intrinsèque des ouvrages. Au regard du fort enjeu de sécurité des grands ouvrages, la revue de sûreté est exigée pour compléter l'étude de dangers et vérifier les justificatifs utilisés, notamment par un examen des parties habituellement noyées ou difficilement accessibles sans moyens spéciaux. Cet article décrit les liens entre ces démarches : spécification du périmètre des examens techniques complets préalables à production de la revue de sûreté, identification des données à collecter, diagnostic des ouvrages et de leurs organes de sécurité permettant de porter un avis particulier sur l'évaluation des risques ainsi que sur un complément éventuel aux mesures de leur réduction.*

#### **INTRODUCTION**

Dans le cadre du premier retour d'expériences sur les études de danger, cet article présente le lien entre les études de dangers et les revues de sûreté des barrages de classe A produites à EDF. Ce lien étant multiforme, cet article, après avoir rappelé les attendus d'une revue de sûreté, en décrit les différentes composantes.

## **1. LES ATTENDUS DE LA REVUE DE SURETE D'UN BARRAGE**

Les exigences d'une revue de sûreté sont décrites dans l'article R.214-129 du décret 1139 du 11 décembre 2007 : « ...*cinq ans après la mise en service de l'ouvrage, le propriétaire ou l'exploitant effectue une revue de sûreté afin de dresser un constat du niveau de sûreté de l'ouvrage. Cette revue intègre l'ensemble des données de surveillance accumulées pendant la vie de l'ouvrage ainsi que celles obtenues à l'issue d'examens effectués sur les parties habituellement noyées ou difficilement accessibles sans moyens spéciaux. Les modalités de mise en œuvre de ces examens sont approuvées par le préfet. La revue de sûreté tient compte de l'étude de dangers et présente les mesures nécessaires pour remédier aux insuffisances éventuelles constatées...* »

L'arrêté du 29 février 2008 précise que la revue de sûreté prend en compte : « ...*les conclusions de l'étude de dangers, et en particulier celles relatives à la sûreté intrinsèque de l'ouvrage et à son dimensionnement...* »

Ces exigences mettent en évidence une certaine similitude entre les deux démarches, notamment par le fait que l'une et l'autre s'intéressent à la sécurité intrinsèque de l'ouvrage (dimensionnement et stabilité). L'étude de dangers est une « photographie » du niveau de sécurité de l'ouvrage à un instant donné. Ce document est établi à partir des données disponibles fournies par l'exploitant du barrage. La revue de sûreté a pour objectif de vérifier la validité de ces données à l'issue d'un examen complet de l'ouvrage, y compris et surtout, de ses parties habituellement noyées ou difficilement accessibles sans moyens spéciaux.

L'étude de dangers produit une analyse des risques identifiant les causes, les combinaisons d'événements et les scénarios susceptibles d'être à l'origine d'accidents importants. Les risques intrinsèques du barrage sont évalués en tenant compte de sa conception, de son dimensionnement, de son état et de son comportement notamment sous l'effet des aléas recensés. La précision de l'évaluation des risques est directement liée à la qualité des données utilisées ; une mauvaise qualité étant caractérisé par une absence totale, un manque de complétude ou de précision des données.

L'objectif de la revue de sûreté va donc être de compléter les données utilisées dans l'étude de dangers et/ou de mettre à jour certaines données difficiles à obtenir, notamment sur les parties difficilement accessibles (1), de porter un avis sur l'évaluation des risques après analyse des diagnostics produits à partir de ces données (2), et de compléter si nécessaires les mesures définies dans l'étude de dangers pour remédier aux insuffisances éventuelles (3). Ces points sont développés dans les chapitres suivants.

## **2. DEFINITION DU PERIMETRE DE LA REVUE DE SURETE**

La revue de sûreté débute par l'examen technique complet de l'ouvrage et notamment l'examen des parties habituellement noyées ou difficilement accessibles sans moyens spéciaux. La revue de sûreté succède à l'étude de dangers ayant produit l'analyse des risques sur un périmètre déterminé. Pour porter un avis cohérent sur l'évaluation des risques et le niveau de sûreté qui en découle, le périmètre des études doit être identique.

### **2.1. Le lien avec l'étude de dangers**

L'examen technique complet comprend l'examen habituel réalisé dans le cadre des visites techniques approfondies (génie civil, mécanique, contrôle commande) réalisées sur les ouvrages et organes couramment accessibles, complété par l'examen des parties difficilement accessibles : parties noyées ou nécessitant des moyens spéciaux pour les examiner (batardage, échafaudages, accès sécurisés, ...).

Comme lors des visites décennales se pratiquant sur les barrages 70-15 avant la parution de la réglementation, le périmètre de l'examen technique complet concerne a minima le parement amont de l'ouvrage et ses organes de sécurité. Cela concerne donc le corps du barrage et sa fondation, l'ensemble de la retenue, les évacuateurs de crues et l'organe de vidange de fond. L'étude de dangers traite les ouvrages et organes identifiés dans la zone d'étude dont la défaillance directe ou par effet domino, peut constituer des éléments agresseurs potentiels du barrage. La préparation de l'examen technique complet débute par l'identification de toutes ces ouvrages et organes devant faire l'objet d'un examen.

## 2.2. Exemple

Un des cas les plus fréquents dans les aménagements hydroélectriques, est celui des conduites d'alimentation des groupes de production traversant le barrage, qu'elles soient externes comme sur le graphique 1, ou internes à l'ouvrage. Leur fonction est directement liée à la production d'énergie et ne font théoriquement pas partie du périmètre de l'étude évaluant la sûreté intrinsèque du barrage.

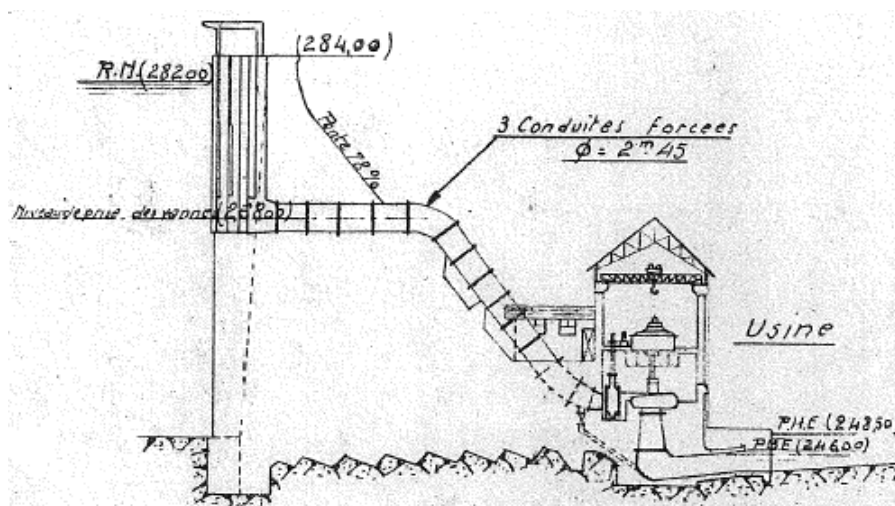
Pour autant, la défaillance de leur étanchéité, comme celle des vannes de fermeture et des reniflards, et la transmission des efforts à l'ouvrage, peuvent potentiellement générer des circulations d'eau dans le corps de l'ouvrage, voire y injecter des pressions néfastes à sa stabilité. La partie scellée de ces ouvrages sera donc incluse dans le périmètre des modalités détaillées de l'examen technique complet.



*Graphique 1 : cas fréquent d'ouvrages, d'ouvrages à vocation énergétique, potentiellement agresseurs du barrage. Leur défaillance peut générer des pressions dans le corps du barrage. Ils feront l'objet d'un examen technique après vidange, batardage et installation de dispositifs de visite afin de pouvoir évaluer précisément leur état et produire un diagnostic sur leur risque de défaillance.*

Les conditions d'accès à ces ouvrages nécessitent la plupart du temps des situations particulières d'exploitation et la mise en œuvre de moyens spécifiques (et parfois importants) de protection et d'accessibilité (graphique 2). Ces opérations peuvent nécessiter des configurations d'exploitation et d'indisponibilité contradictoires (examen du conduit de vidange de fond en fonctionnement lors de la vidange). Ces opérations doivent être suffisamment anticipées pour être réalisées dans de bonnes conditions et produire les résultats attendus.

L'impossibilité d'accès physique peut être palliée par l'utilisation d'appareils endoscopiques notamment dans des conduits de faible diamètre. On assiste également au développement de drones (pour des examens extérieurs ou intérieurs d'ouvrages de grandes dimensions) équipés de caméras pouvant restituer, avec un logiciel de traitement d'images, un relevé des anomalies constatées.



Graphique 2 : l'exemple ci-dessus illustre la complexité à réaliser l'examen complet des ouvrages potentiellement agresseur du barrage : l'examen comprend la visite des conduits, des reniflards, de la vanne de fermeture. Il va nécessiter une vidange totale des conduites, un batardage par la vanne de tête et l'installation de dispositifs de visite sécurisés dans les conduites et les reniflards, ouvrages difficilement accessibles.

### 3. PRECISIONS APORTEES SUR L'ETAT ET LE FONCTIONNEMENT DU BARRAGE ET DE SES ORGANES DE SECURITE

Le constat du niveau de sûreté s'appuie sur l'analyse des données de surveillance accumulées pendant la vie de l'ouvrage. Outre les données technico historiques issues des études de conception, des rapports de réalisation et de modification éventuelle, les données utilisées proviennent de la maintenance : examens visuels (des exploitants et des spécialistes), analyse des mesures d'auscultation, analyse des résultats des contrôles de conformité et de fonctionnement des organes de sécurité, rapports de travaux.

#### 3.1. Lien avec l'étude de dangers

Toutes les données citées précédemment et mises à disposition par l'exploitant au moment de l'étude de dangers, sont utilisées dans l'analyse de risques. Ces données peuvent s'avérer incomplètes, voire totalement manquantes, ce qui nuit grandement à la précision de l'évaluation des risques.

Les données manquantes relatives à la conception ou la réalisation du barrage sont la conséquence d'un historique incomplet qu'il est souvent difficile de reconstituer. Les données incomplètes sur l'état réel des parties d'ouvrages et des organes non visités dans le cadre des actions de surveillance habituelles, seront collectées lors de l'examen technique complet. Certaines données relatives à la conception et au dimensionnement des structures et des organes peuvent malgré tout être recueillies (caractéristiques des matériaux, dimensions des ouvrages en place) afin d'être utilisées dans la modélisation des structures. Ces études spécifiques ne font pas partie du périmètre de la revue de sûreté.

Pour les données liées à l'état et au fonctionnement, l'examen technique complet sera mis à profit pour collecter les données manquantes et pour réaliser les investigations nécessaires aux diagnostics en vue d'évaluer l'importance et l'évolution des anomalies constatées précédemment et non traitées.

### 3.2. Données à collecter lors de l'examen technique complet

Le cahier des charges de l'examen technique complet vise donc à améliorer la complétude et la précision des données sur l'état et le fonctionnement des ouvrages utilisées dans l'étude de dangers. Obtenir la complétude consiste à rafraîchir les données de surveillance et de maintenance produites dans le laps de temps écoulé entre les deux études et collecter les études demandées dans l'étude de dangers(1), à collecter les données manquantes sur les parties du barrage ou des organes de sécurité difficilement accessibles (noyés ou nécessitant des moyens lourds d'accès) (2), et celles découlant des demandes de diagnostics émanant des conclusions de l'étude de dangers (3).

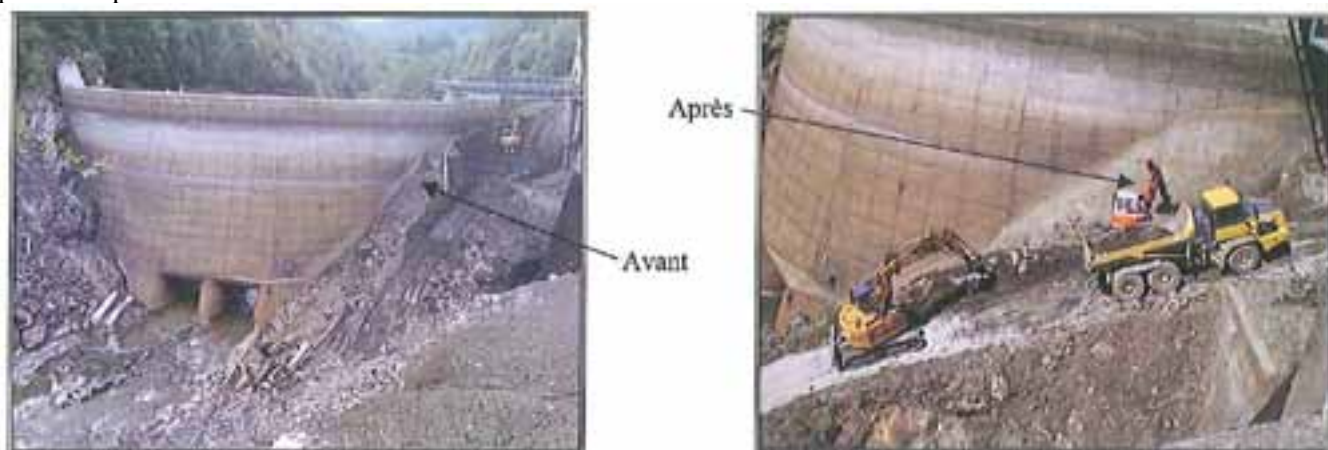
Les données rafraîchies sont celles issues des examens visuels récents, des dernières mesures d'auscultation, des résultats de contrôle sur les organes de sécurité, et des événements survenus sur l'ouvrage : crues, séismes, études et travaux réalisés. Les données manquantes sont collectées lors de l'examen complet de l'ouvrage.

L'évaluation des risques dans l'étude de dangers, prenant en compte les données disponibles, peut rencontrer des difficultés induites par des diagnostics insuffisants sur des anomalies potentielles ou avérées et conduire à spécifier un besoin de complément. L'examen technique complet est mis à profit pour réaliser ces diagnostics, au besoin en effectuant des investigations (relevés, prises d'échantillon) et en accédant aux ouvrages dans les conditions souhaitées comme décrites dans le chapitre suivant.

### 3.3. Exemples

Le mode de visite dépend de la configuration de l'ouvrage, des contraintes environnementales et économiques. Il dépend également des objectifs de la collecte des données complémentaires cités précédemment. C'est également un moment privilégié pour réaliser des travaux de maintenance sur des organes et des structures difficilement accessibles en temps normal.

Le mode de visite le plus précis est celui de la vidange totale de la retenue permettant en général un accès à la majeure partie du parement amont et des organes de sécurité du barrage. Comme le montre les photographies ci-dessous, il permet de réaliser des travaux rendant possible un examen précis du parement amont.



Dégagement du contact béton-rocher en rive droite

*Graphique 3 : dégagement du pied d'un barrage voûte facilitant son examen et l'identification d'anomalies.  
Ces opérations peuvent avoir un caractère systématique ou découler des besoins de diagnostics à l'issue de l'étude de dangers*

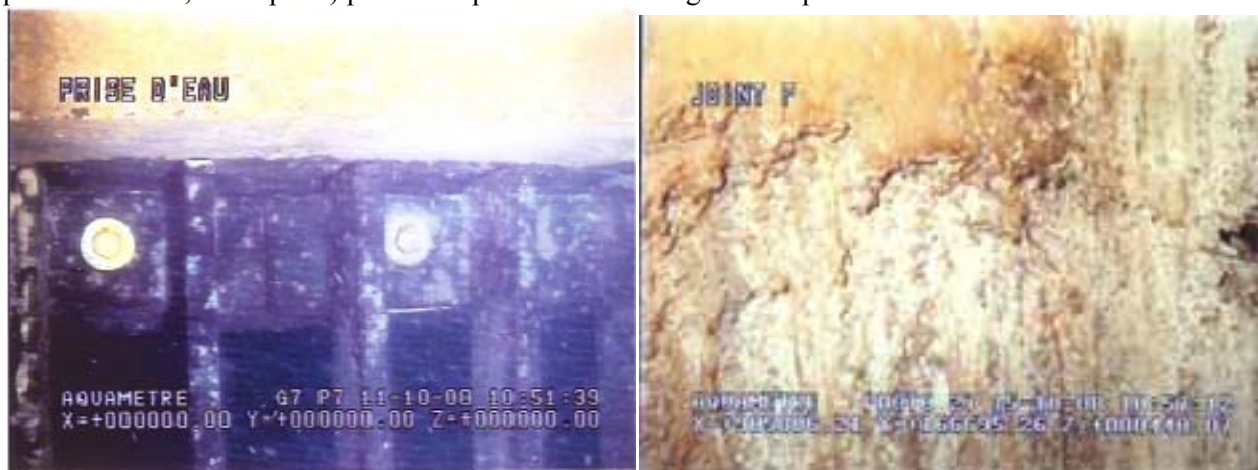
La vidange d'un barrage n'est pas toujours possible, voire souhaitable car elle génère des comportements particuliers parfois irréversibles, et les examens sont alors réalisés ouvrage en charge, occasionnant parfois des conditions d'accès difficiles comme le montre les photographies du graphique 4, mais offrant l'avantage de permettre la visualisation plus aisée d'anomalies, l'ouvrage étant sous contraintes.

L'accès direct va permettre la prise d'informations complémentaires sur les caractéristiques des ouvrages et de réaliser éventuellement des mesures ou essais in situ caractérisant son état (mesures d'épaisseur, de déformations, prises d'échantillon, ...).



*Graphique 4 : visite des parties d'ouvrages dans des conditions d'un barrage en charge. Les visites sont parfois difficiles à réaliser mais offrent l'avantage de visualiser de façon évidente les anomalies (photographie de gauche : fuites dans un reniflard de conduit de vidange de fond, photographie de droite : anomalie dans l'étanchéité d'une vanne papillon) .*

L'examen du parement amont et des organes immergés est réalisé au moyen d'engins télé opérés depuis la surface munis de dispositifs de repérage et de caméras. Cet examen permet de localiser des anomalies par un cheminement méthodique du robot, et de les caractériser (en positionnement, en ampleur) par des dispositifs de mesurage embarqués.



*Graphique 5 : images prises par un robot ACHILE télé opéré depuis la surface muni d'un dispositif de repérage par balises acoustiques et de caméra : photographie de gauche : état des grilles devant un entonnement de vidange de fond, photographie de droite : vue d'une reprise de bétonnage*

### **3.4. Utilisation des données dans la revue de sûreté**

La revue de sûreté d'un barrage s'appuie sur une analyse de son état et de son comportement et du fonctionnement de ses organes de sécurité. Dans la démarche mise en œuvre à EDF, toutes les étapes du diagnostic sont déroulées dans chacun des métiers : génie civil, auscultation, hydromécanique et électricité. Ces étapes portent sur l'identification des anomalies, l'évaluation de leur importance en terme d'amplitude et de profondeur, l'identification de leurs causes et l'évaluation de leur évolution probable, leurs impacts potentiels sur la sécurité de l'ouvrage, les mesures à prendre pour les maîtriser.

La revue de sûreté analyse l'ensemble de ces résultats et en lien avec l'étude de dangers, en déduit le niveau de sûreté de l'ouvrage et les mesures à prendre pour éventuellement l'améliorer.

## **4. AVIS SUR L'EVALUATION DES RISQUES**

### **4.1. Éléments de l'analyse de risques pris en compte**

Dans la méthodologie d'EDF, l'analyse de risques se décompose en deux étapes : une analyse préliminaire de risques identifiant les événements redoutés, et une analyse détaillée des risques de ces événements redoutés décrivant les différents scénarios pouvant conduire aux événements redoutés et identifiant le plus critique.

Les grands barrages étant des ouvrages régulièrement surveillés et entretenus, mais également contrôlés annuellement, le risque de ne pas détecter dans l'analyse préliminaire de risque, un événement redouté est très faible. Pour autant, le rédacteur de la revue de sûreté le vérifie dans son analyse.

Les éléments pris en compte dans la revue de sûreté sont les événements initiateurs et les barrières de protection des événements redoutés. Tous les ouvrages difficilement accessibles ayant normalement été visités, la revue de sûreté porte un avis sur ceux contribuant aux barrières de protection (vanne amont de protection d'une vidange de fond par exemple).

### **4.2. Contenu de l'avis**

Dans l'étude de dangers la détermination de l'occurrence des événements initiateurs prend en compte la conception, le dimensionnement et l'état constaté et se fait à dire d'experts en fonction des données dont ils disposent. La revue de sûreté, après avoir réalisé des diagnostics dans chacun des métiers, porte un avis sur ces paramètres et complète les conclusions obtenues dans l'étude de dangers.

L'évaluation du niveau d'occurrence des événements redoutés tient compte des barrières de prévention mises en œuvre par l'exploitant apportant une décote éventuelle de l'occurrence des événements initiateurs, réduisant le risque que l'événement ne se produise. La revue de sûreté n'examine que les barrières relatives à l'état et au fonctionnement des ouvrages (ne prend pas en compte les barrières « humaines » ou « organisationnelles »). Après analyse des diagnostics, elle porte un avis sur la capacité des barrières à remplir les fonctions pour lesquelles elles ont été prévues.

### **4.3. Exemples**

La vidange de fond est un organe important pour la sûreté à plusieurs titres : les vannes de réglage participant à la fonction « retenir l'eau », doivent avoir une sûreté intrinsèque satisfaisante, la fiabilité de cet organe doit être d'un niveau satisfaisant pour constituer une barrière de prévention efficace pour des scénarios de défaillance du barrage proprement dit, et les vannes amont peuvent être des barrières

de protection si elles ont été conçues pour couper le débit en charge, afin de limiter les effets d'une défaillance de la vanne de réglage. La revue de sûreté, s'appuyant sur les résultats des diagnostics, répond à ces questions.

Dans le domaine du génie civil, l'examen de la structure de prise et de son état d'engrèvement permet d'évaluer la fiabilité de fonctionnement de l'organe sur une durée compatible avec la vidange de la retenue, les structures reprenant les efforts des vannes sont examinées afin de détecter des anomalies (fissuration, corrosion d'armatures) et les parties d'ouvrages contribuant à la restitution du débit au cours d'eau sont examinées pour évaluer le risque d'érosion régressive vers le barrage.

Dans le domaine de la mécanique, les vannes sont examinées afin de produire un diagnostic sur leur sûreté intrinsèque intégrant l'analyse de leur conception et son évolution depuis la vie de l'ouvrage, de leur état au besoin en réalisant également des investigations si cet état pose question, et leur historique de maintenance et de fonctionnement. Cet examen porte également sur l'état de leur chaîne cinématique et sur l'analyse des essais de fonctionnement afin d'évaluer le risque de coincement ou de refermeture accidentelle.

Dans le domaine électrique, la fiabilité des différentes sources d'alimentation est analysée avec prise en compte de la conception des circuits et du résultat des essais de fonctionnement réalisés régulièrement par les exploitants.

La revue de sûreté intègre l'ensemble de ces diagnostics et porte un avis sur la sûreté intrinsèque des vannes et sur la capacité de l'ensemble de l'ouvrage à remplir leur fonction de vidange de la retenue avec un niveau de fiabilité acceptable.

## **5. MESURES DE REDUCTION DES RISQUES**

À partir des diagnostics produits dans chacun des métiers, la revue de sûreté porte un avis sur la sûreté intrinsèque de l'ouvrage, accompagné des conditions à remplir pour le conserver voire l'améliorer. Cet avis, tient compte de l'analyse sur l'occurrence des événements initiateurs et sur la capacité des barrières à jouer leur rôle et, de ce fait, apporte des précisions et des compléments argumentés à celui formulé dans l'étude de dangers.

Les mesures de réduction des risques présentées dans l'étude de dangers dans le chapitre « Étude de réduction des risques » sont reprises et éventuellement complétées pour satisfaire aux conditions de pérennisation ou d'amélioration du niveau de sûreté.

Des recommandations sont produites pour améliorer la surveillance de l'ouvrage : compléments au dispositif d'auscultation, examen de parties d'ouvrage à inclure dans les visites techniques approfondies, périodicité à adapter aux anomalies constatées. Ces recommandations conduisent à mettre à jour la consigne de surveillance.

Les diagnostics font également émerger des besoins d'approfondissement sur l'importance des anomalies constatées au travers d'études d'évaluation de leur impact nécessitant éventuellement des investigations : prise d'échantillons, essais non destructifs pour évaluation de l'ampleur, caractérisation des matériaux, ...

Par ailleurs, ayant analysé dans le détail les résultats de la maintenance effectuée par les exploitants, des préconisations sont formulées et commentées aux exploitants pour améliorer son efficacité.

## **6. CONCLUSIONS**

La mise en œuvre de la nouvelle réglementation contribue à faire progresser la sûreté des ouvrages. EDF s'est employée à produire les études de dangers et les revues de sûreté dans les délais prescrits en mobilisant l'ensemble de ses compétences en ingénierie et en produisant un référentiel adapté. La situation d'une revue de sûreté post étude de dangers n'a été possible. Cependant les principes décrits dans cet article ont été appliqués.

Les barrages de classe A sont les plus grands et donc ceux qui sont susceptibles d'engendrer les risques les plus importants. C'est la raison pour laquelle l'étude de dangers, qui évalue le niveau de sûreté intrinsèque à travers une analyse de ces risques, est complétée par la revue de sûreté apportant une plus grande précision sur cette évaluation notamment par le complément de données apporté par l'examen technique complet et l'analyse de ses constats. Cela constitue un ensemble cohérent qui contribue à accroître la performance de la maîtrise des risques sur les barrages présentant les plus grands enjeux.



## INCIDENCE DES NOUVELLES PRESCRIPTIONS SUR LES PRATIQUES DE SUIVI ET DE CONTRÔLE PAR UN GESTIONNAIRE DE PARC DE BARRAGES-RESERVOIRS

### *Consequences of new instructions on practices of follow-up and control by a park of dams-reservoirs manager*

**Daniel Boubée**, Directeur de l'Aménagement Hydraulique  
CACG BP449 65004 Tarbes France  
[d.boubee@cacg.fr](mailto:d.boubee@cacg.fr)

**Jean-Luc Brodin**, Responsable Pôle auscultation  
CACG BP449 65004 Tarbes France  
[jl.brodin@cacg.fr](mailto:jl.brodin@cacg.fr)

#### ABSTRACT

The CACG, the company of regional development, planner of the territory is also a designer and a builder of large facilities, in particular hydraulic, which participate in it. She can, secondly, insure their operation. So the CACG manages, since the beginning of 1960s, a stock of about sixty dams under various statutes (concession of State, delegation for local Authorities...) with the aim of re-feeding weak hydrological rivers on the big Southwest of France.

She set up since about twenty years an internal protocol of follow-up and control of the works, taking into account their size, their evolution (followed by auscultation) and the stakes identified downstream.

The Studies of Dangers (EDD) henceforth recommended by texts ensuing from the decree of 2007 express new conditions. The EDD of the works concerned by the park managed by the CACG are gradually realized. It was verified at first that these ones did not introduce significant modification into the regular actions of O&M of the works. It was shown, last year, that the first experience feedback in this subject in the CACG did not lead to a questioning as regards the identification of the risks and the definition of their criticality. Actually, the prescriptions seem to introduce involvements at least different with regard to the present practices as regards the periodic reviews of safety (RS). certain of our works has to be the object in the short term of this review, according to a calendar dictated by the last ten-year visits. We thus wondered about the factors of adaptation of our practices and about the opportunity to postpone some of these reviews so that the returns of the validated EDD are completely turned to account.

#### RÉSUMÉ

La CACG, société d'aménagement régional, aménageur du territoire est aussi concepteur et constructeur des aménagements, notamment hydrauliques, qui y participent. Elle peut, dans un deuxième temps, assurer leur exploitation. Ainsi la CACG gère depuis le début des années 1960 un patrimoine d'une soixantaine de barrages sous différents statuts (concession d'Etat, DSP...) dans le but de réalimenter des bassins hydrologiques déficients sur le grand Sud-Ouest de la France. Elle a mis en place depuis une vingtaine d'années un protocole interne de suivi et de contrôle des ouvrages tenant compte de leur taille, de leur comportement (suivi par auscultation) et des enjeux identifiés en aval.

Les études de danger désormais préconisées par les textes découlant du décret de 2007 énoncent de nouvelles stipulations. Il a été vérifié dans un premier temps que celles-ci n'introduisaient pas de modification significative dans les actions régulières de contrôle et de suivi des ouvrages.

Les EDD des ouvrages concernés du parc géré par la CACG sont progressivement réalisées. Lors d'une précédente communication, il a été montré que les premiers retours d'expérience en cette matière à la CACG ne conduisaient pas à une remise en cause en ce qui concerne l'identification des aléas et la définition de leur criticité. De fait, les prescriptions semblent introduire des dispositions au moins différentes par rapport aux pratiques en place en ce qui concerne les revues de sûreté périodiques. Un certain nombre de nos ouvrages doivent faire à court terme l'objet de cette revue, selon un calendrier normalement dicté par les dernières visites décennales ou la date de mise en service des plus récents barrages. Nous nous sommes donc interrogés sur les facteurs d'adaptation de nos pratiques et sur l'opportunité de différer certaines de ces revues pour que les retours des EDD validées soient pleinement mis à profit.

## **1. PREAMBULE**

Les études de dangers des ouvrages hydrauliques et notamment des barrages sont désormais l'occasion de faire, tous les dix ans, un bilan sur le niveau de sécurité de ces ouvrages.

Elles s'adressent aux barrages de classes A et B du décret du 11 décembre 2007 qui regroupent environ 600 barrages en France pour lesquels les enjeux en terme de population exposée peuvent s'étaler entre plusieurs dizaines voire centaines de milliers de personnes pour les plus grands d'entre eux, pour descendre probablement à moins d'une dizaine de personnes exposées pour d'autres (barrages sur des cours d'eau proches de la confluence avec des fleuves importants, ou barrages sur des petits fleuves côtiers).

Malgré cette diversité de situation, tous ces barrages doivent faire l'objet d'une étude de dangers dont le plan doit être uniformément conforme à l'arrêté du 12 juin 2008 : bien entendu, un plan commun ne veut pas dire que le contenu soit le même, mais la réalisation d'une étude de dangers reste un travail important, même pour les barrages dont les enjeux sont très modestes.

A contrario, il existe des barrages de classe inférieure présentant des enjeux non négligeables qui ne sont pas soumis à cette obligation, sauf bien entendu en cas de surclassement par l'Administration. C'est la conséquence de cet effet « seuil » et du fait que la classification des barrages, contrairement à celle des digues, n'a pas pris en compte les enjeux aval.

Parmi les quelques centaines de barrages-réservoirs qu'elle a contribué à faire émerger, concevoir puis construire, la CACG demeure gestionnaire d'une soixantaine d'entre eux. Il s'agit des plus conséquents en termes de dimension et volume, le plus souvent à vocation mixte. La principale d'entre elles étant le soutien des débits des rivières du sud-ouest pour assurer des conditions de salubrité imparties tout en permettant la compensation des prélèvements des usages économiques (agricoles et industriels) ou sociaux (AEP). Un noyau important de ce parc relève d'une Concession d'Etat accordée depuis une cinquantaine d'années, une part plus récente étant le fait de délégations de service public par des Collectivités territoriales. Quelques ouvrages sont exploités aux seules fins de l'irrigation pour le compte de gros collectifs de professionnels agricoles.

La CACG a fait le choix de procéder par elle-même à l'étude de dangers des ouvrages qu'elle gère en tant que concessionnaire, de l'Etat notamment. Pour comprendre ce choix il convient tout d'abord de prendre en compte l'organisation fonctionnelle de la gestion des ouvrages, au-delà de la phase de construction.

### **Organisation interne de la CACG**

La CACG assure la totalité des missions de prévention et de surveillance. Ainsi, pour évoquer les responsables de la mise en œuvre du plan de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité, il est fait référence aux services de la CACG, suivants :

- EXP : Direction de l'Exploitation,
- DIG : Direction de l'Ingénierie,
- DAH : Direction de l'Hydraulique,
- TOP : service Topographie, fonctionnellement rattaché à la DAH.

La CACG applique pour chacun des barrages-réservoirs qu'elle gère, la procédure générale interne d'exploitation et de surveillance des barrages, incluant la formation spécifique du personnel de la Direction de l'Exploitation.

Les barrières de sécurité pour un barrage sont essentiellement de deux types :

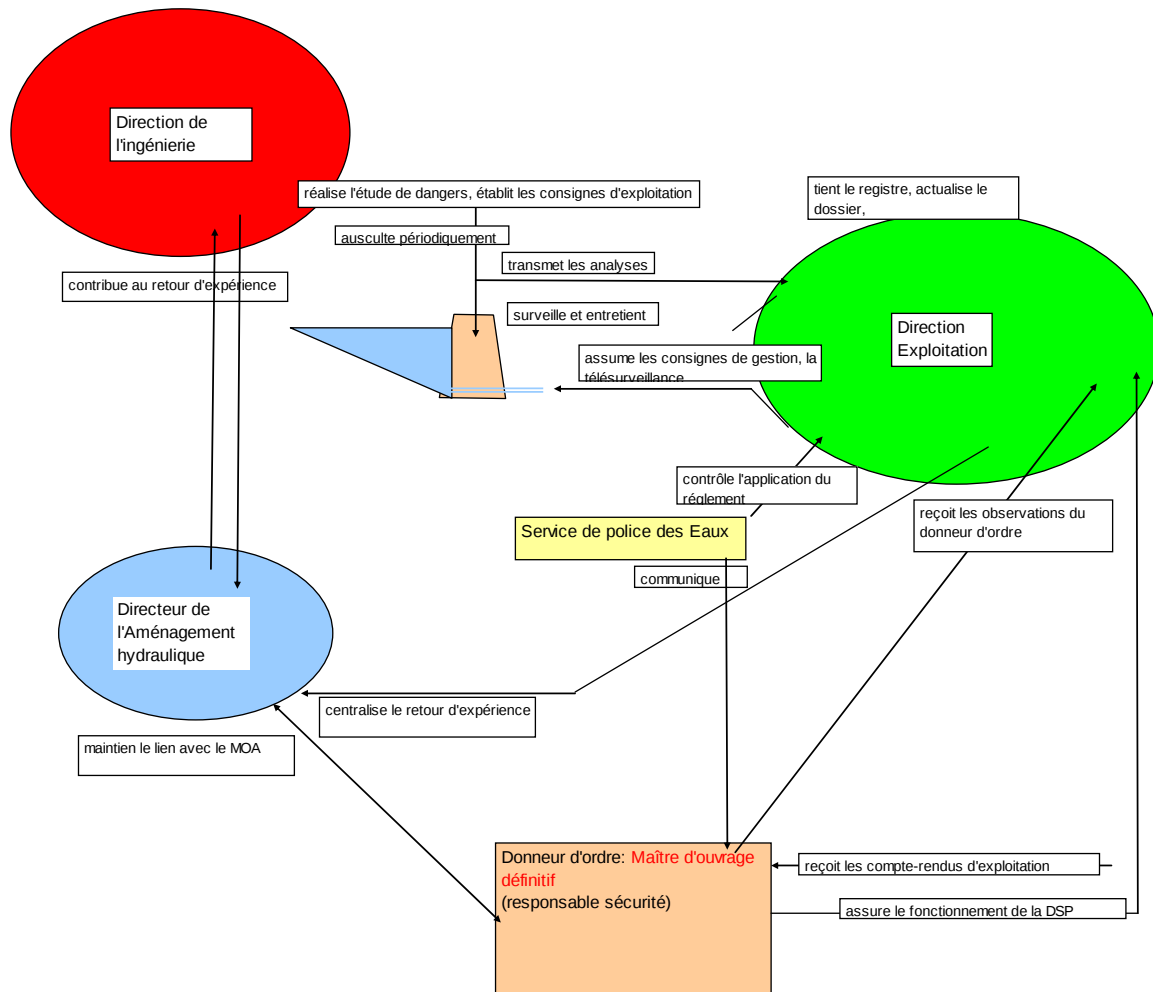
- des actions de prévention,
- des actions de surveillance.

Les actions de gestion, d'entretien et de suivi sont classiques pour ce type d'ouvrage et relèvent à la base de la maintenance, selon le schéma fonctionnel ci-après :

- maintenance courante et préventive :
    - surveillance régulière,
    - entretien (abords, génie-civil, panneautage, clôtures, équipements auscultations),
    - petites réparations hors campagne ou en service,
  - maintenance différée : en fonction du REX (retour d'expérience) et des rapports d'auscultations annuels,
    - prise en compte des nouvelles « normes » (hydrologie, calculs stabilités...),
    - prise en compte de l'état de dégradation ou de vieillissement.
- ↳ Identification, diagnostic, projet, estimation, programmation, instruction, planification

Selon la distribution fonctionnelle des responsabilités internes suivante :

- **Exploitation et Maintenance** par une Direction en charge de l'exploitation
  - ✓ un pôle responsable de la gestion des eaux (outils de télémessure, télécommande téléalarme),
  - ✓ un pôle responsable de la gestion des ouvrages (surveillance, entretien, maintenance),
  - ✓ un pôle responsable de la relation client (contrats, contrôle des consommations, facturation de service, participation aux commissions rivières : « partage de l'eau » )
- ➔ missions confiées à des techniciens génie-civilistes, électromécaniciens, électriciens, hydrauliciens, s'appuyant en tant que de besoin sur des ingénieurs de ces spécialités.
- **auscultation et contrôle** par la Direction de l'Ingénierie
  - ✓ un pôle étude : (production des analyses hydrologiques,...),
  - ✓ un pôle maîtrise d'œuvre, avec une double mission :
    1. Conception et construction des ouvrages neufs ou des modifications substantielles
    2. contrôle et auscultation des ouvrages en service.
- ➔ opérations conduites par des ingénieurs barragistes, génie-civilistes, hydrauliciens, automaticiens, géotechniciens, géologues, laborantins.
- **cohérence et vérification des engagements** étant assurées par le Directeur de l'Hydraulique.



Ce schéma répété pour chacun des ouvrages conduit à une organisation globale classique similaire à celle présentée dans la communication introductive par M. Poupard

Lorsque des anomalies sont constatées, des actions correctives spécifiques sont décidées, en général par le service Ingénierie. Le moindre désordre détecté sur le barrage, par le personnel de l'Exploitation, ou par celui en charge de l'auscultation remonte directement aux experts du service Ingénierie de la CACG qui décideraient de l'urgence et des moyens d'intervention. On peut distinguer aussi deux types de déclencheurs dans le système de gestion de la sécurité :

- ceux qui ressortent de la « routine » : interventions programmées à l'avance et répétitives,
- ceux résultant de situations « exceptionnelles » : suite à un séisme, à une crue importante, à des constatations ou mesures anormales....

Dans le cadre de l'amélioration continue de la sécurité, une réunion annuelle est organisée entre les différents services cités précédemment, et impliqués dans le suivi des barrages ; cette réunion n'est pas spécifique à un barrage en particulier, mais concerne tous les barrages suivis par la CACG ; elle permet d'analyser les dysfonctionnements qui peuvent s'être produits sur certains ouvrages, de trouver les solutions, et d'en faire ainsi profiter tous les barrages.

Indépendamment de cette réunion programmée annuellement, une réunion extraordinaire peut être provoquée dans le cas où des modifications importantes des protocoles de suivi devraient être mises en œuvre, suite à la mise en évidence de dysfonctionnements majeurs sur certains ouvrages.

Les aléas et risques étaient jusqu'alors analysés selon ce processus. Ce dernier, sans être fondamentalement changé, intégrera désormais les retours formalisés des études de dangers produites et si possible validées par l'Administration compétente.

## Méthodologie retenue pour l'élaboration des EDD des ouvrages concédés

La Direction de l'Ingénierie de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne et la Société J2C services (prestataire spécialisé en analyse de risques) réalisent ainsi les études de dangers, respectant l'arrêté du 12/06/2008 et comportant :

- l'identification des dangers (rupture, dysfonctionnement des organes, manœuvres),
- la caractérisation des aléas naturels : crues, séismes, mouvements de terrain,
- le retour d'expérience des défaillances, incidents et crues survenus (cas généraux connus sur le type d'ouvrage et accidentologie éventuelle spécifique au cas traité),
- l'analyse des risques :
- les scénarios susceptibles de provoquer des accidents (probabilités, intensité et cinétique des effets),
- les conséquences (personnes exposées, dégâts aux biens),
- la démarche de réduction des risques que le propriétaire propose avec l'efficacité escomptée (délais de mise en œuvre des mesures),
- la carte de l'environnement de l'ouvrage, caractérisation des aléas, des phénomènes dangereux et de la gravité des conséquences.

Cet examen, voulu exhaustif, passe en préalable par :

- une analyse fonctionnelle (interne et externe) de l'ouvrage et de son environnement (rapproché et plus éloigné),
- la présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité sur et autour des ouvrages,

Dans le cadre primordial qui est celui de la caractérisation des risques potentiels identifiés, la difficulté ressentie par le groupe de travail est celle d'une quantification en termes de probabilité, d'occurrence des phénomènes, la présentation de résultats en valeur de cinétique et d'intensité des effets présentant moins de difficulté car découlant de méthodes de calcul classiques et étalonnées. Gravité des conséquences et proposition des barrières de sécurité additionnelles en mesure de réduire les risques ne sont plus que des choix techniques... et économiques pour le couple bureau de contrôle – maître de l'ouvrage.

Indiquons en préalable qu'aucun incident majeur n'a été observé sur ces ouvrages en fonction.

La méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) retenue de concert, est une méthode de la Sûreté de Fonctionnement la plus utilisée dans l'industrie et qui est bien adaptée aux systèmes mécaniques. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système ou fonction qui présente un potentiel de danger pour l'ouvrage et analyse ses modes de défaillance et leurs effets.

J2C services a animé un groupe de travail avec des experts de la CACG pour identifier :

- les causes possibles de défaillance ;
- les effets possibles d'une défaillance ;
- les indicateurs (visuels, issus d'un instrument d'auscultation) traduisant la manifestation des conséquences des défaillances et pouvant être détectés (moyens de détection).

Dix modes de défaillance ont pour effet maximal la rupture du barrage et donc la propagation d'une onde de submersion, sans toutefois apporter d'élément novateur par rapport aux ressentis antérieurs.

## **2. APPORTS DES ÉTUDES DE DANGERS POUR LA CACG**

La finalité de l'étude de dangers est d'aboutir à un plan d'actions visant à réduire les risques générés par le barrage.

À la lumière des études de dangers qui ont été réalisées sur les ouvrages que nous gérons, il ressort que les préconisations du plan d'actions peuvent être regroupées en trois catégories, à savoir :

- ✓ les préconisations d'études complémentaires,
- ✓ les préconisations de suivi et de maintenance, et
- ✓ les préconisations de travaux confortatifs.

### **2.1. Les préconisations d'études complémentaires**

Au sens strict l'étude de dangers n'intègre pas les études techniques spécialisées (étude hydrologique, étude de stabilité, ...), sauf peut-être l'étude de l'onde de submersion qui est indispensable pour délimiter et quantifier les enjeux aval.

Par contre l'étude de dangers doit analyser le contenu des études existantes et apprécier leur « qualité » au sens large, à savoir si elles peuvent servir de bases fiables pour l'analyse des différents scénarios de défaillance examinés dans l'étude de dangers.

Par exemple, il est évident que le risque de submersion d'un barrage en remblai qui est un des risques majeurs ne peut être appréhendé selon les critères exigés aujourd'hui que si les résultats de l'étude hydrologique ayant servi de base à la détermination de la crue de projet sont eux aussi relativement récents ou actualisés. Cependant rien n'empêche (sauf bien entendu le service de contrôle qui ne « validera » pas l'étude de dangers) un bureau d'études chargé d'une étude de dangers de ne pas envisager de révision de l'étude hydrologique, mais de la préconiser dans le cadre du plan d'actions visant à améliorer la sécurité du barrage.

On pourrait ainsi avoir une première étude de dangers dont le plan d'actions visant à améliorer la sécurité du barrage serait essentiellement constitué de préconisations pour réaliser des études qui normalement sont les données d'entrées de l'étude de dangers.

Ce point est très important, car beaucoup de Maîtres d'Ouvrage n'ont pas les compétences pour apprécier la nécessité ou non de réaliser certaines études techniques nécessaires à la réalisation d'une bonne étude de dangers ; laisser le choix aux bureaux d'études dans le cadre de l'appel d'offres pour la réalisation de l'étude de dangers peut se révéler une source de contentieux ou de dépenses supplémentaires quand le service de contrôle demandera lors de l'examen du projet de l'étude de dangers que certaines études non prévues initialement par le bureau d'études, mais préconisées dans le plan d'actions, soient réalisées rapidement, ce qui revient en fait à ne pas valider le projet de l'étude de dangers.

Des contacts préalables entre les Maîtres d'Ouvrage et les services de contrôle seraient souhaitables de telle sorte que les appels d'offres concernant les études de dangers soient plus précis en ce qui concerne les études complémentaires préalables à l'étude de dangers.

Il semble donc évident que les préconisations d'études complémentaires dans le cadre du plan d'actions visant à améliorer la sécurité du barrage doivent être le plus limité possible, et ne concerner que des aspects très peu critiques au regard de la sécurité du barrage, sous réserve que l'on soit capable d'en juger ; ce peut être le cas par exemple des calculs de stabilité sismique préconisés par le groupe de travail "barrages et séismes", dans le cas de barrage en zone d'aléa faible, voire modéré.

### **2.2. Les préconisations de suivi et de maintenance**

Dans les cas les plus courants de barrages correctement dimensionnés, bien conçus, construits, et très correctement entretenus, l'étude de dangers doit aboutir à un plan d'actions visant à améliorer la sécurité du barrage basé essentiellement sur des préconisations de suivi et de maintenance. Ces préconisations devront être intégrées aux consignes écrites, bien que dans la plupart des situations

actuelles qui ressortent des nouveaux arrêtés de classement des barrages, les consignes écrites doivent être produites avant la réalisation de l'étude de dangers.

Dans cette situation, cela pourrait aussi conduire à ce que le plan d'actions de l'étude de dangers reprenne les préconisations des dites consignes sans analyse particulière, ce qui diminue un peu l'intérêt de l'étude de dangers.

Comparaison entre anciennes et nouvelles pratiques découlant des derniers textes

Pour la CACG qui dispose de personnel quasi exclusivement affecté à la surveillance et à la maintenance des barrages qu'elle gère, le suivi et la maintenance sont des métiers historiques qui ont été développés depuis la création des premiers barrages en Gascogne au début des années 60, et les procédures formalisées en début des années 90 en leur état actuel.

Ces métiers ont évolué avec le nombre de barrages (50 barrages de classes A ou B sont actuellement suivis, au moins en auscultation), avec l'apport des retours d'expérience, et avec l'évolution des matériels et des techniques.

Ainsi la rédaction des consignes écrites, ou la mise en application des plans d'actions visant à améliorer la sécurité des barrages issus des études de dangers ne constituent pas des « révolutions », mais plus des adaptations à des pratiques déjà mises en œuvre depuis longtemps.

Ces adaptations concernent principalement une nouvelle formalisation des actions effectuées jusqu'à présent de manière informelle avec une déficience importante d'enregistrement pour toutes les actions en dehors des mesures d'auscultation.

En ce qui concerne également ces dernières, les nouveaux textes n'ont pas amené de changement significatif dans nos pratiques, instaurées depuis une vingtaine d'années. Nous avons même conservé nos fréquences de mesures et de restitution de leurs résultats, avec des périodicités supérieures à celles désormais définies par les dispositions administratives. Dans les cas où notre gestion relève d'une délégation de service public antérieure, nous ne faisons le plus souvent que respecter les termes contractuels mis en place avec notre délégant. La question se posera lors du renouvellement de la délégation, ou plus exactement lors de la remise en concurrence de celle-ci, de convenir de la poursuite des pratiques ou de l'adoption d'un calendrier simplement respectueux des dispositions administratives en vigueur.

Au-delà du réglementaire, les modalités retenues seront sûrement le résultat du pragmatisme et sans doute fonction des conclusions des EDD effectuées (comportement des ouvrages, vieillissement des structures, enjeux aval...). Il peut également être convenu, par exemple en cas de renforcement ou de modification des appareillages de contrôle sur nouvel investissement du Maître d'Ouvrage, de densifier au moins pendant un temps la périodicité des mesures.

Nous avons eu connaissance de modalités différentes sur d'autres aménagements que nous ne gérons pas, mais sur lesquels nous avons été amenés à intervenir. Nous y avons le plus souvent noté des pratiques moins rigoureuses, mais aussi parfois l'inverse, sans que nous n'ayons matière à formuler d'observation pouvant conduire à une remise en cause notable de ces modalités. Il est vrai que ces situations correspondent aux cas d'ouvrages relativement conséquents (réservoirs d'eau potable...) de Collectivités territoriales bien suivis. Il n'en serait sûrement pas de même sur des ouvrages moindres et/ou moins bien suivis par leur propriétaire ou un délégataire.

En effet, à la CACG, les mesures d'auscultation ont toujours été stockées « en temps réel » sous forme de bases de données, permettant ainsi leur archivage ainsi que la visualisation graphique des paramètres mesurés, en permanence à jour, et accessible sur le réseau de l'entreprise (logiciel propriétaire jusqu'en 2005, puis logiciel CONDOR 2004).

Par contre les autres actions de suivi et de maintenance, même si elles étaient réalisées ne faisaient pas toujours l'objet d'un enregistrement, notamment dans le registre du barrage pourtant ouvert.

Cette formalisation est importante et elle n'est pas si évidente que cela à mettre en pratique puisque les habitudes sont pesantes ; on peut même penser que la mise en œuvre de ces nouvelles spécifications soit plus facile au sein d'une nouvelle structure qui débiterait dans le métier, sans expérience, mais sans (mauvaises) habitudes.

Dans le cas de la CACG, les principales sources d'amélioration qui ressortent des études de dangers, mais également de la formalisation des consignes sous forme écrite concernent ainsi la tenue du registre du barrage.

La prise en compte du risque comme facteur déterminant du contenu des consignes générales et des adaptations au cas par cas ?

Nous avons ainsi été conduits à rédiger un document global « organisation générale de l'exploitation et de la surveillance des barrages à la CACG » porté à la connaissance de l'Administration (dans ses différentes composantes compétentes sur nos bassins d'intervention). Ce document reprend les diverses dispositions indiquées ci avant selon l'ordonnancement suivant :

- exploitation et surveillance fonctionnelles courantes,
- dispositions relatives aux visites techniques approfondies,
- dispositions relatives à la surveillance en période de crues, aux interventions après séismes, aux événements exceptionnels, et modalités de principe de la transmission des informations,
- modalités de maintenance des ouvrages.

Ce document qui n'a pas à être formellement validé en externe résulte du retour d'expérience acquis. Il est appelé à évoluer en tant que de besoin, selon les retours successifs des enseignements des EDD, ... et des avis en retour exprimés. Ce cadre soutend ensuite chacun des documents de « consignes écrites » spécifique à chaque ouvrage. Ont ainsi été élaborés les documents relatifs aux principaux ouvrages de notre concession d'Etat. A ce jour, seules les consignes relatives à un ouvrage concédé par une Collectivité territoriale (première transmission effectuée) sous une ancienne mouture moins élaborée, ont été administrativement validées. Le retour d'avis administratif sur les plus récentes transmissions nous permettra de libérer les envois relatifs aux autres ouvrages du parc : les calendriers d'élaboration de ces documents (fixés au cas par cas par arrêté préfectoral valant nouveau règlement d'eau) sont normalement dépassés, mais le pragmatisme des uns et des autres a conduit à cette souplesse. Les retours des avis relatifs aux EDD sont encore susceptibles de faire évoluer le détail de tel ou tel document spécifique sans toutefois les remettre en question de façon significative.

En effet la plupart des intervenants sur les barrages (le plus souvent des opérateurs-techniciens) ne sont pas particulièrement habitués ni formés à la rédaction de documents et donc à l'enregistrement écrit de leur intervention ; de plus on est confronté à la CACG (et ailleurs) à la mise en œuvre de plus en plus systématique de dispositif informatisé de gestion du travail du personnel, ce qui ne facilite pas la consignation écrite dans le registre.

Par exemple à la CACG, un électricien qui va contrôler les dispositifs électriques de manœuvre des vannes sur un barrage va devoir consigner son intervention dans le dispositif informatique de gestion de la maintenance (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur), dans les buts premiers de gestion des emplois du temps du personnel et de gestion analytique des affaires ; ainsi, pour lui et pour sa hiérarchie, sa prestation est identifiée.

Le fait de devoir encore écrire dans le registre du barrage ce qu'il a fait lui apparaît comme redondant.

Cette situation n'est bien entendu pas figée, et de nombreuses opérations de sensibilisation et de formation du personnel ont été réalisées et se poursuivront au fur et à mesure que les consignes

écrites seront validées par les Préfectures, chaque validation pouvant être un peu utilisée comme « piqure de rappel » (au moins pour les premières qui se font un peu attendre).

Usage immédiat ou différé des notations aux registres ?

Les consignes, spécifiques à chaque ensemble d'ouvrages, s'inscrivent dans un cadre – a priori exhaustif – de dispositions et moyens de contrôle : ainsi les examens routiniers définissent chacun des éléments physiques constitutifs en déterminant la fréquence du contrôle ou de la mesure, l'indicateur relevé, la durée et le moyen de contrôle, le mode de report et d'archivage de l'information.

La désignation du service et de l'opérateur en charge de chaque groupe de test est préalablement précisée dans le cadre général du dispositif de contrôle élaboré (et si besoin actualisé) pour l'ensemble du parc des ouvrages gérés par la CACG.

Quelle appropriation pour la préparation des VTA puis des RS ?

Cet ensemble d'enregistrements doit être (et est) mis à profit pour la préparation des visites techniques approfondies (VTA, anciennes visites annuelles) réalisées par le bureau de contrôle (le cas échéant en présence de l'exploitant) en préalable à la visite programmée par les services de contrôle administratifs (compilation des données et des mesures d'auscultation, annotations du registre de surveillance, événements remarquables et de toute nature survenus depuis le passage précédent).

Il en ira désormais de même pour les futures revues de sûreté (RS, anciennes visites décennales). Nous employons ici délibérément le futur car le calendrier de ces visites fait qu'aucun de nos ouvrages n'a fait l'objet de ce nouveau protocole (cf ci-après).

Il apparaît que les apports des nouvelles EDD sont sans effet significatifs dans cette préparation des VTA et ne constituent pas un élément déclencheur des RS.

Les VTA sont encore effectuées selon la périodicité antérieure, sur l'inertie d'un système jusqu'alors éprouvé et sans modification significative de procédure. Il est probable que le proche avenir verra une amélioration par une meilleure mise en évidence du comportement « différentiel » d'une inspection sur l'autre (actuellement les restitutions sont globales et cumulatives) et un meilleur affichage des événements survenus dans l'année. Une difficulté organisationnelle subsiste : la VTA est le fait du bureau de contrôle et intervient à l'amont de la visite administrative, après communication des éléments de ce contrôle. De fait l'exploitant est tenu de participer aux deux visites pour effectuer à la demande la manœuvre des équipements hydrauliques et permettre l'accès aux locaux électriques. Nous voyons dans une meilleure tenue des registres, une possibilité de nous affranchir de ces présences, grâce à la prise en compte des manœuvres effectuées dans le cadre des suivis systématiques. Cette opération serait certes facilitée par la télécommande de la vanne de vidange rapide qui ne peut en l'état de nos procédures être effectuée que sur site et par un personnel de l'exploitant : un risque, confirmé par nos analyses EDD serait de permettre la télécommande (aisée techniquement) mais avec des risques d'ouverture inopinée, accidentelle ou délictueuse.

En ce qui concerne les RS, leur protocole actuel est validé par l'Administration et nous donne satisfaction. Une difficulté, non apparue jusqu'alors, pourrait provenir de l'articulation entre la préparation de la revue, notamment par inspection subaquatique, et le souhait des techniciens de cette administration de mieux appréhender un élément immergé non visible. Une insuffisance de la confiance portée au bureau de contrôle (et en parallèle au couple Maître d'Ouvrage – exploitant) peut être une source d'allongement et de complexification de la procédure. Nous voyons dans les nouvelles modalités, une possible cause d'étirement des calendriers. Ainsi, pour les deux principaux ouvrages de la Concession précédemment mentionnés et qui ont fait l'objet de la production d'une EDD (non encore formellement validée) nous sommes engagés dans ce qui aurait été la visite décennale. Les visites subaquatiques ont été anticipées en fin de campagne précédente et ont fait l'objet de rapports diffusés en début d'année 2011. Leur prise en compte par les Services de contrôle technique de

l'Administration devra intervenir d'ici la fin de la présente campagne pour que l'inspection visuelle de l'examen technique complet (ETC) puisse être effectuée en période de creux de vidange, en présence ou non de ceux-là. Il serait opportun pour ces « premières » que cette inspection soit faite en parallèle à la prise en compte par nos partenaires des EDD d'ores et déjà rendues.

Quels apports attendre d'un contrôle croisé ?

De même, le processus doit-il être engagé pour deux autres ouvrages de classe A dont nous sommes gestionnaires pour le compte d'une Collectivité (Institution Adour)? Pour l'un d'entre eux l'EDD a d'ores et déjà été produite : il est à signaler que la CACG et l'Institution ont, de concert, jugé opportun de la laisser réaliser par un bureau de contrôle agréé tiers (ISL en l'occurrence). La CACG, constructeur de cet ouvrage il y a près de trente ans et actuel gestionnaire, a communiqué l'ensemble des pièces de dossiers archivées, les registres et consignes, rapports de suivi et d'auscultation... Les conclusions ne mettent pas en évidence d'écart entre l'état des ouvrages et les procédures de suivi et gestion qui lui sont appliquées. Le bureau d'étude préconise un renforcement souhaitable du système d'auscultation (remplacement de cellules de pression interstitielle et densification de puits de décompression). Au-delà de nos divergences conceptuelles (mineures, cf analyse comparative du thème 1) sur les méthodes d'estimation de la criticité, c'est sans doute là le seul point qui serait susceptible d'appréciations différentes entre le couple Maître d'Ouvrage-exploitant et le tiers « sachant » mais extérieur à l'histoire et à la vie de l'ouvrage. L'un cherchera à préconiser toute mesure d'amélioration qui lui semblerait possible et souhaitable, les autres n'en saisissant pas nécessairement l'opportunité.

Le calendrier de la RS (la visite décennale aurait dû intervenir en 2011) a été quelque peu distendu pour cet ouvrage, ainsi que pour un voisin, afin de pouvoir intégrer le retour d'avis sur l'EDD (produite pour l'un, à initier pour l'autre). Il sera là aussi intéressant de juger du couplage entre les deux démarches.

A l'inverse nous avons eu la possibilité de conduire des interventions diverses sur des ouvrages, jusqu'alors inconnus de nous, et sans attendre les conclusions d'EDD (engagées ou non selon les cas). Il s'agissait en l'occurrence de concevoir les dispositions constructives propres à améliorer la sécurité des ouvrages fonctionnels, par anticipation délibérée des Maîtres d'Ouvrage qui n'ont pas attendu pour cela de décision administrative de type révision spéciale. Ces améliorations sont essentiellement passées par une actualisation hydrologique, une redéfinition des crues de projet et de danger, le redimensionnement des ouvrages.

En l'occurrence l'initiative du propriétaire des barrages-réservoirs (à vocation d'AEP ou de loisirs) n'a pas été conditionnée ni guidée par l'EDD. Comme pour nos ouvrages, il apparaît que le souci de la sécurité de la part de Maîtres d'Ouvrage responsables ne requiert pas la production de telles EDD.

Nous retiendrons que ces EDD seront l'élément déclencheur de remise en cause dans les cas différents, où un MOA ne serait pas sensibilisé, voire serait réticent à engager une modification coûteuse de ses ouvrages ou risquerait d'en voir compromettre l'exploitation normale.

Les possibles remises en cause (actualisations) de données dimensionnelles ?

En ce qui concerne notre parc, le retour d'expérience permanent nous a permis techniquement d'évoluer en modifiant quelques caractéristiques du génie civil pour l'évacuateur de crue de tel ou tel autre barrage par exemple, mais surtout il a conduit à préconiser dans le détail des actions de prévention à mettre en œuvre pendant les phases de construction (valorisées dans le CCTP travaux applicable à nos constructions).

Les nouvelles modalités d'appréciation des risques (EDD) et de contrôle (RS essentiellement) seront-elles de nature à avoir des incidences à court terme ? Il est probable que les modalités d'exploitation et de gestion ne seront pas critiquées sur ce parc d'ouvrages qui bénéficie de procédures homogènes éprouvées et validées au cours des vingt dernières années.

Il est par contre possible que la prise en compte de nouveaux aléas ou l'identification de risques, sans doute très hypothétiques, jusqu'alors non perçus, voire celle de nouvelles normes en matière de dispositions constructives ou dimensionnelles, conduise à des préconisations (des obligations) de reprises d'éléments physiques des ouvrages (redimensionnement des évacuateurs...). Si ce risque (ici économique et fonctionnel) est peu redouté sur un parc correctement construit et suivi, il n'en va pas de même pour une série d'ouvrages isolés.

Il en découlera de nécessaires recommandations, puis par voie administrative, obligations de reprise d'ouvrages par des travaux confortatifs plus ou moins conséquents.

### **2.3. les préconisations de travaux**

Quand les données techniques initiales sont satisfaisantes, l'étude de dangers peut montrer que l'amélioration de la sécurité du barrage nécessite des travaux qui peuvent être relativement « légers » par exemple la mise en œuvre de dispositifs d'auscultation complémentaires, ou très « lourds » par exemple la réhabilitation d'un évacuateur de crues dont les capacités sont apparues trop faibles au regard des standards actuels ou de l'amélioration de la connaissance des paramètres hydro-climatiques par allongement des chroniques de mesures.

Nous n'avons pas encore été directement concernés par cette deuxième situation, notamment en raison du fait que certains barrages, pour lesquels l'étude de dangers a été réalisée, avaient précédemment été l'objet de travaux d'augmentation de capacité des évacuateurs en prolongement d'une démarche interne du type « révision spéciale » engagée en fin des années 90.

De même, d'autres Maîtres d'Ouvrage ont pris l'initiative de lancer de telles procédures de remise « à niveau » avant l'étude de dangers, notamment quand les processus de révision étaient déjà engagés de longue date.

Dans ces situations, il convient que le bureau d'études en charge de l'étude de dangers soit en étroite relation avec le Maître d'Ouvrage de telle sorte que les préconisations qui ne sont pas discutables fassent l'objet d'un engagement formel de sa part et puissent être assorties de délais de réalisation, en accord avec les contraintes techniques de sécurité, mais également en tenant compte de ses possibilités de mobilisation financière.

En effet, il est indispensable que les préconisations de travaux soient assorties de délais de réalisation, qui peuvent s'étaler de quelques mois en cas d'urgence jusqu'à dix ans, soit pour la prochaine révision de l'étude de dangers ; en l'absence de délais qui permettent de mesurer l'urgence des préconisations, on peut craindre que ces préconisations restent des intentions de principe ; cela peut être fréquemment le cas en ce qui concerne le dispositif d'auscultation dont on peut dire systématiquement sans se tromper qu'il peut toujours être densifié et amélioré, mais sans que l'on soit persuadé que cela améliore significativement le niveau de sécurité du barrage.

Notons toutefois que dans certains cas (insuffisance notoire des équipements opérationnels ou inquiétude quant au vieillissement ou à l'évolution des ouvrages), l'amélioration du dispositif d'auscultation est une action importante vis-à-vis de l'augmentation du niveau de sécurité du barrage, et dans ce cas elle doit être mise en œuvre dans un délai raisonnable, compatible entre l'intérêt technique et les possibilités financières du Maître d'Ouvrage.

### **2.4. Les premiers retours d'expérience**

Une somme de cas spécifiques ou des constantes prévisibles ?  
De nouvelles perceptions ?

Il semble évident que les conséquences des nouveaux textes seront plus ou moins « dommageables » en ce qui concerne les nouveaux investissements financiers à consentir par le Maître d'ouvrage, selon la situation actuelle de son (ses) ouvrage(s), voire de leur situation de « départ », c'est-à-dire leur ancienneté, la façon dont ils ont été conçus et construits (à l'économie ou dans les normes, en fonction de quelles données disponibles, notamment hydrologiques...). L'EDD à engager ne pourra que mettre en exergue les insuffisances des conceptions initiales, des modalités constructives (apparentes ou selon les « dossiers » qu'il sera – ou non – possible de reconstituer). Cela sera particulièrement vrai pour la classe des ouvrages agricoles, de loisirs ou à des fins de stockage pour l'AEP de petites collectivités, sans doute beaucoup moins pour ceux de grands parcs et particulièrement pour les grands barrages soumis à avis préalable du CTPB. On constate cependant que l'extension des données et connaissances en matière d'hydrologie conduit assez inexorablement, pour les ouvrages de plus d'une dizaine d'années, à une remise en cause des données de remplissage et de crues et souvent un redimensionnement des seuils évacuateurs et des revanches.

De même les plus récentes avancées sur les phénomènes sismiques et la prise en compte des eurocodes (cf travaux du GT ad' hoc du CFBR) risquent-ils de conduire au moins à des calculs de vérification de stabilité ? Les retours d'un nombre suffisant de résultats d'EDD confirmeront cette appréciation. Nous aurons à procéder à cette vérification pour notre parc, même si les zonages n'ont pas fondamentalement changé et si la stabilité au séisme semble confirmée, au moins pour les ouvrages sains.

Ainsi, l'EDD permet, de façon plus systématique que dans les pratiques antérieures plus ou moins codifiées, de mettre en évidence les éventuelles insuffisances de l'ouvrage et de les hiérarchiser en fonction des conséquences potentielles de défaillances liées à de telles insuffisances. Mais comme pour tout dispositif réglementaire nouveau, il apparaît des problèmes de calage dans le temps en fonction de l'historique de chaque ouvrage.

### **3. DES MODIFICATIONS COMPORTEMENTALES POUR LA CACG? DES ENSEIGNEMENTS A RETIRER POUR D'AUTRES CAS ?**

Les conclusions précédentes qui sont le fait de techniciens nous conduisent toutefois sur le champ de la perception du risque par les tiers et de son acceptabilité sociale, et en prolongement sur le porté à connaissance des EDD pour le grand public.

Criticité : quel risque « admissible » ? Comment expliciter la notion de fréquence (de probabilité ?) Existe-t-il un décalage entre perception et réalité ?

Nous n'apporterons pas ici la réponse à cette question, déjà soulevée en 2010, et attendons des éléments des échanges de ce présent congrès.

Alors que des opposants systématiques à la création de nouveaux réservoirs, voire au simple maintien des existants, nous opposent régulièrement les craintes de la « Société civile » qu'ils représenteraient, nous rappellerons seulement quelques éléments déjà produits en 2006 lors du Symposium du CIGB relatif à « l'acceptabilité sociale des barrages au XXI<sup>ème</sup> siècle » (2).

L'analyse exhaustive des différentes formes de consultation du public et des organismes constitués montrent en effet que les craintes sécuritaires sont quasiment absentes des préoccupations des populations avoisinantes, y compris de celles qui vivent en dessous des ouvrages projetés. Rarement sont évoqués des risques sanitaires (d'ailleurs non identifiés) et les risques de noyade. Le risque de rupture, que ce soit à la suite de séismes ou par submersion, n'est quasiment jamais évoqué.

Des diffusions de grande presse à l'occasion de l'engagement de visites décennales, de révisions d'ouvrages, ou lors des polémiques de 2006 sur l'état des ouvrages du parc EDF n'ont pas eu de retentissement dans la population en dépit des manchettes accrocheuses.

A contrario des articles de fond sont bien perçus et resteraient, à notre sens, de circonstance à l'issue de la production des EDD et des prochaines procédures réglementaires.

Pouvons-nous avancer une différence de comportement entre gestionnaires de parc et Maîtres d'Ouvrage isolés ?

Les expériences précédemment rapportées nous ont montré qu'il n'existe pas de règle univoque en la matière. Certains propriétaires de très petits parcs, voire d'un ouvrage unique, sont très sensibilisés, éventuellement avec le concours de l'Administration, à la sécurité intrinsèque de leur(s) ouvrage(s) es » et prennent des initiatives sans contrainte.

A l'inverse, de plus « riches propriétaires, quoique dûment sensibilisés, rechignent à se plier à un calendrier contraignant et à l'obligation d'engager de nouvelles dépenses sur des ouvrages souvent récemment construits suivant toutes les normes du moment et au comportement sain.

Nous avouons nous positionner entre ces deux situations, en ce qui concerne notre concession des aménagements d'Etat, car si ce dernier a largement subventionné la mise en conformité des barrages aux dernières dispositions, une charge résiduelle non négligeable est reportée sur son concessionnaire sans qu'il lui soit facilement possible de la répercuter sur les usagers ou bénéficiaires des aménagements. Nous prêcherons ainsi pour l'observance d'un rythme de mise en œuvre qui tout en permettant le respect des textes en autorise une adaptation pragmatique.

Pour les barrages techniquement bien suivis par un maître d'ouvrage sérieux et compétent (nous pensons que c'est la cas de la CACG, de la plupart des détenteurs de grands parcs, mais on l'a vu également de Maîtres d'ouvrage isolé bien accompagnés), l'introduction des EDD se traduit essentiellement par une formalisation et une traçabilité des actions techniques conduites et de l'organisation qui est mise en œuvre pour s'assurer de la sécurité des ouvrages.

La clause de confiance dans tel ou tel couple Maître d'Ouvrage / conseil technique est difficilement intégrable sans discrimination dans un texte ou règlement alors qu'il est indéniable que cette fonction joue un rôle dans la garantie de la sécurité. La densité et la précision des opérations de contrôle sont fixées par les textes, mais doivent être à notre sens adaptées aux situations avec souplesse : c'est ainsi que nous continuons (comme d'autres d'ailleurs) à respecter un protocole interne pouvant être plus contraignant, même en absence d'élément alarmant. A l'inverse, le nouveau rythme de production des rapports d'auscultation à 5 ans pour les ouvrages de classe B nous paraît imprudent dans plusieurs situations où ce capital confiance (dans les capacités interprétatives ou de réaction des intéressés) ne serait pas suffisamment étayé par le retour d'expérience.

Au vu de ces divers ressentis, nous retiendrons que l'EDD permet certes de mieux appréhender les nécessaires interventions confortatives mais il ne faut pas que le service de contrôle demande ensuite de tout réaliser en urgence, surtout si celle-ci ne s'impose pas, car les mobilisations de moyens techniques et financiers ne seront très certainement pas suffisamment étalées dans le temps ; de plus l'aspect pédagogique de la démarche risquerait alors d'être perdu au risque que celle-ci ne soit plus ressentie que comme une contrainte vaine et inutilement coûteuse.

La pondération et la hiérarchisation des pistes d'amélioration devraient être prises en compte lors de discussions avec le service de contrôle pour fixer des échéances compatibles tout à la fois avec le niveau de sécurité de l'ouvrage et en regard des conditions opérationnelles de fonctionnement de l'ouvrage et pour mobiliser le maître d'ouvrage (selon ses capacités de mobilisation de financements).

## **BIBLIOGRAPHIE**

1 / Colloque CFBR / AFEID de novembre 2010 : « Premier retour d'expérience en ce qui concerne les études de dangers effectuées pour les principaux barrages de la CACG dans le sud-ouest » ; Daniel BOUBEE, Solène LALOUX, (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne),

2 / Acceptabilité sociale des barrages au XXIème siècle, Symposium CIGB Barcelone 2006 :  
D. BOUBEE « Retour d'expérience sur les vingt dernières années de réalisations dans le sud-ouest ».



## LE RESUME NON TECHNIQUE DE L'ETUDE DE DANGERS DE BARRAGE

**Patrick Le Delliou**  
MEDDTL/DGPR/SRNH/STEEGBH/BETCGB  
[patrick.ledelliou@developpement-durable.gouv.fr](mailto:patrick.ledelliou@developpement-durable.gouv.fr)

**Xavier Layrac**  
EDF DPIH  
[xavier.layrac@edf.fr](mailto:xavier.layrac@edf.fr)

**Jean BOULET**  
EDF DPIH  
Téléphone : 00 33 04 79 60 62 16,  
Fax : 00 33 04 79 60 62 98,  
Courriel : [jean.boulet@edf.fr](mailto:jean.boulet@edf.fr)

### MOTS CLÉS

Résumé, communications, barrages, enjeux, environnement, accidents, vulgarisation scientifique et technique, risques, confiance, responsable, législation.

### RÉSUMÉ

*Le Résumé Non Technique (RNT) est le premier chapitre de l'Etude de Dangers (EDD) ; son objectif réglementaire<sup>18</sup> est de "... favoriser la communication de l'EDD à des non-spécialistes et permettre une appréciation convenable des enjeux."*

*Communiquer sur les dangers potentiels d'une installation dont les bienfaits sont reconnus par la société mais dont la mémoire collective ne conserve que trop souvent les images de catastrophe(s), n'est pas un exercice trivial, ni exempt lui-même de risques potentiels.*

*Les barrages constituent certainement le type d'ouvrage existant au monde depuis les temps les plus anciens et leur utilisation est des plus diverses ; leur présence dans l'environnement est, sauf exception, relativement bien acceptée. Bien que l'accidentologie internationale montre que le nombre d'accidents recensés, ayant causé des conséquences graves, soit très faible, l'occurrence d'un accident n'est évidemment pas nulle ; néanmoins, cette conclusion, sans doute abstraite, même reconnue, n'est pas facilement admise par le grand public, notamment dans les sociétés des pays développés.*

*La réglementation en vigueur impose aux responsables des barrages des classes A et B de faire réaliser par un organisme agréé, une EDD avec une mise à jour périodique. Dans la majorité des cas, l'EDD est rédigée, relue et approuvée par des techniciens ; ces derniers, bien qu'habités à rédiger des documents techniques et à présenter des communications scientifiques et techniques, ne sont pas pour autant des spécialistes en communication grand-public et en particulier, sur un sujet aussi sensible pour la société qu'est le risque industriel.*

*Le résumé non technique est donc voulu par le législateur comme un outil de communication de l'EDD par le Responsable de l'ouvrage ; le pari d'un résumé non technique "réussi" consiste donc à conjuguer dans un document concis, les attentes du législateur, la fidélité à l'EDD et une rédaction dans un style linguistique sobre et compréhensible par tous les lecteurs.*

*La communication proposée est structurée en deux parties et une annexe :*

- Finalité et forme du résumé non technique : précisant le contenu attendu par rapport à l'objet de l'EDD et le niveau souhaité de synthèse, de vulgarisation et de précision,*
- Recommandations de rédaction : style de rédaction, volume du document et équilibre entre texte et illustration ; formulation non anxiogène des notions de dangers, risques, gravités des conséquences, etc.*
- Annexe 1 : proposition d'une maquette de RNT : atteindre le niveau de concision, de vulgarisation technique et de transparence souhaité, tout en étant crédible face à de légitimes interrogations mêlées de craintes, est sans doute un dilemme pour tout sachant confronté à l'exercice de communication.*

<sup>18</sup> Arrêté du 12 juin 2008

## 1. FINALITE ET FORME DU RESUME NON TECHNIQUE

Les études de dangers (EDD) constituent la nouveauté sans doute la plus importante, en tout cas la plus souvent citée, des dispositions en matière de sécurité des barrages résultant du décret du 11 décembre 2007. Ces nouveaux objets ont même été prévus dès l'origine puisque le principe en apparaît dans la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 qui stipule :

*«Un décret en Conseil d'État détermine :*

...

3° Les conditions dans lesquelles l'autorité administrative peut demander au propriétaire ou à l'exploitant d'un ouvrage visé à l'article L. 214-2 du présent code ou soumis à la loi du 16 octobre 1919 précitée la présentation d'une étude de dangers qui expose les risques que présente l'ouvrage pour la sécurité publique, directement ou indirectement en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'ouvrage. Cette étude prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique et la gravité des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents ; »

Le décret de 2007 et les textes suivants précisent les objectifs et le contenu général de l'étude de dangers. Il s'agit d'un document dont l'une des finalités est d'établir et de présenter les risques inhérents à l'existence même de l'ouvrage, d'indiquer les mesures prises par le responsable de l'ouvrage pour maîtriser ces risques et, si nécessaire, de tracer les pistes pour une amélioration de la sécurité.

Il s'agit donc à la fois d'un outil de dialogue entre le responsable d'un ouvrage et l'administration en charge du contrôle de la sécurité de ce barrage et aussi d'un outil d'affichage et de communication sur les risques auprès d'autres intervenants potentiellement concernés.

L'arrêté du 12 juin 2008 qui précise le plan type d'une étude de dangers prévoit l'existence d'un « Résumé non technique ». De façon presque paradoxale, ce résumé est le premier chapitre (et celui de numéro 0) du document. Le message est clair : il s'agit d'ajouter au document « Étude de dangers » une sorte de supplément détachable qui rappelle l'essentiel de l'étude de dangers. C'est normalement le premier vecteur de communication sur l'EDD auprès du grand public.

Le contenu et la forme sont entièrement définis par le titre et précisés par l'arrêté. Le guide de lecture joint à la circulaire du 31 octobre 2008 en rappelle la forme et le contour. Il s'agit de faire un résumé de l'essentiel de l'étude, en rappelant les caractéristiques générales de l'ouvrage et de son environnement, en indiquant les risques principaux, les parades existantes et les méthodes utilisées par le responsable du barrage pour maîtriser les risques et de montrer les axes de progrès envisagés. Le résumé indique notamment les améliorations envisagées à court terme en indiquant des délais de mise en œuvre ou bien il rappelle les mesures conservatoires déjà prises.

Il ne s'agit évidemment pas d'y trouver des éléments techniques, des affirmations ou des justifications qu'on ne trouverait nulle part dans le reste du document. Il n'est inversement pas admissible que ce résumé omette d'évoquer des éléments majeurs comme les événements redoutés étudiés, des risques jugés non acceptables...

La cible est d'abord celle de lecteurs non avertis. On évitera donc les jargons trop techniques voire technocratiques, sans tomber dans l'excès inverse. Outre une ou des photos du barrage, les éléments graphiques et cartographiques illustrant l'implantation des ouvrages ainsi que l'étendue des zones impactées par les accidents potentiels y trouvent une place majeure. Il faut dire les choses dans un style presque journalistique en gardant à l'esprit que le résumé peut-être la porte d'entrée du document complet et donc ne doit pas présenter de décalage par rapport à l'ensemble de l'étude. Compte tenu de la « cible » du résumé, les éléments de méthodologie, les méthodes de calcul n'ont pas besoin d'être ici décrits dans cette partie.

## **2. RECOMMANDATIONS POUR LA REDACTION DU RESUME NON TECHNIQUE**

La partie 1 de la communication a rappelé le cahier des charges fixé par la réglementation pour la rédaction du RNT de l'EDD de barrage et l'a décliné en objectifs ; ainsi proposée, la qualité recherchée pour le RNT constitue pour son rédacteur, un difficile exercice de synthèse d'un document technique complexe traitant d'un sujet par essence anxiogène, afin d'en faire un instrument de communication tout public véhiculant l'image du barrage et au-delà, celle de l'organisme qui en porte la responsabilité.

Il s'agit donc de résumer fidèlement l'Etude de Dangers dans un style de rédaction sobre, précis et nuancé, s'inspirant du journalisme technique.

***Le RNT peut être subdivisé en quatre parties :***

### **2.1. L'ouvrage et son environnement :**

Cette partie uniquement descriptive permet au lecteur, familier ou non du monde des barrages, de faire connaissance avec l'ouvrage, son milieu naturel et son environnement.

Ainsi, le rôle du barrage, la retenue d'eau artificielle qu'il crée sur la rivière naturelle, la genèse de sa conception et de sa réalisation doivent être décrits ; de même, l'environnement géographique de l'ouvrage et les principaux enjeux de sécurité publique qui s'y trouvent, sont identifiés.

Les grandeurs caractéristiques du barrage et de ses principaux organes de sécurité sont décrites ; pour un ouvrage existant, il est pertinent de rédiger une courte synthèse traitant du comportement du barrage depuis sa construction et sa mise en eau de barrage et rappelant les événements remarquables ayant façonné son histoire.

Cette partie comprend la description des ouvrages faisant partie du périmètre de l'Etude de Dangers, ainsi que la zone géographique concernée par l'étude.

### **2.2. L'exploitation du barrage et la gestion de la sécurité :**

Cette partie permet au lecteur de faire connaissance avec l'industriel qui exploite et surveille le barrage.

*Commentaire : préciser si l'exploitant est également ou non le Responsable de l'ouvrage*

Le système organisationnel et humain, mis en place par le Responsable de l'ouvrage pour exploiter et maintenir l'ouvrage, est sommairement décrit ; le fonctionnement de la chaîne de responsabilités chargée d'appliquer les procédures, consignes, instructions de sécurité existantes, est décrit dans ses principes.

L'objectif recherché est de permettre au lecteur de forger sa propre opinion quant à la robustesse des dispositifs de surveillance et de maintenance de l'ouvrage et dans la capacité d'intervention rapide des personnels qui sont chargés au quotidien de l'exploitation de l'ouvrage.

### 2.3. *L'analyse des risques et l'évaluation de la dangerosité :*

Cette partie présente sommairement la méthodologie retenue par le réalisateur de l'EDD, à qui le Responsable de l'ouvrage a confié la réalisation de l'EDD.

Une brève description de l'organisation et des compétences rassemblées pour réaliser l'EDD, est pertinente ; elle est de nature à donner au lecteur des gages sur la qualité de la démarche.

La démarche d'analyse de risques proprement dite, ne nécessite pas une description détaillée dans le RNT ; néanmoins, on peut trouver utiles d'en illustrer les adaptations au domaine des barrages en identifiant ses spécificités, par rapport aux autres domaines de l'industrie ; par exemples :

- Définition du périmètre et de la zone d'étude <sup>19</sup> : *rappeler la description figurant dans l'EDD*
- Définition des fonctions du barrage : *maîtriser la rétention d'eau, les variations de débits relâchés à l'aval, les fluctuations du niveau de la retenue,*
- Recensement des enjeux de sécurité publique : *rappeler les enjeux identifiés dans l'EDD tels que : infrastructures publiques ou privées recevant ou non du public, temporaires ou permanentes, classées sensibles pour l'environnement ou non,*
- Recensement des agresseurs potentiels du barrage : *rappeler les agresseurs identifiés dans l'EDD.*

Cette courte présentation doit montrer que la méthodologie d'analyse est adaptée à l'importance et à la sensibilité des enjeux potentiels, ainsi qu'à la complexité du barrage. L'objectif est de montrer au lecteur, sans doute plus familier de l'environnement de l'ouvrage que du barrage lui-même, que les enjeux de sécurité publique qu'il connaît ou perçoit, ont été appréhendés et traités par l'EDD.

### 2.4. *Les Evénements redoutés, leurs conséquences et les mesures de maîtrise des risques :*

Cette partie peut être limitée à une présentation commentée du bilan de l'analyse de risques ; elle comprend principalement les Evénements Redoutés Centraux (ERC) figurant dans la table de criticité de l'EDD et les Mesures de Maîtrise des Risques, décidées par le Responsable de l'ouvrage, au vu de l'EDD.

- *Les Evénements Redoutés Centraux* : décrire les scénarios retenus en explicitant les modes de défaillance étudiés et leur cinétique de développement, la combinaison des événements, les barrières de prévention passives et actives, les barrières de protection, le cas échéant ; le ou les scénarios les plus critiques sont commentés, en les situant par rapport à l'état des connaissances disponibles dans le domaine de l'accidentologie et l'accidentologie des barrages et de leurs organes de sécurité.

*L'expression des occurrences* : dépend de la méthodologie utilisée par le réalisateur de l'EDD ; il faut éviter dans le RNT les formulations complexes et mathématiques ; une transposition dans le langage commun est largement préférable. L'important est de rendre cette expression cohérente avec des données statistiques disponibles, lorsqu'elles existent.

*L'expression des gravités des conséquences* : dépend de la méthodologie utilisée par le réalisateur de l'EDD ; suivant le cas, la transposition synthétique des résultats de l'EDD est suffisante, en incluant si besoin, des illustrations pertinentes <sup>20</sup> \*, permettant au lecteur de visualiser les conséquences potentielles des ERC.

---

<sup>19</sup> Zone d'étude : zone située au-delà du périmètre (définition réglementaire) et contenant des éléments pouvant constituer des enjeux et/ou des agresseurs des composants du périmètre.

<sup>20</sup> Joindre éventuellement la cartographie du tracé de l'onde de submersion, consécutive à la rupture du barrage et/ou toute autre illustration de même nature, facilitant la lecture et la compréhension du RNT.

*Le bilan de criticité des ERC* : l'insertion de la table de criticité de l'EDD ne semble pas indispensable dans le RNT, sa lecture pouvant ne pas être aisée. On peut choisir de lui préférer des commentaires aux ERC et en identifiant ceux faisant l'objet de mesures de réduction des risques que l'EDD recommande au Responsable de l'ouvrage de décider.

- *Les Mesures de Maîtrise des risques* :

Cette partie finale du résumé de l'EDD doit convaincre le lecteur de la réalité du partage de l'EDD entre l'Organisme réalisateur et le Responsable de l'ouvrage et de sa participation au processus d'élaboration de l'étude ; le RNT précise que les mesures listées dans l'EDD sont décidées par le Responsable de l'ouvrage habilité à les commanditer.

La transposition du chapitre correspondant de l'EDD peut être suffisante. Il est proposé de traiter distinctement :

*Les Mesures de Réduction des Risques* : en indiquant leur date de mise en œuvre, les mesures transitoires éventuelles et leur efficacité (réduction de l'occurrence ou des gravités des conséquences ou les deux à la fois).

*Les études complémentaires identifiées par l'EDD* : en indiquant que leur mise en œuvre est destinée à actualiser et améliorer la qualité des données de l'ouvrage et par conséquent à renforcer la pertinence de l'image sécuritaire du barrage.

### **3. CONCLUSIONS**

Ces premières recommandations ont pour ambition d'aider les rédacteurs des RNT des EDD à atteindre les objectifs du RNT dans un document de quelques pages (une dizaine au plus). Elles ont naturellement vocation à s'enrichir en bénéficiant du retour d'expériences des professionnels contribuant aux Etudes de Dangers.

### **4. NOMENCLATURE**

Le décret du 11 décembre 2007

L'Arrêté des EDD du 18 juin 2008

La circulaire du 31 décembre 2008 et son annexe.

### **5. REMERCIEMENTS**

Les auteurs remercient les rapporteurs/relecteurs de la présente communication ainsi que tous les rédacteurs d'EDD confrontés à l'exercice de rédaction d'un RNT ; ces derniers ont ainsi contribué indirectement à élaborer cette communication et son annexe.

## Proposition de maquette de Résumé Non Technique

### Résumé Non Technique de l'EDD du barrage (B)

Conformément à la réglementation, le Responsable du barrage (*nom de l'organisme*) a fait réaliser l'Etude de Dangers du barrage de (B) par l'Organisme agréé (*nom du bureau d'ingénierie*).

L'EDD porte sur le barrage, ses organes de sécurité et ses dispositifs et moyens d'exploitation et de surveillance ; elle ne concerne pas les ouvrages et organes de production d'énergie (*ou autre usage du barrage à des fins industrielles*).

- *Commentaires* : l'exemple support choisi est un barrage (vraisemblablement en béton et équipé d'un évacuateur de crues vannés), destiné à la production hydroélectrique; le volume de la retenue est important et le plan d'eau est le siège d'activités touristiques et de loisirs nautiques. L'environnement à l'aval proche est rural ; l'environnement éloigné est très urbanisé et industrialisé.

### L'ouvrage et son environnement

Le barrage de (B), implanté sur la rivière (R), est situé sur la (les) commune(s) de ...., dans le département de .... L'environnement du barrage est constitué par la retenue artificielle qu'il crée, les communes de (citer les principales) ; les principaux enjeux de sécurité publique concernés par une éventuelle défaillance du barrage sont (lister).

Les fonctions de sécurité du barrage sont de retenir l'eau de la retenue artificielle qu'il crée par sa présence, d'assurer en le maîtrisant le transit des crues naturelles de la rivière, de maîtriser le débit de l'eau relâché à l'aval et de gérer le marnage de la retenue.

La retenue alimente une centrale hydroélectrique. Par ailleurs, la présence de la retenue a permis le développement d'activités touristiques ainsi que de loisirs nautiques et aquatiques.

L'Organisme (nom), concessionnaire/propriétaire du barrage, l'exploite au titre du décret de concession ou de l'arrêté préfectoral d'autorisation du .....

- *Commentaire* : insérer un extrait de carte (routière ou autre au 1/25000), en la complétant pour permettre une visualisation aisée du barrage. Insérer une légende à l'illustration et citer sa source.

### Description de l'ouvrage

Le barrage de (B) a été construit de (période) et mis en service en (date) ; il s'agit d'un ouvrage de classe A, suivant le classement des barrages défini par le décret du 11 décembre 2007.

Le barrage (B) est un ouvrage de conception (*contemporaine, autre*) (date) ; il a été conçu, construit et contrôlé par (*citer le nom des bureaux d'études et entreprises et équipementiers à l'origine de l'ouvrage*), dans le respect des règles de l'art en vigueur.

- *Commentaire* : insérer un ou deux extraits de plans ou des photos permettant de visualiser l'ouvrage et sa retenue.

*Le barrage* : il s'agit d'un ouvrage de type (*type : béton poids, voûte, remblais, autre,*), d'une hauteur maximale de H (m) et dont la longueur en crête est de L (m). Le barrage crée une retenue artificielle de V (m<sup>3</sup>) à l'altitude (H) ; il est régulièrement surveillé par l'exploitant et ausculté et contrôlé.

*L'évacuateur de crues : situé en (crête, latéral, adjacent), l'ouvrage est du type (vanné, seuil libre, ..).*

*Exemple pour un EVC vannés : l'ouvrage est une construction en béton, composée de (x) passes, équipées de vannes, ..) et d'un coursier (ou non) ; les vannes sont pourvues des équipements et instruments permettant de les manœuvrer localement, depuis des locaux destinés à cet effet. L'évacuateur de crues est dimensionné pour permettre le transit, en toute sécurité, d'une crue naturelle (ayant une chance sur "x" mille de survenir chaque année)*

*L'organe de vidange de fond (ou de demi-fond) : il s'agit d'un organe de sécurité du barrage dont la fonction principale est de permettre par son ouverture une baisse rapide du niveau de la retenue dans l'hypothèse de l'urgence d'une situation d'urgence.*

*Les équipements auxiliaires du barrage : il s'agit des équipements d'alimentation en énergie (et leurs moyens de secours), des dispositifs de mesure du niveau du plan d'eau, des systèmes de commandes et de transmission des données et des alarmes, du système de surveillance et d'auscultation du barrage.*

*Les ouvrages annexes : il s'agit par exemple : de la galerie de dérivation provisoire, utilisée lors de la construction pour détourner l'eau de la rivière de l'emprise du chantier et actuellement obturée par un bouchon en béton de (X) m de longueur.*

*L'accès au barrage : s'effectue par la rive (gauche, droite) en empruntant la route (R).*

- *Commentaire : compléter selon le cas*

## **L'environnement de l'ouvrage**

- **La retenue d'eau créée par le barrage**

En situation d'exploitation courante, à l'altitude de A (m), la surface de la retenue est de S (km<sup>2</sup>) et s'étend sur plus de L (km) ; *préciser le cas échéant, la présence d'un barrage, ou autre, en queue de la retenue,*

La retenue est alimentée par un bassin versant de x (km<sup>2</sup>) + *caractéristiques particulières si nécessaire.*

La vallée à l'amont du barrage est une vallée (*large, étroite*) du massif (), représentative du relief (*moyenne ou haute montagne, plaine*) ; les berges de la retenue sont (*très ou faiblement pentues et boisées, etc.*)

*Commentaire : description sommaire de l'usage et de la fréquentation du plan d'eau à adapter suivant le cas ; par exemple :*

*Le plan d'eau, créé par la retenue du barrage (B), représente un attrait touristique et de loisirs apprécié et, à ce titre, connaît une forte fréquentation en saison estivale. Des bases de loisirs ont été aménagées aux abords de la retenue (citer les principales et, le cas échéant, un point spécifique remarquable). L'usage du plan d'eau à fins de loisirs est encadré par des textes réglementaires spécifiques et selon le cas, des conventions particulières.*

- **L'environnement à l'amont et à l'aval du barrage**

A l'amont : lister les installations industrielles et les infrastructures, présentes à l'amont du barrage (B), citées dans l'EDD,

A l'aval : lister les principales agglomérations, campings saisonniers, bases de loisirs nautiques, industries classées, citées dans l'EDD,

*Commentaire : compléter par des illustrations*

## **L'exploitation du barrage et la gestion de la sécurité**

L'exploitation du barrage de (B) est assurée par : à adapter au cas par cas mais doit traiter de l'exploitation courante, de la surveillance y compris de l'auscultation, de la maintenance courante, et de l'organisation mise en place pour faire face aux phénomènes naturels et aux situations exceptionnelles.

*Commentaire : proposition de texte générique à adapter (source EDD d'EDF)*

*Les missions de l'exploitant de barrage sont : la conduite, la surveillance et la maintenance opérationnelle courante du barrage et de ses équipements ; l'organisation mise en place par le Responsable de l'ouvrage permet de mobiliser en permanence les moyens adaptés et d'y affecter des personnels compétents, régulièrement formés et entraînés pour faire face avec l'anticipation requise, aux situations rencontrées.*

*Le barrage est exploité dans le respect des procédures établies et mises à jour autant que de besoin, par le Responsable de l'ouvrage et dont certaines sont soumises à l'approbation des services du contrôle, délégataire de l'autorité administrative ; les procédures d'exploitation en situations exceptionnelles comme, par exemple, les crues et les séismes, sont parmi les plus importantes, en raison de leur lien avec les exigences de sécurité publique auxquelles les barrages sont soumis.*

*Les organes et leurs équipements, ainsi que les dispositifs de mesures, font l'objet d'essais périodiques ; ces derniers sont réalisés par des organismes spécialisés suivant des procédures établies pour lesquelles les intervenants et leur encadrement sont formés et entraînés. Ces procédures portent sur les domaines techniques et l'organisation des essais ; elles analysent et anticipent les conséquences d'éventuelles défaillances durant la réalisation de l'essai.*

*Outre les dispositifs de sécurité propres à chaque organe (secours, redondances, limiteurs, indicateurs), des dispositifs particuliers existent pour maîtriser les risques et en limiter les conséquences, dans l'hypothèse d'une situation accidentelle ; ils sont composés de panneaux de danger, de restriction d'accès dans les zones sensibles, de campagnes régulières pour sensibiliser le public, les associations concernées et les écoles.*

*La pièce maîtresse du dispositif de prévention et de maîtrise des risques mis en place par le Responsable de l'ouvrage, repose sur la surveillance du barrage et des organes de manœuvres, la maintenance des installations, les dispositions de prévision des crues et des phénomènes naturels, le retour d'expérience et le contrôle des intervenants et leur formation permanente. Ainsi, le barrage de (B) est "ausculté" grâce à de nombreux appareils de mesure ; la fréquence des relevés permet aux organismes d'ingénierie qui interviennent sur sollicitation du Responsable de l'ouvrage, dans le cadre d'interventions programmées et spécifiques, de détecter les anomalies éventuelles, d'analyser le comportement du barrage, de réévaluer son niveau de sécurité en utilisant les moyens et méthodes les plus modernes en vigueur, de proposer des interventions pour maintenir l'ouvrage au niveau de sécurité requis et en maîtriser les risques liés à son exploitation.*

## **Méthode d'analyse des risques**

La sûreté est assurée par la maîtrise permanente des trois fonctions de sécurité de l'ouvrage qui sont "retenir l'eau", "maîtriser les variations de débit à l'aval", "maîtriser les variations du niveau du plan d'eau amont".

L'analyse des situations dangereuses et de leurs conséquences est menée de la façon suivante : *décrire succinctement la méthode d'analyse utilisée.*

*Commentaire : exemple de processus d'analyse de risques (source EDF)*

*L'analyse de risques de l'étude de dangers est structurée en 4 étapes :*

1. *L'identification des risques intrinsèques de l'ouvrage et de sa retenue et l'identification des barrières de prévention et de protection et l'évaluation de leur efficacité et de leur disponibilité.*
2. *L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) : elle 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 ; elle évalue l'effet des barrières en comparant la cinétique de leur activation par rapport à celle des initiateurs. Cette étape permet notamment l'identification des modes de défaillance les plus critiques appelés Evénements Redoutés Centraux (ERC).*
3. *L'Analyse Détaillée des Risques : pour chaque ERC identifié à l'APR, un arbre de défaillance (causes) et un arbre d'événements (conséquences) sont construits sous la forme d'un "nœud papillon" (schéma comportant l'ERC au centre, l'arbre de défaillance à gauche et l'arbre d'événement à droite). L'analyse des barrières évaluées à l'APR est approfondie en examinant notamment celles nécessitant des interventions humaines. L'occurrence de l'ERC est déterminée par quantification des occurrences des événements de l'arbre de défaillance, selon une échelle à 5 niveaux (voir tableau ci-après) et du niveau de confiance accordé aux mesures de maîtrise de risques. Les scénarii les plus vraisemblables pouvant conduire à l'ERC sont ainsi mis en évidence. L'échelle d'occurrence retenue est l'échelle qualitative (par classes ou niveaux) de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005, relatif aux études de dangers des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement soumises à Autorisation et dont s'inspire la méthodologie développée pour les EDD de barrages.*
4. *L'évaluation des gravités des conséquences :*
  - Rupture du barrage : par analogie aux données disponibles sur les débits des crues de référence de la rivière (rupture barrage),*
  - Rupture d'organes : par estimation des grandeurs physiques caractérisant la propagation de la vague correspondante.*

L'EDD est réalisée par une équipe pluridisciplinaire, sous la responsabilité de l'Organisme agréé ; les représentants du Responsable de l'ouvrage et de l'exploitant du barrage sont associés aux différentes étapes de l'élaboration de l'EDD, dont l'une des plus importantes est la collecte des données du barrage et de son environnement.

## **Le bilan de l'analyse des risques**

L'EDD a examiné l'ensemble des événements initiateurs et a étudié leurs combinaisons ; les scénarios des situations accidentelles pouvant porter potentiellement atteinte à la sécurité publique (dommages aux personnes et aux biens), qui ont été retenus par l'EDD, sont présentés ci-dessous.

*Commentaire : sont décrits ci-après quelques exemples courants de scénarios accidentels.*

- **Rupture du barrage (exemple)**

L'étude de dangers a étudié les scénarios susceptibles de provoquer la rupture de l'ouvrage :

*Lister les scénarios identifiés dans l'EDD et décrire le plus critique en rappelant les barrières de prévention qui permettent d'en réduire l'occurrence.*

Exemple pour une montée incontrôlée du plan d'eau :

*Scenario le plus critique : le scénario potentiellement dangereux retenu est une montée incontrôlée du niveau du plan d'eau en crue, combiné à une défaillance d'ouverture simultanée d'une partie ou de tous les organes de sécurité de l'ouvrage.*

*Barrière : l'organisation mise en place par l'exploitant (prévision des crues, astreinte, alarme, procédures adaptées, etc.), permet de détecter rapidement le(s) défaut(s) de fonctionnement des organes de sécurité et disposer des moyens et du temps suffisant pour y remédier.*

Les conséquences de ce scénario extrême sont des désordres importants affectant le barrage, voire sa rupture ; les conséquences, liées à la libération brutale de l'eau de la retenue, provoqueraient la baisse rapide de son niveau et une inondation qui se propagerait avec une vitesse rapide à l'aval, sur une distance de () km et concernerait, sur son passage, les agglomérations () ; la population qui serait concernée directement par le passage de la vague d'inondation a été estimée à ().

La rupture du barrage (B), susceptible d'impacter (x) personnes, est cotée *très improbable*.

*Suggestion : il est pertinent et, sans doute utile, d'insérer une carte montrant l'emprise des zones submergées. Cette carte est celle figurant dans l'EDD ; elle peut être simplifiée pour permettre de la présenter sous un format différent (réduit).*

- **Rupture d'une vanne de l'évacuateur de crues du barrage (exemple)**

L'étude de dangers a étudié les scénarios susceptibles de provoquer la rupture d'une vanne de l'évacuateur de crue :

*Lister les scénarios identifiés dans l'EDD et décrire le plus critique en rappelant les barrières de prévention qui permettent d'en réduire l'occurrence.*

*Exemple : rupture d'une des vannes qui retiennent l'eau en position fermée, avec la retenue pleine.*

*Scénario le plus critique : les données collectées prouvent que les vannes ont été correctement dimensionnées suivant les méthodes et règles de l'art en vigueur à l'époque de leur conception ; leur état actuel, les résultats des essais, leur niveau de maintenance attestent qu'elles ne présentent pas de défauts susceptibles d'altérer leurs performances mécaniques sous la sollicitation de la charge d'eau. Seul leur âge (), rapporté à la durée de vie estimée de ce type d'équipement est un facteur entrant dans l'estimation des scénarios de défaillance.*

*Barrière de prévention : l'organisation mise en place par l'exploitant (surveillance, essais, contrôles, appui de l'ingénierie, etc.), permet de détecter des anomalies et d'y remédier.*

Les conséquences extrêmes de cette situation potentiellement dangereuse seraient une baisse lente du niveau plan d'eau jusqu'à l'atteinte du seuil bas de la vanne qui repose sur le béton de la structure de l'ouvrage de génie-civil. Le volume d'eau ainsi libéré de façon intempestive est de (V).

*La gravité des conséquences sur la retenue : elles sont jugées négligeables compte tenu de la vitesse d'abaissement du niveau rapporté à la surface de la retenue.*

*La gravité des conséquences à l'aval du barrage : la rupture de la vanne générerait la libération instantanée d'un débit d'eau de plusieurs (centaines de m<sup>3</sup>/s) et élèverait de façon incontrôlée, le niveau de la rivière à l'aval et se propagerait sur plusieurs kilomètres. Elle provoquerait l'élévation inattendue du niveau de la retenue du barrage (C), situé à () km à l'aval du barrage (B), sans pour autant porter atteinte à sa sécurité. Ainsi, les conséquences resteraient contenues dans la retenue du barrage (C), qui est interdite d'accès ainsi qu'à la navigation.*

La rupture d'une vanne de l'évacuateur de crues du barrage (B) est cotée *improbable* ; les conséquences de cette rupture inopinée sont susceptibles d'impacter (y) personnes **ou\*** de propager une vague d'eau dont les effets sont jugés dangereux pour les personnes se trouvant sur sa trajectoire.

*\* Commentaire : l'expression des gravités dépend de la méthodologie utilisée par l'Organisme rédacteur.*

- **Ouverture intempestive complète d'une vanne de crues en essai (exemple)**

L'étude de dangers a étudié les scénarios susceptibles de provoquer l'ouverture intempestive d'une vanne de crues lors d'un essai :

Lister les scénarios identifiés dans l'EDD et décrire le plus critique en rappelant les barrières de prévention qui permettent d'en réduire l'occurrence.

Exemple : Ouverture intempestive d'une vanne lors d'un essai

*Scenario(s) le(s) plus critique(s) : l'un serait lié à une défaillance humaine, l'autre à une défaillance du contrôle commande de la vanne.*

*Barrière de prévention : présence d'agents d'exploitation compétents pour réaliser l'essai, essai planifié et strictement encadré par une consigne, présence d'un crantage à trois paliers pour éviter de perdre le contrôle de la vanne.*

*La gravité des conséquences à l'amont sur la retenue : les conséquences seraient une baisse lente et limitée du plan d'eau jusqu'à la re-fermeture de la vanne ; la gravité est négligeable,*

*La gravité des conséquences à l'aval du barrage : les conséquences seraient, dans le cas extrême d'une ouverture totale, le déversement instantané d'un débit de () à l'aval du barrage et engendrant un exhaussement rapide et imprévu du niveau de la retenue du barrage (C).*

*Cet événement est jugé globalement très improbable (coté en D) ; les conséquences de cette ouverture intempestive complète sont susceptibles d'impacter (y) personnes à l'aval du barrage **ou\*** de propager une vague d'eau dont les effets sont jugés dangereux pour les personnes se trouvant sur sa trajectoire.*

*\* Commentaire : l'expression des gravités dépend de la méthodologie utilisée par l'Organisme rédacteur.*

- **Autres ERC**

A traiter suivant le même principe.

## **Les mesures de maîtrise des risques**

L'Etude de Dangers montre que les risques identifiés sont maîtrisés au barrage de (B), tant au niveau de l'occurrence des initiateurs de dangers que sur le maintien de barrières de prévention et de protection, voulues par le Responsable de l'ouvrage ou exigées par la réglementation.

L'EDD est partagée par le Responsable de l'ouvrage ; au vu du bilan de l'EDD, le Responsable de l'ouvrage décide de réaliser dans des délais indiqués, (*une, plusieurs*) Mesure de Réduction des Risques et (*une, plusieurs*) Etudes Complémentaires qu'il s'engage à commanditer.

- **Les mesures de réduction des risques**

En conséquence, il décide une Mesure de Réduction des Risques consistant à commanditer *une expertise* destinée à déterminer l'état actuel de (*à compléter*) et à faire réaliser les travaux et interventions qui résulteront de l'expertise.

L'expertise particulière de cette structure est programmée en () et sera réalisée dans le cadre de l'Examen Technique Complet du barrage, programmée en (date) ; les travaux éventuellement nécessaires seront programmés à la suite de l'expertise et réalisés dans un délai maximal de (date).

L'Organisme, réalisateur de l'EDD, juge cette MRR efficace et potentielle pour diminuer la classe d'occurrence de l'ERC d'une classe et coter cet ERC très improbable, après la réalisation de la mesure.

- **Les études complémentaires (exemple)**

Les études complémentaires recommandées par l'EDD sont jugées nécessaires, afin de compléter et actualiser le corpus documentaire actuel de l'ouvrage et de ses organes de sécurité :

- ✓ *Collecter les notes de calcul et à défaut effectuer un retour à la conception pour les organes de vannerie suivant (à compléter) ; délai (à préciser).*
- ✓ *Actualiser l'étude hydrologique actuel dont la validité date de (à préciser).*

Le Responsable de l'ouvrage s'engage à commanditer les études les délais indiqués.

## **Le Comité Français des Barrages et Réservoirs**

**Association scientifique et technique créée en 1926 sous le patronage de la Société Hydrotechnique de France (SHF). Il constitue la branche française de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB).**

Le CFBR s'est donné la mission de **favoriser le progrès dans la conception, la construction, l'entretien et l'exploitation des barrages**, y compris les usines quand elles sont intégrées aux barrages.

Le CFBR comprend 400 membres, représentants de l'Administration, de Sociétés Nationales, d'Etablissements Publics, de Collectivités Locales, d'Entreprises, de Bureaux d'Études ou de membres à titre personnel, tous désignés en raison de leur compétence en matière de barrages et de digues. Le Comité remplit sa mission par l'échange d'informations entre ses membres. Chaque année, il organise des Colloques techniques. Il anime des groupes de réflexion nationaux. Le CFBR participe activement aux travaux de la Commission Internationale des Grands Barrages. Il est ainsi représenté dans les Comités Techniques de la CIGB. Il participe à la rédaction des bulletins techniques édités par la CIGB, qui constituent la **référence internationale dans la profession**. Le CFBR participe aux Commissions Exécutives et aux Congrès Internationaux des Grands Barrages en y présentant des rapports techniques.

En 2011, le CFBR a décidé d'ouvrir ses activités au domaine des digues de protection contre les submersions maritimes et fluviales. Ce sont plus de 10 000 km d'ouvrages qui sont concernés en France et qui, depuis fin 2007, relèvent de la même réglementation que les barrages en matière de sécurité. Le CFBR est honoré d'accueillir de nouveaux membres représentant les gestionnaires de ce parc.

## **Association française pour l'étude des irrigations et du drainage**

### **Association constituée en 1952**

L'AFEID regroupe l'expertise française pour les questions d'eau pour l'alimentation au travers de ses institutions et entreprises membres (profession agricole, sociétés d'aménagement régional, recherche, agences de l'eau, ingénieurs conseils...) et d'experts adhérents à titre individuel. Parmi les missions définies dans ses statuts, l'AFEID contribue, en tant que Comité Français de la Commission Internationale de l'Irrigation et du Drainage (CIID - ICID) et dans le cadre du Partenariat Français sur l'Eau, à l'élaboration et à l'expression de la position française dans les grandes instances et les conférences internationales et en particulier les Forums Mondiaux.

Au niveau national, l'association est engagée dans un travail partagé sur des thématiques communes avec ses trois associations sœurs ASTEE, SHF et Académie de l'Eau à l'initiative de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du MEEDDM. L'AFEID organise également régulièrement des événements au niveau national pour mettre en débat, à l'échelle des territoires, les questions de gestion de l'eau, pour identifier, mettre en valeur et conforter les points de convergence entre enjeux agricoles et environnementaux.



Cet ouvrage constitue la restitution des communications exposées lors du colloque technique « Pratiques des Etudes De Dangers des barrages », organisé à Lyon les 28 et 29 novembre 2011 conjointement par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) et l'Association Française pour l'Eau, l'Irrigation, et le Drainage (AFEID).

Les thèmes suivants sont abordés :

- Méthodologie des Etudes De Dangers
- Accidentologie et incidentologie
- Etudes De Cas
- Apports et bilans des EDD

