
Projet Tuteuré

Etude de la sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique de génie civil : application à des ouvrages de protection contre les inondations de la ville de Nîmes

Laurent Peyras¹, Paul Royet¹, Daniel Boissier², Aurélie Talon²

¹ Cemagref, Unité de recherche « Ouvrages hydrauliques »
3275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence cedex 5, FRANCE
laurent.peyras@cemagref.fr ; paul.royet@cemagref.fr

² Polytech' Clermont-Ferrand / LAMI
24, avenue des Landais, BP206, 63174 Aubière Cedex, FRANCE
d.boissier@cust.univ-bpclermont.fr ; aurelie.talon@polytech.univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ. Le Cemagref et le bureau d'ingénieurs conseils ISL ont réalisé, pour le compte de la ville de Nîmes, une étude de sûreté de fonctionnement portant sur un aménagement hydraulique, constitué de plusieurs barrages, ouvrages singuliers et réseaux à ciel ouvert et enterrés, et destiné à assurer une protection contre les inondations. Ce projet tuteuré vise à s'assurer de l'assimilation de méthodes qualitatives et quantitatives d'analyse de risques (cf. étage 3 de la maison cyberrisques) sur la base de l'une des premières études qualitatives et quantitatives de sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique de génie civil réalisée en France.

MOTS-CLÉS : aménagement hydraulique, barrage, génie civil, sûreté de fonctionnement, analyse de risques.

Ce projet tuteuré a été réalisé sur la base d'un article :
Peyras L., Royet P., Salmi A., Salembier M., Boissier D. 2006. Etude de la sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique de génie civil : application à des ouvrages de protection contre les inondations de la ville de Nîmes. In Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 10, juin 2006, Hermès / Lavoisier. p.615 à 631.

Introduction au projet tuteuré

Un aménagement hydraulique est un système de génie civil, composé de plusieurs ouvrages (unitaires ou de long linéaire) et destiné à transporter et réguler des écoulements. Par exemple, un barrage écrêteur de crue d'un aménagement hydraulique est vide en temps normal, se remplit progressivement à l'occasion des crues tout en rejetant un débit contrôlé par son pertuis, que l'environnement aval est capable de faire transiter sans inondations. Une fois la crue terminée, le barrage va progressivement se vider via ce même pertuis. De cette façon, le débit rejeté en aval de l'ouvrage est laminé par rapport à la crue naturelle. Si la crue arrivant sur le barrage dépasse la crue de projet de protection pour lequel il a été conçu, les débits sont rejetés par un évacuateur de crues qui assure la protection ultime du barrage.

L'étude de la sûreté de fonctionnement d'un tel système vise, d'une part, à déterminer ses modes de défaillance, les scénarios susceptibles de conduire aux défaillances et les conséquences associées, d'autre part, à évaluer quantitativement les probabilités d'occurrence des différents événements indésirables et des scénarios associés.

Pour évaluer la fiabilité d'un aménagement hydraulique, on fait appel aux disciplines classiques des approches physiques d'analyse de risques (Peyras *et al.*, 2004), telles que :

- *l'hydrologie* pour la caractérisation des événements pluviométriques de référence et l'évaluation des débits de crues associées aux différentes périodes de retour ;
- *l'hydraulique* pour la simulation des écoulements au sein des ouvrages et, le cas échéant, des débordements ;
- *la mécanique et le génie civil* pour l'étude de la stabilité des ouvrages.

Toutefois, ces disciplines ne suffisent pas nécessairement à déterminer la fiabilité d'un tel aménagement, compte tenu de la complexité de son fonctionnement et donc de ses modes de défaillances. Il est alors nécessaire de faire appel à des approches systémiques, et plus particulièrement, aux méthodes de la Sûreté de Fonctionnement.

La Sûreté de Fonctionnement appliquée au contexte des barrages date du début des années 1990 et fait l'objet actuellement de nombreux développements, impulsés essentiellement par les pays nord-américains (USA et Canada) et nord-européens (Norvège, Suède, Pays-Bas). Deux manuels techniques font référence dans le domaine : le récent bulletin de la Commission Internationale des Grands Barrages (Icoid, 03) et le guide de la *Canadian Electricity Association* (Cea, 00), mais aussi

les travaux remarquables : (Marche, 04), (Seidou *et al.*, 03-04), (Johansen *et al.*, 97).

Ce projet tuteuré propose d'appliquer la démarche et les méthodes permettant de mener une étude de sûreté de fonctionnement à un aménagement hydraulique de génie civil. Les méthodologies utilisées font partie intégrante de la Sûreté de Fonctionnement et sont issues du domaine industriel (Villemeur, 1988). Elles sont adaptées à notre domaine et proviennent pour certaines directement du domaine de la recherche en génie civil (Peyras *et al.*, 2006b - 2003).

La première partie du projet tuteuré présente l'aménagement hydraulique étudié et la démarche générale adoptée pour conduire l'étude de sûreté de fonctionnement. Cette partie introductive ne donne pas lieu à des questions.

La seconde partie s'intéresse à l'analyse qualitative : on propose de mettre en œuvre une modélisation des scénarios de défaillance à travers l'analyse fonctionnelle, l'analyse des modes de défaillance et la méthode des arbres d'événements.

La troisième partie s'intéresse à l'analyse quantitative : modèle probabiliste hydrologique, évaluation à dires d'experts, étude des conséquences par modélisation hydraulique, représentation du risque sous un format de type industriel à l'aide de courbes « probabilité – gravité ».

Ce projet tuteuré se rattache au troisième étage de la maison cyberrisques et vise à s'assurer de l'assimilation de méthodes qualitatives et quantitatives d'évaluation des risques à travers une étude engagée par la ville de Nîmes constituant l'une des premières études de sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique de génie civil réalisées en France.

Partie 1

Contexte et démarche du projet tuteuré

1.1. Présentation de l'aménagement hydraulique de génie civil

Un aménagement hydraulique de génie civil comporte différents ouvrages unitaires de nature diverse (barrages, ouvrages de dérivation, ouvrages répartiteurs de débit, pertuis de contrôle, dessableurs, etc.) interconnectés entre eux par d'autres ouvrages linéaires de liaison (canaux à ciel ouvert, collecteurs enterrés, etc.).

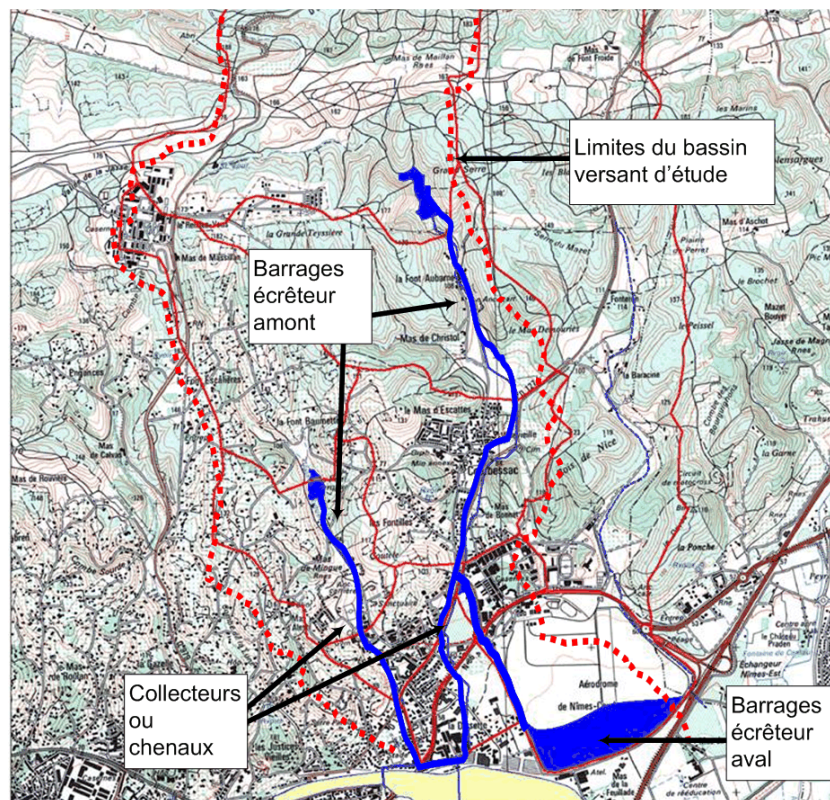


Figure 1. Plan général de l'aménagement hydraulique

Suite aux événements catastrophiques du 3 octobre 1988, la ville de Nîmes s'est dotée de plusieurs aménagements hydrauliques destinés à assurer la protection contre les inondations en période de crue. Notre étude (Peyras *et al.* 2006a) s'est intéressée à l'aménagement du bassin versant du Valladas, situé à l'Est de Nîmes et couvrant une superficie de 16 km² (Fig. 1). Il comprend deux barrages écrêteurs amont d'une capacité totale d'environ 90 000 m³, deux barrages écrêteurs aval d'une capacité totale de 400 000 m³, plusieurs kilomètres de canaux à ciel ouvert et de collecteurs enterrés permettant l'interconnection des barrages, et divers ouvrages ponctuels (pertuis, grilles, ouvrages de dérivation, dessableurs...).

1.2. Démarche de l'étude de sûreté de fonctionnement

A l'instar des études de sûreté réalisées dans l'industrie, la démarche d'étude de sûreté de fonctionnement comporte quatre étapes :

étape 1 : l'analyse fonctionnelle de l'aménagement hydraulique.

étape 2 : l'analyse des modes de défaillance de l'aménagement. Pour cette étape, nous utilisons la méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) et une représentation des scénarios par la méthode des Arbres d'Evénements.

étape 3 : une évaluation quantitative de la sûreté de fonctionnement des ouvrages. Nous couplons ici, d'une part, des mesures déclaratives issues de l'analyse physique des mécanismes et de l'expertise, d'autre part, des mesures quantitatives probabilistes issues des modèles hydrologiques.

étape 4 : la synthèse, comprenant les scénarios les plus critiques, les ouvrages les plus vulnérables associés à une probabilité de défaillance, et les conclusions sous forme de propositions visant à améliorer la sûreté de fonctionnement de l'aménagement.

Pour les besoins de l'étude de sûreté de fonctionnement, un panel d'experts, composé d'ingénieurs seniors spécialisés dans le domaine des barrages et d'ingénieurs hydraulicien et hydrologue, animé par un docteur en génie civil spécialisé en Sûreté de Fonctionnement, a été constitué. Ce panel d'experts est sollicité aux différentes étapes de l'étude, en particulier, lors de l'analyse qualitative pour la détermination des défaillances technologiques de l'aménagement et lors de l'analyse quantitative pour l'évaluation experte des probabilités subjectives des défaillances technologiques.

1.3. Cadre du projet tuteuré

Pour des raisons de simplification de l'exercice, le projet tuteuré sera restreint à une partie des ouvrages de l'aménagement hydraulique. Ainsi, on se limitera à l'étude de la sûreté de fonctionnement des ouvrages situés à l'ouest de l'aménagement hydraulique.

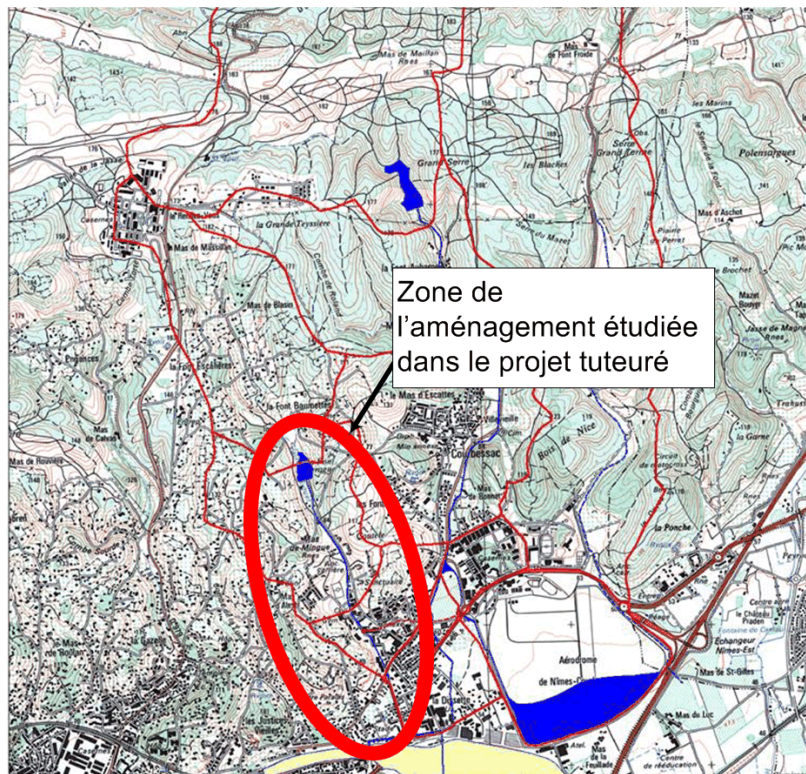


Figure 2. Zone de l'étude du projet tuteuré

Dans ces conditions, le domaine de notre projet tuteuré comporte de l'amont vers l'aval :

- un barrage écrêteur de crues, équipé d'un pertuis calibré. Ce barrage est positionné en aval d'une zone naturelle, non urbanisée et formée de garrigues provençales ;
- un talweg naturel à ciel ouvert, comportant sur son linéaire des singularités : dalots, franchissement, rétrécissement, etc. Ce talweg traverse

- une zone périurbaine de type pavillonnaire, caractérisée par un habitat peu dense ;
- un collecteur enterré qui traverse une zone à habitat dense (immeubles, zones urbaines).

Les illustrations suivantes montrent ces différents ouvrages :



Figure 3. Barrage écrêteur de crue. Photo prise à l'intérieur de la cuvette

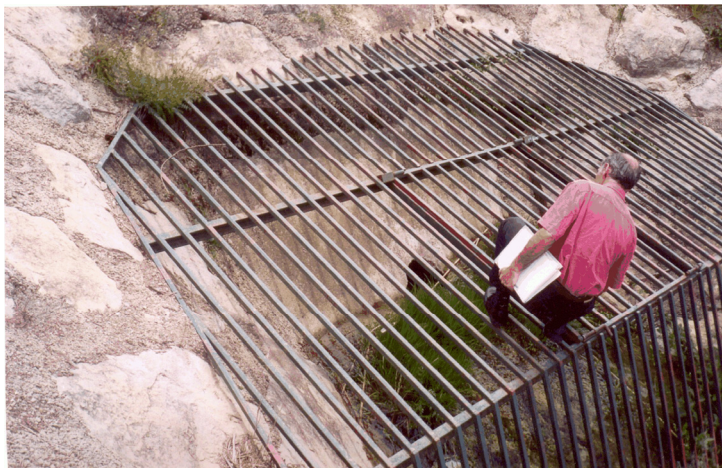


Figure 4. Entrée du pertuis du barrage écrêteur de crue – l'entrée du pertuis est protégée par une grille de protection



Figure 5. *Sortie du pertuis du barrage écrêteur de crue – vue depuis l’aval*



Figure 6. *Talweg à ciel ouvert en aval du barrage écrêteur de crue, dans une zone pavillonnaire à urbanisation peu dense*



Figure 7. *Entrée du collecteur enterré en amont immédiat de la zone à habitat dense*

Partie 2

Analyse qualitative de la sûreté de fonctionnement

Questions du projet tuteuré

Question 2.1. *Analyse fonctionnelle du système*

Etablir l'analyse fonctionnelle de l'aménagement hydraulique. On commencera par une analyse fonctionnelle externe lors de laquelle on déterminera les milieux extérieurs en interaction avec le système et les fonctions principales du système.

On poursuivra avec une analyse fonctionnelle interne. On en déduira les fonctions principales et technologiques réalisées par les ouvrages de l'aménagement hydraulique.

Question 2.2. *Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets*

Réaliser l'analyse des défaillances de l'aménagement par application de la méthode AMDE à la granularité des ouvrages de l'aménagement.

Par analyse experte des modes de défaillance obtenus par l'AMDE, retenez ceux qui vous semblent les plus pertinents. En déduire les configurations de fonctionnement du système.

Question 2.3. *Scénarios de défaillance*

Construire les scénarios de défaillance de l'aménagement hydraulique. On utilisera pour cela la méthode des arbres d'événements. En déduire l'ensemble des configurations possible de fonctionnement du système.

Réponses

2.1. Analyse fonctionnelle du système

L'analyse fonctionnelle permet la compréhension et la description synthétique du fonctionnement du système étudié : elle définit ses limites, son environnement, sa constitution et elle recherche les fonctions qu'il assure.

Dans notre étude, l'aménagement hydraulique est constitué d'une succession d'ouvrages linéaires (collecteurs enterrés et canaux/vallats à ciel ouvert), ponctués par des ouvrages singuliers (barrages, répartiteur des débits, grilles, etc.). Trois niveaux de granularité permettent la description de l'aménagement : le système dans son ensemble (l'aménagement hydraulique), les ouvrages du système, (barrages, collecteurs...) et les composants des ouvrages (vannes, déversoirs, filtres...).

Nous définissons les contours géographiques de l'aménagement hydraulique qui conduisent ensuite à considérer les milieux extérieurs en interaction (Tab. 1).

Type	Milieux extérieurs
<i>environnement lié à l'eau</i>	<ul style="list-style-type: none"> - la partie amont des bassins versants ruraux englobant l'aménagement hydraulique - la partie aval des bassins versants urbains englobant l'aménagement hydraulique - la géologie, la géotechnique
<i>milieux à proximité de l'ouvrage</i>	<ul style="list-style-type: none"> - habitations privées, immeubles et équipements de la zone urbaine - zone rurale, champs, cultures, bois, friches - végétation, embâcles, sédiments, alluvions - aéroport, voies RFF - voies de circulation automobile : voies communales, RD, RN, autoroute

Tableau 1. Milieux extérieurs interagissant avec l'aménagement (extrait)

L'analyse fonctionnelle externe permet d'obtenir les fonctions principales, traduisant l'objet de l'action du système (l'aménagement hydraulique considéré dans sa globalité), et les fonctions de contrainte, traduisant les réponses du système face aux sollicitations imposées par son environnement :

- ➔ *laminer les débits/crues provenant des bassins versants amont, ruraux et urbains.*
- ➔ *résister aux sollicitations imposées par les environnements extérieurs : ne pas s'obstruer par les embâcles/sédiments/dépôts divers ; ne pas se rompre ou se dégrader, etc.*

L'analyse fonctionnelle interne étudie ensuite le fonctionnement interne du système. Elle consiste en une analyse structurelle : le système est découpé en ouvrages de génie civil homogènes, repérés géographiquement au sein de l'aménagement (Fig. 8).

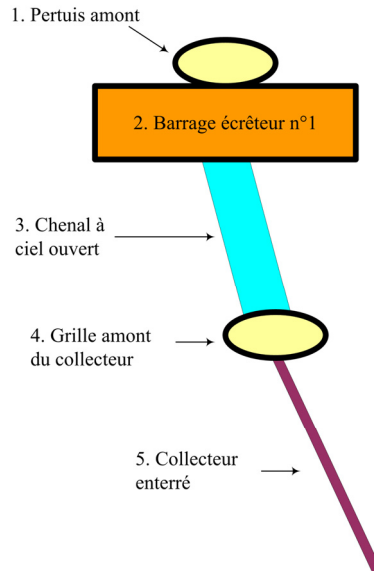


Figure 8. Analyse structurelle du système dans le cadre de l'analyse fonctionnelle interne

Elle détermine les interactions entre les ouvrages et les milieux extérieurs et conclut sur les fonctions accomplies par chaque ouvrage.

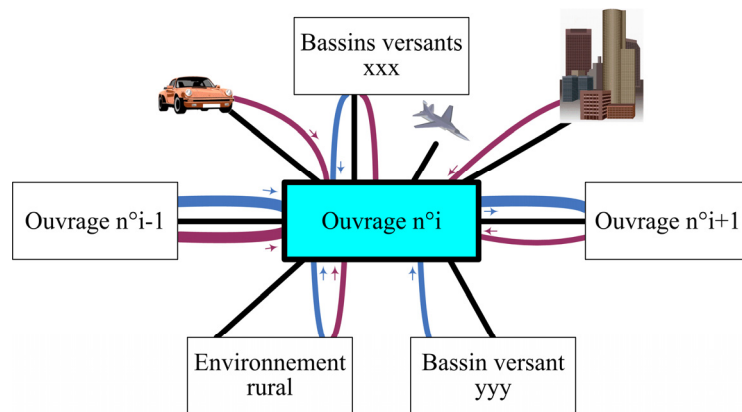


Figure 9. Analyse des interactions d'un ouvrage avec les ouvrages en contact et le milieu environnant

Ouvrages	Fonctions principales	Fonctions technologiques
Barrage écrêteur	<ul style="list-style-type: none"> - laminier les crues / stocker l'eau en crue - assurer le transit des crues exceptionnelles 	<ul style="list-style-type: none"> - résister à la poussée hydrostatique - ne pas glisser - résister à l'érosion interne et externe - ne pas se liquéfier (séismes) - résister à certaines actions de l'homme (vandalisme, erreur humaine, ...) - résister aux différents mécanismes de rupture
Canal à ciel ouvert	<ul style="list-style-type: none"> - assurer le transit des débits - collecter les débits - restituer les débits 	<ul style="list-style-type: none"> - permettre le libre écoulement des eaux : ne pas s'obstruer, être surveillé et entretenu
Pertuis du barrage (grille, pertuis, vidange)	<ul style="list-style-type: none"> - assurer le transit des débits - bloquer les embâcles 	<ul style="list-style-type: none"> - permettre le libre écoulement des eaux : ne pas s'obstruer, être surveillée et entretenu - résister aux sollicitations
Collecteur enterré	<ul style="list-style-type: none"> - assurer le transit des débits / collecter les débits / restituer les débits 	<ul style="list-style-type: none"> - résister à certaines sollicitations / ne pas se rompre sous certaines sollicitations - permettre le libre écoulement des eaux : ne pas s'obstruer, ne pas colmater, être surveillé et entretenu

Tableau 2. *Fonctions des ouvrages de l'aménagement hydraulique*

Au final de l'analyse fonctionnelle, nous avons une connaissance du fonctionnement du système, des fonctions des ouvrages et des interactions avec l'environnement. Elle est le point de départ de l'analyse des modes de défaillance.

2.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

Pour chaque ouvrage, nous recherchons ses modes de défaillance, leurs causes et leurs effets possibles. Ce travail est produit de façon systématique en appliquant la méthode AMDE. Initialement développée pour l'industrie, l'AMDE a également été utilisée en génie civil, notamment sur les barrages (Peyras, 2003), les digues (Serre *et al.*, 2006) et les bâtiments (Talon *et al.*, 2006).

Dans notre projet, l'AMDE est appliquée aux ouvrages de l'aménagement hydraulique et les résultats sont consignés sous forme de tableau (Tab. 3 et 4).

Ouvrage	Mode de défaillance	Causes	Effets
Barrage écrêteur	<i>Ne lamine pas ou de façon insuffisante les débits de crues</i>	- pertuis / grille obstrué - vidange obstruée - exutoire de la vidange obstruée - ligne d'eau aval trop élevée (défaillance du dissipateur)	- remplissage prématuré du plan d'eau avec laminage limité
	<i>Défaillance technologique : Ne résiste pas à l'érosion interne</i> - dans le remblai - dans la fondation - le long de la vidange	- formation d'un renard hydraulique, en fondation, dans le remblai ou le long de la conduite de vidange	- rupture du barrage par érosion interne, en fondation, en remblai, le long de la conduite de vidange

Tableau 3. AMDE appliquée à un barrage écrêteur de crues (extrait)

Ouvrage	Mode de défaillance	Causes	Effets
Collecteur enterré	N'assure pas ou partiellement le transit des débits / Ne collecte (restitue) pas les débits	Obstruction du collecteur enterré par des embâcles de nature diverse	Une partie du débit déborde hors du collecteur en amont de l'entrée
		Obstruction de l'exutoire du collecteur enterré	Les débits ne sont pas restitués en aval
		Débordement du canal à ciel ouvert en amont de l'entrée du collecteur	
		Obstruction du canal à ciel ouvert (ou de l'ouvrage aval) en aval du collecteur	
	Dysfonctionnement technologique du collecteur enterré	Chocs, effondrements, etc.	Obstruction partielle ou totale du collecteur enterré
	- Obstruction du collecteur - Rupture du collecteur	Embâcles provenant de l'environnement : végétaux, arbres, blocs, encombrants, sédiments, etc.	
		Défaut d'entretien	
		Singularités ponctuelles : rétrécissement, coude, obstacles, etc.	
	Vandalisme / erreur humaine		

Tableau 4. AMDE appliquée à un collecteur enterré

Analyse experte des défaillances

A partir de l'analyse des modes de défaillance, nous connaissons toutes les défaillances potentielles des ouvrages constituant l'aménagement hydraulique. Cette analyse systématique permet d'envisager a priori l'ensemble des modes de défaillance du système et des ouvrages le constituant.

L'AMDE est ensuite soumise à l'examen du panel d'experts, l'objectif étant de ne retenir que les modes de défaillance pertinents, ceux dont il est réaliste d'envisager l'occurrence (y compris pour ceux liés aux événements rares). Ce

travail est fait par l'interview du panel d'experts et des discussions collectives qui conduisent à une revue experte complète de l'ensemble des ouvrages. Sur la base des résultats de l'AMDE, les experts se prononcent sur les modes de défaillance des ouvrages à retenir, leurs causes et leurs effets possibles.

Au final de ce travail, on dispose des modes de fonctionnement raisonnablement envisageables pour les ouvrages du système : les fonctionnements nominaux et les fonctionnements dégradés. La combinaison des modes de fonctionnement donne alors les configurations possibles de l'aménagement hydraulique (Tab. 5).

N°	Ouvrage	Fonctionnement envisagé et niveau de performance associé
1	Pertuis amont du barrage n°1	Fonctionnement nominal
		Fonctionnement dégradé à 50 %
2	Barrage écrêteur n°1	Fonctionnement nominal
		Fonctionnement totalement défaillant : rupture
3	Chenal à ciel ouvert	Fonctionnement nominal
4	Grille amont du collecteur	Fonctionnement nominal
5	Collecteur enterré	Fonctionnement nominal
		Fonctionnement totalement dégradé

Tableau 5. Configurations de fonctionnement des ouvrages (extrait)

2.3. Scénarios de défaillance

A ce stade, on dispose donc de toutes les informations nécessaires pour construire les scénarios de défaillance : les modes de défaillance réalistes et les configurations de fonctionnement correspondantes des ouvrages. On représente ces scénarios par la méthode des arbres d'événements qui permet d'enchaîner les modes de défaillances successifs des différents ouvrages en contact au sein de l'aménagement hydraulique, en respectant les liens de cause à effet dans la chronologie des défaillances (Fig. 10).

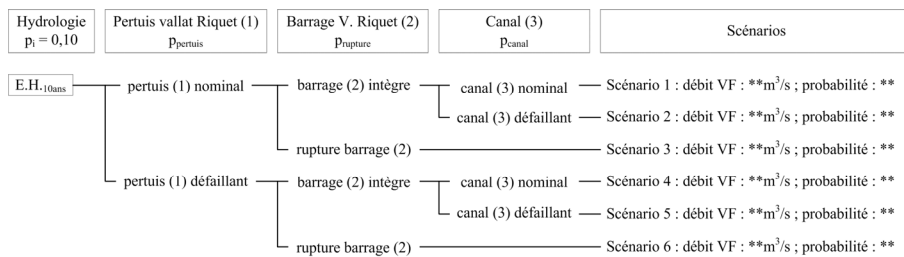


Figure 10. Représentation de scénarios de défaillance par la méthode des arbres d'événements

Cette analyse permet de déduire les six configurations de fonctionnement possible du système, correspondant aux six scénarios représentés dans l'arbre d'événements. On remarque que le scénario 1 correspond au fonctionnement nominal du système, sans défaillance des ouvrages.

Partie 3

Analyse quantitative de la sûreté de fonctionnement

Avant-propos à l'analyse quantitative

Après l'analyse qualitative de l'aménagement hydraulique, nous présentons dans cette partie l'évaluation quantitative de la sûreté de fonctionnement des ouvrages et les probabilités d'occurrence des différents scénarios.

La méthodologie employée pour l'évaluation quantitative des probabilités de défaillance des ouvrages met en œuvre, d'une part, une approche probabiliste pour l'évaluation des probabilités d'occurrence des événements hydrologiques, d'autre part, une approche experte pour l'estimation des probabilités d'occurrence des défaillances technologiques des ouvrages. Cette méthodologie est conforme à la pratique internationale des études d'analyse de risques réalisées sur les barrages, notamment les références signalées (Icold, 2003), (Hartford *et al.*, 2004).

L'analyse quantitative des conséquences des différents scénarios est exprimée en terme de débit rejeté dans l'environnement hors réseau et est obtenue par la modélisation hydraulique de l'aménagement.

Questions du projet tuteuré

Question 3.1. *Evaluation des probabilités de défaillance technologique*

Déterminer les probabilités d'occurrence des différents scénarios de défaillance obtenus dans la partie 2.

Pour cet exercice, on adopte les hypothèses et démarches suivantes :

- pour les événements naturels, en particulier les événements hydrologiques (E.H.), on étudie différents événements associés aux périodes de retour suivantes : 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans. Dans le projet tuteuré, on travaillera sur la période de retour 20 ans.
- pour les défaillances technologiques des ouvrages de l'aménagement hydraulique (en dehors des barrages), on met en œuvre des démarches par

questionnement d'un groupe d'experts en utilisant des grilles de traitement des dires d'experts telles que la suivante :

Appréciation experte de la probabilité d'occurrence	Traitement quantitatif des dires d'expert
« Très probable »	0,60
« Probable »	0,40
« Moyennement probable »	0,20
« Peu probable »	0,10
« Très peu probable »	0,01

Tableau 6. Grille d'analyse des dires d'experts (exemple pour le projet tuteuré)

On admet que le questionnement du groupe d'experts a abouti aux résultats suivants.

N°	Ouvrage	Fonctionnement envisagé et niveau de performance associé	E.H. $t = 50$ ans $\rightarrow p = 0,02$
1	Pertuis amont du barrage n°1	Fonctionnement nominal	f. défaillant : probable
		Fonctionnement dégradé à 50 %	
2	Barrage écrêteur n°1	Fonctionnement nominal	
		Fonctionnement totalement défaillant : rupture	rupture $\rightarrow p = 10^{-5}$
3	Chenal à ciel ouvert	Fonctionnement nominal	
4	Grille amont du collecteur	Fonctionnement nominal	
5	Collecteur enterré	Fonctionnement nominal	
		Fonctionnement totalement dégradé	f. défaillant : peu probable

Tableau 7. Résultats de l'interview des experts sur les défaillances technologiques des ouvrages pour l'événement hydrologique (E.H.) de période de retour $t=20$ ans

Pour les défaillances des barrages écrêteurs de crues, on admettra une très grande fiabilité de ces ouvrages compte tenu de leur conception très soignée et on adopte $p=10^{-5}$ quel que soit l'événement hydrologique.

Pour l'analyse des conséquences, un modèle hydraulique spécifique a été construit de manière à modéliser le comportement du système en fonctionnement nominal et dégradé, avec un débit correspondant à celui de l'événement hydrologique. Les conséquences sont ensuite obtenues à partir du modèle hydraulique et exprimées en terme de débits rejetés dans les zones habitées (débit d'inondation).

Question 3.2. *Analyse de la criticité des scénarios*

Analyser les résultats obtenus à la question 3.1. et classer les scénarios les uns par rapport aux autres. Quels sont les scénarios les plus risqués, les plus dangereux, les plus probables ? Quels sont les ouvrages les plus critiques sur lesquels il faut prioriser la maintenance ou la remise à niveau ? Discutez du scénario de fonctionnement nominal de l'aménagement hydraulique.

Question 3.3. *Représentation du risque - Principaux enseignements de l'étude et propositions d'améliorations.*

Proposez une représentation du risque combinant les informations quantitatives obtenues aux questions 3.1. et 3.2.. Quels sont les principaux enseignements que vous retenir de cette étude ? Quelles propositions d'amélioration de cet aménagement hydraulique proposeriez-vous ?

Réponses

3.1. Evaluation des probabilités de défaillance technologique

Les probabilités d'occurrence des défaillances technologiques des ouvrages (les défaillances structurelles) sont évaluées par expertise, par interview collective du panel d'experts, puis traitement des dires d'experts. Pour chacune des défaillances envisagées, le panel d'experts est questionné sur son appréciation de la probabilité d'occurrence. Les réponses des experts font l'objet d'un traitement quantitatif du dire d'expert, à partir de différentes grilles d'analyse, comme celles proposées dans (Peyras, 2003).

Les probabilités des défaillances technologiques envisagées pour les ouvrages sont généralement conditionnées par l'événement hydrologique analysé. Elles sont donc évaluées en fonction de la période de retour de l'événement hydrologique.

Enfin, les scénarios sont évalués en mettant en œuvre la méthode des arbres d'événements (Fig. 11) : les agrégations des probabilités conditionnelles obtenues à chaque nœud de l'arbre (correspondant aux probabilités individuelles de défaillance des ouvrages) permettent d'obtenir la probabilité globale du scénario (l'occurrence de l'événement terminal) et les conséquences associées, exprimées en débit rejeté dans l'environnement.

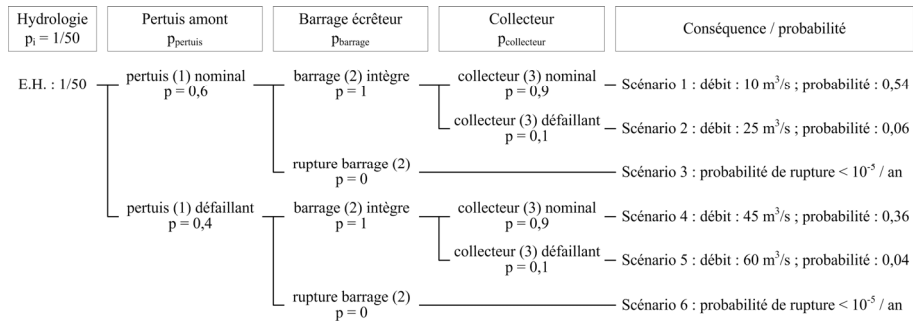


Figure 11. Evaluation quantitative des scénarios de défaillance par la méthode des arbres d'événements (données ayant uniquement valeur d'exemple)

3.2. Analyse de la criticité des scénarios

Rappel des résultats (Fig. 12) pour l'événement hydrologique $t = 20$ ans :

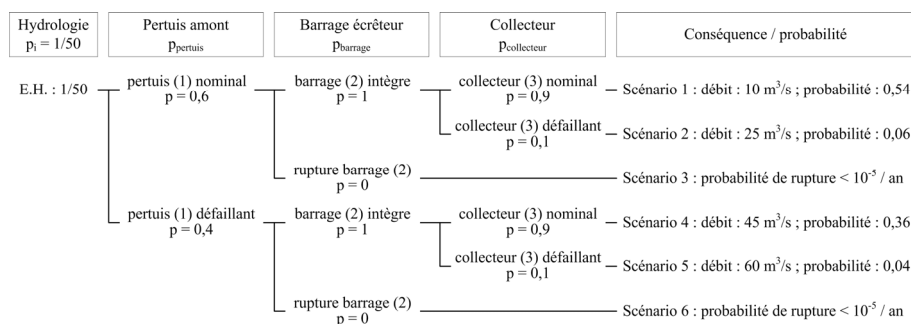


Figure 12. Evaluation quantitative des scénarios de défaillance par la méthode des arbres d'événements (données ayant uniquement valeur d'exemple)

A partir des arbres d'événements, il est possible de procéder à un double classement des scénarios, d'une part, des plus probables au moins probables, d'autre part, des plus graves aux moins graves. Pour chaque scénario, il est également possible de voir l'implication des défaillances des ouvrages dans la probabilité d'occurrence du scénario.

Le scénario le plus probable est le scénario 1 : il correspond au fonctionnement nominal de l'aménagement hydraulique. C'est celui où les conséquences sont les plus faibles également (uniquement 10 m³/s de débordement hors du système). On constate néanmoins qu'il n'a qu'une chance sur deux de se produire pour l'E.H. considéré.

Le scénario 4 est associé à une forte probabilité d'occurrence (une chance sur trois) et les conséquences sont nettement plus graves que pour le scénario 1 de fonctionnement nominal (45 m³/s de débordement hors du système).

L'ouvrage le plus critique dans l'aménagement apparaît être le pertuis du barrage.

3.3. Représentation du risque

A l'instar de la pratique des études de risques dans l'industrie, les résultats peuvent être synthétisés au moyen de courbes Probabilité – Gravité (courbes de Farmer). Dans un premier temps, le risque inhérent à l'aménagement hydraulique est représenté selon l'événement hydrologique d'origine (Fig. 13).

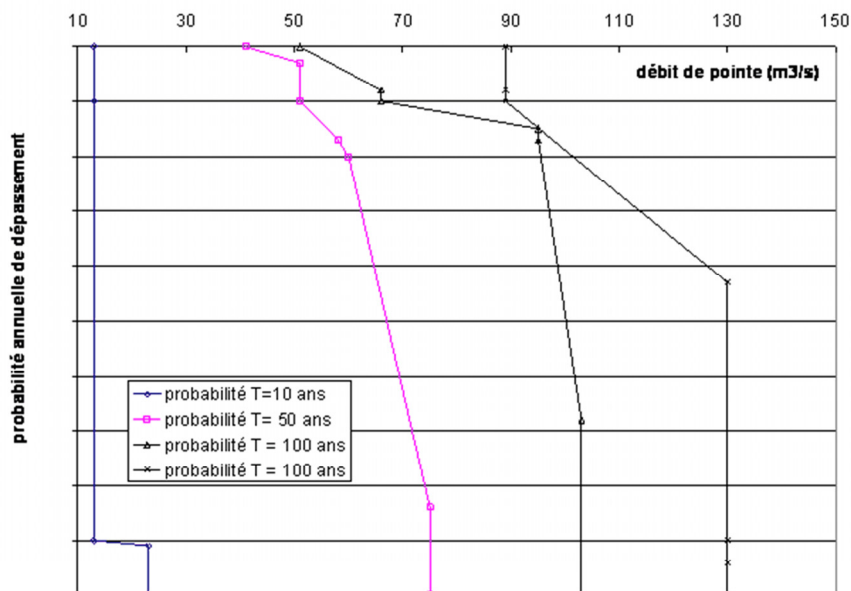


Figure 13. Courbes « probabilité – gravité » en fonction de l'événement hydrologique

Ces courbes présentent les probabilités annuelles de dépassement du débit du pointe en un point stratégique situé en aval de l'aménagement hydraulique pour des événements pluviométriques de périodes de retour comprise entre 10 ans et 1000 ans. Elles permettent d'apprécier l'efficacité globale de l'aménagement en intégrant les probabilités de défaillance des composants du système.

L'analyse de ces courbes est particulièrement instructive. Elle montre logiquement que, lorsque les conséquences des défaillances de l'aménagement (exprimés en terme de débits de pointe relâchés dans l'environnement aval) augmentent, les probabilités d'occurrence annuelles associées diminuent. Mais surtout elle montre que les défaillances technologiques des ouvrages ont une implication plus forte sur le risque global pour les événements hydrologiques rares. Ainsi pour réduire les risques, il est important de protéger les ouvrages de l'aménagement en tenant compte des événements pluviométriques non courants.

Dans un deuxième temps, nous combinons les probabilités d'occurrence des crues et les probabilités de défaillance technologique des ouvrages afin d'obtenir un affichage globalisé du risque tenant compte de tous les aléas et défaillances (Fig. 14). Cet affichage synthétique du risque inhérent à l'aménagement ne permet pas d'accéder à l'information de détail sur les différentes défaillances, mais présente l'avantage d'apprécier la sûreté de fonctionnement globale de l'aménagement

hydraulique, combinée aux conséquences potentielles sur l'environnement. Il correspond typiquement aux résultats obtenus dans les synthèses des études d'analyse de risques menées dans le domaine industriel (Villemeur, 1988).

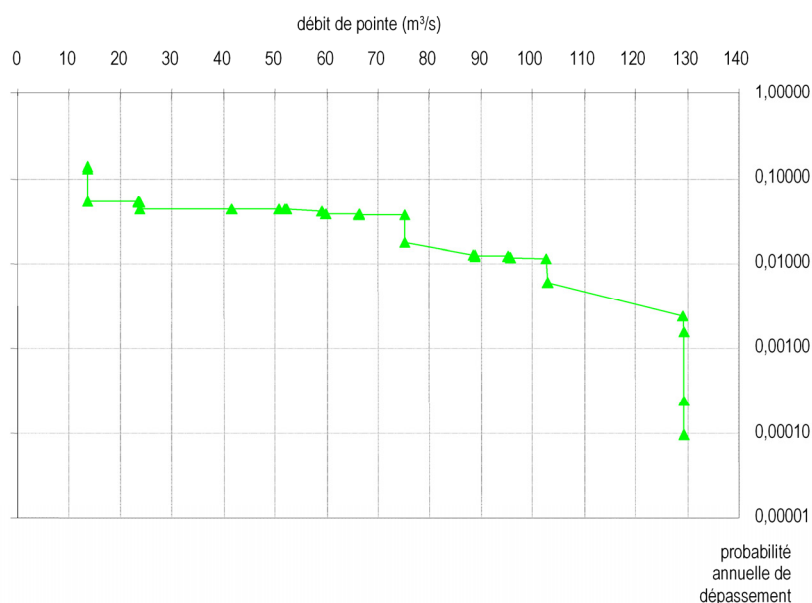


Figure 14. Courbes synthétiques « probabilité – gravité » en un point du réseau

Principaux enseignements de l'étude et propositions d'améliorations

Avec un système complexe d'ouvrages hydrauliques interconnectés et dans différentes configurations temporelles, l'intérêt d'une étude de sûreté de fonctionnement est de mettre clairement en évidence le niveau d'efficacité de l'aménagement vis-à-vis de l'atténuation des crues et de faire apparaître les dysfonctionnements les plus probables. Les objectifs sous-jacents sont bien sûr d'améliorer in fine la sûreté de l'aménagement et de ses ouvrages.

De ce point de vue et dans notre application, le niveau de fiabilité des barrages est apparu très élevé (probabilité annuelle de rupture inférieure à 10^{-6}), vu leur conception et leur réalisation très soignées. Sur un des quatre barrages présentant une fiabilité légèrement plus faible (Tab. 8), des améliorations simples de génie civil de l'ouvrage ont été proposées pour atteindre le même niveau de fiabilité que les autres.

Mécanisme de rupture du barrage écrêteur (x)	Probabilité annuelle de rupture
Glissement	inférieure à 10^{-6}
Erosion interne en remblai	inférieure à 10^{-6}
Erosion interne en fondation	inférieure à 10^{-6}
Renard hydraulique le long de la vidange	inférieure à 10^{-6}
Erosion externe	inférieure à 10^{-6}
Surverse	inférieure à 10^{-5}

Tableau 8. Exemple de résultats de l'analyse quantitative de sûreté d'un barrage écrêteur en remblai

Les dysfonctionnements technologiques les plus probables ont été mis en évidence sur d'autres ouvrages (pertuis, ouvrages répartiteurs...). L'étude a permis de proposer des améliorations et d'évaluer leur apport en terme de sécurité. Leurs probabilités de défaillance restent néanmoins de plusieurs ordres de grandeur plus élevées que celles correspondant aux ruptures des barrages.

Enfin par l'examen exhaustif de l'environnement du système réalisé lors de l'analyse fonctionnelle, l'étude a permis d'identifier un risque relativement négligé jusqu'alors, lié à des écoulements provenant d'un bassin versant voisin et pouvant, dans certaines conditions, interférer avec le fonctionnement de certains ouvrages. A ce titre, des mesures correctives ont été proposées et leur efficacité évaluée.

Au final, l'analyse des scénarios les plus probables conduisant à un risque important ou à une dégradation majeure de l'efficacité de l'aménagement hydraulique permet de proposer au Maître d'Ouvrage des mesures préventives susceptibles d'améliorer la sûreté du système. Ces mesures consistent pour certaines en des améliorations des ouvrages, visant à augmenter sensiblement leur fiabilité lors d'événements hydrologiques rares pour lesquels ils apparaissent particulièrement vulnérables. D'autres mesures consistent en des actions d'inspection et maintenance préventives et systématisées, qui permettront de s'assurer de l'efficacité des ouvrages en période de crue.

Compléments d'information

Des informations utiles à l'analyse quantitative des aménagements hydrauliques mais ne faisant pas l'objet de ce projet tuteuré sont détaillées dans ce paragraphe ; il s'agit de :

- l'étude hydrologique ;
- l'évaluation des probabilités de défaillance des barrages ;
- la modélisation hydraulique et de l'analyse quantitative des conséquences.

Etude hydrologique

L'étude hydrologique définit les événements pluviométriques de référence correspondant aux différentes périodes de retour examinées dans l'étude de sûreté de fonctionnement. Elle permet ainsi de connaître les pluies de référence (caractérisées en IDF : intensité / durée / fréquence) et les hydrogrammes (QDF : débit / durée / fréquence) correspondant aux réponses en débits des différents bassins versants pour chaque période de retour des événements hydrologiques.

Nous avons mené nos calculs avec la méthode SHYREG développée au Cemagref (Lavabre *et al.*, 2003). Elle s'appuie sur un générateur stochastique de pluies horaires, régionalisé sur les régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte-d'Azur à partir des données de 556 stations pluviométriques. Les chroniques de pluies horaires générées sont ensuite utilisées pour calculer les débits de pointe (en 1, 2, ...72 heures et pour des périodes de retour de 2 à 1000 ans) à une maille de 1 km². Les débits sont enfin agrégés à l'échelle du bassin versant, par une fonction de transfert statistique.

Les pluies de références et les hydrogrammes sont caractérisés respectivement par des IDF et des QDF issus de la méthode SHYREG sur le secteur de l'étude (Fig. 15).

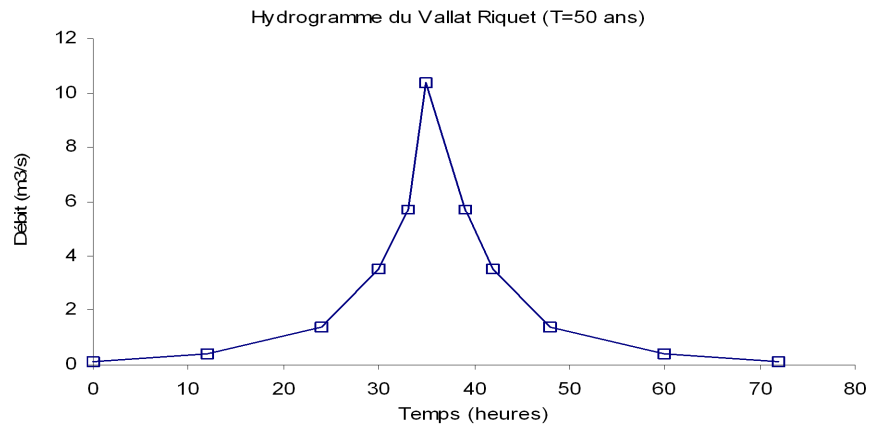


Figure 15. Hydrogramme de référence pour un bassin et une période de retour donnés

Evaluation des probabilités de défaillance des barrages

Les barrages de l'aménagement hydraulique font l'objet d'une évaluation différenciée liée, d'une part, à une fiabilité sensiblement plus importante que celle des autres ouvrages de l'aménagement, d'autre part, à des mécanismes de rupture complexes nécessitant une analyse approfondie réalisée à la granularité du composant de chaque barrage. De fait, il est nécessaire de décomposer les barrages en composants élémentaires et d'analyser individuellement leurs modes de défaillance (Fig. 16).

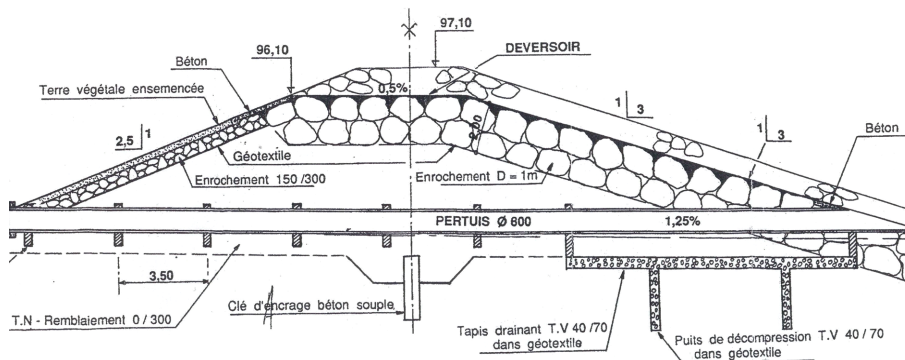


Figure 16. Analyse structurelle d'un barrage de l'aménagement hydraulique

A partir de l'analyse des modes de défaillance des barrages et de leur revue détaillée par le panel d'experts, nous évaluons les probabilités annuelles de rupture des barrages selon les différents mécanismes de rupture. A titre d'exemple, nous présentons la synthèse de l'analyse quantitative d'un barrage écrêteur en remblai. Pour cet ouvrage, le mécanisme de surverse, évalué à partir de différents événements hydrologiques extrêmes correspondant à différentes périodes de retour ($t=1\ 000$ ans à $10\ 000$ ans), est apparu comme le plus critique (Tab. 9).

Mécanisme de rupture du barrage écrêteur (x)	Probabilité annuelle de rupture
Glissement	inférieure à 10^{-6}
Erosion interne en remblai	inférieure à 10^{-6}
Erosion interne en fondation	inférieure à 10^{-6}
Renard hydraulique le long de la vidange	inférieure à 10^{-6}
Erosion externe	inférieure à 10^{-6}
Surverse	inférieure à 10^{-5}

Tableau 9. Exemple de résultats de l'analyse quantitative de sûreté d'un barrage écrêteur en remblai

Modélisation hydraulique et analyse quantitative des conséquences

L'analyse quantitative des conséquences d'un aménagement hydraulique correspond au débit rejeté par le système dans l'environnement hors du réseau. Dans notre étude, elle est obtenue par la modélisation hydraulique de l'aménagement qui a nécessité l'utilisation de deux modèles.

Un premier modèle numérique pour les écoulements à surface libre et souterrains (collecteurs) utilise les données topographiques du bassin versant et permet d'apprécier le fonctionnement hydraulique de points particuliers (bassin de dégrèvement, ouvrages de dérivation, etc.). Il autorise la modélisation maillée en régime fluvial, torrentiel ou mixte, en régime transitoire ou permanent, monodimensionnel ou pseudo-bidimensionnel (casiers).

Un second modèle développé par le bureau ISL permet de reproduire le fonctionnement hydraulique des ouvrages, les transferts dans les réseaux et le laminage dans les barrages. Il comprend des nœuds de calculs, correspondant aux points d'entrée d'hydrogrammes de crue et au droit desquels peuvent être implantés les barrages écrêteurs, et des biefs permettant les échanges entre les nœuds et destinés à représenter les fonctionnements des ouvrages.

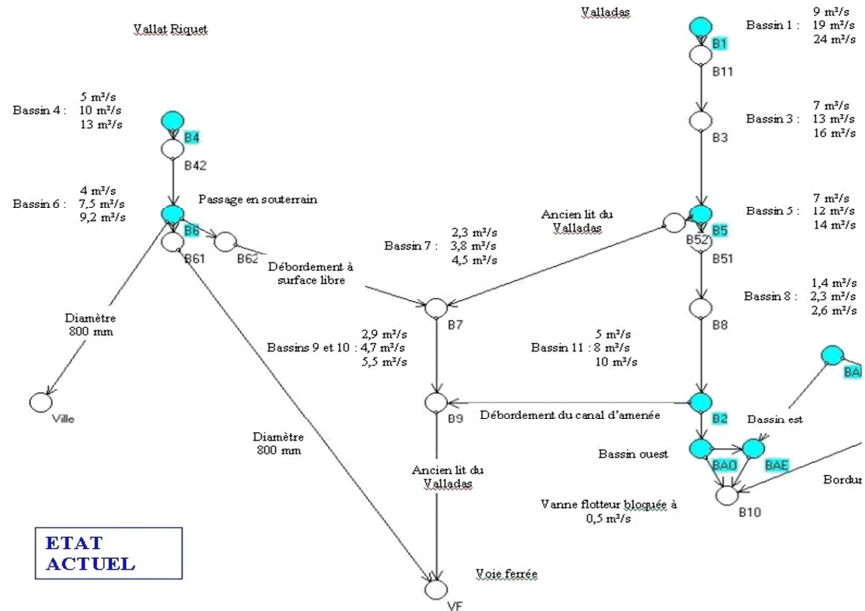


Figure 17. Modélisation hydraulique des écoulements au sein de l'aménagement

Les modèles hydrauliques simulent, pour une configuration nominale ou dégradée de l'aménagement hydraulique et pour un événement hydrologique donné, la réponse du système en terme de débit transporté dans le réseau et/ou rejeté vers l'environnement extérieur. Ils permettent d'évaluer ainsi les conséquences d'un scénario.

Conclusion – Synthèse du projet tuteuré

Un aménagement hydraulique est un système de génie civil à fonctionnement souvent complexe, composé de différents ouvrages ponctuels (barrages, pertuis, répartiteurs de débit...) interconnectés par des ouvrages linéaires (canaux à ciel ouvert, collecteurs enterrés...). L'étude de la sûreté d'un tel aménagement met en œuvre des disciplines classiques (l'hydrologie, l'hydraulique, le génie civil), mais aussi les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement adaptées au génie civil : l'analyse fonctionnelle, l'analyse des modes de défaillance, la méthode des arbres d'événements.

L'analyse quantitative de la sûreté de l'aménagement utilise, d'une part, des mesures probabilistes issues de modèles hydrologiques, d'autre part, une évaluation experte des probabilités des défaillances technologiques des ouvrages. Cette méthodologie est conforme à la pratique internationale des études d'analyse de risques réalisées sur les barrages, notamment (Icold, 2003), (Hartford *et al.*, 2004). Enfin, les modèles hydrauliques permettent d'obtenir les mesures de conséquences des différents scénarios.

Les résultats de l'étude quantitative des risques sont obtenus au moyen de scénarios de défaillance. Ils sont synthétisés sous forme de courbes « probabilité – gravité », présentant la sûreté de fonctionnement globale de l'aménagement en fonction des conséquences potentielles sur l'environnement. Cet affichage du risque correspond aux résultats obtenus dans les études d'analyse de risques du domaine industriel (Villemeur, 1988). Certaines évaluations introduisent des probabilités subjectives issues du jugement expert. Ainsi, même si les ordres de grandeur restent corrects, ces mesures peuvent difficilement être extraites du contexte de l'étude, pour établir des comparaisons de risques avec d'autres barrages d'un autre parc, voire d'autres risques industriels.

Enfin, les résultats d'une telle étude mettent en évidence les ouvrages les plus critiques, sur lesquels les efforts doivent être portés pour améliorer la sûreté de l'aménagement.

Bibliographie

- Cea. *A Guide to Dam Risk Management*, Canadian Electricity Association – Dam Safety Interest Group, December 2000. Revision 8.0.
- Hartford D.N.D., Baecher G.B. *Risk and uncertainty in dam safety*, London, Thomas Telford Publishing, 2004.
- Icold. *Risk Assessment in Dam Safety Management – A reconnaissance of Benefits, Methods and Current Applications*, 2003, 118 p.
- Johansen P.M., Vick S.G., Rikartsen C. “Risk analyses of three Norwegian rockfill dams”. In: *Hydropower’97*. Rotterdam: Balkema, 1997, p.431-442.
- Lavabre J., Fouchier C., Grégoris Y. « SHYREG : une méthode pour l’estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises ». *Ingénieries EAT*, n° spécial Risque naturel et aménagement du territoire, 2003, p.97-111.
- Marche C. *Barrages – crues de rupture et protection civile*, Québec, Presses Internationales Polytechnique, 2004.
- Peyras L., Royet P., Salmi A., Salembier M., Boissier D. 2006a. *Etude de la sûreté de fonctionnement d’un aménagement hydraulique de génie civil : application à des ouvrages de protection contre les inondations de la ville de Nîmes*. In *Revue Européenne de Génie Civil*, Vol. 10, juin 2006, Hermès / Lavoisier. p.615 à 631.
- Peyras L., Royet P. and Boissier D. 2006b. “Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert judgement”. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, 2006, p. 169-186.
- Peyras L., Boissier D., Royet P. « Approches de l’analyse de risques en génie civil : exemple des barrages », *Revue Française de Génie Civil*, Vol. 8, 2004, p. 931-952.
- Peyras L. Diagnostic et analyse de risques des barrages - Développement de méthodes d’aide à l’expertise. Thèse de doctorat spécialité génie civil, Université Blaise Pascal – Clermont II, janvier 2003. 199 p.
- Seidou O., Robert B., Marche C., Rousselle J., Lefebvre M. « Construction probabiliste de scénarios d’apports à réservoir », *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 2004, p. 146-154.
- Seidou O., Marche C., Robert B., Rousselle J. « La gestion à risque contrôlé des réservoirs hydroélectriques », *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 2003, p. 1111-1122.
- Serre, D., Peyras, L., Tourment, R., Diab, Y., 2006. *Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations*, In *Revue Française de Géotechnique*, 2^{ème} trimestre 2006, n°115. p. 57 à 70.
- Talon, A., Chevalier, J-L., Hans, J., 2006. *Failure Mode Effects and Criticality Analysis Research for and Application to the Building Domain*, Publication CIB n°310, Working commission 80, Rotterdam, International Council for Building Research Studies and Documentation, 246 p.
- Villemeur A. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Paris, Eyrolles, 1988.