

Canal Seine Nord Europe – Quantification des scénarios de rupture

Seine-Nord Europe Canal – Assessment of the failure scenarios

Luc DEROO, Rémi BEGUIN
Groupement ONE, Société ISL
deroo@isl.fr

Véronique BERCHE
SCSNE
Veronique.berche@scsne.fr

MOTS CLEFS

Barrage latéral ; Canal ; Sécurité hydraulique ; Analyse des risques quantitative ; AMDEC ; APR ; Probabilités

KEY WORDS

Lateral dam ; Canal ; Hydraulic Safety ; FMECA ; QRA ; Probabilities

RÉSUMÉ

Les canaux de navigation constituent, dans certains cas, des barrages de dimensions importantes et, à ce titre peuvent générer des risques pour les personnes en cas d'accident. Il s'agit de barrages particuliers, pour lesquels des scénarios de défaillance spécifiques peuvent se produire.

En France et en Europe, plusieurs accidents importants se sont produits ces dernières décennies, qui illustrent le caractère spécifique de ce type d'ouvrages. Nous rappelons (§1) les enseignements de quelques-uns de ces accidents notables : les ruptures à la mise en service de deux canaux à grand gabarit en Allemagne, des accidents significatifs aux écluses du Rhin et du Rhône, et le retour d'expérience des accidents sur le réseau de VNF.

C'est dans ce contexte qu'est développé le projet du CSNE, qui comporte plusieurs barrages de classe A et B. Il s'agit de barrages neufs, qui sont donc soumis à l'article 39 de l'ATB, avec une exigence de niveau de sécurité spécifiée : la probabilité de rupture globale ne doit pas dépasser 10^{-5} par an pour un barrage de classe A et 3.10^{-5} par an pour un barrage de classe B. Cette exigence oblige à un effort de quantification des différents scénarios de rupture. Cet article décrit les méthodes employées pour les principaux scénarios, et en tire des enseignements globaux.

Un focus est proposé sur les scénarios majeurs suivants :

- *Le passage des crues dans le CSNE, au long de la succession de barrages et d'écluses, mettant en exergue les sujets liés à l'hydrologie et aux organes de sécurité ultime (« sections résistantes à la surverse »),*
- *Les risques particuliers posés par les ouvrages traversants : les dizaines de rétablissements hydrauliques sous le CSNE, les passages routiers inférieurs, les pont-canaux, les rétablissements de réseau d'eau et de gaz,*
- *L'érosion interne, dans les remblais et en fondation, tenant compte du contexte singulier, avec le développement potentiel de cavités dans la fondation des ouvrages,*
- *Les incidents et accidents d'exploitation aux écluses.*

Pour chacun de ces scénarios, l'article présente le ou les scénarios de rupture envisagés, les dispositions de conception et barrières de sécurité mises en œuvre, l'évaluation quantitative de la probabilité de rupture (au stade de l'étude de dangers initiale).

La méthode (simplifiée) mise en œuvre pour tenir compte de la grande longueur de certains barrages est décrite.

ABSTRACT

Navigation canals can act as significant dams and, in the event of failure, pose serious risks to public safety. This article reviews recent incidents that underline the unique risks associated with these structures, including failures during the initial filling of large canals in Germany, accidents at locks on the Rhine and Rhône rivers, and notable incidents in the VNF network.

Within this context, the Seine-North Europe Canal (CSNE) project is developing multiple Class A and B dams, with strict safety requirements under Article 39 of "ATB", a French regulation dedicated to dam safety. This regulation mandates a failure probability of no more than 10^{-5} annually for Class A dams and 3×10^{-5} for Class B dams, requiring detailed quantification of possible failure scenarios.

The article outlines the main scenarios studied:

- Flood management through successive dams and locks, emphasizing hydrology and ultimate safety features;
- Unique risks from crossings such as hydraulic underpasses, road bridges, and utilities like water and gas networks;
- Internal erosion in embankments and foundations, with a specific focus on cavity or sinkhole development;
- Operational incidents at locks.

For each scenario, the article presents the failure scenarios, design measures, and safety barriers employed, as well as quantitative rupture probabilities.

1. CONTEXTE

Les canaux de navigation sont des barrages, au sens de la réglementation française, car ils stockent de l'eau et, de ce fait, peuvent occasionner des « libérations incontrôlées et dangereuses » de l'eau qu'ils retiennent.

De tels événements se sont produits dans le passé, comme l'illustre le tableau ci-dessous :

Rupture de canaux de navigation	
Rupture du canal RMD, à la mise en eau ; 1979	Rupture du remblai au droit d'un rétablissement de réseau d'eau mal remblayé.
Rupture du canal latéral à l'Elbe, à la mise en eau ; 1976	Rupture du remblai au raccordement de la section courante avec un pont-canal.
Brèches sur canaux VNF ; lors de crues : canal du Midi 2018 (crues de l'Aude) ; canal du Loing 2016 (crue du Loing) ; canal des Ardennes 2021 (crue de l'Aisne)	Ruptures provoquées par érosion externe : surverse par-dessus les remblais (intérieur -> extérieur et extérieur -> intérieur) ; érosion par les courants latéraux.
Brèches sur canaux VNF, hors crue, par exemple : canal de la Marne au Rhin 2019, canal de Briare 2002, canal latéral à la Loire 2000 (cf [3]).	Rupture par érosion interne : au droit de raccordements d'étanchéité ou de singularité. Sensibilité particulière des périodes post-chômage.

Les accidents impliquant les écluses sont fréquents, et en majorité provoqués par des accidents de navigation, des fausses manœuvres ou des ruptures mécaniques des portes.

Accidents et incidents impliquant les écluses	
Iffezheim, Bollène, Sablons, ..., cf [1] et [2]	Ces accidents sont souvent graves pour les bateliers, mais mettent rarement en jeu la sécurité hydraulique. Peuvent être cependant redoutés : l'intumescence provoquée par l'effacement de la porte aval (sas plein), ou la submersion des remblais aval si les biefs sont mis accidentellement en communication. Le CSNE est plus sensible que d'autres canaux aux intumescence et mises en communication (cf [2]).

Le CSNE s'inscrit dans un contexte géologique particulier : les limons éoliens et les craies des Hauts de France. Les limons peuvent être peu denses et dans certains cas s'effondrer à l'imbibition (les loess) ; les craies, roches carbonatées évolutives, qui lorsqu'elles se situent hors nappe peuvent présenter des cavités anthropiques plus ou moins vastes: ouvrages de la 1^{ère} guerre mondiale et anciennes mines artisanales. Des intercalations de sables et d'argiles peuvent localement être rencontrées

Accidents et incidents dans le contexte des sols du projet	
Brèche du canal du Nord à Moeuvres en 2003	Rupture après plusieurs années d'infiltrations visibles. Erosion interne du corps du remblai en limons, protégés par des dalles en béton.
Déraillement TGV en 1993 et incidents sur la ligne en 2001	En 1993, effondrement sur 600 m après affaissement d'une galerie de la 1 ^{ère} guerre mondiale. En 2001 : nombreux fontis lors d'un épisode de pluies longues et prolongées ; ce phénomène est particulièrement apparu sur le territoire picard lors des inondations de la Somme.

L'inventaire de ces accidents peut être complété par la prise en compte du « REX positif » : les accidents graves sur les canaux demeurent relativement peu fréquents, et, comme souvent pour les barrages, les mécanismes d'instabilité liés aux fondations sont plutôt à redouter lors de la première mise en eau.

REX positifs	
Canal RMD, Canal latéral à l'Elbe, Ligne TGV	Passé la mise en service (première mise en eau pour les canaux ; premiers mois d'exploitation pour la LGV) : pas de nouvel accident.
Canal du Nord	Le Canal du Nord n'a pas connu d'autre accident que celui de Moeuvres, alors même que la conception est rustique (remblais homogènes et étanchéité mince amont), et les conditions de fondation difficiles. (Cependant : la raison pour laquelle la digue de Moeuvres a cédé après 40 ans de service n'est pas claire : probablement altération des joints des dalles béton, mais ce n'est pas documenté)

2. L'ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ DE RUPTURE D'UN BARRAGE DU CSNE

La réglementation impose que soient produites des Etudes de Dangers (EDD), à l'appui des demandes d'autorisation des barrages neufs. Ces Etudes sont donc réalisées en phase de développement des projets, avant que ne soient connues les conditions effectives de réalisation des travaux.

Ces EDD doivent présenter une analyse des risques. Et, pour les ouvrages neufs de classe A et B, l'article 39 de l'ATB fixe les objectifs à atteindre.

Pour les barrages neufs de classe A et B, il dispose que : « L'exigence essentielle de sécurité visée au 3° du I de l'article 2 est réputée satisfaite quand la probabilité [de se produire chaque année] de libération

incontrôlée et dangereuse de l'eau contenue dans la retenue est inférieure à 10^{-5} si le barrage est de classe A et inférieure à 3×10^{-5} s'il est de classe B. »

Ainsi, il est nécessaire de déterminer la probabilité globale de défaillance des barrages, exercice qui n'est pas requis pour les barrages en service.

La probabilité annuelle globale ne doit pas dépasser 10^{-5} pour les barrages de classe A, et il y a plusieurs scénarios susceptibles de conduire à la rupture : il faut donc, pour chaque scénario, tenter d'approcher les probabilités annuelles à la précision 10^{-6} ou mieux. Il s'agit d'un exercice délicat, pour lequel il y a peu de retour d'expérience.

Cela a conduit à utiliser une méthode spécifique de calcul des probabilités et à examiner en détails certains scénarios.

3. LA METHODOLOGIE UTILISEE

L'approche utilisée a combiné une évaluation en deux temps :

- Une APR/ADR (Analyse Préliminaire des Risques, mais suffisamment détaillée pour calculer des probabilités dans les processus simples), qui tente de couvrir l'ensemble des scénarios avec deux objectifs :
 - o identifier les scénarios dominants
 - o fournir un calcul de probabilité globale, dans une démarche aisément modifiable et auditable (transparente) ; permettant une étude de sensibilité
- l'élaboration d'arbres de défaillance pour certains scénarios trop complexes pour être traités par les tableaux de l'APR/ADR.

L'APR/ADR est donc le cœur de l'approche par analyse des risques.

Elle est traitée dans un fichier Excel qui contient une série d'onglets :

- un onglet « Fonctions », qui dresse la liste des composants, et qui affecte un code à chacun : c'est la clé à partir de laquelle est bâtie la complétude de l'analyse APR/ADR : la mise en défaut de chacun des composants est traitée dans l'APR/ADR.
- un onglet « Événements initiateurs », qui fournit la liste des hypothèses de probabilité pour chaque événement initiateur ; un point de vigilance : l'unité, en an^{-1} pour les probabilités annuelles et sans unité pour les probabilités conditionnelles.
- un onglet « Barrières » qui fournit la liste des barrières et leur classification en Niveau de Confiance.
- Un onglet « Conséquences », qui dresse la liste des conséquences possibles et cote leur « gravité ».
- Un onglet « APR », dans lequel, pour chaque Fonction, on fait l'inventaire des modes de défaillance. Pour chaque mode de défaillance :
 - o On indique la « Conséquence » associée
 - o Plusieurs scénarios peuvent conduire à la défaillance ; on précise ces scénarios en combinant les « Événements initiateurs » correspondant
 - o Lorsque cela est pertinent, on précise les « Barrières » qui interviennent.

Cela fait des tableaux qui peuvent paraître lourds individuellement (Pour le barrage de classe A de Marquion-Bourlon, avec écluse, en ordre de grandeur : 150 lignes dans l'analyse fonctionnelle, 30 lignes dans les barrières, 70 lignes dans les événements initiateurs, 50 lignes dans les modes de défaillance, jusqu'à 300 lignes dans les tableaux d'APR/ADR).

Cependant, par cette méthode, toutes les hypothèses quantitatives sont sorties des tableaux APR/ADR et les tableaux APR/ADR ne contiennent alors que les scénarios (= événements + barrières). Cela facilite la lecture et l'audit.

De plus :

- La méthode permet d'implémenter des événements complexes (les événements complexes sont listés dans les « événements initiateurs » ; leur probabilité d'occurrence est calculée dans « APR » ; puis réinjectée automatiquement dans « événements initiateurs »).
- Toute modification (par exemple de cotation d'une barrière) est directement répercutée sur toutes les lignes adéquates
- Et, pour CSNE, cela facilite la mutualisation des hypothèses entre les différents barrages du CSNE, en faisant ressortir les points spécifiques à chacun.

L'annexe à cet article donne une illustration de ces tables, à partir de quelques extraits.

Le tableau ci-dessous dresse typiquement des résultats obtenus pour un des barrages :

Description	Conséquence redoutée	Proba ($\cdot 10^{-6} \text{ an}^{-1}$) de libération dangereuse
Instabilité du talus extérieur du remblai.	Perte de la crête, puis brèche	~ 2
Instabilité en grand d'un talus de déblai	Instabilité conduisant à une vague solitaire dangereuse	~ 1
Erosion externe par surverse, occasionnée par une crue ou par un accident d'exploitation.	Perte de la crête, puis brèche	~ 1
Erosion externe par franchissement : tempête extrême, intumescence ou vague solitaire.		~ 1
Erosion interne du remblai	Erosion non stabilisée puis brèche	~ 3
Erosion interne de la fondation		
Effondrement Galerie sous remblai	Brèche dans le canal	~1
Rupture réseau sous pression	Rupture de la fondation par claquage / érosion interne	<< 1
Rupture d'une vanne d'aqueduc ou porte amont	Surverse des remblais du bief aval	<< 1
Ouverture intempestive d'une vanne ou porte amont		<< 1
Rupture de la porte aval, sas plein	Intumescence provoquée par vidange du sas.	<< 1
Ouverture intempestive porte aval, sas plein	Surverse des remblais du bief aval	~3
Rupture tête aval (du génie-civil), sas plein	Intumescence provoquée par vidange du sas. Surverse des remblais du bief aval	<< 1

La somme de ces probabilités est de 10^{-5} par an (le tableau ci-dessus laisse supposer une somme un peu supérieure, mais cela tient aux arrondis).

Cette synthèse illustre les scénarios prépondérants pour *un des barrages* avec écluse :

- l'ouverture intempestive ou la rupture d'une porte ou vanne.
- l'érosion interne, du remblai ou de la fondation.
- l'instabilité des remblais au cisaillement (avec deux scénarios dominant : séisme et érosion externe pied extérieur du remblai).

D'autres scénarios peuvent dominer pour les autres barrages, essentiellement en fonction de la configuration topographique et géologique, et en fonction des ouvrages annexes en relation avec les barrages, par exemple les ouvrages de rétablissements sous le canal. L'exemple ci-dessus est en effet un cas de barrage de longueur relativement limitée, avec peu d'ouvrages traversants.

4. FOCUS SUR QUELQUES SCENARIOS

4.1. Passage des crues

Les crues ont été à l'origine des principaux accidents récents sur le réseau VNF, avec comme scénario privilégié l'alimentation en eau des biefs, sans capacité adéquate d'évacuation du trop-plein.

Le CSNE capte toute une série de vallées, issues de bassins versants de petite taille (de moins de 1 km² à quelques dizaines de km²). Pour nombre de ces vallées, des ouvrages de rétablissements hydrauliques sont installés sous le canal, et l'essentiel des débits demeure donc dans le milieu naturel. Cependant, sur le bief de partage, certains rus et un cours d'eau sont captés ; augmentés du ruissellement direct dans l'emprise des fouilles, cela conduit à un débit de 76 m³/s pour la pointe de la crue exceptionnelle, et un volume de 3,3 hm³ à comparer au volume du bief: 0,9 hm³ de stockage disponible entre Cote haute de navigation (Niveau Normal de Navigation, NNN+20 cm) et Cote des Plus Hautes Eaux (NNN+70 cm) .

Cela correspond déjà au fonctionnement hydrologique du Canal du Nord (CDN) actuel : le CDN capte toute une série de rus qui seront demain collectés par le CSNE. Sur le CDN, les crues sont ensuite transférées de bief à bief par les écluses successives, par des manœuvres de « fausses bassinées ».

Dans le cas du CSNE, un parti différent a été retenu :

- Un bypass est ajouté en parallèle des écluses ; ce bypass est utilisé en priorité pour le passage des crues. Cela permet notamment que la navigation soit maintenue jusqu'à la crue centennale des biefs.
- Des « sections résistantes à la surverse » (SRS) sont prévues sur chaque bief. Leur seuil est placé 10 cm au-dessus des PHE : il s'agit d'ouvrages de sécurité, et pas d'évacuateurs de crues.

La probabilité de rupture par surverse est inférieure à 10⁻⁶ par an, puisque pour qu'il y ait surverse, il faut :

- Soit : une crue extrême (probabilité typique 10⁻⁵ par an) + la défaillance de tout moyen d'évacuation des débits sur les deux écluses du bief de partage (Marquion-Bourlon et Allaines).
- Soit : une crue exceptionnelle (probabilité typique 10⁻⁴ par an) + indisponibilité des ouvrages d'évacuation des crues + tassement de la crête de plus de 20 cm.

Ces résultats issus de l'APR ont conduit à ne pas examiner avec plus de détail la probabilité d'indisponibilité des ouvrages d'évacuation des crues en cas de crue exceptionnelle ou extrême. Cependant, les dispositions habituelles pour maximiser la disponibilité en cas de crue sont bien mises en œuvre (consignes de crue avec mobilisation du personnel, essais réguliers des organes, redondances de l'alimentation électrique et des moyens de communication).

4.2. Ouvrages traversants

Les ouvrages traversants peuvent constituer une source de scénarios dangereux, avec au moins trois modes de défaillance :

- L'érosion interne provoquée par des défauts d'étanchéité : défaut du canal au passage de ces ouvrages provoqué par des tassements différentiels (REX Canal de l'Elbe) ; défaut d'étanchéité

des galeries qui se mettraient en charge ; défauts d'étanchéité des réseaux en fondation (REX Canal RMD).

- Pour les ouvrages de rétablissement hydraulique : la saturation des capacités de transfert avec élévation du niveau d'eau côté extérieur ; et/ou l'érosion de la base du talus par des vitesses d'écoulement excessives.
- Pour les ouvrages de rétablissement routier : les accidents de circulation impliquant des poids lourds, avec incendie dans les galeries sous les remblais.

Vis-à-vis de *l'érosion interne*, l'approche retenue est l'approche classique : étanchéité / filtration / drainage / détection des fuites. De nombreuses parties d'ouvrage sont protégées de la sorte, en section courante, et dans les sites éclusiers ; les configurations sont très variables.

L'événement initiateur, défaut d'étanchéité, a été coté avec une probabilité élevée. Défaut accidentel : 10^{-1} /an (par km de canal) pour l'étanchéité mince exposée ou protégée par une protection mince. Défaut par vieillissement : probabilité $> 0,5$ sur la vie de l'ouvrage pour une étanchéité exposée aux variations climatiques et $0,1$ pour une lame waterstop d'un ouvrage souterrain.

La probabilité d'un défaut de filtration ou de drainage a été notée différemment selon les contextes. Pour un défaut d'étanchéité dont l'origine n'est pas de nature à conduire également à un défaut des filtres : probabilité de défaillance (sur sollicitation) de 10^{-3} pour le géotextile et 10^{-4} pour le filtre granulaire. Pour un défaut accidentel par exemple de type tassement différentiel excessif, il est fait l'hypothèse que l'étanchéité et le filtre géotextile sous-jacent sont perdus simultanément. Le filtre-drain, situé à distance de la retenue, est supposé alors ne pas être concerné.

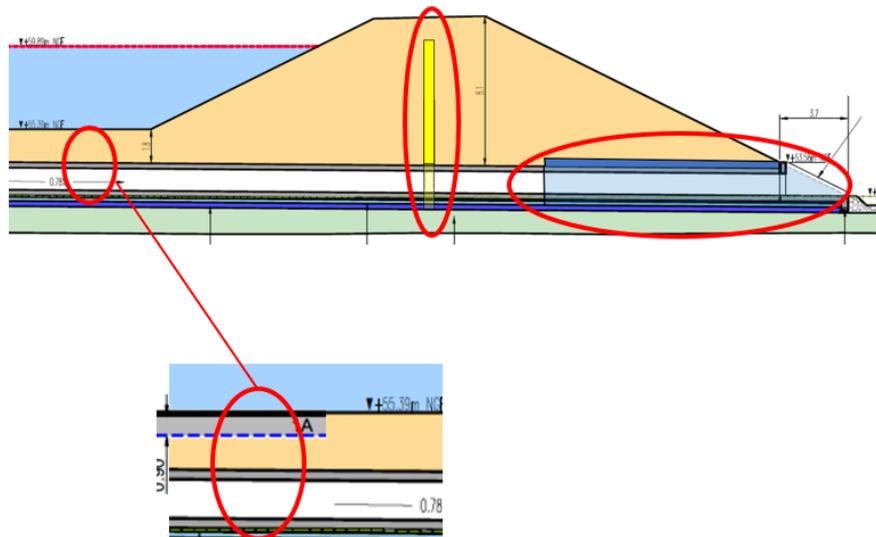


Figure 1 : schéma illustrant les dispositions de conception

Les *barrières de défense* successives permettent d'obtenir des probabilités suffisamment basses.

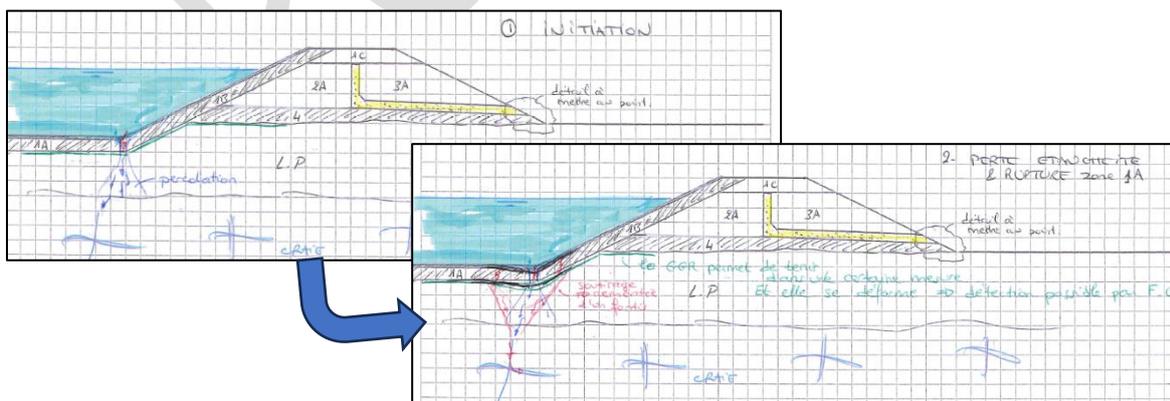
Le cas des rétablissements des *réseaux d'eau* sous les ouvrages pose des problèmes spécifiques, puisqu'il n'est pas possible d'assurer la filtration des éventuels écoulements. La sécurité repose notamment sur la mise en œuvre d'une double enveloppe étanche, la détection des fuites et les essais en pression à la mise en service. Les réseaux de gaz font l'objet d'une étude de dangers spécifique, élaborée par GRDF, qui formule également des résultats en probabilités d'accidents.

La possible saturation des ouvrages de rétablissement hydraulique est difficile à caractériser. Les ruissellements et crues d'orages en contexte agricole peuvent apporter des sédiments en quantité importante, même pour de petits thalwegs; mais ces sédiments n'ont pas naturellement tendance à se déposer dans les galeries, où l'écoulement est chenalisé et les vitesses fortes. Le risque est plutôt un dépôt à l'amont, s'il y a d'abord saturation par l'hydraulique d'eau claire seule (au-delà de Q_{1000}). Il a été retenu une probabilité annuelle de colmatage de 10^{-3} /an/ouvrage (et 10^{-2} /an/ouvrage pour les siphons) ; cette probabilité fait l'hypothèse d'un entretien régulier des ouvrages par l'exploitant : elle ne tient pas compte d'un éventuel colmatage progressif par de petits dépôts. Enfin, les cas de colmatage n'ont pas été considérés comme étant dangereux, car l'eau peut surverser par-dessus la crête sans générer d'érosion (cf. coupe du barrage en Figure 1), et car les volumes de surverse sont trop faibles pour former une crue dangereuse dans le canal.

La probabilité d'accident de poids-lourds avec incendie dans les galeries de passage inférieur a été estimée à partir des statistiques d'accidents : environ 1,1 incendies par 10^8 véh.km. Cependant, tous les incendies ne causent pas de désordres graves aux structures de génie-civil. Trois événements de ce niveau de gravité ont été recensés en France (BP-A6 en 1976, Fréjus en 1983, Mont-Blanc en 1999), pour 117 incendies documentés : probablement un rapport de 100 entre le nombre d'incendies et le nombre d'incendies endommageant gravement les structures de génie-civil. Compte-tenu de la circulation attendue sur la voie la plus fréquentée, pont-canal de l'A29, la probabilité d'un accident avec incendie endommageant dangereusement les structures est 2.10^{-5} par an. Ce niveau de probabilité est excessif, et il est donc nécessaire de prévoir des parades. Sont mis en œuvre : le niveau maximal de résistance au feu (circulaire de 2000, postérieure aux 3 incendies graves mentionnés), qui assure en théorie la résistance au feu pendant une durée de 4 heures ; la vidéo-surveillance aux têtes. Doit également être mis en œuvre : l'information spécifique des services de lutte contre les incendies, de sorte à garantir une intervention en moins de 2 heures. A noter : la longueur du « tunnel » (100 m) est peut-être suffisamment courte pour limiter les montées en température en cas d'incendie, et elle facilite en tous cas l'intervention des secours.

4.3. Erosion interne en fondation

L'érosion interne en fondation est un sujet délicat, pour deux raisons : un scénario accidentel est identifié, qui serait provoqué par les cavités dans la craie ; il est impossible de couper ou filtrer tous les écoulements. Le développement d'un tel phénomène est illustré ci-dessous.



La cotation de cet événement est quantifiée de la manière suivante :

- La prévalence de zones sujettes à formation de cavités est estimée, pour chacun des barrages, en fonction des enquêtes de terrain préalable ; typiquement, 20% à 50% du linéaire.
- Les enquêtes de terrain indiquent que les fontis sont formés presque toujours par soutirage dans des cavités anthropiques, plutôt que dans les fractures naturelles de la craie. Les cavités

anthropiques peuvent être détectées, par les inspections de terrain, et la géophysique ; il est fait l'hypothèse que la plupart des cavités anthropiques dangereuses (tranchées de guerre, mines artisanales) sont effectivement détectées (NC 1, i.e. décote d'un facteur 10).

- Le déclenchement d'un soutirage nécessite une alimentation en eau, et donc un défaut d'étanchéité. Il suffit d'un défaut de petites dimensions ; un tel défaut est probable (défaut de construction, tassements, vieillissement, agression par la navigation) : on retient 10^{-1} /an/km. Pour qu'il soit dangereux, le défaut doit être suffisamment proche d'une cavité, or celles-ci sont sporadiques (typiquement 1 chance sur 5 que le défaut d'étanchéité ne soit pas trop éloigné d'une cavité). Ainsi, globalement, il est considéré que la probabilité de déclenchement d'un processus tel qu'illustré sur le schéma ci-dessus est, pour un tronçon de 10 km :

$$\frac{(20\% \text{ à } 50\%)}{10} * \frac{(1 - (1 - 10^{-1})^{10})}{5}$$

de l'ordre de 0,5% par an.

- Le suivi par fibre optique (percolation + déformation) et le suivi bathymétrique offrent des possibilités de détection précoce, qui permettent alors une intervention (NC 1), en particulier à l'occasion de la première mise en eau contrôlée.
- A défaut, il y a rupture grave des étanchéité de la 1^{ère} barrière (étanchéité mince) et de la 2^{ème} barrière (limons argileux), probabilité annuelle typique 10^{-3} par an.
- Au-delà, le risque est celui d'une érosion des limons de fondation sous le remblai, avec des gradients de l'ordre de 0.1 à 0.2. Deux mécanismes sont possibles :
 - o L'érosion régressive, mais la granulométrie des limons est telle que les gradients ne sont pas suffisants pour provoquer l'érosion, faute d'une perméabilité suffisante
 - o L'érosion de conduit, à la faveur de zones décomprimées dans les limons de fondation ou à l'interface avec le remblai ; une bêche vient couper ces écoulements.
 - o Il ne s'agit pas d'une protection absolue, mais pour ces deux mécanismes, les conditions sont suffisamment éloignées de celles qui permettent l'érosion pour considérer que la confiance est forte, NC2 (probabilité divisée par 100) ou NC3 (probabilité divisée par 1000).
- Enfin, l'expérience montre que les ruptures par érosion interne se produisent presque toujours lors de la première mise en eau (ou, plus précisément, à la cote maximale atteinte). La première mise en eau est réalisée de manière contrôlée, et la cote est montée pratiquement aux PHE. Un incident pendant cette phase a toutes chances d'être détecté suffisamment tôt pour être contrôlé, via un abaissement de la cote de retenue.

Cet exercice de quantification contient des approximations. Cependant, il permet de mettre en évidence que, vis-à-vis du problème des cavités, c'est bien la chaîne des parades successives qui limite la probabilité d'accident à une valeur acceptable.

4.4. Accidents d'exploitation aux écluses

L'article [2] présente les risques associés à l'exploitation des écluses. Parmi ceux-ci, deux sujets émergent particulièrement : la rupture de la porte aval, sas plein, et l'ouverture intempestive.

La probabilité de l'ouverture intempestive de la porte aval, alors que le sas est haut (voire plein) est un sujet important, car cette ouverture peut provoquer une onde d'intumescence qui, selon les calculs pourrait franchir la crête des remblais aval avec une lame d'eau importante (en ordre de grandeur : 1 m, pendant 1 minute).

La probabilité d'un tel accident se calcule différemment selon les conditions d'exploitation : exploitation courante, phase de mise en route (mise en service ou après modifications des automates),

maintenance. En exploitation courante (mode semi-automatique), un ordre d'ouverture intempestive peut être donné si :

- Soit les capteurs donnent une information fautive sur la cote d'eau dans le sas,
- Soit il y a défaillance successive du traitement par les automates : le couple Automate Programmable Industriel (API) / Automate Programmable de Sécurité (APS) d'abord, l'Automate de sauvegarde ensuite.

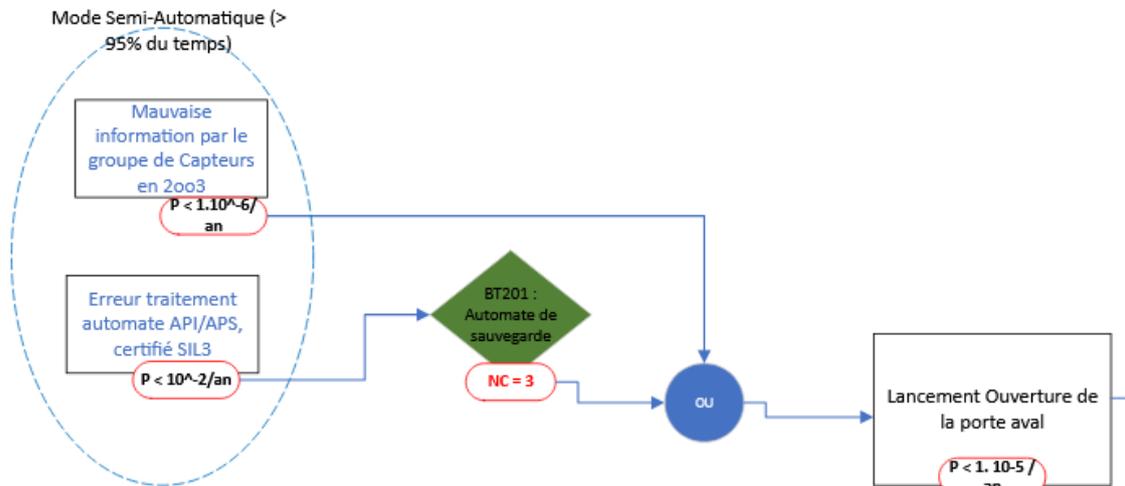


Figure 2 : extrait de l'arbre d'événement illustrant la probabilité d'ouverture intempestive de la porte aval

Dans le schéma en « 2003 », la probabilité d'une mauvaise information des capteurs est très basse, car elle résulte d'une circonstance inhabituelle : un capteur hors service ; l'exploitation se poursuit car il suffit de deux capteurs cohérents pour fonctionner ; un deuxième capteur est défaillant ; la défaillance n'est pas repérée ; l'exploitation se poursuit avec le seul 3^{ème} capteur, et il faut que ce troisième capteur donne également une information erronée. Le calcul de cette probabilité est fait par une approche « FMDS », avec trois paramètres : taux de défaillance d'un capteur : $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ (indication fournisseur, pour un capteur faisant l'objet d'un programme de maintenance préventive, ce qui est donc une probabilité de $2 \cdot 10^{-2}$ par an) ; MTTR (mean time to repair : 1 semaine) ; Intervalle entre tests de détection : 24h. Le calcul tient compte du fait que si un capteur tombe en panne, la probabilité qu'un autre capteur, de la même série, tombe en panne, est augmentée (d'un facteur 10).

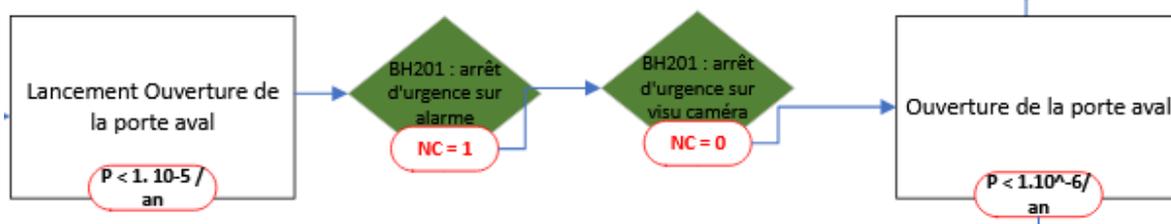
La probabilité de défaillance des automates est justifiée par leur conception, certifiée SIL. Le niveau SIL3 est recherché pour les deux automates, mais s'il est certain d'y parvenir pour l'automate de sauvegarde (architecture simple), ce n'est pas évident pour l'API/APS, compte-tenu de la relative complexité du processus qu'il traite. Cela explique qu'une fiabilité moins grande (probabilité 10^{-2} par an, équivalente à NC 2) est retenue pour l'API/APS.

Si l'ordre d'ouverture de la porte aval est donné, alors trois barrières s'y opposent :

- Une barrière physique : la capacité des vérins peut ne pas être suffisante pour contrebalancer les efforts supplémentaires imposés par la poussée de l'eau ; les calculs montrent cependant que cette barrière n'est pas opérante. En effet, pour des raisons de disponibilité, la porte est manœuvrée par deux vérins et le dimensionnement de ces vérins est tel qu'un seul d'entre eux suffit pour lever la porte en condition normale d'exploitation (en eaux équilibrées) ; les calculs montrent que les deux vérins combinés sont capables de lever la porte avec un sas plein, ou presque plein.
- Deux barrières humaines :

- arrêt sur alarme (émise par l'API/APS) sur effort de manœuvre trop élevé ;
- arrêt sur visualisation d'anomalie par le retour caméra.

En exploitation normale, depuis le PCC, seule l'alarme est jugée suffisamment fiable pour pouvoir décaler l'événement. L'appréciation de la note de confiance relève de l'application des critères de Omega20 ([5]), qui font dépendre la valeur de NC des barrières humaines de trois critères : la capacité à détecter la situation redoutée, la capacité à opérer le diagnostic de la situation, la capacité à mettre en œuvre l'action de sécurité.



L'analyse des risques est également menée pour les deux autres circonstances : mise en route (moins de 5% du temps ; probabilité de défaillance Capteurs ou API multipliée par 100 ; vigilance accrue de l'exploitant) et maintenance (moins de 1% du temps ; API remplacé par opérateur, avec un taux d'erreur de 1 pour 100 à 1000 cycles d'éclusee ; vigilance accrue de l'exploitant).

5. NOTE SUR LE CALCUL DE LA PROBABILITE GLOBALE

L'article 39 de l'ATB impose le calcul d'une probabilité globale de libération incontrôlée et dangereuse, donc la « somme » de toutes les probabilités du tableau du §3. Cela pose deux difficultés, qui sont également rencontrées dans le cas des digues de protection :

Item 1/ comment intégrer le grand développement linéaire ?

Item 2/ comment combiner les probabilités issues de différents scénarios menant à l'accident redouté ?

Cela pose la question des règles d'agrégation : « et » (si les scénarios accidentels pour les ouvrages considérés sont indépendants), et « ou » (si les scénarios accidentels pour différents ouvrages considérés sont les mêmes, et que l'on cherche une probabilité globale d'accident).

Une approche simplifiée est justifiée ici : compte-tenu des très faibles probabilités recherchées, l'incertitude réside plus dans l'évaluation des probabilités de chaque scénario que dans les opérations d'agrégation.

L'approche retenue a été la suivante, pour chacun des deux items ci-dessus :

Item 1/

La plupart des scénarios d'accident concernant les ouvrages linéaires (remblais, déblais) ont été traités en considérant le barrage comme une seule section, dont les paramètres seraient représentatifs du « maillon faible », typiquement la géométrie et les conditions de fondation les plus défavorables. Par exemple : pour l'érosion interne de la fondation en section courante, on évalue la probabilité d'accident correspondant au « profil mixte » (maximisation des gradients) sur fondation limoneuse (minimisation de la résistance). Il s'agit donc d'une combinaison « ou », pour les différents tronçons de section courante, dont la probabilité est simplifiée par une approche de type « maillon faible ».

Cela ne fonctionne pas lorsque les scénarios accidentels proviennent d'agressions. Dans ce cas l'événement initiateur est apprécié via une probabilité par km de canal (par exemple : fontis suite à cavité, ou accident de navigation).

Une approche similaire a été retenue pour les ouvrages singuliers, par exemple les nombreux ouvrages de rétablissement sous remblai. Les causes et mécanismes d'accidents étant analogues pour tous les ouvrages, on retient une probabilité unique, indépendamment du nombre d'ouvrages, lorsque le mode de défaillance est sans cause extérieure (par exemple : érosion interne le long d'ouvrages traversant, provoquée par une rupture d'étanchéité par suite de tassement différentiel) ; cette probabilité est calculée de manière conservatrice, pour représenter l'ouvrage qui serait le maillon faible. Il s'agit donc d'une combinaison « ou », dont la probabilité est simplifiée par une approche de type « maillon faible ».

Lorsque le scénario accidentel provient d'agressions (par exemple : colmatage d'un ouvrage hydraulique), alors on évalue une probabilité par ouvrage, que l'on multiplie ensuite par le nombre d'ouvrages. Puisque les causes d'accident sont indépendantes d'un ouvrage à l'autre, cette agrégation « et » est nécessaire.

Lorsqu'il n'est pas possible d'identifier un « maillon faible », typiquement dans le cas de la multiplicité d'un équipement industriel, de type capteur, pour lequel le fournisseur donne un niveau de fiabilité, alors la probabilité de défaillance :

- est multipliée par le nombre d'équipements si les équipements sont de fournisseurs ou de séries différentes (combinaison « et »),
- ou simplement augmentée d'un facteur multiplicatif retenu à dire d'expert (+30% à +100%) si tous les équipements viennent de la même série, pour tenir compte de l'écart-type et pas seulement de la moyenne de la fiabilité (combinaison « ou »).

Item 2/

De manière prudente, les scénarios menant aux accidents de libération incontrôlée et dangereuse, c'est-à-dire chacune des lignes d'APR avec gravité 5 (typiquement une cinquantaine de lignes dans ces tableaux), ont été considérés comme étant indépendants. Alors, leurs probabilités sont simplement « additionnées » (plus précisément : leurs probabilités de non-occurrence sont multipliées). Il s'agit donc d'une combinaison « et ».

6. CONCLUSION

La démarche de l'analyse des risques, telle qu'elle a été pratiquée (et, selon notre compréhension, telle qu'elle est attendue par les textes) est une démarche analytique, qui pousse à examiner dans le détail chaque fonction, chaque barrière.

Pour les barrages du CSNE, elle a été utile à deux titres (au moins) :

- Via le recensement analytique (inventaire des fonctions internes et inventaire des conséquences des défaillances de ces fonctions), elle décèle des modes de défaillance que la pratique habituelle aurait pu omettre,
- En raison de l'objectif 10^{-6} , elle oblige à approfondir certains sujets délicats, ce qui a conduit à renforcer la conception à certains égards.

L'inconvénient associé à ce caractère très analytique est le risque de faire perdre de vue une approche plus générale et synthétique, qui met en évidence plusieurs sujets importants :

- Le rôle essentiel de l'exploitant (ressources humaines, organisation), impossible à bien refléter dans l'analyse quantitative
- Pour les ouvrages neufs, les aspects spécifiques aux phases travaux et mises en service, qu'il est impossible de refléter fidèlement dans une approche analytique,
- La prise en compte de phénomènes globaux, qui viendraient impacter simultanément plusieurs fonctions ou barrières (« défaillances de cause commune »).
- L'importance de barrières pour lesquelles le NC est 0, faute de pouvoir démontrer une meilleure note mais qui, en pratique, peuvent être centrales (par ex : la vidange de sécurité – NC=0 car la durée de vidange est trop longue pour *certainement* être efficace).

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] PIANC, InCom WG 241, Crisis Management of Accidents in Navigation Hydraulic Structures, Mars 2024
- [2] Canal Seine Nord Europe – Conception des écluses vis-à-vis de la sécurité hydraulique, Luc DEROO, Jean-Jacques HEROU, Claude LEFEVRE, Rémy MATTRAS, Olivier QUESTE ; colloque de mars 2025
- [3] CETMEF, Digue et berges des voies navigables, Retour d'expérience sur les désordres et les réparations, juin 2010
- [4] « PANNES, ACCIDENTS ET INCENDIES EN TUNNEL ROUTIER, Éléments statistiques », publié en février 2022 par le CETU
- [5] OMEGA20. Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - Ω 20. INERIS, 2009.

Annexe : Glossaire

- ADR : Analyse Détaillée des Risques
- APR : Analyse Préliminaire des Risques
- API : Automate Programmable Industriel
- APS : Automate Programmable de Sécurité
- ATB : Arrêté Technique Barrage (de 2018)
- CDN : Canal du Nord
- CSNE : Canal Seine-Nord Europe
- EDD : Etudes de dangers
- FMDS : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité
- NC : Niveau de Confiance (d'une barrière de sécurité)
- NNN : Niveau Normal de Navigation
- PCC : Poste de Commande Centralisé
- RMD : Rhin Main Danube
- VNF : Voies Navigables de France

Annexe : Tableaux de l'APR (extraits)

Ouvrage	Composant	Sous composant rang 1	Sous composant rang 2	Fonction (du strict point de vue de la sécurité hydraulique)	Num	
(et profils annexes)	Crête Remblai	Structure de la crête		F2a : Garantir la stabilité de la crête F1c : Assurer une revanche minimale	TA-Crê-Str-F2a TA-Crê-Str-F1c	
		Chaussée		F3.1 : Limiter le débit des percolations à des niveaux non dangereux (limiter la percolation des eaux météoriques) F5.3 : Faire intervenir le personnel nécessaire à l'application des consignes	TA-Crê-Str-F3.1 TA-Crê-Cha-F5.3	
	Corps du remblai		Z1 (zone 1)		F2a : Garantir la stabilité du remblai (glissement parement intérieur) F3.1 : Limiter le débit des percolations à des niveaux non dangereux (2ème barrière, en cas de défaillance étanchéité)	TA-Cor-Cor-Z1-F2a TA-Cor-Cor-Z1-F3.1
			Z2A (Zone 2A)		F2a : Garantir la stabilité du remblai / ou de la crête (limitation des tassements) F3.1 : Limiter le débit des percolations à des niveaux non dangereux (2ème barrière, en cas de défaillance étanchéité)	TA-Cor-Cor-Z2A-F2a TA-Cor-Cor-Z2A-F3.1
			Z23 (Zones 2B, 3B)		F2a : Garantir la stabilité du remblai / ou de la crête (limitation des tassements)	TA-Cor-Cor-Z23-F2a
			Z3A (Zone 3A)		F2a : Garantir la stabilité du remblai / ou de la crête (glissement talus extérieur)	TA-Cor-Cor-Z3A-F2a
		Z4 (Zone 4)		F3.1 : Limiter le débit des percolations à des niveaux non dangereux (limiter infiltrations vers les cavités)	TA-Cor-Cor-Z4-F3.1	
		Filtre		F3.2 : Filtrer les percolations pour empêcher l'érosion interne	TA-Cor-Fil-F3.2	
		Drain		F3.3 : Drainer les écoulements pour maîtriser les pressions interstitielles	TA-Cor-Dra-F3.3	
	Pavé Incrément ext	Revêtement		F3.1 : Limiter le débit des percolations à des niveaux non dangereux (limiter infiltrations vers les cavités) F2a : Garantir la stabilité du remblai : fousseurs, racines	TA-Cor-Dra-F3.1 TA-PAV-Rev-F2a	

Figure 3: extrait du tableau des fonctions (source : ISL)

Probabilité d'occurrence d'un événement naturel ou accidentel						
Identification	Désignation	Probabilité annuelle <	Unité	Proba par Unité	Classe de proba Par Unité	Justification de la classe de probabilité
Q EXTR	Crue extrême	1.00E-05	barrage	1.00E-05	0.0	Par définition
Q EXCEPT	Crue exceptionnelle	1.00E-04	barrage	1.00E-04	1.0	Par définition
Q 100	Crue courante	1.00E-02	barrage	1.00E-02	3.0	Par définition
METEO 10	Conditions météo défavorables	1.00E-01	barrage	1.00E-01	4.0	Très fort orage, ou cumul de neige, ou gel, ...
CHOC-ACC-R	Choc de bateau à grande vitesse sur remblai, occasionnant des dégâts majeurs	2.10E-04	km de remblai	1.00E-05	0.0	1 seul REX rapporté sur Rhône et Rhin (échanges verbaux avec représentants de CNR et EDF) ; 1000 km de longueur de berge * 20 ans de REX : 1 / 20 000 accident / km / an. En cas d'impact, il y a dégâts majeur seulement si le choc est d'importance suffisante pour rompre protection + étanchéité zone 1 ; on décote encore d'un facteur 5
FEU PI	Incendie grave dans un Passage inférieur	4.00E-04	passage inférieur	5.00E-05	0.7	

Figure 4: extrait du tableau des événements initiateurs (source : ISL)

Probabilité de défaillance d'un ouvrage conçu ou calculé selon les standards, par convention exprimée en probabilité annuelle						
Identification	Désignation	Probabilité annuelle <	par (unité)	Classe de probabilité	Justification de la probabilité annuelle	
DEF malgré EC2	Défaillance alors que Calcul conforme Eurocode 2, CC3	1,00E-07	barrage	1,00E-07	-2	Selon EC0, la probabilité annuelle de référence est 10-6
DEF malgré EC7	Défaillance alors que Calcul conforme Eurocode 7, CC2	1,00E-06	barrage	1,00E-06	-1	Selon EC0, la probabilité annuelle de référence est 10-6
DEF malgré ATB	Défaillance alors que démonstration ou calcul conforme /ATB	1,00E-06	barrage	1,00E-06	-1	Les calculs menés selon ATB et CFBR visent une probabilité inférieure à 10-5 par an
DEF malgré STANDARD	Défaillance alors que Conception conforme aux standards éprouvés grands barrages	1,00E-06	barrage	1,00E-06	-1	car classe E du tableau de "REX mondial"
DEF STANDARD décotée 1	Défaillance alors que Conception conforme aux standards éprouvés grands barrages. Intégration d'une décote en raison de la difficulté à pleinement apprécier tous les phénomènes	1,00E-05	barrage	1,00E-05	0	décote d'une classe : lorsque la conception standard fait appel au jugement d'expert, sur un sujet éprouvé ; par exemple : appréciation de conditions géotechniques sur site lorsque des incidents se sont déjà produits sur des ouvrages similaires, mais mesures correctives sont en place

Figure 5: extrait du tableau des événements initiateurs (source : ISL)

Probabilité de défaillance, sur sollicitation						
Identification	Désignation	Probabilité de défaillance	par (unité)		Classe de probabilité	Justification de la probabilité annuelle
DEF-OPERATEUR	Erreur de l'opérateur	1,00E-02	barrage	1,00E-02	3	L'opérateur passe un ordre erroné en situation inhabituelle de déconnexion de l'API (maintenance, panne API avec passage de l'exploitation en manuel). La probabilité conditionnelle est le produit de la probabilité de geste erroné pendant cette période (10-1), multipliée par l'absence de correction par la supervision (10-1 par action).
DEF malgré CONSIGNES	Défaillance par Défaut d'entretien alors que l'entretien est inscrit aux consignes	1,00E-02	barrage	1,00E-02	3	"événement probable" selon le tableau ci-dessus
DEF malgré CONTROLE	Défaut d'une opération de vérification simple et redondée par organisme indépendant	1,00E-03	barrage	1,00E-03	2	Deux opérations de Niveau de confiance 2 conduisent à un niveau de confiance au moins 3
DEF DRAINAGE	Défaut de drainage dans cheminée / drain	1,00E-04	barrage	1,00E-04	1	Dimensionnement conforme aux standards grands barrages (filtration, ...); cependant il y a eu des colmatages de drainage sur certains barrages. De plus, le filtre-drain n'est pas très

Figure 6: extrait du tableau des événements initiateurs : événements initiateurs sur sollicitation (source : ISL)

Calculs intermédiaires - Probabilité d'occurrence d'un événement naturel ou accidentel complexe (résultant de l'AMDE)					
Identification	Désignation	Probabilité annuelle <	par (unité)		Classe de probabilité
INTUM. PORTE AVAL	Intumescence provoquée par une ouverture accidentelle de porte aval	5.81E-05	barrage		0.8
	Rupture porte aval, sas plein	2.99E-06	barrage		-0.5
	Ouverture intempestive porte aval (3 min)	5.51E-05	barrage		0.7
INTUM. VANNES	Intumescence provoquée par une ouverture intempestive de porte amont ou vannes d'aqueduc de contournement des têtes	6.17E-05	barrage		0.8
	Rupture vanne ou porte amont	1.61E-06	barrage		-0.8
	Ouverture intempestive vannes ou porte amont (3 min)	6.01E-05	barrage		0.8
PERT ETZ	Perte étanchéité 1ère et 2ème barrière (TOARC)	1.26E-03	barrage		2.1
	Probabilité cumulée de :				
	Perte étanchéité 1ère et 2ème barrière	6.84E-04	barrage		1.8
	Fontis (augmentation du risque)	5.74E-04	barrage		1.8

Figure 7: extrait du tableau des événements initiateurs : événements initiateurs complexes (source : ISL)

Identification barrière		Ouvrage		Identification		Caractéristiques		Indépendance		Efficacité			
Classe	Type	N°	Identification	Fonction de sécurité	Composant (techniques, humains, orga)	Type	Indépendance / scénario	Indépendance / autres barrières	Dimensionnement	Environnement	Positionnement		
Humaine	STPO		Fermeture manuelle	BH301 : Fermeture manuelle vanne de coupure	BH301 : Fermer les circuits en l'absence d'énergie	Fermer les circuits en l'absence d'énergie	Echappement sur les véris	AH	Indépendant de tout scénario	Indépendant des autres barrières	100%	nécessite accès au site par l'opérateur	dans local de restitution pompage
Humaine	TOARC		Abaissement bief	BH111 : Abaisser niveau bief	BH111 : Abaisser niveau bief	Abaisser le niveau du bief pour limiter le risque d'accident, ou sa gravité	Sur situation identifiée par les consignes : démarrage opération vidange par cycle de l'API	SAMS	Indépendant de tout scénario	indépendant des autres barrières	50% (abaissement moitié bief)	néant (peut s'opérer manuellement si perte alim.)	pas de contrainte (PCC ou local)
Humaine	TOARC		Vidange bief	BH112 : Vidanger le bief	BH112 : Vidanger le bief	Vidanger le bief pour limiter le risque d'accident, ou sa gravité	Sur situation identifiée par les consignes : poursuite opération vidange par cycle de l'API, après B301	SAMS	Indépendant de tout scénario	indépendant des autres barrières	100%	néant (peut s'opérer manuellement si perte alim.)	pas de contrainte (PCC ou local)
Humaine	TOARC		Protection amorce instabilité	BH113 : Protéger une amorce d'instabilité par pose d'enrochements	BH113 : Protéger une amorce d'instabilité par pose d'enrochements	Protéger une amorce d'instabilité par pose d'enrochements	Intervention d'urgence si des défauts dangereux sont observés par la surveillance	AH	Indépendant de tout scénario	indépendant des autres barrières	100% si succès	ne fonctionne qu'en cas d'intervention suffisamment précoce	nécessite de disposer du stock à proximité
Humaine	TOARC		Protection défaut drainage	BH121 : Conforter localement si ligne piézo haute	BH121 : Conforter localement si ligne piézo haute	Conforter localement si des sautements sont observés par la surveillance	Intervention de confortement si des sautements sont observés par la surveillance	AH	Indépendant de tout scénario	indépendant des autres barrières	100% si succès	ne fonctionne qu'en cas d'intervention suffisamment précoce	nécessite de disposer du stock à proximité

Figure 8: extrait du tableau des barrières 1^{er} volet (source : ISL)

Ouvrage	Type	N°	Temps de réponse		Test, maintenance		Niveau de confiance		Décote diagnostic	Décote Action de sécurité	NC (à temps de réponse OK)	Actionnements intempestifs
			Temps de réponse	Commentaire	Testabilité	Maintenabilité	Décote détection					
STPO	Fermeture manuelle	BH301	2h	Délai de route + d'actionnement	oui	oui	0	sans objet (l'opération n'est enclenchée qu'après défaut d'une autre barrière)	0	sans objet (l'opération n'est enclenchée qu'après défaut d'une autre barrière)	1	néant
TOARC	Abaissement bief	BH111	8 jours	Temps de vidange de 8 heures	oui	oui	0	Décote éventuelle selon situation nécessitant le déclenchement	0	Les conditions de déclenchement sont fixées par les consignes	2	arrêt navigation
TOARC	Vidange bief	BH112	20 jours	Temps de vidange (y compris B301)	oui	oui	0	Décote éventuelle selon situation nécessitant le déclenchement	0	Les conditions de déclenchement sont fixées par les consignes	2	arrêt navigation ; possibles instabilités de talus
TOARC	Protection amorce instabilité	BH113	8 jours	24h après détection	oui	oui	0	Surveillance : tâche planifiée	-1	Diagnostic pas nécessairement facile à établir	0	néant

Figure 9: extrait du tableau des barrières, 2^{ème} volet (source : ISL)

Code AF	Traité par	Identification du scénario				Conséquence défaillance	Gravité (G)	Causes possibles de défaillance	Événement initiateur : Combinaison "ET" d'événements pouvant conduire à la défaillance				Commentaires Evénement	Classe de probabilité (P)
		Composant	Rang1	Rang2	Fonction (sécurité hydraulique)				combinaison	Événement1	Événement 2	Événement 3		
TA--Cor-Cor-Z2A-F2a		Corps du remblai	Corps du remblai	Z2A (Zone 2A)	F2a - Garantir la stabilité du remblai / ou de la crête (limitation des tassements)	Perte étanchéité 1ère et 2ème barrière	0	Tassements => rupture étanchéité des deux barrières	\OU	DEF malgré STANDARD		\	Les calculs de tassements sont faits selon les référentiels standards (pas de décode car maîtrise des matériaux)	-1,0
TA--Cor-Cor-Z2A-F3.1	TA--Cor-Cor-Z1-F3.1	Corps du remblai	Corps du remblai		F3.1 : Limiter le débit des percolations à des niveaux non dangereux (2ème barrière, en cas de défaillance étanchéité)	Perte étanchéité 1ère et 2ème barrière	0	Développement d'un fontis, qui rompt simultanément l'étanchéité des deux barrières	OU\	COUVERT par AUTRELIGNE	\	\	Mécanisme déjà pris en compte sur zone 1	-5,0
TA--Cor-Cor-Z23-F2a		Corps du remblai	Corps du remblai	Z23 (Zones 2B, 3B)	F2a - Garantir la stabilité du remblai / ou de la crête (limitation des tassements)	Perte étanchéité 1ère et 2ème barrière	0	Tassements => rupture étanchéité des deux barrières	X	DEF STANDARD décodée 1	\	\	Les calculs de tassements sont faits selon les référentiels standards; décode 1 classe car possibilité de montée en pressions interstitielles	0,0
TA--Cor-Cor-Z3A-F2a		Corps du remblai	Corps du remblai	Z3A (Zone 3A)	F2a - Garantir la stabilité du remblai / ou de la crête (glissement talus extérieur)	Instab. Talus extérieur	5	Défaillance de la chaîne Etanchéité / Filtration / Drainage	\OU	DEF malgré ATB	\	\	La vérification est faite y compris pour les différents cas de défaillance (cf. chapitre 5). Cette AMDE ne détaille donc pas l'ensemble des cas de figures	-1,0
TA--Cor-Cor-Z3A-F2a		Corps du remblai	Corps du remblai	Z3A (Zone 3A)	F2a - Garantir la stabilité du remblai / ou de la crête (glissement talus extérieur)	Instab. Talus extérieur	5	Séisme	OU\	SES	\	\	La vérification est faite y compris pour les différents cas de défaillance (cf. chapitre 5). Cette AMDE ne détaille donc pas l'ensemble des cas de figures	0,0

Figure 10: extrait du tableau APR, 1^{er} volet (source : ISL)

Code AF	Cinétique de la défaillance	Évaluation des barrières				Commentaires Barrières	Classe de probabilité (B)	Cotation			
		Barrière 1	Tps Bco. 1	Barrière 2	Tps Bco. 2			P+B (classe)	P+B (proba)	P+B+G	P+B+G combinée
TA--Cor-Cor-Z2A-F2a		\		\		0	-1,0	1E-06	-1,0	\	
TA--Cor-Cor-Z2A-F3.1	quelques semaines à quelques années	\		BH105 : Suivi FO cavités	1 mois	1	-6,0	1E-11	-6,0	-1,0	
TA--Cor-Cor-Z23-F2a		\		\		0	0,0	1E-05	0,0	0,0	
TA--Cor-Cor-Z3A-F2a	quelques mois à quelques années	BH122 : Intervention suite visite programmée	1 mois	\		1	-2,0	1,0E-07	3,0	\	
TA--Cor-Cor-Z3A-F2a	très rapide	BT001 : Marges de calcul	0	\		1	-1,0	1,0E-06	4,0	4,0	
TA--Cor-Cor-Z3A-F2a		\		\		0	1,0	9E-05	1,0	1,0	

Figure 11: extrait du tableau APR, 2^{ème} volet (source : ISL)

PROVISIO