LA RUPTURE DES BARRAGES REMBLAI A GRAND LINEAIRE : CONSTRUCTION ET SCHEMATISATION DES SCENARIOS

Failure of embankment dams with large linear: construction and diagramming of scenarios

Jérémy MEYNET
CNR, 2 rue André Bonin - 69316 LYON CEDEX 04
j.meynet@cnr.tm.fr

Rachid FELLAG
CNR, 2 rue André Bonin - 69316 LYON CEDEX 04
r.fellag@cnr.tm.fr

MOTS CLEFS

Barrage remblai, grand linéaire, analyse de risques, étude de dangers, méthode du nœud papillon

KEY WORDS

Embankment dam, large linear, risk assessment, hazard studies, bow tie method

RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'actualisation des études de dangers des aménagements hydroélectriques de la CNR, la méthodologie de représentation des scénarios de rupture des barrages en remblai à grand linéaire (barrages latéraux également appelés endiguements ou digues) a été affinée au regard d'un contexte constructif spécifique et commun à la plupart des aménagements CNR du Rhône. En effet, ils sont constitués de barrages latéraux en remblai à grand linéaire (les ouvrages qui ferment la retenue et ceux du canal d'amenée à l'usine), de deux grands types : gravier et mixte (limon et gravier). Ces barrages latéraux, non étanches, sont construits avec les matériaux issus du recalibrage de la retenue et du creusement du canal d'amenée ; ils sont présents pour chaque aménagement sur plusieurs kilomètres, pour un total d'environ 400 km de barrages latéraux pour la CNR.

La méthode d'analyse de risques dite du « nœud papillon » est habituellement réservée pour l'analyse de scénarios d'accidents dont les combinaisons de causes sont complexes car elle permet de schématiser une multiplicité de causes et de combinaisons. Cette méthode est parfaitement adaptée au contexte d'un barrage transversal (un seul « objet barrage » avec « un axe de rupture » identifié) mais peut devenir complexe à mettre en œuvre pour des ouvrages latéraux de plusieurs kilomètres, la difficulté principale étant de ne pas pouvoir représenter toutes les causes et tous les axes de rupture potentiels.

Cet article présente l'approche développée par CNR afin d'aboutir à une construction, une schématisation et une analyse claire et représentative des différentes causes et combinaisons pouvant conduire à la rupture des ouvrages en remblai à grand linéaire, grâce à trois choix méthodologiques forts :

***1. Découpage de l'ouvrage en tronçons :** le linéaire complet des endiguements d'un aménagement est découpé en différents « tronçons homogènes » (profil type sur plusieurs centaines de mètres) et en « secteurs unitaires » (250 m maximum pour représenter une spécificité locale).*

***2. Qualification de la stabilité par mode de défaillance en probabilités de rupture :** l'objectif est que les calculs de stabilité soient directement utilisables dans l'analyse de risques en identifiant les profils sensibles selon le mode de défaillance.*

***3. Schématisation des probabilités selon les principaux modes de rupture et choix des scénarios critiques :** représenter dans le nœud papillon les principaux modes de rupture pour ces ouvrages en remblai à grand linéaire et les configurations (probabilité/gravité) les plus critiques via le tableau d'argumentaire.*

ABSTRACT

As part of the update of the hazard studies of the CNR hydroelectric facilities, the methodology for representing the failure scenarios of the large-linear embankment dams (lateral dams also called dikes) was refined in light of a specific construction context common to most of the CNR hydroelectric facilities. Indeed, they are made up of large-linear embankment lateral dams (the structures that close the reservoir and those of the supply channel to the plant), of two main types: gravel and mixed (silt and gravel). These lateral dams, which are not watertight, are built with materials from the recalibration of the reservoir and the digging of the supply channel; they are present for each hydroelectric facility over several kilometers, for a total of approximately 400km of lateral dams for the CNR.

The risk analysis method known as the "bow tie" is usually reserved for the analysis of accident scenarios with complex combinations of causes because it allows a multiplicity of causes and combinations to be schematized. This method is perfectly suited to the context of a transverse dam (a single "dam object" with an identified "failure axes") but can become complex to implement for lateral structures of several kilometers, the main difficulty being not being able to represent all the causes and all the potential failure axes. This article presents the approach developed by CNR in order to achieve a clear and representative construction, schematization and analysis of the different causes and combinations that can lead to the failure of large-scale embankment structures, thanks to three strong methodological choices:

1. Division of the structure into sections: the complete linearity of the embankments of a hydroelectric facility is divided into different "homogeneous sections" (typical profile over several hundred meters) and into "unit sectors" (250m maximum to represent a local specificity).

2. Qualification of stability by failure mode in failure probabilities: the objective is that stability calculations can be directly used in risk analysis by identifying sensitive profiles according to the failure mode.

3. Schematization of probabilities according to the main failure modes and choice of critical scenarios: represent in the bow tie the main failure modes for these large-scale embankment structures and the most critical configurations (probability/severity) via the argument table.

1. DIFFICULTES DE SCHEMATISATION DES SCENARIOS D'ACCIDENT POUR DES OUVRAGES LATERAUX DE PLUSIEURS KILOMETRES

Le premier scénario auquel on pense dans le cadre d'une étude de dangers de barrage est celui de la rupture de l'ouvrage lié à la perte de la fonction « retenir l'eau ». La méthodologie d'analyse de risques d'une EDD barrage permet de schématiser facilement ce genre de scénario en « nœud papillon » avec :

- **Au centre « l'Evènement Redouté Central » ou ERC** qui représente la situation dangereuse non souhaitée ; dans le cadre des EDD barrage c'est un évènement jugé impactant pour la sécurité publique qui conduit à libérer tout ou partie de l'eau retenue et à exposer des personnes.
- **A gauche « l'arbre des causes »** qui représente les causes potentielles et combinaisons de causes (évènement initiateur) pouvant conduire à l'ERC ; les causes sont caractérisées en probabilité d'occurrence.
- **A droite « l'arbre des conséquences »** qui représente l'impact de la libération de l'eau sur les enjeux suite à la rupture ; les conséquences sont caractérisées par un niveau de gravité en fonction du nombre de personnes exposées par la libération de l'eau.

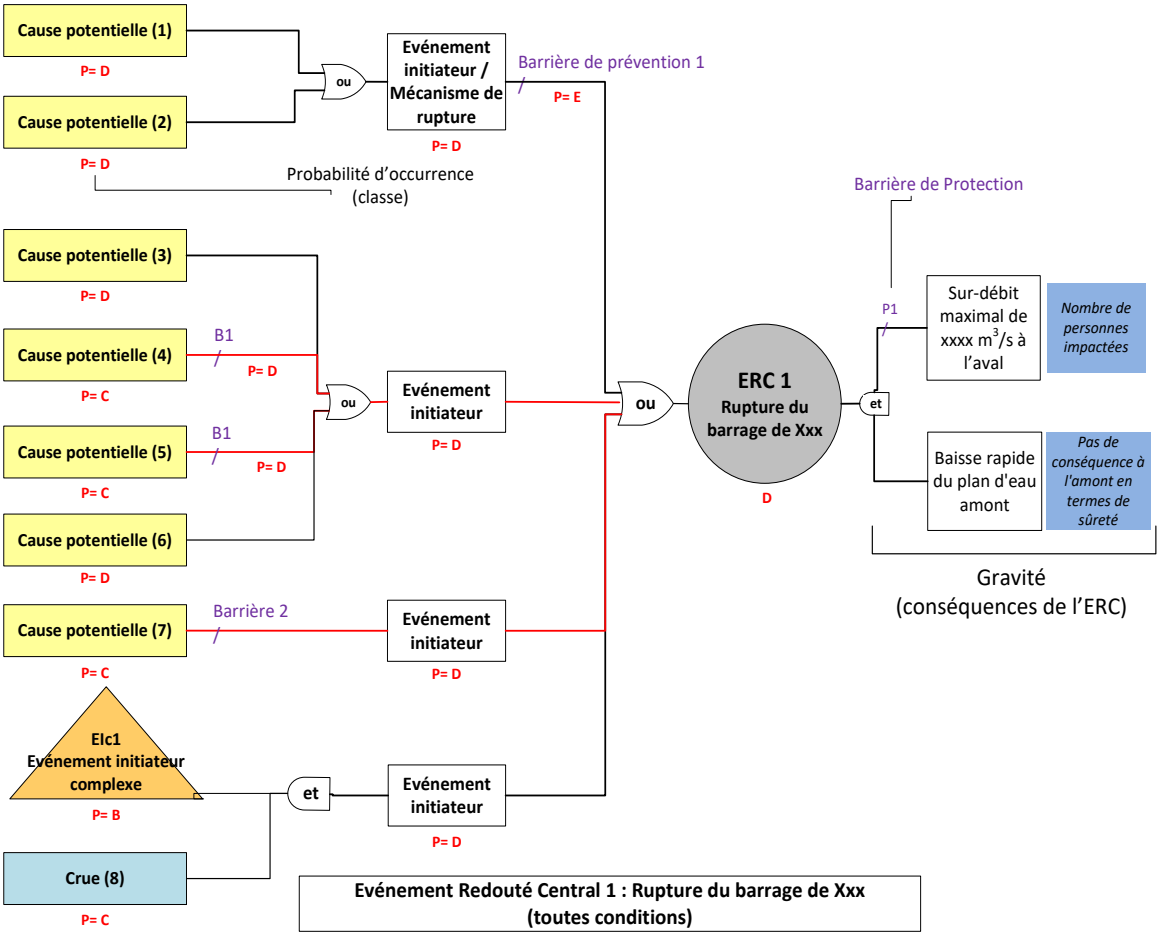

Figure 1 : Exemple de représentation Nœud Papillon pour un ERC Rupture Barrage

Cet exercice, mis en œuvre depuis plus de 10 ans dans le cadre des premières études de dangers barrage et maintenant dans le cadre des actualisations (ou EDD v2), est assez facile à réaliser pour un barrage transversal représentant un seul « objet barrage » et un seul « axe de rupture ». En effet, l'exercice de style attendu est en général l'effacement complet de l'ouvrage et la libération à l'aval du volume de la retenue qui lui est associée.

L'exercice devient plus complexe pour un barrage latéral en remblai de plusieurs kilomètres car il n'y a pas qu'un seul « objet barrage » ou un seul « axe de rupture » en raison :

- **De caractéristiques constructives variables sur le linéaire (différents profils types) :** si les barrages latéraux en terre (ou endiguements) CNR sont de conceptions assez homogènes, certaines

caractéristiques vont varier sur le linéaire de l'aménagement étudié : types de matériaux constituant les digues (graviers et/ou limon), géométries variables (hauteur de quelques mètres à une dizaine de mètres, largeur en crête autour de 10 m, mais parfois supérieures à 30 m), pentes des parement majoritairement de 3/1 (2,5 à 5/1), présence d'ouvrages intégrés, voire des parties en béton ou palplanches. Cette variabilité crée donc des profils distincts.

- **Des sensibilités différentes selon les profils :** sur le linéaire complet du barrage latéral, les profils vont avoir des sensibilités différentes à certains phénomènes et modes de ruptures (érosion interne notamment) selon notamment leurs caractéristiques constructives, leur comportement et leur incidentologie.
- **De configurations aval hétérogènes :** la rupture ne peut pas être modélisée sur l'ensemble du linéaire quand celui-ci est de plusieurs kilomètres ; la réalité physique des phénomènes implique que la brèche apparaitra sur une largeur d'une centaine de mètres à des endroits différents selon les scénarios envisagés et les sensibilités des profils. Ainsi, l'impact de la libération de l'eau suite à la rupture du tronçon devra être analysé au regard des enjeux aval au droit de la brèche : sur un linéaire de plusieurs kilomètres, les configurations aval sont hétérogènes et ne représentent pas un seul niveau de gravité (gravité nulle si le terrain naturel aval est à une altitude supérieure au niveau de Retenue Normale, gravité faible si les terrains inondés sont agricoles, gravité importante si les terrains inondés sont des zones habitées).

Dès lors, comment représenter de manière claire et complète la multitude de configurations « profil / sensibilité / configuration aval » dans un seul schéma nœud papillon ? Faut-il forcément viser l'exhaustivité ou peut-on faire des choix permettant une représentativité des résultats affichés ?

L'approche développée par CNR s'est faite autour de trois choix méthodologiques forts afin d'aboutir à une construction, une schématisation et une analyse claire et représentative des différentes causes et combinaisons pouvant conduire à la rupture des ouvrages en remblai à grand linéaire.

Nota : cet article ne détaillera pas les méthodes de calcul de stabilité des barrages latéraux en remblai CNR classés B (également appelés endiguements ou digues). L'objectif est uniquement de présenter la démarche méthodologique déployée par CNR pour traduire les calculs en scénarios de rupture représentés dans les EDD.

2. CHOIX METHODOLOGIQUES

2.1. Découpage de l'ouvrage en profils

2.1.1. Découpage en tronçons homogènes et secteurs unitaires

Le linéaire d'endiguement de chaque aménagement est divisé en tronçons, dit « **tronçons homogènes** », définis en fonction notamment de types de digues rencontrés et des caractéristiques géométriques représentatives de tout le tronçon. **Un profil (plan) type est associé à chaque tronçon et sert aux calculs**. Il s'agit de l'unité de base de longueur variable de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres, complétée par 2 unités plutôt ponctuelles qui sont la « **zone d'incident** » (close ou active) et « **l'ouvrage traversant** ».

La zone d'incident (zone généralement peu étendue présentant une anomalie et ayant fait l'objet d'une déclaration auprès de la DREAL), fait l'objet d'une analyse dédiée selon les phénomènes à l'origine. Les ouvrages traversant (souvent des conduites de prise et de rejet d'eau) sont étudiés comme des singularités pouvant influencer certains mécanismes d'érosion interne.

Pour l'érosion interne, le maillage est plus resserré afin d'intégrer des spécificités locales. Il s'agit d'un découpage du tronçon homogène en « **secteur unitaire** » de longueur 250 m.

Le schéma ci-dessous synthétise les unités de base utilisées : le tronçon homogène pour les scénarios d'érosion externe et de glissement ; le secteur unitaire pour l'érosion interne.

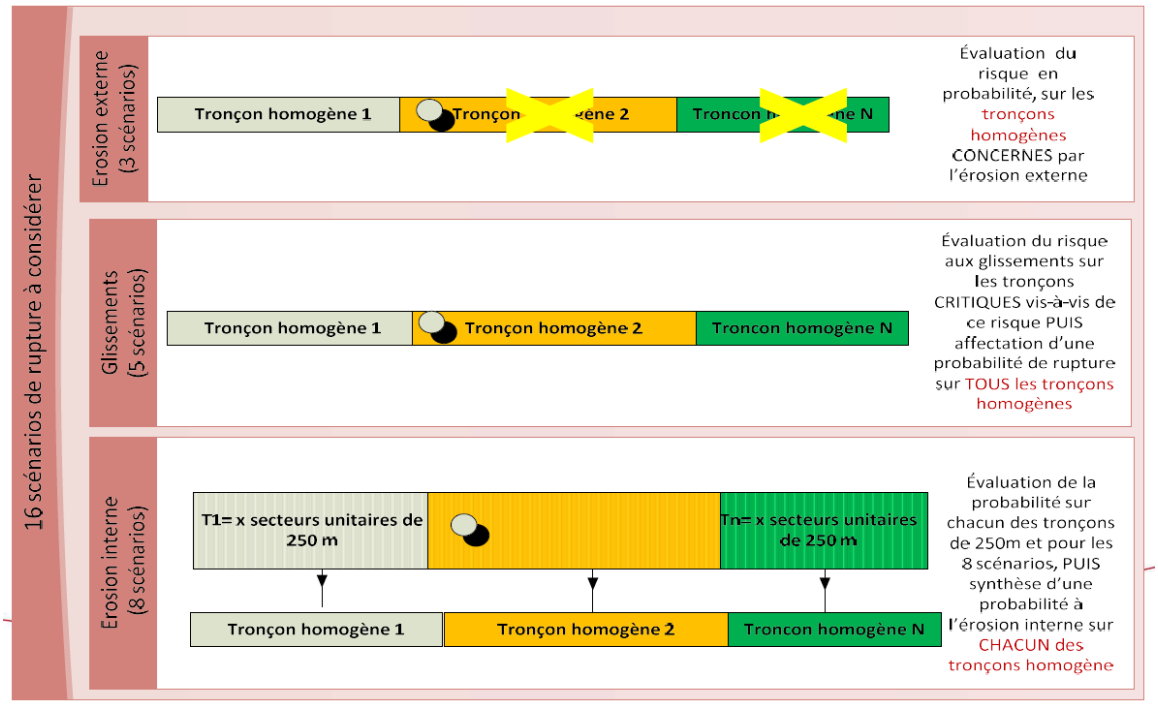

Figure 2 : Principe du découpage en tronçons homogènes et secteurs unitaires

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des modes de défaillance étudiés pour les endiguements. Ils sont issus des « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai d'octobre 2015 du CFBR » et adaptés au contexte des endiguements CNR.

N° scénario	Modes de défaillances élémentaires de l'endiguement		Conditions particulières	Scénarios de ruptures à étudier à l'EDDV2 (situations dangereuses)
1	Stabilité aux glissements	Talus aval	Clé amont colmatée et drainage aval défaillant[1]	Glissement du talus aval menant à la rupture du tronçon
2		Talus aval	Clé amont non colmatée et drainage aval efficace	Glissement du talus aval menant à la rupture du tronçon
3		Talus aval	Clé amont non colmatée et drainage aval défaillant	Glissement du talus aval menant à la rupture du tronçon
4		Talus aval	Sous-pressions en pied de digue	Glissement du talus aval due aux sous-pressions et menant à la rupture
5		Talus amont	Vidange rapide de la retenue	Glissement d'un talus amont menant à rupture par surverse
6	Érosion interne	Érosion de contact	Érosion de contact à la base de l'endiguement entre limon et fondation alluviale	Rupture par fontis/ surverse ou glissement aval suite à progression lente d'une érosion de contact
7		Érosion de contact	Érosion de contact à la base de l'endiguement entre limon et fondation alluviale	Rupture par progression rapide (conduit) de l'érosion de contact
8		Suffusion	Suffusion dans le corps de digue ou fondation	Progression par fontis /glissement puis rupture par surverse
9		Érosion régressive	Présence d'une couche de sable continue sous un toit (généralement une couche de limon)	Rupture par érosion régressive maintenue par un toit limon
10		Érosion régressive	Érosion régressive de talus aval	Rupture par ravinements/ glissements successifs suite à érosion régressive de talus aval

[1] Le degré de colmatage (taux de rabattement) est calculé à partir des relevés piézométriques. Le drainage aval est supposé défaillant pour avoir un cas d'étude enveloppe.

N° scénario	Modes de défaillances élémentaires de l'endiguement		Conditions particulières	Scénarios de ruptures à étudier à l'EDDV2 (situations dangereuses)
11		Érosion de conduit	Initiation par un défaut (terrier, fissure ou vide laissé par une racine quasi traversante) sur partie la supérieure d'une digue peu large	Rupture par érosion de conduit
12		Érosion régressive	Présence d'ouvrage traversant	Érosion régressive le long d'ouvrage traversant
13		Érosion de conduit	Présence d'ouvrage traversant	Érosion le long d'ouvrage traversant et rupture par Érosion de conduit
14	Érosion externe	Affouillement côté talus aval	Pied de digue érodé (constaté lors des VTA / DEO), au droit des zones de seuils ou des affluents débouchant dans le contre-canal	Glissement du talus aval suite à forte érosion de pied
			Fonction des écoulements (vitesses et niveau) du contre-canal (crue, embâcles...)	
15		Affouillement côté talus amont	Talus amont affouillé (constaté lors des DEO)	Glissement d'un talus amont affouillé menant à une rupture par surverse
16		Érosion externe par surverse	Digues submersibles, diguettes, déversoirs	Rupture par érosion externe ou surverse

Tableau 1 : Tableau exhaustif des modes de défaillance à étudier à l'EDD V2

2.1.2. Choix des profils étudiés

Les digues de CNR sont toutes de classe B. Deux grands types de digue sont majoritairement identifiés sur les endiguements CNR : digues en graviers (Figure 3) et digues mixtes (Figure 4). D'autres configurations peuvent exister et sont précisées pour les aménagements concernés avec des approches adaptées non présentées dans cet article. Le linéaire endigué de chaque aménagement est divisé en plusieurs tronçons dits homogènes, en fonction notamment des types de digues rencontrés.

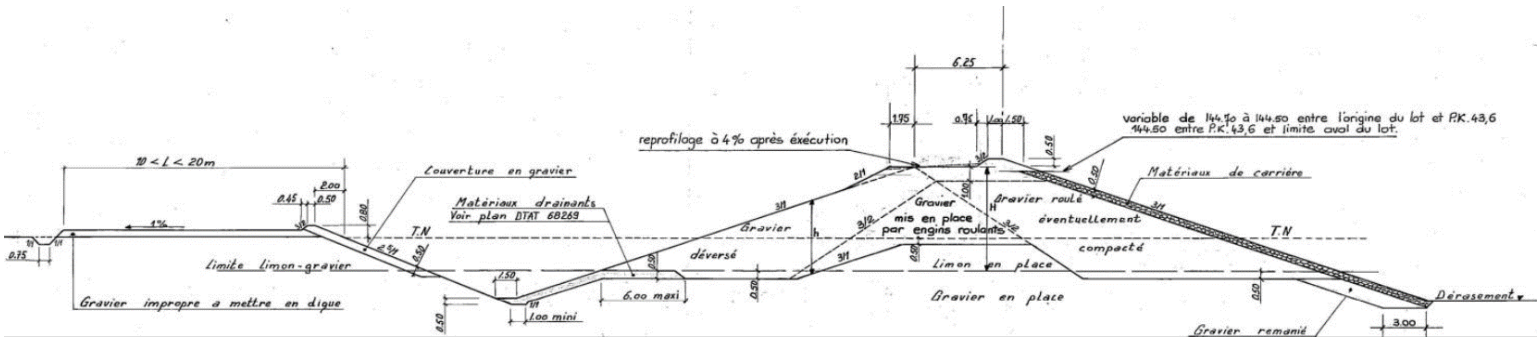

Figure 3 : Digue en graviers

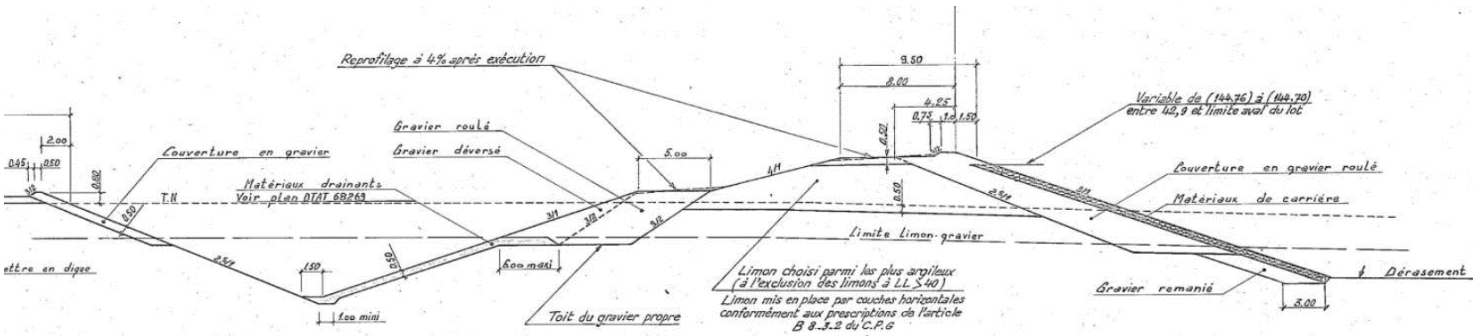

Figure 4 : Digue mixte : avec un noyau en limon et des recharges en graviers

Pour les calculs de stabilité au glissement, et afin d'éviter des calculs répétitifs et non pertinents, les vérifications de stabilité au glissement sont faites sur le profil (tronçon) le plus critique pour chaque type de digues.

La définition des profils types est faite via les trois éléments qui influencent les résultats des calculs de stabilité :

- **Les paramètres géotechniques :** les caractéristiques de résistance mécanique des graviers et des limons pour chaque aménagement ne varient pas pour les tronçons constitués par le même type de digue. Les spécifiés des sols de fondations sont également prises en compte.
- **Les conditions piézométriques en fonction du niveau du Rhône et du contre-canal :** les lignes piézométriques modélisées prennent en compte les exigences de l'item 24 de l'ATB, à savoir la défaillance des dispositifs d'étanchéité et/ou de drainage. Les conditions piézométriques « réelles » dans les digues, dans le cas de niveau de retenue normale, sont également modélisées. Celles-ci montrent globalement un fort rabattement de la ligne piézométrique sur l'ensemble du linéaire endigué, en raison du colmatage du talus amont des digues par les eaux du Rhône chargées en particules fines.
- **Les caractéristiques géométriques des digues :** le type de digue qui conditionne généralement la géométrie des digues (digues graviers, mixtes, autres), la hauteur de digue (en lien avec la charge hydraulique), la largeur en crête digue, les pentes des talus amont (3H/1V généralement) et aval (généralement 4H/1V ou 5H/1V pour le talus en limon des digues mixtes (talus supérieur) et 3H/1V pour les digues graviers et la clé aval des digues mixtes).

Enfin, en plus des éléments énumérés ci-dessus, les secteurs unitaires sont définis par :

- **Des données géotechniques complémentaires** (granulométrie, perméabilité) de l'aménagement.
- **Des données historiques** (incidents liés à l'érosion interne, travaux de confortement) issues d'un recensement CNR et définies à l'échelle du secteur unitaire.
- **Des données des inspections visuelles** (fouisseurs, végétations, résurgences) issues de l'examen exhaustif, des Visites Techniques Approfondies et **des données d'auscultation** issues du bilan de comportement.
- **Des caractéristiques des ouvrages traversants** (plans, dispositions constructives, sols traversés) ainsi que les observations et levés topographiques (cote d'entrée/sortie, résurgences). Le scénario de rupture lié à un ouvrage traversant est pris en compte avec les autres scénarios de la section unitaire correspondante.

2.2. Passage des calculs de stabilité par mode de défaillance en probabilités de rupture

2.2.1. Modes de défaillance étudiés pour les endiguements

L'ensemble des modes de défaillance étudiés pour les endiguements sont issus des « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai d'octobre 2015 du CFBR » [1] et du projet ERINOH (ÉRosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques, [1]), adaptés au contexte des endiguements CNR :

- **Stabilité à l'érosion externe :** pour l'affouillement côté talus amont et talus aval si des constats d'érosion sont faits lors des visites/inspections, et l'érosion par surverse pour les digues dont la fonction est de déverser. Les scénarios de surverse accidentelle sont étudiés dans l'analyse de risques de l'EDD.
- **Stabilité au glissement :** pour les talus aval et amont (pour l'amont uniquement en cas de vidange rapide).
- **Stabilité à l'érosion interne :** on distingue trois mécanismes à cinétique lente : érosion de contact, érosion régressive et suffusion et un à cinétique rapide : l'érosion de conduit.

Ces modes de défaillances sont analysés pour deux niveaux de retenue : le niveau de Retenue Normale (RN) et celui de la crue exceptionnelle (Q_{1500} ans pour les barrages latéraux CNR sur le Rhône classés B).

Nota 1 : la stabilité au séisme est également calculée dans le cadre des EDD des aménagements CNR mais ne sera pas présentée dans cet article car un article lui est dédié [3].

Nota 2 : l'article [4] présente en détails la méthodologie d'évaluation du risque d'érosion interne des barrages latéraux du Rhône développée dans les EDD v2 de la CNR.

2.2.2. Calcul des probabilités de rupture pour la stabilité au glissement et à l'érosion externe

La Figure 5 ci-dessous synthétise la méthodologie de vérification de stabilité au glissement des endiguements CNR.

La vérification de stabilité au glissement des endiguements se fait sur les profils critiques retenus selon les recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai (CFBR, 2015). Le passage en probabilité de rupture se base sur la grille établie par l'USACE en 1993 (Tableau 2) en l'interpolant pour 1.5. Cette grille se base sur les coefficients de sécurité dits « traditionnels ».

Facteur de sécurité sans facteurs partiels	Probabilité de rupture
1.5 [2]	1 E-04
1.4	1 E-03
1.3	1 E-02
1.2	0.1
1.1	0.5
1	0.9

Tableau 2 : Grille de calculs de probabilité de rupture à partir des coefficients de sécurité classiques (USACE 1993)

Le passage du coefficient de sécurité obtenu avec coefficients partiels au coefficient traditionnel se fait en multipliant le premier coefficient par le produit des coefficients partiels correspondant :

- 1,50 (1,25 x 1,20) en situation quasi permanente (situation normale d'exploitation),
- 1,32 (1,10 x 1,20) en situation rare et en situation exceptionnelle de crue.

En situation de crue, la probabilité de rupture obtenue par cette grille est donc multipliée par la probabilité d'occurrence de la crue, pour tenir compte de l'occurrence de cette crue.

[2] La probabilité de rupture est extrapolée pour F_S=1.5

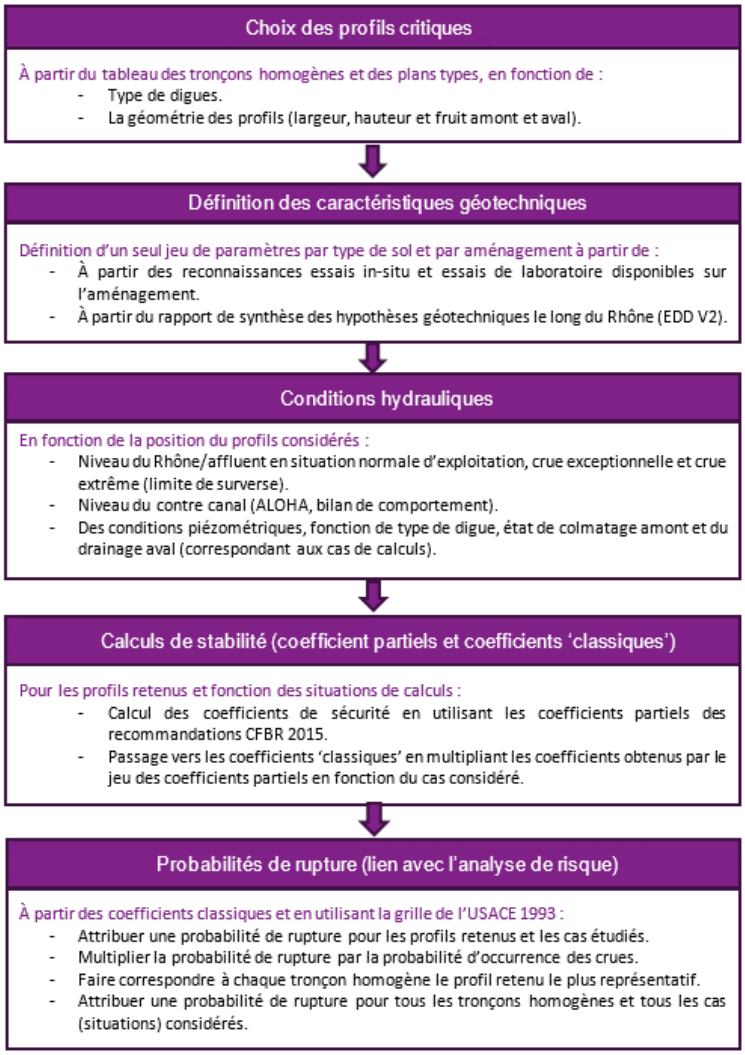

Figure 5 : Schéma des principales étapes de vérification de stabilité au glissement et de calcul des probabilités de rupture

En fonction de la nature des digues et de la géométrie des profils, un travail de correspondance est fait pour identifier pour chaque tronçon homogène le profil étudié qui le représente.

Les profils retenus pour les calculs étant les plus critiques, les probabilités de rupture des autres tronçons seront au plus égales à celles de ces profils critiques.

2.2.3. Calcul des probabilités de rupture pour l'érosion interne

Le projet ERINOH, utilisé comme référence de ces études, a permis de décrire le phénomène d'érosion interne en différentes étapes (localisation, initiation, filtration, progression, brèche) et en typologie d'initiation (suffusion, érosion de contact, érosion de conduit et érosion régressive).

Sur la base de ce référentiel, une probabilité d'occurrence est déterminée pour chaque étape de chaque scénario. En fonction des connaissances et données disponibles sur les mécanismes contrôlant le phénomène à représenter, différents outils ont été utilisés pour déterminer cette probabilité. Dans la mesure du possible, ces outils ont été croisés pour conforter les choix. Par ordre de préférence, on retrouve :

- L'application d'un critère mécanique/hydraulique lorsque les publications de référence précisent une méthode de calcul des sollicitations et des résistances caractérisant l'occurrence de l'étape d'après le chargement hydraulique, et définition des digues et de leurs spécificités ;
- D'après le retour d'expérience incidentologique des endiguements CNR, cumulant ~50 années d'exploitation sur ~400 km. Ces données sont pertinentes grâce à la récurrence de deux profils de digues types (mixte et graviers) et l'archivage des observations d'incidents depuis la mise en eau ;

- À dire d'expert, en s'appuyant sur des raisonnements à base physique, les observations faites sur modèle physique et la littérature. Ces probabilités ont été déterminées en utilisant une grille « verbale » unique : très probable p=0,99 ; probable p=0,9 ; neutre p=0,5 ; peu probable p=0,1 ; très peu probable p=0,01 et quasiment impossible p=0,001 ([5], [6]) et discutées par le groupe de travail de l'EDD.

La méthodologie s'est inspirée de l'EDD du Symadrem sur le delta du Rhône [5] et de l'outil CARDigues [7]. Bien que ces études aient été réalisées pour des digues de protection contre les crues, elles ont en commun avec les endiguements CNR l'aspect « long linéaire », et la construction majoritairement en matériaux du site. Pour chaque section unitaire, les probabilités d'occurrence de chaque étape (probabilité conditionnelle, « sachant la précédente ») sont calculées. Ces probabilités par étape sont multipliées afin d'obtenir la probabilité de brèche de chaque scénario.

L'érosion de conduit est jugée avec une cinétique rapide, ne permettant pas, à ce stade, d'appliquer les mêmes barrières de sécurité que les autres mécaniques d'érosion. Deux probabilités de rupture sont donc calculées, que ce soit en retenue normale ou en crue exceptionnelle :

- Une probabilité spécifique à l'érosion de conduit : soit sur un tronçon homogène (terriers, racines, fissures…), ou le long d'un ouvrage traversant.
- Une probabilité regroupant les autres mécanismes, que ce soit sur un tronçon homogène ou le long d'un ouvrage traversant.

En supposant les scénarios inclus dans chacun de ces deux cas indépendants (hypothèse conservative) la formule de Morgan [5] permet de déterminer les deux probabilités d'apparition d'une brèche :

$$P_{section_érosion_de_conduit} = 1 - \prod_{i=1}^{n} 1 - P_i$$

$$P_{section_hors_érosion_de_conduit} = 1 - \prod_{j=1}^{j} 1 - P_j$$

Avec P_i la probabilité de rupture liée au scénario i impliquant l'érosion de conduit et P_j la probabilité de rupture liée au scénario j n'impliquant pas l'érosion de conduit. Pour chaque tronçon homogène, **la probabilité maximale atteinte sur une section unitaire est retenue pour ces deux cas**. Le résultat final est donc une probabilité de brèche tous scénarios confondus (en distinguant ceux impliquant l'érosion de conduit des autres scénarios) par tronçon homogène et par situation hydraulique.

L'analyse du risque d'érosion interne est réalisée via des calculs ou estimation de probabilité d'occurrence de chaque étape des scénarios, de façon similaire aux attentes de la réglementation « digues ». Le choix d'un calcul probabiliste a été motivé par : 1) la disponibilité de jeux de données conséquents (plusieurs milliers de granulométrie) permettant de définir des distributions de probabilités des paramètres; 2) la disponibilité du retour d'expérience incident de l'ensemble des endiguements CNR depuis ~50 ans, ces endiguements étant majoritairement de profils types récurrents (mixte/gravier) ; 3) le fait que l'érosion interne se développe dans des hétérogénéités locales mal capturées par des valeurs moyennes ou des valeurs caractéristiques.

2.3. Schématisation des probabilités selon les principaux modes de rupture et choix des scénarios critiques

2.3.1. Résultats des calculs de probabilités de rupture et intégration dans l'analyse de risques

Les calculs de probabilités de rupture pour chaque mode de défaillance sont faits pour tous les tronçons du barrage remblai à grand linéaire. En pratique, on présente :

- Une carte avec tous les tronçons homogènes des endiguements de chaque aménagement,
- Un tableau avec les probabilités de rupture par modes de défaillance, combinant :

- Pour le glissement un tableau avec les profils types critiques, la correspondance avec les autres tronçons ainsi que les probabilités obtenues pour les différents scénarios ;
- Pour l'érosion interne, un tableau de tous les tronçons homogènes et probabilités maximales obtenues pours les différents scénarios, en prenant en compte leur spécificités (végétation, fouisseurs, résurgence, ouvrages traversant…).

Tronçon	Position	Glissement / érosion externe		Erosion de conduit		Erosion interne (hors conduit)	
		RN	Crue	RN	Crue	RN	Crue
Tronçon 1.1	PK a-b	10^{-4}	$6{,}6.10^{-8}$	4.10^{-6}	1.10^{-8}	$2{,}6.10^{-3}$	7.10^{-7}
Tronçon 2.2	PK k-l	10^{-4}	$6{,}6.10^{-8}$	3.10^{-4}	3.10^{-6}	6.10^{-6}	7.10^{-9}
Tronçon n	PK y-z	10^{-6}	10^{-8}				

Tableau 3 : Probabilité de rupture des profils retenus pour les différents modes de défaillance

Une conclusion fait ressortir les tronçons avec les probabilités de rupture les plus élevées pour chaque mode de défaillance. Ces résultats sont alors intégrés dans l'analyse de risques de l'EDD via le tableau d'argumentaires de cotation qui retrace cette conclusion et permet de mettre en évidence les tronçons les plus sensibles.

Réf.	Intitulé	Occurrence	Exemple d'argumentaires de cotation
1	**Erosion interne hors érosion de conduit**	**B**	• Les études géotechniques présentées au chapitre 5.2.4 de cette EDD ont permis de calculer pour les différents tronçons d'endiguement les probabilités de rupture à l'érosion interne pour deux situations hydrauliques : situation normale d'exploitation et situation de crue. En raison de sa cinétique jugée rapide l'érosion de conduit est étudiée séparément (réf. 2). • L'analyse conclut à une bonne tenue des ouvrages à l'érosion interne avec des probabilités de rupture (hors barrière de sécurité) souvent très faibles (inférieure à 10^{-4} à RN ou inférieures à 10^{-6} en crue, donc cotation en E après barrière). • La probabilité de rupture par érosion interne hors érosion de conduit la plus élevée identifiée pour les endiguements de l'aménagement est égale à $2{,}6.10^{-3}$ (cotation B) en situation normale pour le tronçon 1.1 (PK a-b). Cette problématique n'est pas appliquée à l'ensemble de ces deux tronçons mais aux linéaires situés entre les PK identifiés qui sont ceux présentant des résurgences. • Cependant, à ce jour, aucune initiation du phénomène n'est observée (résurgences non chargées en particules fines) et la présence et l'évolution de ces résurgences sont suivies dans le cadre de la surveillance courante.
2	**Erosion interne par érosion de conduit**	**C**	• Cette partie concerne l'étude de l'ensemble des endiguements de l'aménagement à l'érosion de conduit (le long d'un ouvrage traversant ou de la base de mur, ou initié par un défaut (terrier, fissure ou racine quasi traversante) sur la partie supérieure d'une digue peu large). • Pour les tronçons étudiés, la probabilité de rupture par érosion de conduit est toujours inférieure à 10^{-4} sauf pour le tronçon 2.2 à RN (probabilité de 3.10^{-4}, cotation C).

3	**Glissement / érosion externe**	**D**	• Les études de stabilité du talus aval par glissement du talus aval ont été réalisées sur dix tronçons critiques du linéaire de l'aménagement, de façon à obtenir des résultats enveloppes pour l'ensemble des endiguements de l'aménagement :
			  ○ Tronçons 1.1 pour les endiguements en gravier,
			  ○ Tronçons 2.2 pour les endiguements mixtes.
			• Les études ont été menées pour les deux situations hydrauliques : situation normale d'exploitation et situation de crue.
			• Pour l'ensemble des tronçons, les facteurs de sécurité obtenus sont conformes à l'état de l'art, pour toutes les situations étudiées. La probabilité de rupture des endiguements de l'ensemble de l'aménagement est inférieure à 10^{-4} (cotation en D, donc cotation en E après barrière).

			• Un calcul spécifique en simulant une érosion externe majeure a été mené au droit du tronçon n. Les calculs itératifs montrent que les glissements concernent uniquement le talus aval et ne provoquent pas une rupture complète de la digue. Ces probabilités sont faibles et ne nécessitent pas d'être prises en compte dans l'analyse des risques par rapport à ce mode de rupture.

Tableau 4 : Exemple d'un tableau d'argumentaires de cotation

2.3.2. Schématisation des probabilités de rupture

Le tableau d'argumentaires de cotation détaille ce que le nœud papillon schématise, à savoir une représentation des probabilités de rupture les plus fortes par mode de défaillance.

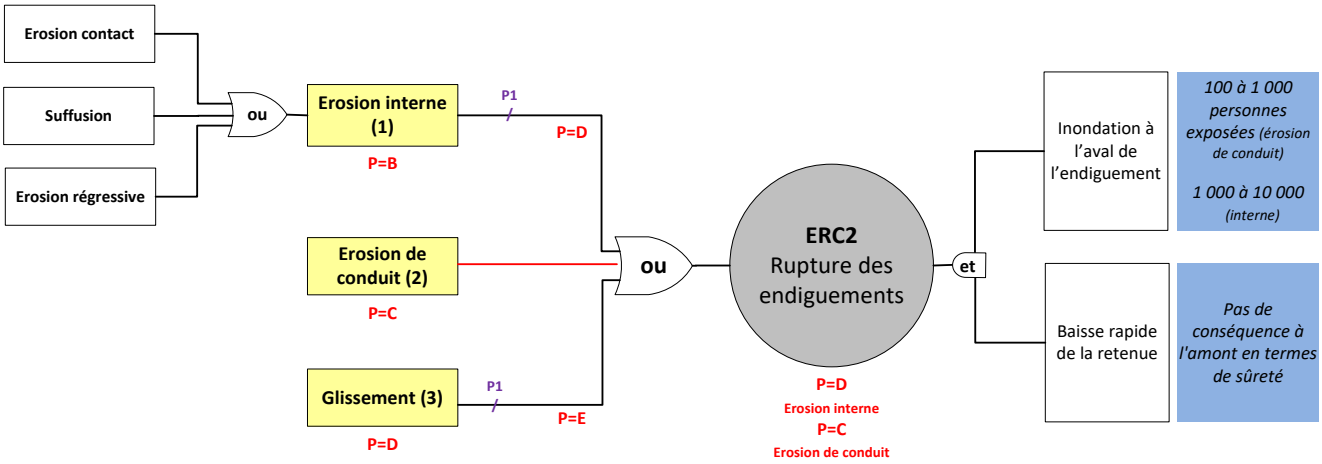

Figure 6 : Extrait d'un schéma nœud papillon pour l'ERC rupture d'endiguements d'un aménagement CNR

Intitulé	Justifications	Décote
Surveillance courante et renforcée des barrages latéraux avec analyse et actions associées	• Cette barrière regroupe : ○ L'ensemble des mesures de surveillance courante et renforcée des barrages latéraux : tournées visuelles, tournées d'auscultation, surveillances ciblées, etc., et de la bathymétrie du Rhône et de ses affluents. ○ Les analyses et actions associées (investigations, études, diagnostics, dragages, etc.). • Dans le cas de détection d'une anomalie ou d'un incident, les mesures prises sont proportionnées au risque de la situation. • Cette barrière permet de détecter et de suivre les anomalies pouvant avoir un impact sur la stabilité des endiguements (notamment les anomalies piézométriques, la présence de fuites, de végétation invasive, de terriers, les niveaux des fonds, etc.), et de déclencher si nécessaire les actions permettant d'y remédier (mesures de confortement, abaissement préventif de la retenue, dragages…).	**2**

Le niveau de gravité dans l'arbre des conséquences (nombre de personnes exposées) est évalué sur la base des scénarios modélisés selon les choix de scénarios critiques effectués.

2.3.3. Choix des scénarios critiques

Dans le cadre de l'analyse de risques, le groupe de travail étudie tous les tronçons avec les probabilités de rupture les plus fortes, en fonction de leur localisation et des enjeux potentiellement impactés en cas de rupture, afin de définir les tronçons les plus critiques pour lesquels des brèches seront modélisées.

L'objectif est de déterminer pour des tronçons avec des probabilités de rupture identiques quelle brèche exposerait le plus de personnes afin de modéliser uniquement les scénarios critiques.

Si toutes les probabilités de rupture tous modes confondus sont faibles, le groupe de travail étudie les configurations aval et retient celles qui présentent le plus d'enjeux potentiellement inondés.

Un tableau est alors établi afin de présenter les différentes configurations et d'identifier les scénarios critiques :

Causes	Q	Localisation brèche	Commentaires
Erosion interne	Toutes conditions	Tronçon c PK ww RT RD Tronçon h PK xx RT RG	Les tronçons c et h ne sont pas retenus, malgré une probabilité de classe D (avec barrière) car le phénomène d'érosion régressive est à cinétique lente et sans évolution, et l'analyse des zones inondables ne fait ressortir aucun enjeu impacté : - Pour le tronçon c, la topographie de la plaine est supérieure à la cote de digue donc il n'y a pas de casier inondable. - Pour le tronçon h, il n'y a aucune zone habitée dans les casiers qui seraient inondés (champs cultivés, moins de 10 personnes exposées, criticité acceptable).
Erosion de conduit	**Conditions normales**	Tronçon d PK zz CA RG Tronçon c PK ww RT RD **Tronçon f PK yy CA RD**	Les tronçons d et c présentent la probabilité la plus forte (classe C), mais ne sont pas retenus car ils présentent peu d'enjeux en cas de rupture (moins de 10 personnes, criticité acceptable). **Cartographie et comptage des enjeux au chapitre 10 pour le tronçon f avec le plus d'enjeux.**
Instabilité talus aval	/	/	Pas de tronçon retenu car les probabilités sont faibles (probabilité brute hors barrière en D et < 10^{-5} avec la barrière de prévention, donc criticité acceptable quel que soit le niveau de gravité).

Tableau 5 : Extrait d'un tableau de localisation des brèches des scénarios de rupture des endiguements

3. CONCLUSION

En raison d'un très grand linéaire de barrages latéraux en terre classés B – également appelés endiguements ou digues (plus de 400 km au total, plusieurs kilomètres par aménagements soumis à étude de dangers), CNR ingénierie en tant qu'organisme agréé, a dû développer une approche méthodologique permettant d'analyser la stabilité de ces ouvrages pour plusieurs modes de défaillance et selon les profils des endiguements, de déterminer une probabilité de rupture par mode de défaillance et tronçons homogènes de digues, et enfin de représenter schématiquement l'ensemble des possibilités tout en mettant l'accent sur les situations les plus critiques.

Si cette approche semble simple en pratique, elle a nécessité le développement de bases de données conséquentes afin de mieux connaître les ouvrages (digues et ouvrages traversant), de découper les barrages latéraux classés B de chaque aménagement en tronçons homogènes selon des caractéristiques géotechniques et géométriques, et également d'avoir les dispositions constructives, des plans, des notes de calculs, des sondages…

Le travail de l'ingénieur est alors facilité par ces recueils des données utiles, mais il n'en reste pas moins chronophage, aussi bien en externe (sous-traitance des calculs de stabilité au glissement et à l'érosion interne pour les différents tronçons), qu'en interne CNR (rédaction de la conception des ouvrages, de leur état, définition des profils types, bilan de la conception sur la base des calculs externalisés).

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai d'octobre 2015 du CFBR

[2] Érosion interne dans les ouvrages hydrauliques - guide "ERINOH" / volume 2 : méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai, 2016

[3] Sensitivity study of large-scale earth dams under seismic stress, R. Granjon, R. Fellag, J. Meynet, R. Taisant, G. Pavaday, Compagnie Nationale du Rhône (CNR), International Symposium on Dams and Earthquakes, 7th EWG, Athens, September 12th to 13th, 2024

[4] Méthodologie d'évaluation du risque d'érosion interne des barrages latéraux du Rhône, R. Beguin (geophyConsult), R. Fellag (CNR), H. Chapuis (CNR), C. Picault (CNR), Colloque France digues 2024, Aix-En-Provence, 27 au 29 Mars 2024

[5] Symadrem, « Etude de Dangers du Système d'endiguement Rive Gauche du Rhône et des travaux de création de digue entre Tarascon et Arles et mesures associées », 2017

[6] USBR, Best Practices and Risk Methodology, chapter 13, Subjective Probability and Expert Elicitation www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html

[7] Patouillard, Sébastien & Braud, Stéphane & Durand, Edouard & Bridoux, B. & Tourment, Rémy. (2019). Méthode et outil de calcul de l'aléa de rupture des digues de protection contre les inondations appliquées à la Loire. 10.1201/9780429319778-221