

# Recommandations CFBR pour la justification à l'érosion interne

## CFBR guidelines for internal erosion risk assessment

Jean-Jacques FRY <sup>1\*</sup>, Luc DEROO <sup>2</sup>, Stéphane BONELLI <sup>3</sup>

*1 J-J FRY Consulting, Bassens, France*

*2 ISL, Lyon, France*

*3 INRAE, Le Tholonet, France*

*\*[jean-jacques.fry@wanadoo.fr](mailto:jean-jacques.fry@wanadoo.fr)*

**RESUME :** L'érosion représente plus de 80% des causes de rupture des ouvrages hydrauliques. Ce phénomène n'est pas couvert par les Eurocodes et le concept de valeur caractéristique. Il nécessite une nouvelle approche pour être appréhendé. Le CFBR, au bout de 7 années de travail impliquant 28 professionnels, publiée en 2026 des recommandations pour justifier la résistance des ouvrages hydrauliques en remblai et de leur fondations vis à vis de l'érosion. Ce projet de recommandations, détaillées sur près de 600 pages, pour la première fois englobe l'érosion interne et l'érosion externe dans une méthodologie commune en 7 étapes à partir du concept de chemins d'érosion. Cette communication est focalisée sur la conduite de l'analyse du risque d'érosion interne, qui peut être menée en 3 niveaux de détail différents et 7 étapes. Les 3 niveaux sont : (1) une approche globale à l'échelle de l'ouvrage complet (sans distinguer les chemins d'érosion) ; (2) une évaluation détaillée (quantitative ou experte) des chemins d'érosion significatifs ou (3) une évaluation analytique avec des analyses expérimentale et numérique des chemins d'érosion les plus dangereux. Les 7 étapes sont : (1) Appropriation des données, (2) Définition des situations de projet, (3) Caractérisation des chemins d'érosion interne, (4) Élaboration des modèles de terrain, (5) Analyse des barrières de défense, (6) Analyse de la tenue à l'érosion interne pour chaque scénario, (7), Synthèse de l'évaluation de la tenue à l'érosion. Ces recommandations développent aussi bien l'usage d'analyse déterministe que celui d'analyse probabiliste. Ce projet ambitieux, unique au monde, sera disséminé en période probatoire en 2026. L'étendue et la nouveauté de la tâche nécessitent un retour d'expérience dans les années à venir pour valider la version finale.

**ABSTRACT:** Erosion accounts for more than 80% of the causes of hydraulic structures failures. This phenomenon is not covered by the Eurocodes and the concept of characteristic value. It requires a new approach to be understood. After seven years of work involving 28 professionals, the CFBR published recommendations in 2026 to justify the resistance of hydraulic structures built on embankments and their foundations to erosion. This draft set of recommendations, detailed over nearly 600 pages, encompasses internal and external erosion for the first time in a common seven-step methodology based on the concept of erosion paths. This communication focuses on conducting internal erosion risk assessment, which can be carried out at three different levels of detail and in seven steps. The three levels are: (1) a comprehensive approach at the level of the entire structure (without distinguishing between erosion paths); (2) a detailed assessment (quantitative or expert) of significant erosion paths; or (3) an analytical assessment with experimental and numerical analyses of the most dangerous erosion paths. The seven steps are: (1) Data acquisition, (2) Definition of project situations, (3) Characterisation of internal erosion paths, (4) Development of ground models, (5) Analysis of defence barriers, (6) Analysis of internal erosion resistance for each scenario, (7) Summary of the erosion resistance assessment. These recommendations cover both deterministic and probabilistic analysis. This ambitious project, unique in the world, will be rolled out on a trial basis in 2026. The scope and novelty of the task require feedback in the coming years to validate the final version.

**Mots-clés :** érosion interne ; fuite ; remblai ; barrage ; canal ; digue.

## 1 INTRODUCTION

Pour évaluer l'intérêt de recommandations sur la justification des ouvrages à l'érosion, il suffit de se rappeler les statistiques de l'accidentologie. Plus de 80% des ruptures de grands barrages dans le monde étaient causées par l'érosion. En France, chaque année une rupture de canal, digue ou barrage était l'œuvre de

l'érosion interne. De surcroît, ces taux de rupture ne semblent pas diminuer depuis les années 2000.

Le Comité Français Barrages et Réservoirs a donc lancé un groupe de travail en 2017 pour dresser l'état de l'art, valoriser les bonnes pratiques, et produire des recommandations professionnelles pour justifier la tenue à l'érosion interne ou externe des barrages, des digues et des canaux. Ces recommandations sont

publiées en 2026 pour être utilisées en phase probatoire afin d'établir une version finale en 2029.

Elles s'adressent au géotechnicien, qui doit étendre son domaine de maîtrise des actions de l'eau, sources de nombreux sinistres.

## 2 CONSIDERATIONS GENERALES

Les chapitres 1 et 2 des Recommandations présentent les notions et les considérations générales qui sont à la base de la méthodologie et des approches proposées.

### 2.1 La spécificité de l'érosion

L'érosion est le détachement et le transport de grains et de particules fines par un écoulement d'eau. Elle est déclenchée dès que les forces de contact et le poids des grains ou des fines ne parviennent plus à équilibrer les forces hydrodynamiques.

Le problème majeur est qu'en pratique il n'est possible ni de mesurer forces appliquées et résistance au niveau du grain, ni de localiser les plus faibles résistances sur site.

En conséquence, il faut retenir que ni la mécanique des milieux continus, ni les Eurocodes, ni la notion de résistance caractéristique stricto sensu ne sont applicables. Une autre approche est nécessaire.

### 2.2 Démarche de justification

L'approche proposée émane de concepts qui ne sont que des corollaires de la spécificité de l'érosion.

#### 2.2.1 Chemin d'érosion

Le processus d'érosion est guidé par la localisation des écoulements les plus forts ou celle des résistances les plus faibles, en conséquence l'évaluation consiste à anticiper, caractériser et barrer tout chemin d'érosion plausible.

#### 2.2.2 Incomplétude

Elle caractérise un état qui n'est pas complet. S'il est possible de maîtriser l'incertitude en géotechnique, aucune approche ne peut évaluer un chemin d'érosion oublié.

#### 2.2.3 Rupture

La rupture d'un ouvrage hydraulique est la perte de sa fonction principale : un lâcher d'eau incontrôlé et dangereux est synonyme de la rupture de barrage (exemple : perte d'une vanne), et l'inondation involontaire de la zone protégée est une rupture de digue. Il importe de ne pas confondre cette définition avec la notion de rupture mécanique (glissement, effondrement).

#### 2.2.4 Analyse fonctionnelle

Pour tenter de parer l'incomplétude, la justification de la tenue à l'érosion nécessite de barrer tout chemin d'érosion. L'analyse fonctionnelle permet de concevoir et d'analyser de telles barrières à ces chemins, appelées barrières de défense.

La rupture par érosion provient de causes (1) externes, liées à l'environnement du site et notamment aux aléas naturels, et (2) internes, liées à l'état, au comportement et fonctionnement de l'ouvrage. Il en résulte que pour éviter une rupture, il faut développer une analyse fonctionnelle (1) externe, dont l'objet est de décrire les interactions entre l'ouvrage et son environnement, et (2) interne, dont l'objet est d'identifier les fonctions technologiques qui garantissent la sécurité de l'ouvrage.

#### 2.2.5 Barrières de défense

Les barrières de défense regroupent les composants et les procédures qui assurent une des fonctions technologiques principales de sécurité :

- 6 sont passives : l'évacuation, l'étanchéité, la résistance, la filtration, le drainage et la protection des parements ;
- 2 sont actives : la surveillance et l'intervention. Elles sont définies dans cet article en 3.2.

#### 2.2.6 Analyse comportementale et défauts

Afin de nouveau à parer l'incomplétude, il convient d'anticiper la défaillance d'une barrière de défense. La défaillance d'une barrière de défense est généralement provoquée par la dégradation d'un de ses composants.

S'il fallait faire un lien entre l'analyse fonctionnelle et les état-limites, la défaillance d'une barrière de défense serait un ELS et la perte des barrières menant à la rupture serait l'ELU. Pour éviter toute confusion cette correspondance est rappelée mais n'est pas appliquée.

Le résultat physique d'une dégradation est appelé défaut. L'inventaire des défauts avérés ou possibles (cachés ou futurs) est le résultat de l'analyse comportementale.

L'analyse comportementale s'appuie sur le retour d'expérience de l'accidentologie mondiale et sur les résultats de la surveillance de la construction et de l'exploitation de l'ouvrage d'une part, elle permet de faire l'inventaire des défauts, d'évaluer leur localisation et leur occurrence par une approche déterministe ou probabiliste d'autre part.

#### 2.2.7 Scénario d'érosion

Un scénario d'érosion est un couple liant un chemin d'érosion à une situation. Une fois l'inventaire des situations établi, il est croisé avec celui des chemins

d'érosion jugés réalistes pour obtenir l'ensemble des scénarios à étudier.

#### 2.2.8 Analyse des barrières de défense

La localisation des défauts positionnée sur le chemin d'érosion de chaque scénario peut déclencher une érosion interne. Une analyse numérique déterministe ou probabiliste évalue si l'érosion peut être initiée, et dans l'affirmative stoppée ou limitée par une barrière de défense. Elle n'est pas toujours possible, elle peut être remplacée par une analyse physique sur site ou à défaut un jugement d'expert.

#### 2.2.9 Approche déterminisme ou probabiliste

L'approche déterministe repose sur une démarche experte pour définir les données d'entrée et fournir un jugement sur la marge de sécurité de l'ouvrage. Les lacunes ou l'incertitude forte des données amènent souvent une étude de sensibilité ou une étude paramétrique pour vérifier l'absence d'impact d'une défaillance de la fonction de défense dans la plage de variabilité de la valeur du paramètre incertain.

L'approche probabiliste évalue l'impact de la variabilité des données d'entrée (la résistance ou la sollicitation) sur celle des résultats (la défaillance du composant). En présence de données consolidées, une probabilité fréquentielle est estimée, sinon elle est remplacée par une probabilité subjective qui affecte un niveau de confiance aux valeurs disponibles.

#### 2.2.10 Barrage ou digue

Les recommandations ont été orientées en vue de répondre à la réglementation des ouvrages hydrauliques. La réglementation des barrages diffère de celle des digues.

Est appelé barrage un ouvrage hydraulique qui stocke l'eau dans un réservoir à niveau constant en condition normale (les canaux sont considérés comme des barrages latéraux). Les barrages sont régis par l'Arrêté Technique Barrage de 2018. Leur sécurité est jusqu'à présent évalué par une approche déterministe (pour des risques appartenant à des classes de probabilité).

Est appelée digue un ouvrage qui protège ses avalisants de l'inondation. Le niveau de protection de la zone protégée doit répondre à l'article R.214-119-1 du Code de l'Environnement. Ce niveau de protection est déterminé en termes de débit ou de cote. Le système d'endiguement est réputé en fonctionnement nominal sans défaillance jusqu'au niveau de protection. Le risque résiduel de rupture d'ouvrage pour ce niveau doit être inférieur à 5%. De plus, il est demandé de modéliser une situation de crise impliquant une défaillance structurelle du système

d'endiguement, le niveau d'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture au moins supérieur à 50 %. Ces prescriptions poussent à l'utilisation d'une approche probabiliste.

#### 2.2.11 Enjeux

Il est légitime de proportionner la profondeur des justifications et les marges de justifications à la complexité des ouvrages et aux enjeux en cas de rupture. Les Recommandations utilisent trois catégories d'enjeu, que l'on peut rapprocher des classes d'ouvrage définies par la réglementation :

- Enjeu très faible : barrages et digues non classés,
- Enjeu limité : barrages et digues de classe C,
- Enjeu significatif : barrages et digues de classe A et B.

Les Recommandations ont été rédigées pour les ouvrages avec des enjeux limités ou significatifs. Il est légitime d'utiliser, pour les ouvrages à enjeux très faibles, des approches et des jugements plus expéditifs.

#### 2.2.12 Niveau d'analyse

Une justification détaillée de la tenue d'un ouvrage à l'érosion interne est longue et complexe à élaborer. Afin de répondre à l'ensemble des situations auxquelles l'ingénieur peut être confronté, trois niveaux de justification ont été proposés :

- Le niveau 1 est une approche synthétique globale à l'échelle de l'ouvrage complet sans distinguer les chemins ou mécanismes d'érosion. Elle est appliquée aux ouvrages à enjeux très faibles ou limités ou à enjeux significatifs en situation d'urgence ou en étude préliminaire.
- Le niveau 2 est une approche conforme aux standards actuels qui détaille les chemins d'érosion réalistes pour les ouvrages neufs ou existants.
- Le niveau 3 est une étude approfondie par des simulations numériques, des essais en vraie grandeur ou des approches nouvelles, principalement quand l'étude de niveau 2 ne permet pas de conclure positivement à la sécurité.

#### 2.2.13 Cote et situation de danger

La cote de danger est la cote du plan d'eau pour laquelle la sécurité du barrage n'est plus garantie. Cette notion est un critère essentiel pour juger le niveau de sécurité, qui est exigé par l'Arrêté de 2008. La note d'interprétation de l'arrêté introduit la notion de situations de danger : situation qui peut dans certains cas être caractérisée par le dépassement d'une certaine cote pendant un certain temps. Certains chemins d'érosion interne ne sont sollicités qu'en crue, et la durée de la crue est parfois insuffisante pour que

l'érosion provoque la rupture. Dans ce cas, la situation de danger est caractérisée par le dépassement de la cote de danger au-delà d'un certain temps.

#### 2.2.14 Trois types de règles

Les approches présentées sont loin d'être toutes complètement abouties. Des travaux de recherche vont faire évoluer certaines d'entre elles. Il est donc apparu nécessaire de renseigner le lecteur sur leur statut. Trois types de statut sont retenus.

1. Les recommandations méthodologiques qui structurent la démarche méthodologique nécessaire et qui s'appuient sur l'état de l'art.
2. Les bonnes pratiques qui font l'unanimité du groupe de travail mais ne sont pas encore validées par une longue pratique de la communauté internationale.
3. Les approches nouvelles jugées pertinentes par ceux qui les ont pratiquées, mais sont trop récentes pour recueillir le consensus du groupe de travail.

### 2.3 Quatre mécanismes d'érosion interne

L'érosion interne recouvre l'ensemble des phénomènes d'arrachement puis d'entraînement de particules par des écoulements internes à l'ouvrage ou à sa fondation. On considère que l'érosion interne est initiée non pas lorsque la première particule est entraînée (car on ne sait pas la mesurer) mais lorsqu'un volume suffisant de particules est entraîné pour enclencher un mécanisme capable de s'auto-entretenir. Le lessivage initial d'un tout petit volume de particules initialement instables, par exemple lors d'une mise en eau, n'est pas considéré comme une pathologie, mais comme le signe d'un nouvel état d'équilibre.

Quatre mécanismes fondamentaux sont régis par des conditions géométriques et hydrauliques différentes pour initier l'érosion interne: l'érosion de conduit, l'érosion régressive, l'érosion de contact et la suffusion.

#### 2.3.1 Erosion de conduit

Elle se produit dans un sol cohésif, quand un écoulement en charge, dans un défaut initial ou induit par claquage hydraulique de type fissure ou conduit débouchant à l'aval, développe des contraintes d'entraînement suffisantes pour arracher et transporter les particules des parois. Si la charge amont reste constante, l'érosion s'accélère par réduction de la perte de charge lors de l'élargissement du conduit et provoque très rapidement la rupture. Il est possible de mesurer en laboratoire deux paramètres essentiels: le seuil d'initiation de l'érosion, la contrainte critique; et

le coefficient d'érosion: l'inverse de la cinétique d'érosion pour une contrainte de cisaillement unitaire.

#### 2.3.2 Erosion régressive

Elle entraîne les particules de son exutoire aval sous l'action du gradient hydraulique de sortie, et elle progresse par régression le long de son chemin d'érosion. Il existe trois types d'érosion régressive :

- Érosion régressive d'un minuscule chenal dans un sable sous un matériau non érodé (béton, argile).
- Érosion régressive dans un boyau ou une cheminée d'un matériau légèrement cohérent au contact d'une cavité.
- Érosion régressive d'un parement aval par déchaussement des grains soumis au gradient hydraulique de sortie d'une résurgence ou d'une nappe.

#### 2.3.3 Erosion de contact

Elle arrache les particules d'un sol fin au contact d'un sol grossier et les entraîne à travers les vides du sol grossier par l'écoulement dans le sol grossier parallèle à ce contact (par exemple contact entre alluvions fines et grossières dans une vallée alluviale). Le seuil d'initiation est donné en vitesse de Darcy.

#### 2.3.4 Suffusion

Elle concerne un matériau à granulométrie discontinue ou étalée, où les fines de la fraction fine sont libres de se mouvoir à travers les vides de la fraction grossière (ou squelette). Elle nécessite trois conditions: un matériau non auto-filtrant, des fines sans cohésion effective, et des forces hydrodynamiques supérieures au seuil d'initiation d'érosion.

### 2.4 Décomposition du processus d'érosion

#### 2.4.1 Développement en quatre phases

Le développement de l'érosion interne est un processus qui est généralement décomposé en quatre phases:

1. initiation : un mécanisme d'érosion commence : des particules sont entraînées par l'écoulement, en quantité significative ;
2. non-filtration (ou continuation) : les particules entraînées par l'érosion cheminent jusqu'à un exutoire non filtré ;
3. progression : le phénomène se poursuit et peut s'accélérer, sans trouver de configuration stabilisée ;
4. rupture : une brèche se développe et l'érosion externe prend le relais, ou bien la crête tasse, glisse ou s'effondre engendrant la surverse.

En réalité, d'autres processus peuvent interférer avec ces 4 phases. Notamment, le processus peut et doit être interrompu à l'une quelconque de ces phases, par les barrières de défense.

#### 2.4.2 Importance de la cinétique

Si le seuil d'initiation de l'érosion est le paramètre de base de l'évaluation du risque d'érosion interne, il est aussi indispensable d'évaluer la cinétique de l'érosion.

La vitesse d'érosion contrôle l'impact de l'érosion, c'est-à-dire le temps nécessaire à sa détection et sa maîtrise et donc l'acceptabilité de son occurrence.

### 3 DEMARCHE DE CONCEPTION

Le chapitre 3 présente les principes généraux de conception et justification des ouvrages neufs ou des parties neuves en remblais construites en réhabilitation des ouvrages existants, vis-à-vis des risques d'érosion.

Il ne remplace pas l'abondante littérature relative à la conception des barrages et des digues. Il oriente la pratique actuelle de la justification des dispositifs constructifs vers la justification des barrières de défense contre les phases de développement des mécanismes d'érosion.

#### 3.1 Définition des barrières de défense

Il n'est pas possible dans le cadre de cet article de lister tous les éléments de justification des barrières de défense. Seules les définitions ou les rôles de ces barrières sont introduits.

##### 3.1.1 Evacuation

La fonction de défense Évacuation est pour les barrages la fonction principale vis-à-vis de l'érosion externe par surverse qui doit garantir une débitance égale ou supérieure aux crues de référence réglementaires et un niveau d'eau maximal pour éviter l'érosion interne de la crête. L'évacuateur de crue, la vidange de fond des barrages, ou les déversoirs latéraux ou les sections de digue résistant à la surverse pour les digues et la revanche des barrages et des digues sont les composants principaux de la barrière de défense.

##### 3.1.2 Étanchéité

La fonction de défense Étanchéité est l'une des trois fonctions essentielles pour écarter l'érosion interne. Elle doit limiter suffisamment la vitesse et le gradient hydraulique des écoulements internes, pour que ceux-ci n'aient pas la capacité d'arracher et de transporter des particules de sol. Un noyau argileux, ou un corps de digue en argile, un masque amont, un tapis

d'étanchéité amont, un écran d'injection ou une paroi moulée sont les composants fréquents de cette barrière de défense.

##### 3.1.3 Résistance

La fonction de défense Résistance (à l'érosion) est l'aptitude des matériaux constitutifs d'un remblai ou de la fondation à supporter les sollicitations hydrauliques (gradients et vitesses) imposées par l'ensemble des situations du projet. Cette fonction intrinsèque de résister à l'érosion interne n'est pas suffisante pour un barrage neuf, mais elle est nécessaire pour les digues homogènes en argile à enjeu très limité. Une argile homogène, compacte et cohésive, ou encore un masque ou un écran en béton sont les composants de cette barrière de défense.

##### 3.1.4 Filtration

La Filtration est la fonction de défense principale la plus sûre vis-à-vis de l'érosion interne. Son objectif est de stopper le transfert des particules d'un matériau à l'autre. La barrière de défense est constituée d'un composant essentiel : le filtre. Pour assurer cette fonction, le filtre a des constrictionnements suffisamment petites pour bloquer la migration des particules du sol fin adjacent et suffisamment grosses pour drainer l'écoulement qui le traverse. Le filtre est souvent minéral et parfois géotextile.

##### 3.1.5 Drainage

La fonction de défense Drainage protège l'ouvrage de (1) l'instabilité en évitant la montée des pressions interstitielles et en rabattant la ligne de saturation dans un matériau apte à supporter vitesse et débit importants et de (2) l'érosion interne en évitant les percolations indésirables et le claquage initiateur d'érosion interne. Drain à l'aval du filtre, drain sous un masque amont, drains horizontaux, puits drainants, crépine sont quelques uns des composants de cette barrière.

##### 3.1.6 Protection

La fonction de défense Protection des parements (amont et aval) et de la crête protège l'ouvrage des initiateurs de l'érosion : agressions environnementales (notamment : fousseurs et racines), agressions climatiques (dessiccation, gel, pluie, ruissellement). Perré, masque, rip-rap, terre végétale sont parmi les composants les plus souvent utilisés de cette barrière.

##### 3.1.7 Surveillance

La fonction de défense Surveillance (ou détection) caractérise de l'état des barrières de défense passives, de sorte à confirmer les modèles de l'ouvrage, et notamment les hypothèses de conception et de

dimensionnement. Elle détecte des précurseurs d'érosion interne en analysant phénomènes, incidents ou pathologies pouvant être à l'origine ou conséquence du processus d'érosion. Enfin elle déclenche une Intervention si l'occurrence d'un processus d'érosion interne est avérée. Les examens visuels et leur analyse, les mesures d'auscultation et leur interprétation, les consignes, les procédures de contrôle, d'inspection, d'information et de décision sont les composants de cette barrière de défense.

### 3.1.8 Intervention

La fonction de défense Intervention rassemble l'ensemble des mesures pouvant être prises en cas d'incident, il s'agit d'une action qui permet la réduction des risques de défaillance totale ou la réduction de sa gravité. La barrière de défense est composée des interventions préventives, déclenchées lorsque des précurseurs de l'érosion ont été identifiés (diagnostic et réparations) et des interventions d'urgence, déclenchées lorsqu'un incident d'érosion a été initié et se développe, pouvant conduire à la rupture ou un accident grave (abaissement de la cote de retenue, ou évacuation de la population aval).

## 3.2 Principe de la démarche

Le tableau 1 associe aux 8 fonctions de défense les phases de l'érosion interne sur lesquelles le concepteur devra focaliser son attention pour lutter contre leur développement éventuel.

Tableau 1. Barrières au processus d'érosion interne

Barrières de défense	Phases d'érosion
Évacuation	Initiation, rupture
Étanchéité	Initiation
Résistance	Initiation, progression
Filtration	Continuation
Drainage	Progression
Protection	Initiation
Surveillance	Initiation, progression
Intervention	Rupture

L'objectif est de définir et de dimensionner chaque composant de chaque barrière, avec une marge de sécurité (si possible normalisée) suffisante pour réduire la probabilité de rupture ou de brèche par érosion à une valeur acceptable.

La démarche est résumée sur la Figure 1. Dans un projet de barrage neuf, elle consiste à rassembler les données nécessaires et pertinentes dans des modèles de terrain en vue de concevoir le profil-type des tronçons homogènes de l'ouvrage. Le profil-type de chaque tronçon homogène est défini comme un ensemble de composants (exemples : noyau, filtre, drain, crête, évacuateur, rip-rap, etc.). Il s'agit ensuite de vérifier

que toutes les fonctions de défense sont assurées avec les matériaux et les équipements choisis. Les niveaux d'eau et autres chargements correspondant aux situations de projet permettent d'élaborer les niveaux de résistance. Enfin, les spécifications fonctionnelles des composants sont fixées par la connaissance des actions de l'eau le long des chemins d'érosion identifiés et le choix des résistances supérieures aux actions de telle sorte que l'érosion interne n'ait pas d'impact sur la tenue de l'ouvrage.

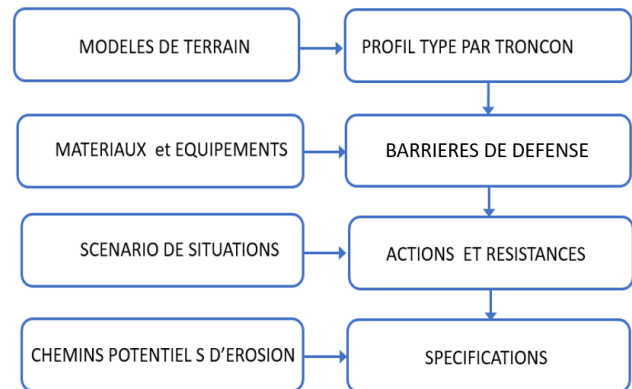


Figure 1. Démarche d'élaboration des spécifications

## 3.3 Importance des filtres

Le filtre, de loin la barrière de défense la plus sûre, mérite une grande attention.

### 3.3.1 Classification et rôle des filtres

Les types de filtre considérés sont :

- minéral à granulométrie fermé équivalent au filtre à rétention totale rapide,
- minéral à granulométrie ouverte stable ou à rétention totale en dessous d'un gradient critique et à érosion limitée au-dessus,
- géotextile non tissé.
- Les filtres « critiques » sont les filtres dont la perte ou l'absence risquerait de causer la rupture. Ils sont conçus et mis en place pour garantir une rétention totale à long terme. Les autres filtres sont « non critiques ».
- Les filtres non-réparables sont inaccessibles sans une déconstruction de l'ouvrage qui mettrait ce dernier en danger, ou sans le mettre durablement hors service. Les filtres réparables sont accessibles après déblaiement de quelques mètres d'épaisseur, sans affecter gravement la sécurité ou l'exploitation de l'ouvrage.

Classiquement, le filtre d'un barrage neuf est un matériau minéral pulvérulent, qui doit assurer la stabilité granulaire entre deux matériaux de granulométries différentes.

Le choix du type de filtre dépend de sa fonction (sa criticité), son emplacement (accessibilité) et des enjeux en cas de rupture (sécurité). Comme il n'est pas démontré (mais probable) que les géotextiles aient une durée de vie supérieure à 100 ans, il est recommandé d'utiliser les filtres géotextiles sous les conditions du Tableau 2.

Tableau 2. *Emploi des filtres en géotextile*

Filtre géotextile	Enjeux		
	Significatif	Limité	Très faible
Critique non réparable	Non	Non	Oui
Critique réparable	Oui*	Oui	Oui
Non critique	Oui	Oui	Oui

\* application limitée par des conditions précises

### 3.3.2 Spécifications fonctionnelles

Aucune rupture de barrage ou de digue n'a été attribuée à la pose d'un géotextile au lieu d'un filtre minéral. L'analyse de l'accidentologie montre que les très rares barrages dotés de filtres qui se sont rompus avaient des spécifications fonctionnelles qui n'étaient pas toutes respectées. Les dysfonctionnements des géotextiles sont imputables au non-respect de quelques spécifications fonctionnelles. En conséquence, 14 ou 16 spécifications fonctionnelles ont été établies pour les filtres respectivement minéraux ou géotextiles. Elles couvrent les trois phases de vie de l'ouvrage (Figure 2) et proviennent du REX accidentologique et des préconisations du CFG.

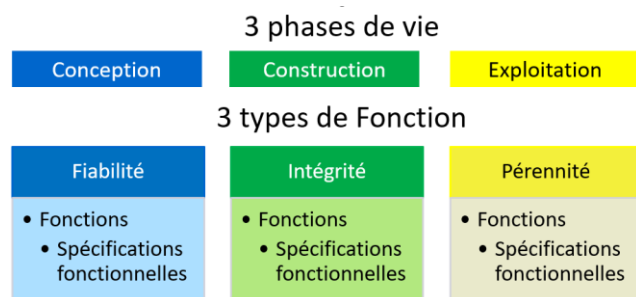


Figure 2 *Origine des spécifications fonctionnelles*

Attention, le critère CFG de non-colmatage à l'amont d'un filtre géotextile critique est remplacé par un critère de stabilité du barrage ou de la digue en supposant le filtre géotextile critique colmaté. La raison est qu'il est nécessaire de protéger les noyaux de barrage ou les corps de digue en sols suffusifs.

## 4 JUSTIFICATION D'UN OUVRAGE EXISTANT

### 4.1 Principes de la méthodologie

Une méthodologie guide le lecteur dans la justification de la tenue à l'érosion interne des ouvrages existants. Elle décrit dans le Chapitre 4 (17 pages) les principes rassemblés en 7 étapes nécessaires pour évaluer et réduire le risque.

#### 4.1.1 Etape 1 - Appropriation des données

La qualité de la justification dépend d'abord de cette étape. La collecte des données pertinentes repose sur l'Enquête Documentaire Préalable préconisée par l'Eurocode 0 et l'inspection visuelle de l'ouvrage. Elle doit être suffisamment approfondie pour éviter l'écueil d'incomplétude.

#### 4.1.2 Etape 2 - Définition des situations de projet

La liste des situations est structurée par la réglementation. Une situation est l'application d'une sollicitation qui combine plusieurs chargements sur un état de l'ouvrage. L'état du barrage intègre les défauts actuels, cachés ou futurs. Un défaut est une anomalie des modèles ou des barrières dont l'occurrence peut être courante, probable, improbable, ou très improbable. Cette analyse nécessite que les étapes soient interactives.

#### 4.1.3 Etape 3 - Caractérisation des chemins d'érosion interne

La caractérisation des chemins d'érosion interne commence par l'inventaire des défauts à sélectionner dans une liste prédéfinie. Les défauts sont ensuite caractérisés par leur localisation, leur dimension, et leur occurrence. Les défauts sont à l'origine ou positionnés sur des chemins d'érosion. Ces chemins d'érosion sont identifiés comme chemins potentiels et caractérisés par leur localisation, les mécanismes d'érosion qui peuvent s'y greffer et qu'il faudra étudier en étape 6. Ils permettent d'identifier l'ensemble des scénarios potentiels d'érosion interne, c'est-à-dire toutes les combinaisons associant une situation au chemin d'érosion.

#### 4.1.4 Etape 4 - Élaboration des modèles de terrain

Pour analyser les scénarios, des modèles de terrain sont développés. Quatre modèles sont incontournables : les modèles géologique, géométrique, géomécanique et hydraulique (interne et externe). Deux autres modèles sont conseillés : le modèle environnemental et le modèle fonctionnel. Ces modèles ont pour objectif de rassembler et valider les données

nécessaires et pertinentes. Ils diffèrent de ceux élaborés pour les études de stabilité, par la nécessité non pas d'extraire les données représentatives de chaque zone ou composant, mais d'évaluer les valeurs extrêmes, de confirmer l'occurrence, la position et la dimension des défauts et d'éliminer tous les chemins d'érosion irréalistes.

#### 4.1.5 Etape 5 - Analyse des barrières de défense

La performance des barrières de défense entachées de leurs défauts est évaluée de différentes manières.

L'impact des défauts d'étanchéité est analysé avec les formules d'initiation des mécanismes d'érosion interne, qui sont décrites avec leur domaine d'application. Les critères d'efficacité des barrières Filtration et Drainage sont aussi connus et détaillés. Les conditions de la progression font appel soit à l'analyse numérique, soit au jugement, et peuvent nécessiter des études de sensibilité. L'analyse des barrières Evacuation et Protection fait appel aux règles de l'art. L'efficacité de la Surveillance et de l'Intervention est évaluée par jugement d'expert ou approche probabiliste.

#### 4.1.6 Etape 6 - Analyse de la tenue à l'érosion interne pour chaque scénario

Chaque scénario de rupture par érosion interne (chemin d'érosion réaliste x situation) décrit le développement du processus d'érosion interne le long d'un chemin réaliste d'érosion dans une situation donnée par un arbre d'événements (Tableau 3), en qualifiant la fiabilité des marges de sécurité dans une démarche déterministe ou en quantifiant les probabilités de défaillance des barrières de défense dans une démarche probabiliste.

*Tableau 3. Analyse d'un scénario en 7 évènements*

<b>Evènement</b>	<b>Nature</b>
1 Situation	Condition hydraulique + évènement
2 Localisation	Défaut original d'une barrière
3 Initiation	Déclenchement d'un mécanisme
4 Continuation	Défaillance de la rétention
5 Progression	Perte de contrôle du débit
6 Détection	Défaillance des moyens de détection
7 Intervention	Echec de la mise en sécurité et rupture

#### 4.1.7 Etape 7 - Synthèse de l'évaluation de la tenue à l'érosion

La synthèse de l'évaluation est faite en trois parties.

Elle rappelle les hypothèses (niveau d'analyse, chemins et scénarios d'érosion étudiés, mécanismes redoutés) et les résultats (marge de sécurité ou probabilité de chaque scénario d'érosion).

Elle justifie et interprète les résultats en termes de sécurité globale pour l'ouvrage en fonction des mécanismes d'érosion redoutés sur l'ouvrage, des principales barrières de défense et de la confiance accordée pour obtenir la sécurité recherchée (façon dont les facteurs d'incertitude ont été intégrés dans l'analyse).

Elle conclut si besoin avec les recommandations destinées à réduire les risques ou à garantir dans le temps la maîtrise des risques. Elle indique s'il y a lieu de procéder à une analyse de Niveau supérieur.

## 4.2 Description détaillée de la méthodologie

L'Annexe 5 des Recommandations complète les principes du Chapitre 4 comme une aide à l'utilisation pour les barrages et les digues. Elle rappelle en 148 pages les outils et méthodes disponibles et les distingue en Recommandations Méthodologiques [RM], Bonnes Pratiques [BP], Approches Nouvelles [AN].

## 5 CONCLUSIONS

Les recommandations CFBR sur l'érosion interne dressent l'état de l'art des connaissances et pratiques en matière d'érosion interne et proposent une appropriation par la profession des résultats de recherche dans ce domaine (projet ERINOH, EURCOLD Working Group on Internal Erosion).

Elles sont des recommandations professionnelles pour la justification des barrages et digues en remblai vis-à-vis des modes de rupture liés à l'érosion interne, en décrivant une méthodologie, en cohérence avec la réglementation en France, qui est graduée selon l'importance des enjeux et en proposant, chaque fois que c'est possible, des critères de justification des ouvrages vis-à-vis des différents mécanismes d'érosion interne. Ces Recommandations contiennent un grand nombre de nouveautés par rapport aux pratiques actuelles. Pour cette raison, elles demanderont un temps d'appropriation et d'adaptation d'au moins deux ans.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CFBR (2026). Justification de la tenue à l'érosion des barrages et des digues fluviales en remblai. Recommandations, Bonnes pratiques, Approches Nouvelles (à paraître sur le site CFBR).