

# Les ruptures des digues de protection : mécanismes et approche par scénarios

## *Failures of flood protection levees: mechanisms and scenarios*

**R. Tourment<sup>1</sup>, B. Beullac<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> INRAE, Aix en Provence, France, [remy.tourment@inrae.fr](mailto:remy.tourment@inrae.fr)

### Résumé

Les ruptures de digues de protection contre les inondations (dont le résultat final est la brèche et l'inondation qui en résulte dans les zones protégées) sont le plus souvent la conséquence non pas d'un mécanisme de détérioration unique mais d'un enchaînement de mécanismes de détérioration dont certains peuvent, selon les conditions, se dérouler simultanément.

L'identification de ces scénarios de défaillance est utile voire nécessaire pour atteindre différents objectifs :

- dans le cadre de la réalisation de diagnostic structurel, d'analyse du risque, d'étude de dangers, pour bien évaluer la performance de la digue ;
- dans le cas d'une rupture de digue ou d'une nécessité de confortement, pour adapter au mieux les travaux aux mécanismes ayant causé ou risquant de causer la rupture ;
- dans le cadre de la mise au point de méthodes d'évaluation des probabilités de rupture, pour être le plus conforme à la réalité des phénomènes et de leurs enchaînements.

Les « modes de rupture » classiques (érosion externe, érosion interne, érosion par surverse, glissement, soulèvement hydraulique du pied aval...), qui sont encore souvent considérés dans les diagnostics de digues, sont baptisés du nom d'un seul mécanisme de détérioration, en général le mécanisme initiateur ou prépondérant de scénarios pouvant conduire à la rupture. Cette pratique laisse à penser qu'un seul mécanisme est à l'œuvre lors de la rupture d'une digue, ce qui amène souvent à des erreurs de diagnostic et/ou d'évaluation de performance lors d'études trop rapidement conduites. Par ailleurs, le fait de considérer les enchaînements possibles lors de la conception d'un ouvrage peut amener à une conception plus sûre et/ou dans certains cas, plus économique.

Dans cette communication, les auteurs développent les bénéfices de l'utilisation d'une approche par scénarios de défaillance. Les apports issus de plusieurs sources bibliographiques françaises et internationales disponibles sur le sujet sont présentés, ainsi que plusieurs exemples de scénarios simples ou complexes. Une méthode basée sur l'analyse fonctionnelle pour l'identification des scénarios de défaillance possibles pour une digue donnée est exposée.

### Mots-clés

brèche, mécanisme, scénario, rupture, défaillance

## Abstract

Flood protection levee failures (the end result of which is a breach and the resulting flooding of protected areas) are most often the consequence not of a single deterioration mechanism but of a chain of deterioration mechanisms, some of which may, depending on the conditions, take place simultaneously.

The identification of these failure scenarios is useful or even necessary to achieve different objectives:

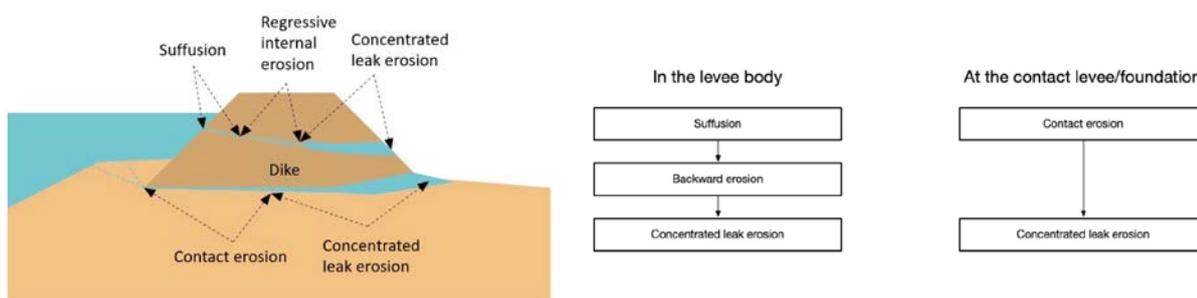
- within the framework of carrying out structural diagnosis, risk analysis, hazard study, to properly assess the performance of the levee;
- in the event of a breach in the embankment or a need for reinforcement, to best adapt the work to the mechanisms that caused or might cause the breach;
- as part of the development of methods for evaluating the probabilities of rupture, to be as consistent as possible with the reality of the phenomena and their sequences.

The classic "failure modes" (external erosion, internal erosion, erosion by overflow, sliding, hydraulic uplift of the downstream toe, etc.), which are still often considered in levee assessments, are named after a single mechanism of deterioration, in general the initiating or predominant mechanism of scenarios that can lead to failure. This practice suggests that a single mechanism is at work when a levee breaks, which often leads to errors in diagnosis and/or performance evaluation during studies conducted too quickly. Furthermore, considering the possible sequences when designing a structure can lead to a safer and/or in some cases more economical design.

In this communication, the authors develop the benefits of using a failure scenario approach. Contributions from several French and international bibliographic sources available on the subject are presented, as well as several examples of simple or complex scenarios. A method based on functional analysis for the identification of possible failure scenarios for a given dam is presented.

## Key Words

breach, mechanism, scenario, failure



Deux scénarios partiels, avant le développement d'une brèche, impliquant plusieurs mécanismes d'érosion interne.

*Two partial scenarios, before the development of a breach, involving several mechanisms of internal erosion*

(R. Tourment, [Van, M.A et al. Failure paths for levees. <https://doi.org/10.53243/R0006>])

## Introduction

Les ruptures de digues de protection en remblai ou composites (remblai et matériaux rigides) sont le plus souvent la conséquence de plusieurs mécanismes élémentaires se produisant successivement et/ou simultanément. Dans la pratique courante de l'ingénierie, pour des raisons à la fois de simplicité et de disponibilité de ressources documentaires et de règles de calcul, les différents mécanismes élémentaires sont encore malheureusement souvent traités de manière indépendante.

Nous présentons dans cet article une approche analytique des ruptures de digues basée sur une synthèse de travaux antérieurs, dans le but de la promouvoir afin qu'elle puisse se généraliser dans les diverses activités d'ingénierie relatives aux digues et systèmes de protection contre les inondations, diagnostics, analyses de risques, conception, justification. Nous espérons ainsi formaliser un ensemble de concepts complémentaires, de manière à ce que la profession partage une approche et un vocabulaire commun, pour également faciliter la progression des pratiques (travaux, diagnostics).

### Les « modes de rupture » des digues

#### *Mécanismes de dégradation et de rupture*

Une rupture de digue, conséquence d'un ou le plus souvent de plusieurs mécanismes de dégradation ou de rupture des matériaux qui la composent, aboutit à une brèche dans l'ouvrage, c'est-à-dire à une ouverture qui peut laisser passer l'eau vers la zone protégée ; par conséquent dans ce cas l'ouvrage ne remplit plus sa fonction de protection. Les différents mécanismes de dégradation ou de rupture des matériaux de type « sol » sont généralement classés dans trois familles : érosion externe (par le courant, les vagues, des chocs, surverse ou franchissement), érosion interne (suffusion, érosion de contact, érosion interne régressive, érosion de conduit) et instabilités (cisaillement : glissements ou effondrements, liquéfaction...), cette liste n'étant pas exhaustive.

#### *« Modes de rupture » des digues*

Habituellement les quatre modes de rupture classiques des digues fluviales étaient baptisés du nom d'un mécanisme [3], voire de l'action qui en était à l'origine : surverse (plus précisément érosion par surverse), érosion externe, érosion interne, glissement.

En rentrant dans le détail, l'érosion externe par le courant comme le glissement de talus conduisent rarement à eux seuls à une brèche. Il faut par exemple que l'érosion externe soit suivie d'un glissement ou d'un effondrement, que le glissement soit suivi par exemple d'érosion interne. Notons que même l'érosion interne et la surverse, qui peuvent potentiellement conduire seuls à une brèche, peuvent néanmoins être associées à d'autres mécanismes. À titre d'exemple, on a souvent attribué la brèche de Saint-Laurent-de-la-Salanque sur l'Agly, lors de la crue de 1999, à la surverse, car il a été constaté d'importantes érosions liées à la surverse sur une très grande partie du linéaire de la digue. Or la brèche a lieu précisément au droit de la station d'épuration communale. Si on analyse les causes de la brèche en admettant qu'il puisse y avoir plusieurs mécanismes à l'œuvre, on peut fortement soupçonner qu'un phénomène d'érosion interne dû à la présence de canalisations traversantes ait joué un rôle prépondérant dans la localisation de la brèche [7].

On a souvent complété ces quatre « modes de rupture » par un cinquième, le soulèvement hydraulique ou (« claquage ») du pied aval. Ce mécanisme se produisant au niveau du terrain naturel en pied de digue côté zone protégée doit lui aussi être suivi d'autres mécanismes pour conduire à une brèche, le plus souvent a minima de l'érosion interne régressive.

*Scénarios de rupture*

Pour éviter toute ambiguïté, il est donc préférable de distinguer mécanismes et scénarios en utilisant le terme approprié, et d'essayer d'éviter l'expression « modes de rupture ». Par ailleurs, les scénarios de rupture pouvant être relativement complexes et étant conditionnés par la composition de la digue (composants, zonage, transitions) et par les sollicitations du milieu environnant, il n'est pas souhaitable d'essayer d'en créer une liste générique.

L'International Levee Handbook (ILH) [1] a validé cette approche par scénarios dans son chapitre 3 consacré entre autres aux défaillances de digues. Il y a également été mis en évidence l'intérêt de distinguer clairement, au sein d'un scénario, les sollicitations et actions (en général hydrauliques) à l'origine de mécanismes, des détériorations ou endommagements de composants (et défaillances de fonctions associées) qui en retour peuvent causer l'apparition d'autres mécanismes (figure 1).

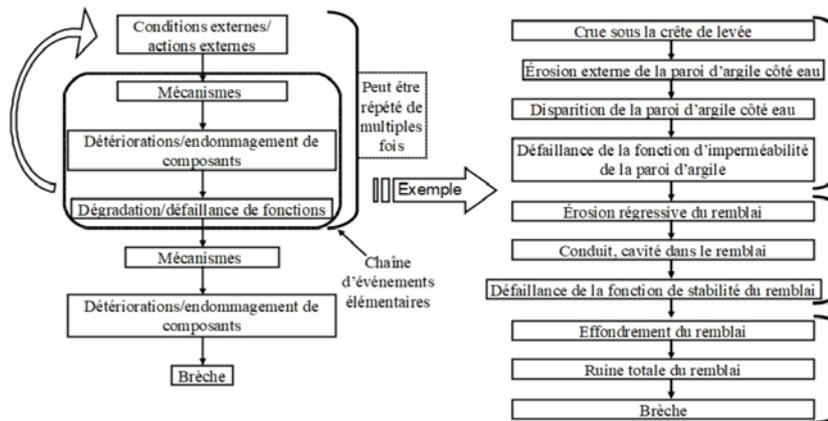


FIGURE 1. Scénarios conduisant à une brèche de digue (R. Tourment, extrait de la version française de l'ILH).

Le Comité Technique sur les digues de la Société Internationale de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (ISSMGE TC201) a récemment publié un rapport centré sur cette approche de scénarios de rupture des digues qui combinent plusieurs mécanismes [9]. Il y a été proposé un logigramme « générique » (figure 2) présentant l'enchaînement possible de multiples mécanismes et surtout la manière dont ils peuvent interagir ; les mécanismes les plus courants y figurent. Ce logigramme n'est probablement pas le plus complet possible, mais on doit pouvoir y faire figurer de très nombreux scénarios de rupture (« chemins » ou « paths » dans la version originale) ; il a d'ailleurs été utilisé dans le rapport pour représenter neuf cas de ruptures de digues, ce qui a permis de vérifier son applicabilité.

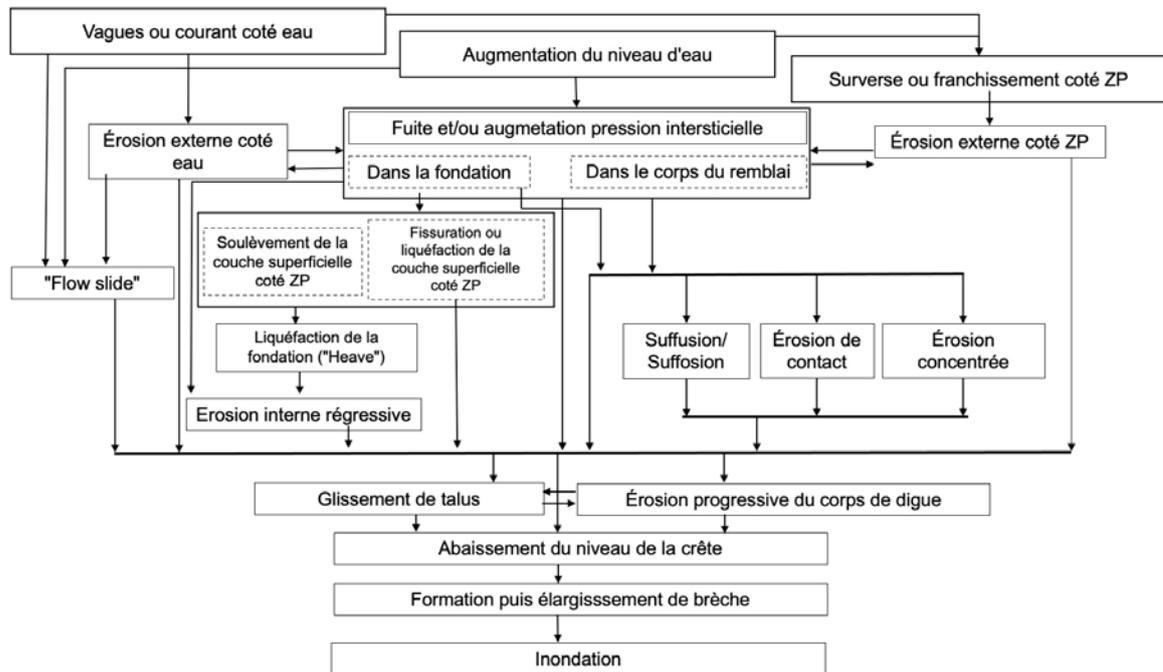


FIGURE 2. Arbre présentant les principaux mécanismes et la manière dont ils peuvent interagir au sein d'un scénario de rupture de digue (extrait de [9]).

Au niveau français, l'approche par scénarios de rupture des digues fait partie de la méthode proposée par INRAE pour l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations [8] qui sera évoquée plus loin et qui a été utilisée dans plusieurs études de dangers réglementaires de systèmes d'endiguement en France.

#### *Défaillance hydraulique et défaillance structurelle*

Dans un cadre d'analyse de risque d'un système de protection contre les inondations, il est important de distinguer les défaillances hydrauliques et structurelles, qui bien que pas toujours indépendantes, sont toutefois clairement différentes [6]. En anglais le mot *failure* est utilisé à la fois pour parler d'une rupture ou d'une défaillance ce qui a pu entretenir une certaine ambiguïté entre ces deux notions. La défaillance hydraulique concerne la fonction de protection contre les inondations, elle s'évalue donc au niveau du système (qui assure dans son ensemble la fonction de protection) et correspond à une inondation avant l'atteinte du niveau de protection, alors que la défaillance structurelle (= la rupture /la brèche) concerne un tronçon de digue et correspond à une rupture avant l'atteinte du niveau de sureté. Un scénario de défaillance hydraulique est un scénario d'inondation de la zone protégée, un scénario de défaillance structurelle est un scénario de rupture d'un tronçon de digue. Les défaillances hydrauliques ne sont pas l'objet de cet article, nous n'entrons donc pas plus dans le détail de celles-ci, mais il convenait de présenter cette dualité et potentielle ambiguïté qu'il faut garder en tête.

#### *Gradation des phénomènes*

Dans l'analyse forensique post événement ou bien en cas de justification de résistance à un scénario de rupture de digue, on peut souvent être amené à distinguer une gradation entre différents

niveaux de dégradation d'un ouvrage ou d'un de ses composants [5], soit, du moins grave au plus grave : une détérioration (qui n'a pas forcément d'autre conséquence), un désordre (qui peut amorcer un processus de brèche), un départ de brèche (le processus de brèche est amorcé), la brèche partielle (ouverture qui laisse passer l'eau vers la zone protégée), la brèche totale (la digue, voire sa fondation, a complètement disparu). Une fois une brèche totale formée, elle va s'élargir, il est donc important d'en analyser la cinétique et les dimensions pour évaluer les conséquences en termes d'inondation, mais cela ne pose pas de question particulière en termes d'analyse de scénario de rupture.

Il est également utile de prendre en compte une différence de cinétique entre les différents mécanismes, ceux-ci produisant des détériorations progressives (par exemple les érosions) ou des ruptures brutales (par exemple les cisaillements).

### Identification des scénarios de rupture et exemples

Dans le cadre d'une analyse de risque (étude de dangers), de la conception d'un ouvrage neuf ou de la réhabilitation d'un ouvrage existant, il faut pouvoir s'appuyer sur une analyse des scénarios de ruptures potentiels sur l'ouvrage en question. Nous avons proposé [8] des méthodes d'analyse des modes de défaillances<sup>1</sup> hydraulique et structurelle (analyse des modes de rupture, identification des scénarios de rupture) pour les systèmes et ouvrages de protection contre les inondations, basées sur des analyses fonctionnelles des fonctions hydrauliques et structurelles.

#### *Lien entre fonctions/défaillances et détériorations/ruptures des composants d'une digue*

Les principales fonctions structurelles des composants d'une digue sont l'étanchéité, le drainage, la stabilité au glissement, la résistance à l'érosion externe, la filtration (aux interfaces) et l'auto-filtration (à l'intérieur d'un matériau), ces deux dernières fonctions étant en lien avec la résistance à différents mécanismes d'érosion interne.

Les différents composants d'une digue portent une ou plusieurs de ces fonctions. Une dégradation (désordre voire ruine ou disparation) d'un composant amène à une dégradation de la performance d'une ou de plusieurs des fonctions qu'il porte, voire à sa défaillance complète. Cette défaillance entraîne des sollicitations imprévues sur d'autres composants qui peuvent à leur tour entraîner l'apparition de mécanismes de dégradation ou de rupture. La décomposition structurelle associée à l'analyse fonctionnelle d'un tronçon de digue suivie d'une analyse des défaillances correspondantes permet donc l'identification des différents scénarios de rupture.

Le *Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai* publié par le CFBR [2] utilise, dans sa première partie « Cadre Général », ces fonctions comme point d'entrée à la définition des mesures de confortement ou de réparation, sur la base d'un diagnostic identifiant les mécanismes à l'origine de désordres ou pouvant potentiellement y conduire.

#### *Exemples de scénarios de rupture*

Les scénarios de rupture de digue peuvent être plus ou moins complexes, n'inclure qu'un seul

<sup>1</sup> Définitions de défaillance : 1/ Cessation de l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir une fonction requise ou à fonctionner comme prévu (NF EN 61508). 2/ Altération ou cessation de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques (AFNOR, 2001).

mécanisme, ou quelques-uns comme dans les exemples décrits plus haut, ou au contraire un grand nombre. Ils peuvent être décrits sous différentes formes, en texte bien sûr, ou sous la forme d'arbres ou logigrammes. Un arbre ou un logigramme peut représenter un scénario unique ou bien encore une famille de scénarios, un scénario étant dans ce cas un des chemins possibles sur cet arbre. Nous présentons ci-dessous deux exemples, la figure 3 qui présente deux scénarios de rupture partiels (n'allant pas jusqu'à la brèche) initiés par de l'affouillement, et la figure 4 qui représente une famille de scénarios centrés sur la présence de sandboils.

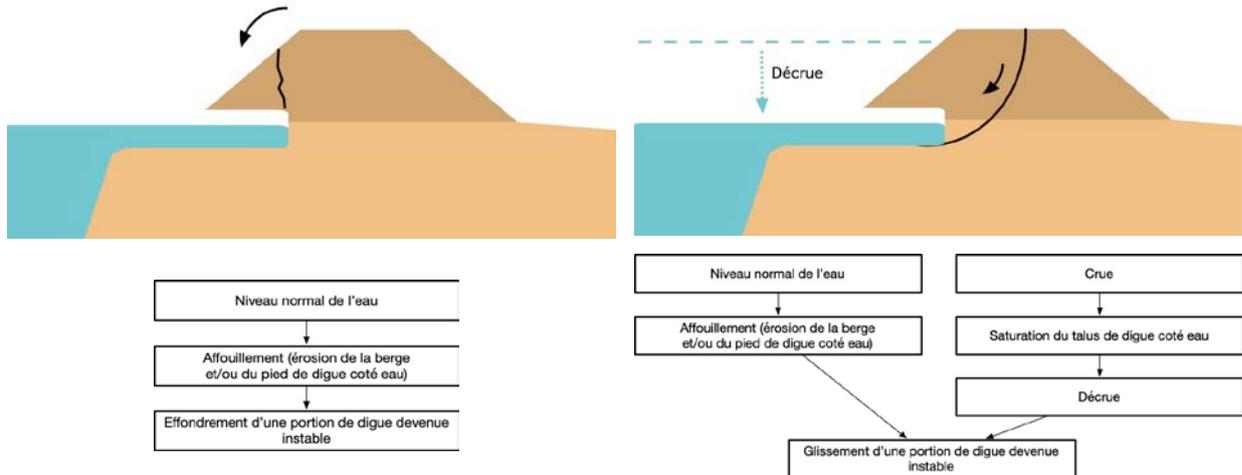


FIGURE 3. Deux débuts de scénarios de rupture initiés par de l'affouillement (R. Tourment, [9]).

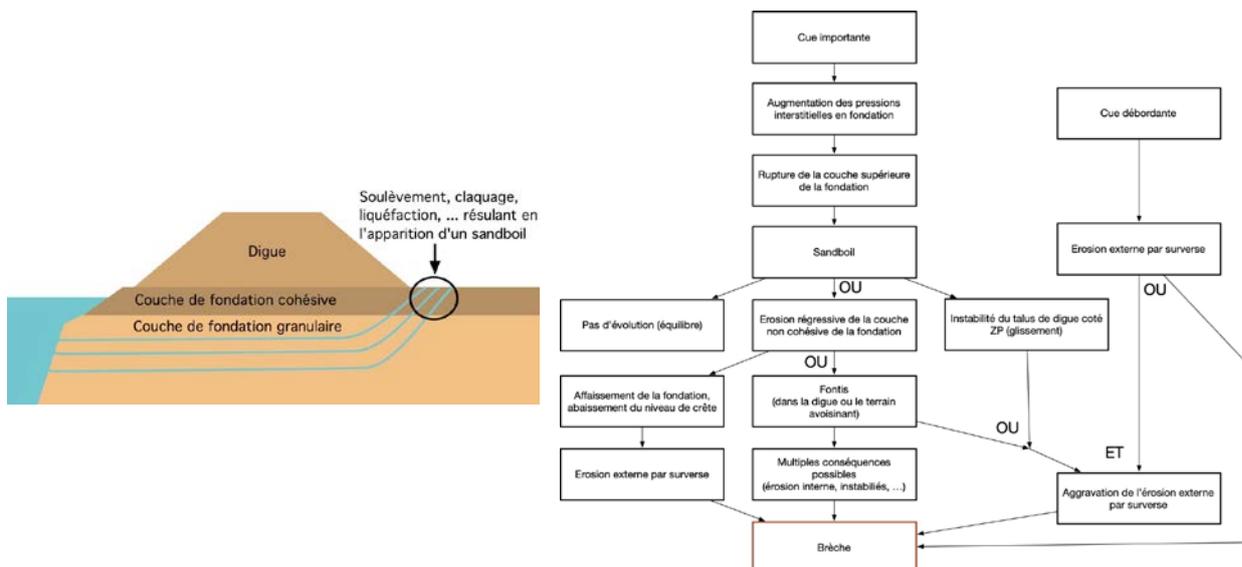


FIGURE 4. Famille de scénarios centrés sur la présence de sandboils. (R. Tourment, [9]).

*Cas de l'érosion interne*

L'érosion interne est une famille de mécanismes, qui historiquement étaient confondus au vu de leur conséquence (le « renard hydraulique »). On pourrait analyser un scénario de rupture en considérant globalement l'érosion interne comme un seul mécanisme mais ce serait dans beaucoup de cas une simplification excessive. Le projet de recherche européen FloodProBE a étudié les liens et enchaînements possibles entre les quatre mécanismes d'érosion interne [4]. Au sein d'un même scénario il est possible que plusieurs mécanismes se produisent simultanément à différents points de l'ouvrage et successivement au même point, comme illustré avec deux exemples de scénarios sur la figure 5, la figure 6 représentant un ensemble de scénarios possibles.

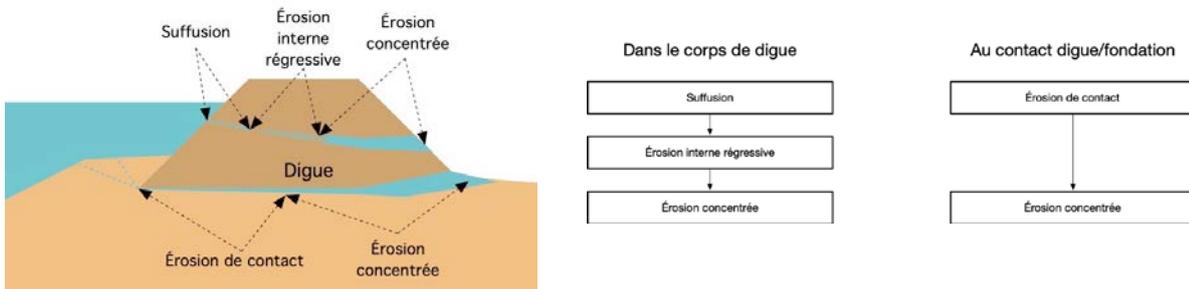


FIGURE 5. Deux scénarios partiels, avant le développement d'une brèche, impliquant plusieurs mécanismes d'érosion interne (R. Tourment, [9]).

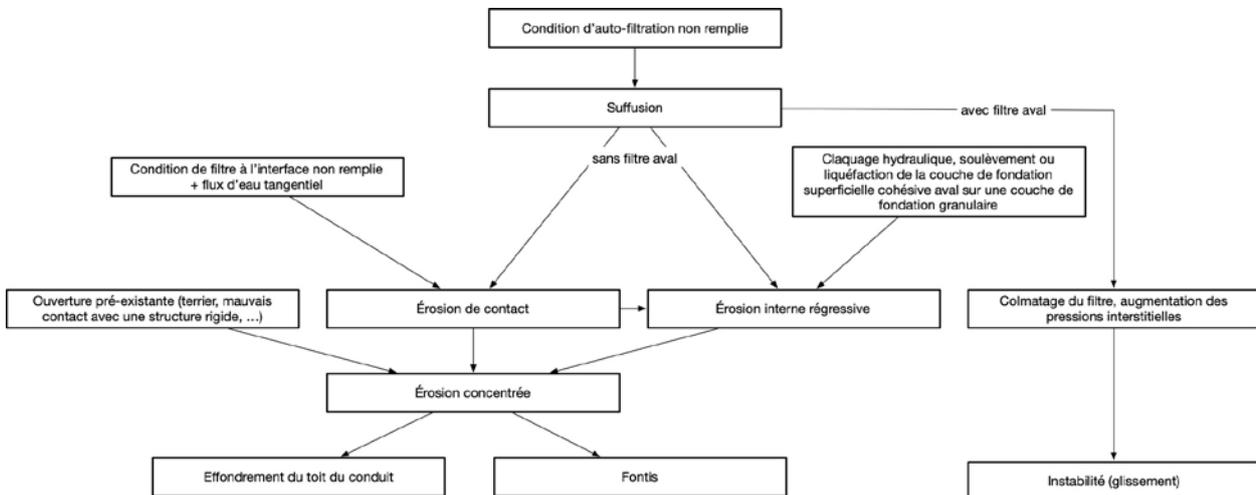


FIGURE 6. Les différentes interactions possibles entre mécanismes d'érosion interne d'après FloodProBE (R. Tourment, [9]).

**Intérêt d'une démarche analytique des scénarios de rupture – Conclusion et perspectives**

La prise en compte de l'ensemble des mécanismes impliqués dans un scénario de rupture, au lieu de considérer comme cela l'a souvent été par le passé des « modes de rupture » désignés et évalués

sur la base d'un seul mécanisme, permet des diagnostics, des analyses de risque et des justifications d'ouvrages plus justes. Le fait qu'il faille s'attacher à des scénarios impliquant divers mécanismes élémentaires est désormais reconnu, aussi bien au niveau national qu'international.

#### *Intérêt pour les diagnostics et analyses de risque*

Dans le cadre d'un diagnostic ou d'une analyse de risque, par exemple lors de la réalisation d'une étude de dangers réglementaire, la reconnaissance de l'existence des scénarios associant plusieurs mécanismes, et l'identification au cas par cas des scénarios possibles permet de tendre vers l'exhaustivité en termes d'identification des scénarios de défaillance, surtout si on utilise une méthode rigoureuse comme celle évoquée plus haut. Ces scénarios étant potentiellement trop nombreux pour être tous évalués, il est ensuite souvent nécessaire de faire des choix quant à ceux qui le seront, mais on évitera de ne pas avoir considéré un scénario potentiellement très dangereux et/ou très probable, car trop spécifique.

L'estimation des probabilités de rupture par un « mode de rupture » donné est du coup plus précise, mais elle est également facilitée en évaluant dans un premier temps les probabilités de chaque mécanisme indépendamment, pour les combiner ensuite.

Enfin, la représentation détaillée sous forme d'arbre d'un scénario avec les différents mécanismes qui y participent, et si possible les détériorations de composants et défaillances de fonctions associées, permet d'identifier facilement des barrières de sûreté et des mesures de réduction des risques à mettre en place pour réduire la probabilité du scénario et/ou ses conséquences.

#### *Intérêt pour la conception et les justifications d'ouvrages*

Que ce soit dans le cas de la construction d'ouvrages neufs ou de confortement d'ouvrages existants, on peut procéder à une analyse des scénarios de rupture potentiels sur l'ouvrage projeté et son environnement, ce qui permet d'en adapter la conception : les défaillances de la fonction principale d'un composant peuvent être relayées par un autre composant assurant, en tant que fonction secondaire, son relai. En termes de justification, la prise en compte des différents composants de l'ouvrage, de leurs fonctions, principales et secondaires, et leurs performances vis-à-vis de chaque fonction, au lieu d'évaluer la résistance de l'ouvrage (souvent d'un seul composant) à chaque mécanisme, permet plus de précision et donc potentiellement des économies.

#### *Perspectives et compléments*

Il est actuellement envisagé de développer des outils qui permettent d'automatiser la construction des scénarios de défaillance potentiels sur la base de la décomposition structurelle et de l'analyse fonctionnelle d'un ouvrage.

Bien entendu, une meilleure connaissance des mécanismes élémentaires est souhaitable, avec si possible à terme un mode d'évaluation cohérent pour tous les mécanismes sur la base de lois de comportement des matériaux et d'équations aux états limites. À l'heure actuelle l'évaluation de nombreux mécanismes fait encore appel à une forte dose d'expertise, et certains mécanismes sont évalués sur la base de lois empiriques pas toujours adaptées (utilisation d'une loi pour un mécanisme voisin mais différent, ou en dehors de ses limites d'application).

Enfin, il est également souhaitable d'arriver à probabiliser l'apparition des différents mécanismes et/ou leur développement jusqu'à une valeur limite, pour faciliter la probabilisation des scénarios où ils interviennent.

*Conclusion générale : nécessaire généralisation de l'approche par scénarios*

Cette approche explicite et analytique par scénarios est encore relativement peu appliquée. Comme nous avons essayé de le démontrer dans cet article elle a pourtant de très nombreux avantages. Mais elle nécessite encore des développements dans plusieurs domaines, et sa pratique gagnera en facilité et en précision sur la base de retours d'expérience de son application et d'échanges au sein de la profession, en complément des recherches. Comme l'approche « risque » qui a progressivement été intégrée aux pratiques de l'ingénierie des ouvrages hydrauliques, nous pensons qu'il est inévitable à terme d'intégrer cette approche par scénarios dans la pratique courante des diagnostics, de l'analyse de risque, de la conception et de la justification des ouvrages hydrauliques et plus particulièrement des digues de protection contre les inondations.

## Références

- [1] CIRIA, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, United States Army Corps of Engineers (2013). *The International Levee Handbook*. CIRIA, Londres, 1349 p.
- [2] CFBR (2021). *Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai*. ISBN 979-10-96371-17-4. La Motte Servolex : CFBR.
- [3] Mériaux P., Royet P., Folton C. (2001). Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires - Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Cemagref éditions, 200 p.
- [4] Morris M., Benahmed N., Philippe P., Royet P., Tourment R., van den Ham G., Van M. (2012). FloodProBE report WP 3: Reliability of Urban Flood Defences - D3.1 Guidance on improved performance of urban flood defences. Retrieved from <http://www.floodprobe.eu/document-details.asp?ID=869>.
- [5] Tourment R., Beullac B., Deniaud Y., Simm J., Wallis M., Sharp M., Pohl R., Van Hemert H. (2013). De l'EDD des digues en France aux travaux de l'ILH sur les mécanismes élémentaires et les scénarios de défaillance. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque national - Dignes2013 12/06/2013-14/06/2013, Aix-en-Provence. p. 289-297.
- [6] Tourment R., Beullac B., Degoutte G. (2015). Études de dangers des systèmes de protection contre les inondations : une méthode d'analyse de la défaillance. *Houille Blanche-Revue Internationale de l'eau*, n° 1, 2015, p. 41-55.
- [7] Tourment R., Benahmed N., Nicaise S., Meriaux P., Salmi A., Rouge M. (2018). Retour d'expérience sur les désordres des digues de l'Agly maritime. Analyse des phénomènes de "sand-boils". Commission Internationale des Grands Barrages. Vingt-sixième congrès des grands barrages 01/07/2018-07/07/2018, Vienna, AUT. 31 p.
- [8] Tourment R., Beullac B. (2019). *Inondations - Analyse de risque des systèmes de protection - Application aux études de dangers*, Lavoisier, Paris, 356 p.
- [9] Van M.A., Rosenbrand E., Tourment R., Smith P., Zwanenburg C. (2022). Failure paths for levees. International Society of Soil mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) – Technical Committee TC201 'Geotechnical aspects of dikes and levees', <https://doi.org/10.53243/R0006>.