

ANALYSE DU RISQUE D'ÉROSION INTERNE DES BARRAGES EN REMBLAI : METHODOLOGIES OPERATIONNELLE ET EN DEVELOPPEMENT

Risk analysis of internal erosion in embankment dams: operational and under development methods

Jean-Robert COURIVAUD, Jean-Jacques FRY
EDF – CIH- Savoie Technolac -73373 LE BOURGET-DU-LAC
jean-robert.courivaud@edf.fr, jean-jacques.fry@wanadoo.fr

Luc DEROO
ISL, Lyon
DEROO@isl.fr

Stephane BONELLI
Irstea et Aix-Marseille Université, 3275 route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence
stephane.bonelli@irstea.fr

MOTS CLEFS

Barrages, digues de protection contre les crues, digues de canaux, érosion interne, analyse de risque

KEY WORDS

Dams, flood embankment, canal dikes, internal erosion, risk analysis

RÉSUMÉ

L'analyse du risque d'érosion interne dans les barrages en remblai, les digues et leurs fondations a fait l'objet de recherches croissantes depuis plus de 25 ans, au niveau international au sein du groupe de travail européen sur l'érosion interne (EWGIE) lancé par le club européen de la CIGB (EURCOLD) et au niveau national, principalement au sein du projet de recherche ERINOH et maintenant au sein du groupe de travail CFBR « barrages en remblai ». Ces collaborations entre maîtres d'ouvrage, bureaux d'étude et centres de recherche ont abouti à des méthodologies d'analyse du risque d'érosion interne dans les barrages en remblai, pour les études de réévaluation de la sûreté : bulletin CIGB n° 164, guides du projet ERINOH. Dans une première partie, la déclinaison actuelle par EDF-CIH de la méthodologie d'analyse du risque d'érosion interne est résumée. Dans une seconde partie, l'analyse de niveau 1 d'ERINOH est évoquée, elle peut être menée en moins d'une heure grâce à un tableur développé par Suez et à un jeu de données infallible. Les premiers tests de validation sont introduits et les résultats sont interprétés. Enfin les perspectives en termes de recherche et développement clotent cette présentation.

ABSTRACT

The analysis of the risk of internal erosion in embankment dams, dikes and their foundations has been the subject of increasing research for more than 25 years, at the international level within the European Working Group on Internal Erosion (EWGIE) launched by the European club of ICOLD (EURCOLD) and at the national level, mainly within the ERINOH research project and now within the working group CFBR "embankment dams". These collaborations between project owners, engineering companies and research centers have led to methodologies for analyzing the risk of internal erosion in embankment dams, for safety reassessment studies: ICOLD Technical Bulletin No. 164, ERINOH guides. In a first part, the current application by EDF Hydro-CIH of the methodology of risk analysis of internal erosion is summed up. In a second part, the ERINOH level 1 analysis is evoked, it can be done in less than an hour thanks to a spreadsheet developed by Suez and to a complete dataset. The first validation tests are introduced and the results are interpreted. Finally, in the last part, the perspectives in terms of research and development complete this presentation.

1. RAPPEL RAPIDE DE L'HISTORIQUE DES RECHERCHES SUR L'ÉROSION INTERNE

L'érosion interne rassemble les processus d'arrachement et de transport des grains de matériau constitutifs du remblai ou de sa fondation par un écoulement de percolation. Cette pathologie reste de nos jours difficile à analyser. Jusqu'à présent, une forte dissymétrie existe dans la présentation académique des phénomènes physiques régissant la tenue des ouvrages hydrauliques. Dans les manuels pédagogiques, l'accent est mis sur la description mécanique de l'analyse de la stabilité générale, alors que cette dernière n'est que très marginalement impliquée dans la plupart des incidents et des ruptures. En revanche, l'analyse des statistiques mondiales montrent que l'érosion interne est la cause de 30 à 50% des ruptures des barrages en remblai, des digues fluviales de protection, et des digues de canaux.

La France dispose d'un parc important d'ouvrages hydrauliques. Le linéaire de digues correspond à environ 13 fois la plus grande dimension de son territoire, avec près de 9000 km de protection contre les crues, 8000 km de digues de canaux de navigation et 1000 km de canaux hydroélectriques. Le nombre de petits barrages, d'une hauteur inférieure à 15 m, est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers et celui des grands barrages avoisine 600. Si la première caractéristique du patrimoine hydraulique français est son ampleur, la seconde est l'ancienneté du parc : la majorité des digues est âgée de plus d'un siècle et la majorité des barrages de plus d'un demi-siècle. Enfin la prépondérance des remblais en matériaux naturels du site dans la constitution de ces ouvrages en est la troisième caractéristique.

L'apparition de boulanges dans les contre-canaux du barrage de Saint-Egrève lors de la mise en eau en 1991 est l'occasion d'un rapprochement EDF-CNR, pour mieux maîtriser ces désordres peu connus. Un groupe de travail est créé en 1992 et devient un groupe de travail CFBR quand le Cemagref le rejoint en 1993. Il délivre un rapport en 1997 [1], revu dans le détail par le président du CTPB et du CFBR, André Goubet. Ce rapport tente d'ordonner les méthodes d'observation, de détection et de répartition des diverses manifestations de l'érosion interne. L'ampleur de la pathologie (environ 1 incident par an en France), les enjeux de sécurité, et le contexte économique de plus en plus contraignant poussent à redoubler d'efforts. L'approfondissement des connaissances encore balbutiantes, le désir d'extraire de l'empirisme une méthode de calcul rationnelle et la recherche de solutions innovantes et économiques de réparation donnent corps en 2006 à un projet national de recherche ERINOH (Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques), accueilli par l'Irex jusqu'en 2013. Emmenant 32 partenaires publics et privés, représentant des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'oeuvre, des entreprises, des laboratoires de recherche et des bureaux d'études, le projet ERINOH réunit la matière à plusieurs synthèses :

- un ouvrage qui synthétise l'état de l'art en 2005 et initie les besoins de recherche ERINOH [2] ;
- deux ouvrages qui détaillent les processus physiques [3 et 4] ;
- une base de données ERINOH comportant près de 300 fiches d'incidents, dont 16 sur grands barrages, 30 sur petits barrages, 32 sur digues de canal et plus de 200 sur digues fluviales [5] ;
- un ouvrage qui détaille les 17 appareillages de laboratoire développés et déployés au cours du projet [6] ;
- un ouvrage qui détaille les méthodes de détection et d'investigations géophysiques [7] ;
- un ouvrage qui propose des méthodes d'évaluation du risque pour l'Ingénierie [8].

Ces synthèses du Projet National ERINOH, se sont nourries et réciproquement ont alimenté d'autres réflexions parallèles nationales et internationales :

- le projet EDF de R&D PAREOH, initié en parallèle d'ERINOH, continue, piloté par J.-R. Courivaud, son effort d'amélioration de la sécurité de son parc d'ouvrages en remblai vis-à-vis de l'érosion interne.
- La recherche lancée par Prof. Robin Fell, à l'Université de New South Wales en Australie, en engageant plusieurs thèses pour comprendre et modéliser la pathologie de certains mécanismes, propose une approche quantitative de la probabilité de rupture, synthétisée dans l'ouvrage [9] ;
- La recherche du groupe de travail « Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations » du Club Européen de la CIGB (<http://cnpgeb.apambiente.pt/IColdClub/index.htm>), créé en 1993 par J.-J. Fry (EDF) et actuellement animé par S. Bonelli (Irstea) produit des comptes-rendus et des mises à jour de l'état de l'art [10,11 et 12]. Ces travaux ont largement contribué à inspirer le premier bulletin technique sur l'érosion interne rédigé par R. Fell, J.-J. Fry et R. Bridle [13] et à constituer le corps du second mis en forme par R. Bridle [14]. Il se réunit toujours annuellement (entre 40 et 100 experts et scientifiques de plus de 25 pays, y/c USA, Canada, Russie, Japon, Australie) et poursuit ses actions et ses publications [15].
- Le groupe de travail CFBR sur les barrages en remblai après avoir émis des recommandations sur le calcul de stabilité des barrages [16] travaille actuellement d'une part à valider ou modifier les approches ERINOH de l'érosion interne et d'autre part à mettre à jour l'état de l'art de l'érosion externe en distinguant les digues des barrages (Luc Deroo : président, Stéphane Bonelli : vice-président et Jean-Jacques Fry : secrétaire).

Deux approches diagnostiquant le risque d'érosion interne sont présentées dans les paragraphes suivants : la méthodologie en usage à EDF et l'approche niveau 1 d'ERINOH.

2. METHODOLOGIE DEPLOYEE A EDF

2.1.Méthodologie EDF-CIH de diagnostic de sûreté des ouvrages hydrauliques en remblai

EDF exploite environ 500 km d'ouvrages hydrauliques en remblai de grand linéaire, qui sont soit des barrages latéraux de canaux, principalement situés sur la Durance et sur le Rhin, soit des barrages d'aménagements fluviaux, principalement sur le Rhin. Le vieillissement de ces ouvrages accroît leurs besoins de maintenance afin de garantir à la fois leur sûreté et leur performance de production. Pour ces besoins de maintenance, mais aussi pour répondre aux exigences accrues de justification de leur sûreté de la part des autorités de contrôle, EDF réalise un lourd programme d'études de diagnostic de sûreté sur ces ouvrages.

Ces études doivent conclure à l'acceptabilité de la marge de sécurité actuelle de l'ouvrage vis-à-vis de tous ses modes de rupture potentiels, sous peine de le renforcer.

Ces études ne peuvent pas être limitées à des dires d'expert, sur la base des seules données existantes. Elles suivent une méthodologie rationnelle sous assurance-qualité. La méthodologie EDF-CIH de diagnostic de sûreté des ouvrages hydrauliques s'appuie d'abord à compléter le modèle accompagnateur de projet, grâce à une campagne de reconnaissances ciblées sur les lacunes à résorber. Elle combine ensuite l'analyse comportementale de l'auscultation, à l'analyse expérimentale, in situ ou en laboratoire, avec l'analyse numérique. Déployée sur les barrages réservoirs, les barrages latéraux de canaux ou d'aménagement fluviaux, ainsi que sur les digues de protection contre les inondations, elle comporte treize étapes.

N°	Etapas	
1	Définition de l'emprise de la zone d'étude	
2	Choix du scénario des situations de chargement appliquées à l'ouvrage [16]	<ul style="list-style-type: none"> - chargement hydraulique (niveau d'eau amont et aval) - chargement sismique - chargement en crête de digue (trafic)
3	Sélection des modes de rupture potentiels	<ul style="list-style-type: none"> - cisaillement, qui inclut instabilité par grand glissement sous sollicitation statique, Instabilité due au séisme et poinçonnement ; - érosion interne - érosion externe, qui inclut érosion par surverse et affouillement
4	Enquête documentaire préalable	<ul style="list-style-type: none"> - données géologiques - données géomorphologiques - données de conception - données sur la construction - données sur l'exploitation de l'ouvrage
5	Définition du modèle accompagnateur de projet qui synthétise l'enquête préalable	<ul style="list-style-type: none"> - modèle géométrique (choix des sections à étudier) - modèle géologique - modèle géotechnique - modèle hydraulique - modèle environnemental
6	Examen visuel	<ul style="list-style-type: none"> - recherche d'indicateurs de défaillance - vérification et compléments aux modèles
7	Analyse et synthèse des données collectées	<ul style="list-style-type: none"> - recoupage et confrontation des données - choix des tronçons homogènes - mise en évidence des lacunes à combler
8	Reconnaissances : définition, suivi et interprétation	<ul style="list-style-type: none"> - levé topographique - bathymétrie - reconnaissances géophysiques - reconnaissances géotechniques in situ - essais de laboratoire
9	Synthèse des données et finalisation du modèle accompagnateur de projet	<ul style="list-style-type: none"> - sélection des profils transversaux où l'ouvrage est modélisé - finalisation des modèles pour chaque profil sélectionné
10	Analyse du risque de rupture par instabilité	<ul style="list-style-type: none"> - calcul des pressions interstitielles - calcul de stabilité - calcul du facteur de sécurité à la liquéfaction - calcul des déplacements sismiques irréversibles
11	Analyse du risque de rupture par érosion externe	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion externe du talus aval par surverse - Erosion externe du talus amont par affouillement
12	Analyse du risque de rupture par érosion interne	<ul style="list-style-type: none"> - Détaillé ci-dessous
13	Conclusions sur les marges de sécurité de l'ouvrage	

Tableau 1. Les treize étapes de la méthodologie EDF.

2.2. Méthodologie générale d'analyse du risque d'érosion interne

La méthodologie du risque d'érosion interne est issue du Bulletin CIGB 164 [2,13,14] et du groupe de travail Eurcold [12]. Elle comporte huit étapes (Tableaux 2 et 3).

N°	Etape	Question
1	Sollicitation	Quelles sont les sollicitations ?
2	Localisation	Quelles sont les localisations possibles d'initiation de l'érosion ?
3	Initiation	Quels sont les mécanismes possibles d'initiation de l'érosion ?
4	Continuation	Quelle est l'efficacité du filtre à contrôler l'érosion ?
5	Progression	Quelles sont les conséquences de la progression de l'érosion ?
6	Détection	Les conséquences sont-elles détectées ?
7	Intervention	Quelles sont les solutions de réparation rapides et efficaces ?
8	Brèche	Quels sont les mécanismes de brèches ?

Tableau 2. Les questions des huit étapes auxquelles l'analyse de risque par érosion interne doit répondre

N°	Etape	Eléments de méthodologie
1	Sollicitation	Sollicitations hydrauliques Sollicitations sismiques
2	Localisation	Quatre localisations possibles : dans le corps du remblai (dans les matériaux ou aux interfaces sols/sols ou sols structures) dans la fondation aux interfaces corps du remblai/ fondation aux corps du remblai/appuis de rives Fonction du type d'ouvrage et de sa conception [1,2,8,9]
3	Initiation	Quatre mécanismes d'initiation fonction des conditions aux limites [1,2,8,9,10] érosion par écoulement concentré (également dénommé érosion de conduit) érosion régressive érosion de contact entre deux sols érosion interne sélective (également dénommée suffusion) Occurrence d'initiation à analyser en fonction (Figure 1) du matériau des sollicitations hydrauliques de l'état de contrainte mécanique
4	Continuation (filtration)	Efficacité des filtres, des zones de transition ou des zones aval à stopper l'érosion : méthodes basées sur la granulométrie méthodes basées sur la perméabilité
5	Progression	Conséquences du développement de l'érosion : colmatage des drains tassements, fontis, effondrements conduit traversant
6	Détection	Analyse des mesures d'auscultation Système de détection [4,10]
7	Intervention	Techniques de colmatage rapides Possibilité de baisser le niveau du réservoir Importance de la cinétique d'érosion
8	Brèche	Destructuration de la face aval Glissement de la zone aval par instabilité Effondrement par liquéfaction statique Surverse par tassement de la crête Effondrement du toit du conduit traversant

Tableau 3. Les éléments des huit étapes de l'analyse de risque par érosion interne

2.3. Principales méthodes de reconnaissances in situ mises en œuvre dans l'analyse du risque d'érosion interne

Les principales méthodes de reconnaissances in situ mises en œuvre par EDF pour des analyses de risque d'érosion interne sont présentées ci-après. Cette présentation n'est cependant pas exhaustive, des problématiques ou des configurations particulières de l'ouvrage ou de sa fondation pouvant amener à recourir à d'autres méthodes moins couramment utilisées.

L'objectif général des reconnaissances in situ est double :

- Caractériser les zones les plus faibles vis-à-vis du risque d'initiation de l'érosion interne ;
- Rechercher les zones de fuite.

Lorsque des fuites et éventuellement l'érosion interne sont avérées, caractériser leur cheminement ainsi que les vitesses d'écoulement associées.

2.3.1. Caractérisation des zones les plus faibles

Cette caractérisation des zones les plus faibles vis-à-vis du risque d'érosion interne est menée est trois étapes :

1. Reconnaissances topographiques ;
2. Reconnaissances géophysiques à grand rendement ;
3. Reconnaissances géotechniques.

2.3.1.1. Reconnaissances topographiques

Les reconnaissances topographiques décrites ci-dessous sont principalement mises en œuvre sur des ouvrages de grand linéaire ou sur des barrages en remblai généralement de petite taille dépourvus d'auscultation du comportement mécanique.

L'objectif de ces reconnaissances topographiques est de mettre en évidence des tassements le long de la crête de l'ouvrage ou des déformations des parements amont ou aval qui peuvent être des signes d'érosion interne à cinétique lente (mécanismes de suffusion ou d'érosion de contact).

Quelle que soit la méthode de mesure topographique utilisée, ces reconnaissances sont traduites sous la forme de profils en long de l'altitude de crête et de profils en travers de l'altitude de l'enveloppe du remblai, qui sont comparés aux plans de conception (ou mieux, aux plans conformes à exécution dans les rares cas où ils existent).

Ces profils topographiques longitudinaux ou transversaux permettent de mettre en évidence des anomalies significatives selon la verticale de l'ordre de la dizaine de centimètres.

2.3.1.2. Reconnaissances géophysiques à grand rendement

L'objectif de ces reconnaissances géophysiques à grand rendement est double :

- fournir une information grossière sur la nature des matériaux constitutifs du remblai et de sa fondation superficielle ;
- fournir une information sur la localisation de zones faibles vis-à-vis du risque d'érosion interne : zones lâches, décomprimées.

Pour obtenir une information grossière sur la nature des matériaux constitutifs du remblai et de sa fondation, EDF a principalement mis en œuvre jusqu'à présent la méthode de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE), mise en œuvre par panneaux électriques. Cette méthode, dont le résultat est issu d'une inversion dont la solution n'est pas unique, nécessite d'être calée à l'aide de profils lithologiques qui permettent de définir un modèle géo-électrique. La résolution spatiale de cette méthode est de l'ordre de la dizaine de mètres selon la verticale et de quelques dizaines de mètres selon l'horizontale. Elle permet donc de mettre en évidence les grandes structures, mais elle est incapable de détecter des zones faibles ou humides de taille plurimétrique. EDF teste actuellement des méthodes électriques alternatives dont les coûts de mise en œuvre pourraient être bien inférieurs.

Pour obtenir une information sur la localisation de zones faibles (zones lâches, décomprimées), EDF met en œuvre depuis plusieurs années la méthode MASW (méthode acoustique d'ondes de surface). Cette méthode fournit les vitesses de cisaillement (V_s) des matériaux traversés, qui renseigne directement sur l'état de compacité des sols. Pour cette méthode également, la résolution est assez grossière et des zones faibles de taille plurimétrique ne sont pas détectables.

2.3.1.3. Reconnaissances géotechniques

Les reconnaissances géotechniques ont pour but essentiel de caractériser la résistance à l'érosion des sols constitutifs des zones considérées comme les plus faibles à l'issue de l'enquête documentaire préalable, de l'examen visuel et des reconnaissances topographiques et géophysiques. Pour cela, il est indispensable de prélever le mieux possible les sols à tester, en perturbant le moins possible durant ce prélèvement leur état initial.

EDF utilise depuis plusieurs années les sondages carottés gros diamètre utilisant le sondeur Düsterloh pour prélever des sols à granulométrie étalée, remaniés ou intacts. Cette méthode est chère (environ 1000 €/m de carottage), mais elle permet d'obtenir près de 100% de récupération dans les sols à granulométrie étalée, ainsi que des échantillons intacts sous gaine de 200 mm de diamètre intérieur (méthode Stoelben).

Ces prélèvements de qualité sont ensuite utilisés pour réaliser les essais d'identification classiques en laboratoire, ainsi que des essais d'érosion (Hole Erosion Test pour l'analyse du risque d'initiation de l'érosion de conduit, Contact Erosion Test pour l'analyse du risque d'initiation de l'érosion de contact, érodimètre triaxial pour l'analyse du risque d'initiation de la suffusion).

2.3.2. Recherche des zones de fuite

La recherche de zones de fuite consiste à localiser l'entonnement et l'exutoire de la fuite. C'est en général la première étape avant la caractérisation du cheminement de la fuite à travers l'ouvrage ou sa fondation et l'estimation d'une vitesse moyenne de l'écoulement.

EDF met en œuvre principalement deux méthodes :

- La polarisation spontanée (PS), qui est une méthode électrique effectuée à la fois sous l'eau, côté amont et à terre, en pied aval. Cette méthode, qui est passive, mesure le potentiel électrique naturel entre deux électrodes (l'une est fixe, l'autre est mobile), dont on cherche à extraire le potentiel d'électrofiltration généré par l'écoulement de fuite ;
- la méthode acoustique, qui vient compléter la méthode PS pour la localisation des entonnements de fuite. La méthode acoustique consiste à détecter le bruit spécifique engendré par un entonnement de fuite dans le parement amont de l'ouvrage.

La méthode PS a fait l'objet de développements récents dans le cadre d'une collaboration entre EDF et le laboratoire ISTERRE de l'université de Savoie Mont-Blanc. Sa mise en œuvre recourt à la fois à des mesures in situ et à une modélisation numérique par une méthode aux éléments finis couplant électricité et hydraulique. Cette méthode est toutefois inopérante en présence de perturbations électromagnétiques à proximité du site d'investigations, ainsi qu'en présence de structures métalliques provoquant un potentiel d'oxydo-réduction.

La méthode acoustique a fait également l'objet de développements par la R&D d'EDF, qui ont abouti à une méthode opérationnelle consistant à enregistrer les sons dans la zone où un entonnement de fuite est suspecté et à analyser la densité spectrale d'énergie des sons enregistrés en les comparant à des gabarits de sources de bruit bien identifiés (bruits de fuite, bruits naturels, bruits anthropiques). Cette méthode est inopérante en cas d'écoulements rapides (bruits liés aux turbulences masquant les bruits recherchés) ou de perturbations acoustiques environnantes importantes (clapot, circulation, chantiers...).

2.3.3. Caractérisation des fuites

Si l'entonnement et l'exutoire d'une fuite ont pu être localisés (cf. étape précédente), la dernière étape consiste à localiser son cheminement à travers le remblai ou sa fondation et à estimer la vitesse moyenne d'écoulement.

Pour cela, EDF utilise les méthodes de traçage. Les traceurs utilisés sont la température, la fluorésceine ou la saumure. Le choix du traceur s'effectue en fonction de la perméabilité du matériau.

2.4. Méthodologie détaillée d'analyse du risque d'érosion interne (étapes 1 à 6)

2.4.1. Etape 1 : Situations

Les situations, c'est-à-dire les combinaisons de chargement de l'ouvrage pour lesquelles l'érosion interne a le plus de chance de se développer et d'évoluer vers une pathologie grave et qui sont considérées en priorité, sont les suivantes :

- La première mise en eau. Des défauts de conception et/ou de construction peuvent s'avérer fatals pour l'ouvrage dès sa première mise en eau ;
- Les chargements extrêmes : crue, séisme. La crue sollicite l'ouvrage à des niveaux rarement atteints. Un fort séisme peut fissurer la crête et les talus du remblai. Si l'étanchéité est endommagée et si les parties fissurées ne sont pas protégées par des filtres d'une épaisseur suffisante, l'érosion interne s'initie dans ces fissures et peut aller jusqu'à la rupture ;
- Le vieillissement dont le manque de surveillance peut ignorer les symptômes et laisser l'érosion interne entraîner la rupture d'ouvrages très anciens, y compris des ouvrages pluri-centennaires.

2.4.2. Etape 2 : Localisation de l'érosion interne

Cette étape consiste à localiser les zones les plus probables d'initiation de l'érosion interne dans les profils de barrage ou les tronçons de digue sélectionnés. Le cheminement possible de l'érosion interne est étudié à partir de cette localisation.

Parmi les zones d'initiation possibles, les secteurs ou les profils-types les plus dangereux sont sélectionnés, en justifiant les raisons de ce choix. Un secteur jugé a priori sain de l'ouvrage est également représenté, afin d'être en mesure de justifier que ce secteur dispose de marges de sécurité suffisantes.

Dans le cas où l'ouvrage étudié est un ouvrage de grand linéaire, celui-ci est découpé en tronçons homogènes. L'analyse doit être menée par tronçon. Dans le cas où l'ouvrage étudié est un barrage de réservoir, l'analyse est menée par profil.

La sélection des zones où l'érosion interne a le plus de chance de s'initier est le résultat d'une synthèse des données acquises au cours de l'enquête documentaire préalable et des résultats des reconnaissances, en particulier géophysiques et géotechniques, qui auront permis de caractériser les sollicitations (vitesses moyennes et localisation des écoulements de fuite à travers le remblai ou sa fondation) et les résistances (caractérisation de la résistance du sol constituant le remblai ou sa fondation à l'érosion).

2.4.3. Etape 3 : Analyse du risque d'initiation de l'érosion interne

Les quatre mécanismes d'initiation potentiels de l'érosion interne sont a priori analysés. Certains mécanismes, comme l'érosion régressive de conduit ou l'érosion de contact peuvent d'emblée être écartés lorsque les modèles géologiques et géotechnique le justifient.

2.4.3.1. Erosion dans une fuite concentrée (également dénommée érosion de conduit)

La méthode utilisée par EDF pour analyser ce risque d'initiation de l'érosion interne comporte les quatre étapes suivantes :

1. Estimation de l'ouverture préexistante : largeur de la fissure ou diamètre du conduit. Cette donnée est déterminée à partir de la connaissance qu'a l'ingénieur de fissures ou conduits pré-existants dans l'ouvrage et en fonction de la sélection effectuée, de tailles typiques d'ouverture issues de la littérature.
2. Calcul de la contrainte de cisaillement sur les parois du conduit ou les lèvres de la fissures à partir d'une approche analytique enveloppe.
3. Mesure de la contrainte critique d'érosion du sol bordant le conduit ou la fissure à partir d'un et si possible plusieurs essais Hole Erosion Test (HET). La mise en œuvre commerciale de l'essai HET est assurée en France par *geophyConsult* et *Solsolution*, selon la méthodologie développée par IRSTEA [4,18].
4. Comparaison entre la contrainte de cisaillement et la contrainte critique d'érosion et conclusion sur le risque d'initiation d'une érosion de fissure.

Du fait des incertitudes importantes de cette approche, la comparaison entre sollicitation et résistance est faite seulement en ordre de grandeur, ce qui permet de dresser un bilan de la sensibilité à l'érosion interne : moyenne, faible ou forte.

2.4.3.2. Erosion régressive

Deux types différents de processus physiques sont couverts par le terme d'érosion régressive :

- L'érosion régressive de conduit ;
- L'érosion régressive de talus aval.

L'érosion régressive de conduit s'applique généralement à des remblais constitués d'argile fondés sur des fondations sableuses. Un écoulement puis un conduit se développent entre le réservoir amont et l'aval de l'ouvrage sous le remblai, dans la fondation sableuse. Le toit du conduit est soutenu par la base cohésive du remblai.

La méthode EDF pour l'analyse du risque d'érosion régressive de conduit considère trois critères qui doivent être vérifiés pour conclure à ce risque d'initiation :

- Le sol où le conduit se développe doit être fin, perméable et pulvérulent (sans cohésion). Le critère de Fell, selon lequel ces sols doivent avoir un $IP < 7$ est utilisé pour vérifier cette condition.
- L'érosion régressive s'initie à l'exhaure d'une surface sans filtre, de contrainte effective nulle, instable sous la poussée du gradient hydraulique, dans la fondation sableuse, soit au fond d'une tranchée aval qui coupe la couverture argileuse, soit sous la couverture argileuse claquée par les sous-pressions. EDF utilise la formule de l'USACE pour calculer l'épaisseur limite de la couche argileuse.
- Pour que l'érosion s'initie, il faut un toit suffisamment résistant. Le critère utilisé est un $IP > 7$.

L'analyse du risque d'érosion régressive de talus aval est menée en réalisant dans un premier temps un calcul hydraulique 2D vertical puis en réalisant un calcul de stabilité statique, où des instabilités de peau sont recherchés sur le parement aval. Ces instabilités ont une profondeur de l'ordre de 1 m. Le coefficient de sécurité recherché (coefficient global) est de 1,3.

2.4.3.3. Erosion de contact

L'érosion de contact ne peut avoir lieu que si deux critères, l'un géométrique et l'autre hydraulique, sont satisfaits ensemble. Le critère géométrique correspond au non respect du critère de filtre entre le matériau fin (matériau de base) et le matériau grossier (matériau de filtre). Le critère de filtre utilisé par EDF est le critère de rétention de Sherard et al (1989). Le critère géométrique d'initiation de l'érosion de contact est satisfait si :

$$D_{F15} / D_{B85} > 9.$$

Le critère hydraulique s'exprime en comparant la vitesse de Darcy de l'écoulement à une vitesse critique de début d'érosion (d'après thèse de Rémi Béguin [19]) estimée à 1 cm/s. Dans la méthodologie EDF, la vitesse de Darcy est soit déterminée par une méthode de traçage in situ, prenant en compte un coefficient de sécurité variant de 1 à 10 en fonction de la méthode de traçage, soit par un calcul d'écoulement prenant en compte l'enveloppe supérieure des valeurs de perméabilité dans la couche grossière et un coefficient de sécurité variant de 3 à 10 en fonction du degré d'hétérogénéité connu du sol.

Dans le cas où cette méthode conclut à un risque d'initiation de l'érosion de contact alors que celle-ci n'a jamais été mise en évidence par la surveillance, un essai de Contact Erosion Test (CET) est réalisé et permet de finaliser la conclusion sur ce risque d'initiation. La mise en œuvre commerciale de l'essai CET, qui a été développé conjointement par l'université de Grenoble, EDF et CNR, est assurée par *geophyConsult*.

2.4.3.4. Suffusion

La suffusion est l'érosion des particules de la fraction fine d'un matériau grossier. Un matériau est considéré comme étant sujet à la suffusion lorsque trois conditions sont réunies :

- Un critère mécanique exprimant qu'une fraction fine est soumise à des contraintes effectives bien inférieures à celles appliquées sur les grains du squelette ;
- Un critère géométrique exprimant que la courbe granulométrique est si étendue qu'elle ne vérifie pas le critère d'auto-filtration ;
- Un critère hydraulique, exprimant qu'il existe au moins un écoulement préférentiel où la vitesse de l'eau est supérieure à la vitesse critique d'entraînement des fines.

Dans l'analyse de la suffusion, les particules de sol désignées comme fines ne sont pas les grains inférieurs à 80 microns mais les particules mobiles dans le squelette grossier. EDF considère dans ce cas les particules dont le diamètre est inférieur à 2 mm.

Le critère mécanique est vérifié lorsque la fraction fine (fraction de particules inférieures à 2 mm) est inférieure à 20% pour une granulométrie étalée ou 35% pour une granulométrie étroite.

Le critère géométrique utilisé par EDF dépend du type de granulométrie rencontré :

- Pour les granulométries continues et étalées, la méthode de Fannin, qui synthétise les critères de Kenney et Lau, Kezdi et VNIIG est utilisée.
- Pour les granulométries discontinues, bimodales, la méthode de Cambefort – Ziems – Witt est utilisée.

Contrairement à de nombreuses approches, EDF utilise un critère hydraulique de la suffusion en vitesse et non en gradient. En effet, des travaux ont montré que les critères en gradient pouvaient dépendre de l'effet d'échelle et ne pas être conservatifs. L'approche retenue par EDF pour le critère hydraulique de la suffusion est un critère en vitesse d'écoulement identique au critère hydraulique de l'érosion de contact (cf. § 2.4.3.3).

Dans le cas où cette méthode conclut à un risque d'initiation de la suffusion alors que celle-ci n'a jamais été mise en évidence par la surveillance, un essai d'érodimètre triaxial est réalisé et permet de finaliser la conclusion sur ce risque d'initiation. La mise en œuvre commerciale de l'essai d'érodimètre triaxial, qui a été développé par l'université de Nantes, est assurée par la structure de valorisation industrielle de cette université.

2.4.3.5. Conclusion sur le risque d'initiation de l'érosion interne

A la fin de cette étape d'initiation, l'ingénieur conclut sur le risque d'initiation de l'érosion interne sur l'ensemble des profils et tronçons étudiés. Si pour au moins un profil ou tronçon, le risque d'initiation est considéré pour au moins l'un des quatre modes étudiés, alors l'analyse se poursuit par le risque d'absence de filtration.

2.4.4. Etape 4 : Analyse du risque d'absence de filtration

Dans le cas d'un ouvrage qui n'est pas muni de filtre, l'analyse se poursuit directement en phase de progression.

Pour les ouvrages munis de filtre, le critère appliqué par EDF pour l'absence de filtration se compose :

- D'un critère géométrique (défini par Fell) : $D_{15} > 9 D_{85}$

D'un critère hydraulique, qui est défini en termes de perméabilité maximale en fonction du pourcentage de fines par Delgado (2006). Si les critères d'absence de filtration sont vérifiés, alors l'analyse se poursuit en phase de progression.

2.4.5. Etape 5 : Analyse du risque de progression de l'érosion interne

Les mécanismes de progression de l'érosion interne sont nombreux et la présentation exhaustive de la méthodologie EDF appliquée pour chaque mécanisme n'est pas l'objet de cette communication. On se limitera ici à la présentation de l'analyse du risque de progression d'une érosion interne initiée par une fuite concentrée, non stoppée par un filtre et progressant au sein d'un remblai homogène. C'est le mécanisme responsable du plus grand nombre de ruptures d'ouvrages hydrauliques en remblai par érosion interne.

En phase de progression, l'érosion interne initiée par une fuite concentrée se développe sous la forme d'un renard hydraulique. Le risque de formation d'un écoulement localisé (autrement dénommé renard hydraulique) dans les remblais homogènes dépend de deux conditions :

- Une condition mécanique : est-ce que le toit du conduit est stable ?
- Une condition hydraulique : est-ce que l'écoulement peut éroder les parois du conduit et de l'élargir ?

Pour évaluer la condition mécanique, EDF utilise le critère empirique proposé par Fell, qui indique s'il peut y avoir stabilité d'une cavité en fonction du type de sol, de la fraction de fines et du degré de saturation.

Pour évaluer la condition hydraulique, EDF utilise l'approche simplifiée développée par IRSTEA qui a défini des formulations analytiques mécaniquement fondées pour déterminer notamment le temps caractéristique d'érosion et le débit lors de l'effondrement du renard [4]. Cette approche utilise notamment comme données d'entrée le coefficient d'érosion et la contrainte critique d'érosion du sol, qui sont déterminés par l'essai de HET.

2.4.6. Détection

Dans cette étape de l'analyse, l'ingénieur évalue la capacité de la surveillance (examens visuels et auscultation) mise en place sur l'ouvrage à détecter une érosion interne en phase d'initiation ou de progression et vérifie si l'échelle de temps de la réactivité d'intervention est en adéquation avec la cinétique du phénomène.

2.5. Retour d'expérience d'edf sur la mise en œuvre de cette méthodologie : lacunes et besoins d'amélioration

Bien que la méthodologie présentée dans le bulletin CIGB 164 et dans le guide ERINOH constitue un grand pas en avant pour l'analyse pratique du risque d'érosion interne dans les barrages en remblai et les digues, il demeure néanmoins des sujets où les méthodes proposées sont très limitées, voire incomplètes. Ce paragraphe présente les principales lacunes et besoins d'amélioration de la méthodologie mises en évidence par EDF, après une dizaine d'années d'application.

Ce retour d'expérience porte sur les domaines suivants :

- Définition des modèles de l'ouvrage, identification des zones les plus faibles ;
- Analyse du risque d'initiation
- Analyse de la phase de progression.

2.5.1. Définition des modèles de l'ouvrage, identification des zones les plus faibles

La détection et la caractérisation des zones les plus faibles vis-à-vis du risque d'érosion interne, notamment sur les ouvrages en remblai de grand linéaire, reste encore aujourd'hui une difficulté majeure. Seules les méthodes géophysiques fournissent une information continue sur tout le linéaire d'un ouvrage et sur des profondeurs comprenant le remblai et sa fondation superficielle. Cependant, aucune méthode, y compris la MASW, n'est en mesure de détecter des lentilles de matériau érodable ou de faible caractéristique mécanique de taille décimétrique. Or, des zones faibles de taille décimétrique, si elles sont continues dans le sens amont – aval, peuvent constituer un potentiel de danger significatif pour l'ouvrage. Des développements pour disposer de méthodes géophysiques ayant une meilleure résolution spatiale qu'aujourd'hui sont donc nécessaires. En attendant, il importe, lorsque des hétérogénéités sont identifiées ou suspectées, d'intensifier les reconnaissances, à la fois géophysiques et géotechniques, de manière à définir des modèles géologiques et géotechniques qui prennent en compte les matériaux les plus faibles qui ont été rencontrés, selon des géométries réalistes.

2.5.2. Analyse du risque d'initiation

Parmi les quatre modes d'initiation de l'érosion interne, deux présentent des méthodologies limitées ou incomplètes : l'érosion de fuite concentrée (également dénommée érosion de conduit) et la suffusion.

La première étape de l'analyse du risque d'initiation d'une érosion de fuite concentrée consiste à estimer la position et l'ouverture des fissures ou conduits potentiels au sein de l'ouvrage et au cours de sa durée de vie. Ces hypothèses sont déterminantes pour l'évaluation du risque d'initiation. Or avec l'état de l'art actuel, l'ingénieur se trouve souvent assez démuné pour faire des hypothèses à la fois réalistes et prudentes et les analyses d'un même cas d'étude peut être assez

divergentes selon l'ingénieur qui les réalise. Une base de données nourrie par les observations issues des inspections visuelles, VTA et expertises de la profession pourrait à terme rassembler ces hypothèses dans un futur guide du CFBR.

2.5.3. Analyse de la phase de progression

L'analyse du risque d'initiation de la suffusion repose sur l'analyse successive de trois critères : un critère mécanique, puis un critère géométrique et enfin un critère hydraulique. Les travaux scientifiques menés jusqu'à présent ont porté essentiellement sur les critères mécaniques et géométriques et l'on peut considérer ces derniers comme effectivement satisfaisants. En revanche, il existe très peu d'éléments dans la littérature sur le critère hydraulique. EDF a fait le choix temporairement d'utiliser pour la suffusion le critère hydraulique appliqué pour l'érosion de contact mais sans pour autant que cela ne repose sur des travaux scientifiques éprouvés. La définition de critères hydrauliques de l'initiation de la suffusion constitue donc un challenge pour la recherche dans les années à venir.

La phase de progression est la partie la moins avancée de la méthodologie d'analyse du risque d'érosion interne. Selon la cinétique du processus initié et non stoppé par un filtre, la progression peut évoluer en quelques heures vers une brèche ou évoluer très lentement au cours de décennies en ne générant que des désordres limités. Enfin, les bifurcations possibles au cours de la phase de progression entre mécanismes à cinétique lente ou rapide sont très mal connues et très peu décrites.

La progression d'une érosion interne initiée par une fuite concentrée, non stoppée par un filtre et qui évolue donc en un renard hydraulique a fait l'objet d'une analyse simplifiée mécaniquement fondée développée par IRSTEA pour les ouvrages homogènes. Néanmoins, aucun modèle de calcul capable de représenter le processus de progression d'un renard hydraulique prenant en compte la variété des ouvrages en remblai, barrages ou digues, de différents types de conception et de géométrie, jusqu'à la formation éventuelle d'une brèche, n'a été jusqu'à présent validé par la profession.

La progression d'une érosion interne initiée par une érosion régressive de conduit n'a pas non plus été décrite par les instituts néerlandais et américains qui ont le plus œuvré dans les méthode d'analyse de ce processus. En particulier, le temps dont dispose le maître d'ouvrage une fois que l'érosion régressive de conduit a été initiée n'est pas prédit.

Enfin, la progression d'une érosion interne initiée par la suffusion est encore très mal connue, tant en termes de cinétique que de conséquences hydrauliques et mécaniques pour le remblai (modification des perméabilités, modification de l'angle de frottement effectif, tassements,...). Ce sujet fait l'objet de recherches en cours, qui sont discutées au sein du groupe de travail sur l'érosion interne du Club européen.

3. ANALYSE ERINOH NIVEAU 1

3.1. Principe de la méthode

L'évaluation du risque d'érosion interne proposée dans le guide Erinoh a trois niveaux. Le niveau 1 est un diagnostic d'expert rapide, possible à partir d'une enquête documentaire préalable sur le projet, sa construction, son exploitation et sa surveillance. Il combine une analyse fonctionnelle simplifiée avec une analyse comportementale simplifiée. L'analyse fonctionnelle évalue la fiabilité (ou à l'inverse son degré d'exposition) du barrage selon sa conception. L'analyse comportementale évalue sa fiabilité selon son comportement historique

La fiabilité globale de la conception d'un ouvrage à l'érosion interne est supposée assurée pour n'importe quel chemin d'érosion par quatre barrières dont trois passives : Etanchéité (E), Résistance des sols à l'érosion (R) et Filtration (F) et une barrière active (A), dont l'action est de détecter les dégradations et de les éliminer pour maintenir l'ouvrage en bonnes conditions. Le jugement de la fiabilité de chaque barrière est noté sur 3 : possible mais extrêmement improbable (note=3, Probabilité de défaillance $10^{-4} < P < 10^{-3}$), très improbable (N=2, $10^{-3} < P < 10^{-2}$), improbable (N=1, $10^{-2} < P < 10^{-1}$), probable à courante (N=0, $10^{-1} < P \leq 1$). La fiabilité de chaque barrière est notée grâce à une grille d'analyse qui classe les différents états rencontrés dans les études de cas ERINOH. L'expérience d'ERINOH montre que toutes les ruptures se sont produites en l'absence de la barrière Filtration, quel que soit l'état des autres barrières et réciproquement aucune rupture par érosion interne n'est signalée avec une conception de filtre conforme à l'état de l'art. En conséquence, un degré de confiance plus élevé est accordé à la barrière Filtration qu'à celui des autres barrières avec une note N=4 et une probabilité de défaillance $< 10^{-4}$. La note globale de fiabilité d'un chemin d'érosion est la somme des notes de fiabilité des quatre barrières. La note de fiabilité d'un barrage ou d'une digue est la plus faible fiabilité parmi celles des trois principaux chemins d'érosion: (R) le remblai, incluant l'érosion du remblai vers la fondation, (F) la fondation, noté par l'indice et (C) le contact des structures traversantes (conduites).

La surveillance du comportement de l'ouvrage est nécessaire pour fiabiliser les informations issues de la conception. En conséquence la note de l'analyse comportementale va pondérer la note de l'analyse fonctionnelle par une plus-value ou une moins-value. Le comportement du barrage observé pendant l'exploitation et mesuré par l'auscultation est apprécié à partir de (1) l'intensité des épreuves passées et (2) de la classe d'érosion observée. La note est extraite deux grilles d'analyse : (1) une échelle des incidents et accidents d'érosion interne et (2) une échelle de la classe maximale d'érosion

subie dans le passé. La première grille permet de calculer une « note comportementale » pondérée par la seconde. Cette démarche est inspirée de la pratique des probabilités en diagnostic médical : un Test médical (ici : un Test de mise en eau) vient modifier l'évaluation de la probabilité (ici : la note de fiabilité) qu'un patient (ici : un ouvrage) soit atteint d'une affection particulière (ici : un mécanisme d'érosion interne non stabilisé). Elle est détaillée dans un autre article de ce colloque [17].

3.2. La feuille de calcul EXCEL du groupe de travail CFBR

Le groupe de travail CFBR sur les barrages en remblai est en train d'expérimenter la méthode de niveau 1 d'Erinoh. Patrick Soulat de Suez Consulting a mis en forme cette méthode sous la forme d'un fichier EXCEL comportant un questionnaire de 14 feuilles. Les cases cochées ont leurs résultats reportés dans trois bilans de résultats, présentés en 3 feuilles distinctes : analyse fonctionnelle, analyse comportementale et bilan de l'analyse complète récapitulative. Les cases des feuilles contiennent des commentaires (dessins ou textes explicatifs) mises en place et complétées au gré des déboires signalés par les utilisateurs. Le fichier en est à sa version 6. Un guide à l'utilisation permet lors de la première pratique d'étalonner son choix par rapport aux instructions des auteurs.

3.3. Premier test d'étalonnage : notation d'incidents par un expert et un débutant

Le premier étalonnage consiste à évaluer la note d'une rupture, d'un accident ou d'une pathologie. Les incidents sont 17 cas réels répertoriés dans le volume 3 d'Erinoh et 2 cas virtuels. Pour tester la robustesse de la méthode, l'évaluation d'un débutant (Damien Cognet, étudiant stagiaire à EDF) est comparée à celle d'un expert (Luc Deroo). Les résultats sur les barrages sont représentés dans le tableau 4 et ceux sur les digues sont dans le tableau 5.

Incident	Evaluateur	Note= 0	Note= 1	Note= 2	Note=3	Note= 4	Note= 5
Rupture	expert	10					
	étudiant	6	1				
Accident	expert	0	2	2	1		
	étudiant	2		1	1		
Pathologie	expert			1	1		
	étudiant			2			
RAS	expert					2	
	étudiant	1				1	

Tableau 4 : Notation de ruptures, d'accidents et de pathologie de barrages

Les notes de l'expert sont plus conformes à la gravité de l'incident, les notes de l'étudiant sont plus dispersées : il est logique que le jugement de l'expert soit plus sûr. Il est surtout intéressant de noter que l'écart de jugement est raisonnable pour une plage d'expérience quasi maximale. Ainsi une rupture est notée 0, voire 1. La précision est bonne car la plage de variation est très étroite. Un accident est noté 2 en moyenne, mais avec une plage de variation plus large [0 à 3]. Une pathologie est notée 3 en moyenne, voire 4. Les incidents de digues ne sont pas notés différemment des barrages, mais cette constatation reste à confirmer par un échantillon plus large.

Incident	Evaluateur	Note= 0	Note= 1	Note= 2	Note=3	Note= 4	Note= 5
Rupture	expert	2					
	étudiant	1	1				
Pathologie	expert			1			
	étudiant			1			

Tableau 5 : Notation de deux ruptures et d'une pathologie d'ouvrages linéaires (digues et canaux)

En conclusion, l'approche de niveau 1 sur ce test permet à une expertise rapide de diagnostiquer :

- un danger imminent de rupture avec une note inférieure ou égale à 1.
- une pathologie possible avec une note en dessous ou égale à 4, valeur qui peut être considérée comme un seuil en dessous duquel une analyse de niveau 2 s'impose.

3.4. Second test d'étalonnage : diagnostic d'un barrage en exploitation par 6 binomes d'experts

Les experts du groupe de travail CFBR ont ensuite analysés l'état d'un barrage étranger à partir de données d'un diagnostic d'EDF. La note basée sur ce diagnostic est qualifiée de « référence ». Le test et la note sont élaborés par Damien. Les données sont sommaires. Le cas est traité par groupe de 2. Sur la demande du BETCGB, il est demandé d'adopter deux points de vue :

- Une approche raisonnablement prudente au sens de l'Eurocode 7 (*Best estimate*),
- Une approche sécuritaire (*worst estimate*).

Les résultats dépouillés sur place déconcertent à première vue, ils sont très dispersés.

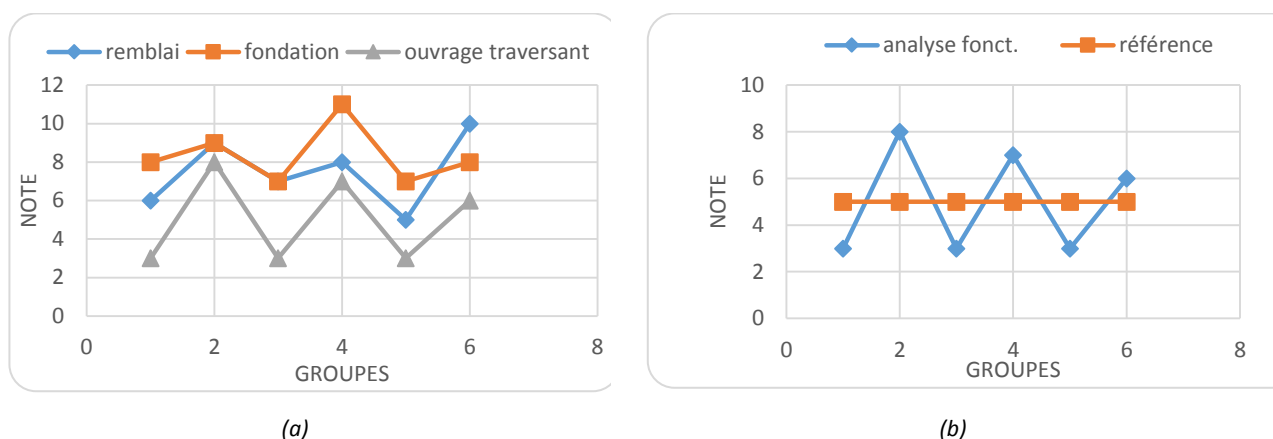


Figure 2 : (a) Notes des 3 chemins d'érosion par avec l'approche « best estimate », (b) Notes de l'analyse fonctionnelle (groupes/référence) avec l'approche « best estimate »

Mais en seconde analyse, les écarts de la Figure 2.a sont justifiés. Les grands écarts de notation concernent (1) la filtration de l'ouvrage traversant qui est le mur extérieur du bajoyer d'évacuateur et (2) la parade active. Pour ces deux rubriques, un manque de données est flagrant. Ainsi les grands écarts de jugement sont la conséquence d'un manque de données sur la fondation et le filtre qui protégeait le noyau au contact de l'évacuateur et d'une description incomplète de la notation de certaines cases. Les notes de l'analyse fonctionnelle de l'érosion le long de l'évacuateur (Figure 2.b) oscillent autour de la référence traduisant une interprétation soit optimiste soit pessimiste de la conception: mais la moyenne des évaluations est égale à l'évaluation de référence ! Ce qui est rassurant...

La première conclusion du second test est que la qualité de la notation, synonyme ici de la réduction de la dispersion des notes, exige des données claires et complètes. La seconde leçon est que ce manque de précision peut être corrigé par l'ajout de commentaires dans la feuille de calcul ou dans la notice d'utilisation.

La comparaison de l'approche raisonnablement prudente avec l'approche sécuritaire est représentés Figure 3.

L'observation de la Figure 3 montre qu'en moyenne l'approche sécuritaire fait tomber de 3 points la moyenne : ce qui est beaucoup. Dans l'évaluation sécuritaire, tous les groupes ont attribué au moins une note en dessous ou égale au seuil de 4. Cela justifie une étude de diagnostic. Le jugement sécuritaire de tous les groupes est confirmé par la réalité. Ce barrage était en révision. Dans l'évaluation raisonnablement prudente, tous les groupes ont attribué au minimum une note de 5, en faisant abstraction du manque de données qui a biaisé le jugement du risque lié à l'ouvrage traversant. Cela justifie un ouvrage sans risque notable. Le jugement raisonnablement prudent de tous les groupes est confirmé par la réalité. Le diagnostic de la révision (la « référence ») a conclu à l'absence de renforcement du barrage. L'évaluation raisonnablement prudente est plus proche de la réalité que l'approche sécuritaire : c'est un premier indice de robustesse de la démarche. D'autres sont attendus.

Ainsi, l'approche raisonnablement prudente pourrait suffire, à la condition que les données soient précises. L'absence ou le manque de pertinence des données génèrent des écarts qui justifient alors l'approche sécuritaire.

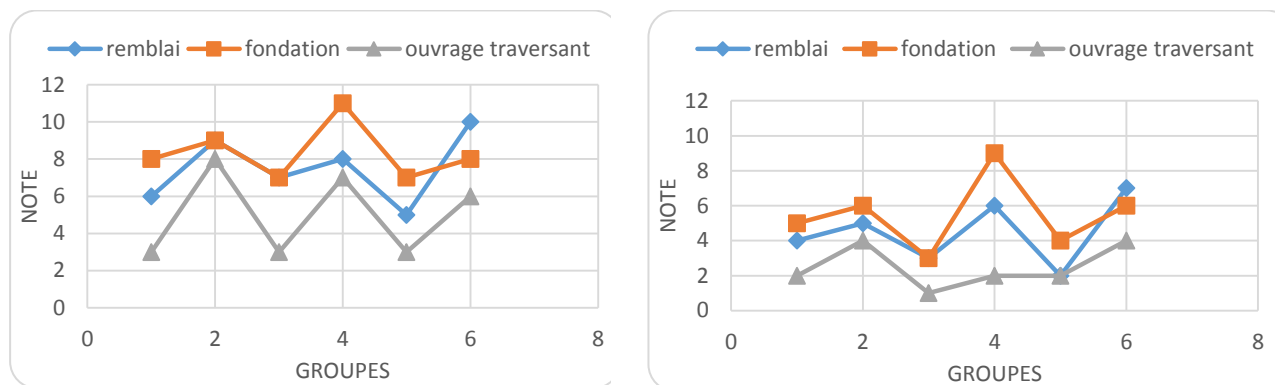


Figure 3 : Comparaison de l'évaluation raisonnablement prudente avec l'approche sécuritaire des chemins d'érosion

3.5. Troisième test d'étalonnage : évaluation d'un accident de barrage en construction par 6 binomes

Ce test est pris dans l'actualité, il s'agit de la construction héroïque de la crête d'un barrage en Amérique du Sud en mai 2018, sujette à des fuites importantes. Il est élaboré par Luc Deroo. Le cas est traité par groupe de 2 experts. Les résultats dépouillés sur place sont de nouveau dispersés et déconcertent sur le coup. Mais derechef, leur analyse montre qu'ils sont l'expression d'un jugement qui capture l'essentiel (Figure 4).

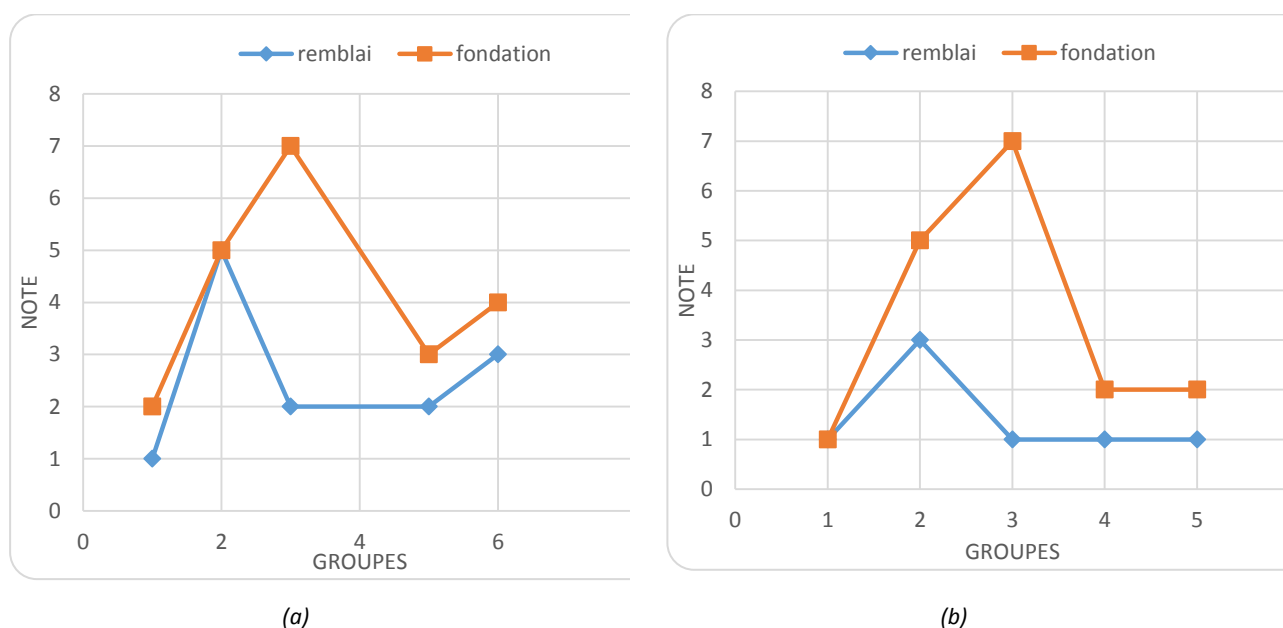


Figure 4 : (a) Notes des chemins d'érosion avec l'approche raisonnablement prudente, cas d'Ituango, (b) Notes des chemins d'érosion par groupe avec l'approche sécuritaire. Cas d'Ituango

Les grands écarts proviennent en partie des causes évoquées précédemment, mais avec en plus une raison qui accroît la dispersion : la notion de « fondation » n'est plus adaptée, puisque la fondation est en fait le barrage principal. Ce cas d'accident grave montre que l'écart de notes entre approches prudente et sécuritaire se réduit et passe de 3 à 0,5. Toutes les notes de l'approche sécuritaire sont en dessous ou égales à 3 : cette note justifie l'existence d'une pathologie. La moyenne des notes de l'approche sécuritaire est proche de 2 : cette note justifie la situation d'accident. 80% des évaluations sécuritaires attribuent la note 1 : ce seuil équivaut à une rupture probable. Toujours dans l'approche sécuritaire, aucun groupe n'attribue la note 0. La note 0 équivaut à une rupture certaine. Or la rupture ne s'est pas produite. La réalité a confirmé le jugement conservatif des 6 groupes. Le jugement raisonnablement prudent est plus dispersé, mais a en moyenne, un diagnostic à peine supérieur au jugement sécuritaire (2,5 au lieu de 2).

Après incorporation de petites améliorations au niveau de la notification et de la notice d'utilisation, le CFBR dispose d'un outil rapide de justification à l'érosion interne, basé sur la méthode niveau 1 d'ERINOH, dont la sensibilité et les limites ont été décrites précédemment, qui peut être utilisé en période probatoire par les bureaux d'études. Il suffit de le demander au groupe de travail et d'en prendre la responsabilité des résultats, dans l'attente de sa validation.

4. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Le niveau 2 reprend les principes du niveau 1 avec une application plus fouillée, au niveau du chemin d'érosion et avec des données plus détaillées. Le niveau 3 est une approche de type probabiliste, basée sur le bulletin CIGB 164, qui a été mise en pratique d'abord sur les levées de protection, car le danger de crue a des statistiques souvent bien connues et bien modélisées et les modes de rupture qu'elle déclenche se probabilitent bien en fonction du niveau d'eau.

Des améliorations à l'approche CIGB sont apportées par le groupe de travail européen et justifie la poursuite des développements. Par exemple, la prise en compte des effets 3D modifie la valeur des gradients critiques globaux d'initiation et de progression de l'érosion régressive. La rupture par suffusion est mieux comprise et simulée : suivant le pourcentage de fines érodées, elle peut soit ne pas altérer la résistance du sol, soit générer un glissement soit enfin aboutir à une rupture érosion de conduit.

La découverte et l'intégration d'une loi d'érosion rationnelle applicable à tous les cas de charge de tous les ouvrages reste un vœu pieux. Cependant des modèles couplant la loi de comportement du volume équivalent représentatif à un écoulement hydrodynamique commencent à être appliqués aux ouvrages pour analyser les effets de l'initiation de la suffusion sur la tenue du remblai [17]. D'autre part, certains maîtres d'ouvrage, comme BC Hydro, EDF et Verbund et des centres de recherche comme Irstea, Deltarès et Usace maintiennent leurs efforts dans cette voie ; le groupe de travail « Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations » du Club Européen de la CIGB accroît les synergies entre les laboratoires universitaires et les maîtres d'ouvrage du monde entier.

5. CONCLUSION

Depuis environ 25 ans, l'érosion interne est devenu un sujet d'études et de recherches au sein du CFBR. Le projet ERINOH, terminé depuis 5 ans mais épaulé par le groupe de travail européen, a permis des avancées qui ont contribué à la publication de deux bulletins techniques de la CIGB. Ces bulletins proposent des méthodologies déjà appliquées, notamment à EDF. Sur la lancée du projet ERINOH, le groupe de travail CFBR travaille à compléter les recommandations sur la tenue des remblais en testant les outils proposés par ERINOH. L'approche niveau 1 est le premier à avoir été étalonné. Les résultats sont encourageants. L'approche est rapide, mais elle ne fait pas l'économie d'une excellente connaissance de l'ouvrage. Les approches de niveau 2 et 3 feront l'objet à leur tour d'étalonnage dans les deux prochaines années, dans l'attente d'outils numériques qui offriront une aide à la décision plus physique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR, l'IREX et Michel Guerinet sans lesquels le projet ERINOH n'aurait jamais existé et Patrick Soulat, qui a pris de son temps pour mettre au point le tableur de l'approche de niveau 1.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Fry J.-J., Degoutte G., Goubet A., *Erosion Interne : Typologie, Détection et Réparation*, Barrages et Réservoirs n°6, 126 p., 1997.
- [2] Fell R., Fry J.-J. (2007). *Internal erosion of dams and their foundations*. Taylor & Francis
- [3] Bonelli S. (edt), *Erosion des géomatériaux, érosion interne et de surface*, Traité MIM série Risques Naturels, Hermès Science Publication, 416 p., 2012.
- [4] Bonelli S. (edt), *Erosion of Geomaterials*, Wiley/ISTE , 371 p., 2012.
- [5] Fry J.-J., François D., Marot D., Bonelli S., Royet P., Chevalier C., Deroo L. (2015) Study of internal erosion: contribution from Erinoh Project, *25th International Congress on Large Dam, Stavanger, Norway, 13-20 June*.
- [6] Chevalier C., Bonelli S., ERINOH Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques, Vol. 1, Méthodologie de caractérisation expérimentale, Presses de Ponts et Chaussées, 2017.
- [7] François D., ERINOH Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques, Vol. 2, Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai, Presses de Ponts et Chaussées, 2018.
- [8] Deroo L., Fry J.-J., ERINOH Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques, Vol. 3, Guide pour l'Ingénierie, Presses de Ponts et Chaussées, à paraître.
- [9] Stapledon D., MacGregor P., Fell R., Bell G., Foster M., *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd Edition, CRC Press, 2014.
- [10] Aufleger M., Fry J.-J. (2007) *Assessment of the risk of internal erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees*. Intermediate report of the European Working Group of ICOLD. Deutsches Talsperren Komitee, Technical University of Munich, Nr.114 ISBN 1437-3513, ISBN 978-3-9404476-04-3 1-12
- [11] Fry J.-J., Riha J., Julinek T. (2011) *Internal erosion in embankment dams and their foundations*. Proceedings of the Institute of Water Infrastructures. FCE. BUT. Brno. Vol.13.
- [12] Bonelli S. (edt), *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, Wiley/ISTE , 388 p., 2013.
- [13] CIGB (2015), *Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*, Bulletin 164.
- [14] CIGB (to be printed), *Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*, Bulletin 164. Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance
- [15] Bonelli S., Jommi C., Sterpi D., *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees*, Proceedings of EWG-IE 26th Annual Meeting 2018, Springer.
- [16] CFBR, *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*, Edition Cfbr, oct 2015.
- [17] Yang J. (2019). *Numerical analyses of the multi-physics problem of sinkholes in the vicinity of a dike or a linear geo-structure*. Thèse à l'Ecole Centrale de Nantes.
- [18] Bonelli S., Brivois O., *The Scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2007.
- [19] Béguin R., *Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre*, Thèse de docteur de l'université de Grenoble, décembre 2011.

