

Le Projet National Erosion Interne.

The National Research Programme on Internal Erosion.

Jean-Jacques FRY

EDF CIH,
73 373 Le Bourget du Lac Cedex
Tel. 04 79 60 61 78
Fax 04 79 60 62 98
Courriel : jean-jacques.fry@edf.fr

Résumé

Parmi les causes de rupture de digue, l'érosion interne est régulièrement citée. L'érosion interne est un terme unique qui regroupe des phénomènes distincts, encore mal connus. L'IREX a décidé de présenter un projet de Recherche National dans le but d'améliorer la connaissance de cette pathologie et la sécurité des ouvrages qui en sont atteints. Ce projet de recherche porte sur les 8 thèmes suivants :

- A Bases de données et grille d'analyse de dysfonctionnements
- B Seuils d'arrachement et cinétiques d'érosion des sols pulvérulents
- C Migration de grains et suspension dans les milieux poreux
- D Analyse de la pérennité des milieux injectés
- E Modélisation du développement d'un renard
- F Identification des causes de dégradation végétales et recommandations
- G Méthodes de détection de l'érosion interne
- H Valorisation : information et publications.

L'objectif, le contenu et le livrable de chaque axe est décrit dans cette communication.

Abstract

Internal erosion is one of the most frequent modes of failures of dykes and levees. It is one word used to describe different phenomena, not well known yet. IREX decided to launch a Research National Programme in France with the objectives to improving the knowledge of that pathology and the safety of impacted structures. That R&D Programme gets 8 themes :

- A Data bases and incidents assessment framework*
- B Threshold and yield of initiation and flow rule for uncohesive soil*
- C Particles Transport in porous media*
- D Durability of injected soils*
- E Modelling of piping development*
- F Causes and guidelines for root damages*
- G Methods of detection*
- H Valorisation : Information and Publications.*

Objectives and deliverables of every theme is described in this paper .

Mots-clés : digues, barrages en remblai, érosion interne, renard, suffusion, auscultation

Keywords : dykes, embankment dams, internal erosion, piping, suffusion, monitoring

1 Le contexte du Projet National

1.1. Les enjeux du Projet National

En France, de 1970 à 1995, plus de 70 manifestations d'érosion interne ont été recensées par le Comité Français des Grands Barrages sur l'ensemble des barrages ainsi que sur les digues d'aménagement hydroélectriques (soit 550 grands barrages, plusieurs milliers de petits barrages et plus de 1300 km de digues).

Les incidents les plus nombreux concernent les digues : 36 incidents sur un peu plus de 1 300 km de digues ont été signalés. Les levées et les barrages de protection contre les crues apparaissent les plus fragiles. Leur fragilité est inhérente au caractère exceptionnel et rapide de la crue, à leur réalisation souvent ancienne et aux moyens de surveillance souvent très limités. 16 brèches se sont ainsi produites lors de deux crues du Rhône en octobre 93 et janvier 94 sur un tronçon d'une centaine de km de levées limitant le champ d'inondation majeur du Rhône à partir d'Arles.

10 incidents sérieux sont apparus sur des petits barrages (hauteur inférieure à 15 m) dont trois ont taillé une brèche dans le remblai entraînant sa rupture. 8 incidents concernent le parc des 250 barrages en remblai français, classés grands barrages au sens de la CIGB. Ils affectent 2 barrages construits avant 1950, 3 construits entre 1950 et 1970, et 3 après 1970, mais aucune brèche n'eut le temps de se développer.

L'enquête n'est pas exhaustive et la réalité pourrait bien doubler l'évaluation du nombre d'incidents. Le nombre total d'incidents postérieurs à 1970 et recensés sur les digues ou les barrages est certainement très inférieur à la réalité (durant l'été 2001, le barrage des HOUCHES, vieux de 200 ans, s'est rompu au petit matin, balayant une vingtaine de voitures stationnés dans les rues de Châteauneuf-les-Bains ; heureusement aucune victime n'est à déplorer à cette heure matinale).

Au niveau européen, une enquête lancée et interprétée par un groupe de travail animé par le Dr. Andrews CHARLES (U.K.) a recensé plus d'une soixantaine d'incidents sérieux constatés ces dernières années en Europe.

Les événements de fortes crues qui se sont produits en Europe au cours des dernières années ont de nouveau montré la fragilité des digues vis à vis de l'érosion interne, avec des conséquences parfois tragiques (digue d'Aramon, septembre 2002), et des dégâts matériels considérables. Le problème est récurrent, en moyenne, une rupture par érosion interne est recensée en France depuis 1970. Les digues et les petits barrages sont les plus touchés. Une amélioration de la sécurité s'impose.

1.2. L'organisation du Projet National

Le Ministère de l'Équipement et celui de la Recherche, conscients de la nécessité d'améliorer la sécurité et du coût de la mise en conformité, sont favorables à une étude approfondie des causes, des moyens de détection et des méthodes de réparation de l'érosion interne. Ainsi, l'IREX a reçu leur accord pour monter un Projet National sur ce thème.

L'IREX, Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation, est chargé pour le compte des deux ministères du montage de projets de recherche intéressant la collectivité nationale et fédérant les principaux acteurs en France : maîtres d'ouvrages, ingénieurs-conseil et entrepreneurs.

L'IREX a donc lancé une étude de faisabilité avec les représentants de :

- BIDIM, entreprise pour les réparations par géotextiles,
- CEMAGREF, bureau de recherches travaillant pour le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable
- CETMEF, bureau de recherches surveillant les Voies Navigables.
- Ecole Centrale de Nantes
- EDF, représentant les maîtres d'ouvrage
- FNTP, représentant les entreprises de TP
- IFP, bureau de recherches, développant la production d'huiles par érosion interne,
- IREX, organisateur
- IUT de Saint-Nazaire, laboratoire d'hydraulique
- MC Consulting, bureau d'études pour les réparations par injections,

L'étude a été validée par le Comité d'Orientation du RGPU (Réseau de Recherches et d'Innovations technologiques en Génie Civil et Urbain). Le montage financier est en cours. S'il est accepté fin 2004, le projet démarrerait en 2005. Tout organisme intéressé est invité à participer. Le financement est assuré à 60% sur fonds propres des organismes, 20% par les cotisations et 20% par l'état.

Le contenu comprend les axes de recherche suivants :

- A Bases de données et grille d'analyse de dysfonctionnements
- B Seuils d'arrachement et cinétiques d'érosion des sols pulvérulents
- C Migration de grains et suspension dans les milieux poreux
- D Analyse de la pérennité des milieux injectés
- E Modélisation du développement d'un renard
- F Identification des causes de dégradation végétales et recommandations
- G Méthodes de détection de l'érosion interne
- H Valorisation : information et publications.

Les objectifs et le contenu des livrables de chaque axe sont décrits ci-après.

2 Thème A : Bases de données de dysfonctionnements

2.1. Objectif

La constitution d'une base de données de ruptures, incidents ou dysfonctionnements répond aux attentes suivantes :

- Connaissance des pathologies par la description d'études de cas. Ces dernières établies par les experts en charge de la sécurité ont les garanties minimales de cohérence et d'analyse.
- Analyse statistique des pathologies, classement des incidents par leur fréquence d'occurrence.
- Constitution de cas de références utilisées pour la validation de logiciels de modélisation de renard (Thème E).

2.2. Livrable

Une base de données mise à disposition sur Internet est le livrable. Elle comprend deux applications :

- la première contient une cinquantaine de fiches au contenu exhaustif en vue de la validation de la modélisation ;
- la seconde plus fournie contient plusieurs centaines de fiches d'incidents en vue du retour d'expérience et du traitement statistique de l'occurrence de ces incidents.

Le support informatique permet une interrogation rapide, avec accès facile et sécurisé via Internet.

La recherche lors d'une consultation est prévue par choix de champs et mots-clés. Les références sont mises à disposition en ligne.

Les données concernent les ouvrages des participants du projet plus un certain d'ouvrages rompus à l'étranger. La collecte de données complémentaires est faite par les membres du Club Européen de la Commission Internationale des Grands Barrages, la CIGB.

La maintenance après le Projet National (PN) est en cours de discussion, le soutien d'une organisation internationale comme la CIGB est recherché.

Le Projet national s'appuie sur l'expérience récente de mise en service d'une base de données interactive via Internet dédiée aux barrages et digues relevant du Ministère de l'Ecologie et sur celle d'un expert autrichien qui, après avoir travaillé

sur le sujet depuis plus de vingt ans, a la plus grande collection au monde de photos et d'articles de ruptures de barrages.

3 Thème B : Seuils et cinétiques d'érosion des sols pulvérulents

3.1. Objectifs

La revue bibliographique conduite sur l'érosion interne a abouti au constat qu'un grand nombre de digues françaises souffrent de suffusion et que les seuils d'apparition de ce type d'érosion n'ont jamais été mesurés sur notre territoire. De nombreuses approches de la cinétique d'érosion existent mais n'ont pas été validées à moyenne ou grande échelle.

Les livrables sont les seuils d'initiation, d'évolution et de rupture en brèche, sur les ouvrages les plus fréquents en France, les digues de grand linéaire. L'existence de ces seuils permettra de mieux évaluer la marge de sécurité des digues. A cette fin, cinq expérimentations mettant en œuvre les sols les plus courants, les sols alluvionnaires, sont prévues.

3.2. Livrables : les cinq expérimentations

3.2.1. Domaine d'application du renard, de la boullance et de la suffusion

Un soutènement créant une perte de charge (palplanches, paroi moulée, etc.) peut se rompre sous l'effet de l'écoulement ascendant de trois manières distinctes : la boullance, le renard ou la suffusion interne. Le livrable est la mise en évidence du domaine d'application et du seuil respectif de chaque mécanisme de rupture. Ce résultat sera de la plus grande importance en définissant des seuils d'alerte (gradients critiques) à la profession.

L'expérience doit valider soit la théorie de MONNET, où le gradient critique « de renard » est estimé à l'aide de la perméabilité, soit celle de SKEMPTON et BROGAN, dont le gradient critique « de suffusion » est estimé à l'aide de la courbe granulométrique. L'expérimentation tentera d'expliquer les résultats de la littérature non expliqués à ce jour, en introduisant l'effet des contraintes horizontales sur l'éventualité d'un claquage hydraulique vertical (MONNET).

L'influence des caractéristiques de nature (granulométrie) et d'état (densité, contrainte en place, perméabilité) et d'histoire du matériau sur les gradients critiques sous des écoulements ascendants sera étudiée.

3.2.2. Seuil et cinétique de la suffusion dans les digues en alluvions

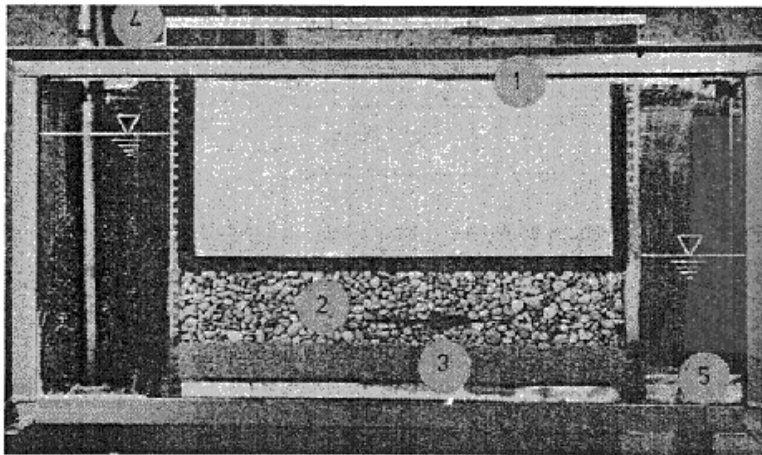
Le livrable est la connaissance d'une part du seuil en termes de gradient hydraulique et de vitesse critiques à partir desquels la suffusion est initiée et d'autre part la loi de transport solide pour des valeurs supérieures au seuil sur les alluvions du Rhône, du Rhin et de l'Isère .

L'initiation et le développement de la suffusion seront mesurés au laboratoire d'hydraulique en vraie grandeur. Des tronçons de digue d'une largeur d'environ 2 m seront réalisés sur une longueur variable pouvant être supérieure à 10 m. La hauteur sera limitée par une géomembrane et le poids de la partie écrêtée sera appliqué par des plots en béton. Deux types de compactage, faible et fort, seront simulés. Les conséquences de la pose d'un géotextile seront étudiées sur le cas le plus érodable. Une charge d'eau maximale de 3m est prévue. La suffusion de contact sera étudiée au contact des alluvions grossières et des alluvions fines (suffusion des matériaux du Rhône et de l'Isère) et la suffusion interne sera analysée dans la grave du Rhin (instabilité du sable dans la grave). Plusieurs types de digue seront testés. Chaque essai durera 1 à 15 jours. Les paramètres mesurés sont les niveaux d'eau par piézomètre, le débit linéaire et la granulométrie des matériaux entraînés.

3.2.3. Seuil de filtre ouvert et cinétique de la suffusion de contact

Le livrable est l'abaque extrapolant les conditions de filtre ouvert trouvés par la CUR et BRAUNS aux matériaux alluvionnaires français. Un filtre ouvert, est un matériau drainant qui a une fonction de filtre tant que le gradient hydraulique ne dépasse pas une certaine valeur seuil (gradient critique). L'abaque fournit le gradient critique et le débit de transport solide en fonction du fuseau granulométrique, du mode de mise en place, de la nature du filtre aval, de la contrainte verticale.

Les essais d'érosion représentent un dépôt alluvionnaire, comme un bicouche horizontal dans une cuve du même type que celle de BRAUNS (Fig. 1), tel le limon sur la grave de l'Isère ou du Rhône. La partie fine du bicouche sera constituée de limon non cohésif 0/1mm et la partie grossière aura un d_{15} 10 à 30 fois plus élevé. Ces granulométries sont non traitées à ce jour et correspondent au cas typique des sols alluvionnaires français (digues du Rhin, du Rhône, de l'Isère, ...). Ces essais en cuve peuvent servir à piloter les essais précédents prévus au laboratoire d'hydraulique.



- | | |
|-----------------|------------------|
| ① FLUME | ④ WATER ENTRANCE |
| ② FILTER - SOIL | ⑤ WATER EXIT |
| ③ BASE - SOIL | |

Figure 1 : cuve expérimentale de la suffusion de contact

3.2.4. Lois d'érosion dans un milieu sous contrainte avec ou sans géotextile

Le livrable est la quantification des quatre étapes d'érosion définies par R. FELL (2000) : absence d'érosion, érosion continue, érosion croissante et rupture par érosion en termes granulométriques, hydrauliques et mécaniques dans les matériaux alluvionnaires.

L'influence de l'état initial, compactage et teneur en eau, de la contrainte verticale et de l'interposition d'un géotextile sera examinée. Plusieurs prises de pression permettront de suivre les pertes de charge verticales.

3.2.5. Développement de l'érosion par renard

Un autre livrable est la mise à disposition de données de la loi de transport solide des matériaux pulvérulents avec ou sans fines dans un conduit de renard à échelle relativement importante.

À l'heure actuelle, les modèles mathématiques de simulation de renard fonctionnent avec une loi issue du transport solide en rivière. Cette loi sera vérifiée sur modèle physique. D'autre part, l'incidence du pourcentage de fines, de la

teneur en eau et du compactage sur la capacité du sol à soutenir un conduit de renard pourra aussi être évaluée.

Le dispositif expérimental s'inspire des expériences récentes de WAN et FELL conduites dans le domaine des argiles et l'adapte aux matériaux granulaires en augmentant le diamètre à 300 mm (schéma sur la figure 2).

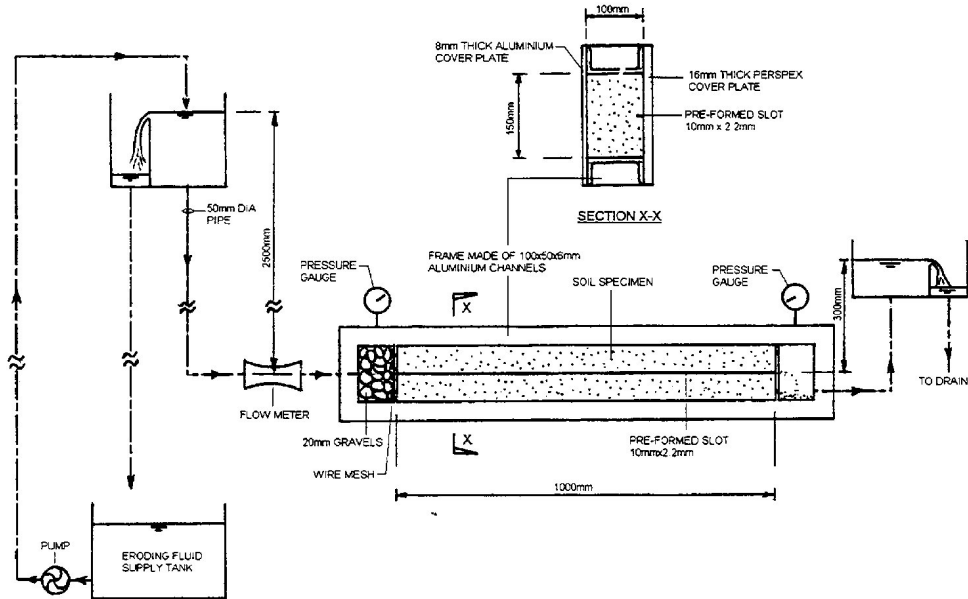


Figure 2 : dispositif expérimental développé par Wan et Fell

4 Thème C : Migration de grains et suspension dans les milieux poreux

4.1. Objectifs

L'objectif principal de ce thème consiste à améliorer la connaissance des mécanismes de transport et de colmatage dans des milieux divers (filtres, drains, milieu à injecter, élément industriel) avec application à l'amélioration des capacités et des critères de transport ou de rétention existants. Cette connaissance doit être

acquise par l'observation et restituée par la modélisation. Des résultats sont attendus dans le domaine des injections, du drainage et de la filtration industrielle.

4.2. Livrables

4.2.1. Modélisation expérimentale

Essais d'Injection en laboratoire

Des propositions d'amélioration des critères d'injectabilité et de dimensionnement d'éléments de filtration sont le premier livrable.

L'obtention de résultats expérimentaux et leur intégration dans une base de données pour la modélisation numérique constitue le deuxième livrable.

En ce qui concerne la nature de la suspension, l'accent est mis sur les résines, les coulis de ciment ultra fin, et les suspension de nano-silice ou autres produits innovants. On pourra étudier des fractions solides de nature différente, telles que des particules inertes, pour lesquelles ne se pose pas le problème de la prise, inhérent aux ciments, sur la demande de certains industriels.

La partie expérimentale s'appuie sur les moyens actuellement disponibles des cuves et des colonnes d'injection et d'infiltration permettant de suivre l'arrêt de fuite provoqué par deux situations typiques d'érosion interne : suffusion de contact et suffusion interne.

Essai de colmatage d'éléments drainants et de filtration de particules

Le livrable est l'étude du colmatage d'éléments drainants.

L'étude menée sur l'érosion dans un sol naturel au laboratoire doit quantifier les effets de la migration des particules fines sur la modification de la perméabilité du sol et de ses caractéristiques mécaniques. La technique de traçage en colonne au laboratoire est l'outil principal de cette étude qui se découpe en deux volets :

- l'influence de la vitesse d'écoulement (ou généralisée par le nombre de Reynolds) sur le comportement de transport et la cinétique de dépôt et de relargage des particules,
- la modélisation physique et numérique de la variation (chute) de perméabilité (ou porosité) due au dépôt et au relargage des particules en milieu à faible perméabilité.

En plus des modifications dans la filtration, les problèmes d'érosion interne constituent une cause d'effondrement dans les sols. Les études sont menées sur une colonne de filtration au laboratoire pour mettre en évidence l'influence des paramètres hydromécaniques sur la nature des particules fines en migration (taille,

quantité) d'une part, et d'autre part sur la modification des propriétés mécaniques des sols.

Analyse du colmatage de géotextile

La caractérisation des conditions éventuelles de colmatage d'un géotextile en fonction de la granulométrie de la suspension, de sa concentration, de la vitesse de l'écoulement et de la structure du géosynthétique est le principal livrable.

Le programme d'essai se limite à un type de configuration : sablon fin de l'Isère par exemple ou alluvions du Rhône, après « écrêtage » à un certain diamètre de grain de manière à ne considérer que la fraction fine susceptible d'être arrachée (thème C). La granulométrie étant définie, les paramètres à considérer sont :

- la concentration de la suspension,
- les conditions hydrauliques : flux ou différence de charge imposé(e),
- les paramètres structuraux du géotextile : tissé ou non tissé, épaisseur, diamètre de fibre, porométrie, ouverture de filtration, etc.

La migration des grains dans le milieu fibreux est analysée au travers de la courbe d'évolution dans le temps de:

- la masse et de la granulométrie du sol ayant traversé le géotextile à partir d'un granulomètre laser pour les granulométries de sol fin.
- la masse et de la granulométrie du sol retenu dans et sur le filtre,
- l'augmentation de pression à l'amont du filtre, représentatif du colmatage dans le cas d'un flux imposé, ou la réduction du flux dans le cas d'un écoulement à charge constante.

4.2.2. Modélisation numérique

La partie modélisation s'appuie conjointement sur une approche type milieu continu et sur une approche milieu discret. L'association des deux méthodes basée sur la modélisation discrète pour une approche locale et la modélisation continue pour une approche plus globale sera développée.

Modélisation du milieu continu

Le livrable est la modélisation des modèles de transport pour simuler les expériences réalisées. Cette évaluation permet d'améliorer les modèles de transport et de les adapter à des configurations plus larges que celles actuellement envisagées. En particulier, ces modèles seront appliqués au colmatage d'éléments drainants par des particules fines. Sur la base d'approches probabilistes, les résultats d'essai permettront de caler des lois de rétention et d'évaluation du risque de colmatage.

Modélisation numérique discrète

Le livrable est une modélisation du phénomène de migration de grains dans un milieu poreux. En particulier les diverses forces d'interaction entre grains et leur conséquence sur les éventuels colmatages ou érosions internes et l'évolution de la perméabilité seront simulées sur une base physique locale pertinente. Une attention particulière sera portée sur la définition des forces d'écoulement, afin de les rendre plus réalistes que la loi de Stokes et sur les forces d'attraction physico-chimique qui interviennent dans la prise du liant.

Compte tenu de la capacité actuelle des ordinateurs disponibles et de la complémentarité entre l'approche discrète (locale) et l'approche continue (à l'échelle de l'ouvrage), l'analyse discrète est limitée à un volume élémentaire représentatif (VER). L'analyse numérique simule un écoulement chargé de particules migrantes ou non, globalement monodimensionnel dans un volume tridimensionnel. Les variables seront l'évolution de la porosité, le nombre de particules piégées ou arrachées ainsi que le nombre de particules mobiles en entrée et en sortie du VER. Ce type de modélisation numérique doit permettre une modélisation réaliste des lois d'évolution de la perméabilité liées à ces phénomènes locaux. Ces lois pourront ensuite être introduites dans les formalismes de modélisation continue.

Intégration des échelles milieu discret et milieu continu

Un modèle général permettant un aller-retour entre les deux échelles pour permettre de prendre en compte une évolution des caractéristiques hydrodynamiques du milieu poreux lors d'un colmatage progressif de ce milieu sera le livrable.

5. Thème D : Pérennité des sols injectés

5.1. Objectifs

Les objectifs sont :

- ❑ une meilleure compréhension des mécanismes élémentaires contrôlant les processus de dégradation (initiation, développement) en milieu agressif, avec la mise en évidence de l'influence de paramètres significatifs du problème : principalement la nature de la suspension, la nature et l'état du milieu injecté et le processus d'injection ;
- ❑ la mise en évidence des procédés les plus durables ;
- ❑ le développement d'outils de caractérisation et de quantification du degré de dégradation atteint dans ces matériaux ;
- ❑ proposition de recommandations pour la profession ;

5.2. Livrables

Les recherches développées seront exploitées sous deux angles différents :

- ❑ amélioration de la compréhension des mécanismes élémentaires qui contrôlent la dégradation sous gradient hydraulique des sols traités ;
- ❑ recommandations pour les praticiens, concernant la conception, le dimensionnement et les méthodes d'exécution des sols traités devant être soumis à des écoulements.

Les matériaux sont préparés soit par injection, soit par mélange entre un sol et un coulis selon un protocole à définir. En ce qui concerne les liquides de percolation, des liquides de différentes compositions (acidité, ions, lixiviats, etc.) permettront de mettre en évidence l'influence du dosage de composants spécifiques sur les comportements observés. En ce qui concerne les protocoles expérimentaux, tout d'abord une expérimentation permettant de tester l'érodabilité du milieu, bien adaptée aux matériaux d'intérêt dans ce travail et représentative des phénomènes à mettre en évidence, sera conçue. L'altération du matériau à différents âges, le « jeune » âge, correspondant à une période où la prise n'est pas encore totale, pouvant par exemple apparaître comme une phase critique sera mesurée.

Une réflexion sur la modélisation du processus de dégradation du sol traité, basé sur la prise en compte des couplages chimiques et mécaniques dans la description des comportements observés sera proposée. Un tel travail théorique serait mené en lien étroit avec les travaux expérimentaux qui permettront de conforter l'activité de modélisation.

6 Thème E - Modélisation du renard

6.1. Objectifs

De nombreuses approches sur le sujet de la cinétique d'érosion existent mais elles n'ont pas été validées à moyenne ou grande échelle. L'objectif est d'évaluer les logiciels de modélisation existants et de les améliorer.

6.2. Livrables

Quatre tâches sont programmées :

6.2.1. Analyse d'études de cas pour validation

Des données de cas réels de rupture in situ ou en laboratoire sont analysées pour définir les principaux phénomènes à modéliser. Ces études de cas sont rentrées dans une base de données, comme des références de validation pour l'étape suivante.

6.2.2. Evaluation des codes existants

Cette étape consiste à pointer les limites des codes actuels. Les codes actuels, basés sur des lois de transport de solides en rivière, seront évalués sur des cas types. Pour cela des comparaisons avec des cas in situ ou de laboratoire sont réalisés et analysés. Le bilan de cette évaluation précise les lacunes des modèles actuels et les hypothèses à modifier.

6.2.3. Faisabilité d'une nouvelle modélisation de la cinétique d'érosion

La progression de l'érosion a déjà été analysée en développant un modèle poro-mécanique ne présumant pas de la géométrie de la zone érodée. Pour cela le principe retenu est de considérer deux zones :

- la zone où le sol est considéré intact dans laquelle on fait un calcul poro-élastique fragile d'une part,
- la zone érodée dans laquelle on fait un calcul d'écoulement du mélange sable plus eau en considéré comme un fluide homogène d'autre part.

Le problème est que, pour chacun des calculs considérés de façon indépendante, une partie des conditions aux limites n'est pas connue a priori. Un algorithme de calcul, qui permet de gérer la pression dans le mélange à l'interface mélange-sol et le flux de fluide à cette même interface, a été validé dans un cas unidimensionnel. Le travail proposé dans le cadre de ce thème est de tester la faisabilité d'une modélisation 3D.

En ce qui concerne les codes de rupture de remblai, des tests seront réalisés pour jauger différentes hypothèses de couplage du transport solide par érosion et par instabilité. La façon de décrire l'instabilité, le mécanisme de rupture, le critère, les propriétés mécaniques et le modèle géométrique 1D, 2D ou 3D sera analysée.

6.2.4. Etablissement du cahier des charges d'un modèle pour l'ingénierie

Il est fort peu probable que la réalisation d'un logiciel validé pour l'ingénierie soit possible dans la durée du projet. En revanche, l'analyse réalisée au sein du projet doit permettre de définir les hypothèses physiques, les méthodes numériques et le support informatique à partir duquel le modèle serait développé.

7 Thème F : Identification des causes de dégradation végétales et recommandations

7.1. Objectifs

L'objectif général est d'identifier les risques d'érosion interne des digues liés au développement racinaire de la végétation arborée, en fonction de divers paramètres :

- espèces végétales ;
- constitution de la digue et de sa fondation (nature des matériaux, stratification, compactage) ;
- position et mouvements de la ligne phréatique ;
- zone climatique.

Les racines d'arbres, surtout après leur pourrissement consécutif à la mort ou à l'abattage des arbres, figurent parmi les chemins privilégiés de développement des écoulements, et donc de l'érosion interne, dans les digues et parfois aussi dans les barrages, tel le cas du barrage de Torcy-Vieux.

Sur de très nombreuses digues qui ont fait l'objet de plantations d'alignement, vis à vis desquelles, on se trouve dans le dilemme suivant :

- recommander d'abattre les arbres et ainsi enclencher un processus analogue à celui décrit ci-dessus pour Torcy ;
- ne rien faire et se retrouver dans la même issue le jour où les arbres disparaîtront de leur mort naturelle.

7.2. Livrables

Le livrable sera un document de synthèse, décrivant de façon structurée les observations faites sur le terrain et proposant des recommandations, d'une part pour la gestion de la végétation arborée existante, d'autre part pour la prévention des risques d'érosion interne liés aux racines, lorsque ces risques existent.

La mise au point de méthodes d'investigation non destructives sera également un résultat de cet axe, si la recherche de partenaires sur un tel sujet s'avère fructueuse.

8 Thème G : Détection de l'érosion interne

8.1. Objectifs

Les objectifs sont doubles :

- terminer le travail d'évaluation des méthodes géophysiques à grand rendement engagées dans le projet CriTerre, en s'intéressant aux périodes de crues et de post crues sur digues sèches.
- évaluer un dispositif de surveillance (monitoring) à base de méthodes géophysiques des fuites à travers les digues de canaux ou les écrans d'étanchéité.

Ce thème de recherche répond au besoin de détection de l'érosion interne. Deux applications sont ciblées :

- la prévention des digues sèches contre les crues
- la détection des fuites à travers les digues et les écrans étanches.

Cet axe propose de balayer les techniques existantes ou innovantes pour finalement établir un guide méthodologique pour les exploitants.

La détection d'hétérogénéités dans les digues sèches a fait l'objet de travaux dans le cadre du projet Cri-Terre. Dans ce cadre, plusieurs techniques avaient été mises en œuvre sur digues sèches. Leur aptitude à localiser des zones de forte perméabilité avait été évaluée. Un ensemble de recommandations est regroupé dans le rapport de synthèse [Fauchard, 2004]. Cependant cette évaluation est à compléter. Si l'on considère un épisode de crue sur ces ouvrages, les contrastes de teneur en eau, induits dans les matériaux constitutifs de l'ouvrage par la mise en eau, sont susceptibles de marquer les zones d'érosion interne et de les rendre plus facilement détectables. Ainsi, la pertinence des différentes techniques de détection de l'érosion interne peut être validée en période de crue. Or aujourd'hui, cela n'est pas fait.

Les travaux menés par EDF depuis 2001 sur la détection de fuites à travers les digues de canaux qui relient les réservoirs aux centrales hydroélectriques au moyen d'un dispositif de surveillance en continu, ont pour objectif de définir une installation qui puisse alerter l'exploitant en cas d'apparition de fuite brusque sur ses ouvrages. La technologie de référence est aujourd'hui la fibre optique, disposée en pied de digue de manière à détecter les fuites de l'ouvrage quelle que soit leur localisation. Le principe de la mesure des fuites avec la fibre est la mise en évidence de singularités thermiques. D'autres axes de recherche complémentaires à la technologie « fibre optique », sont possibles. La mise en

œuvre des méthodes géophysiques pour réaliser une surveillance en continu d'un ouvrage est un autre moyen de détecter l'apparition de fuites concomitantes à une érosion interne.

8.2. Livrables

8.2.1. Les digues à sec

Le livrable est un guide méthodologique sur l'apport de campagnes de mesures en crue à la détection d'anomalies de perméabilités et donc de zones à risque de renards. Ce guide s'appuie sur l'organisation et l'interprétation de campagnes de mesures à grand rendement :

- ❑ la première qui sera mise en œuvre dans des délais très courts, pendant ou juste après une crue ayant sollicité significativement une digue,
- ❑ les suivantes identiques, la digue étant redevenue "sèche", de façon à disposer de données comparatives en crue et hors crue.

Les étapes sont :

- Définition précise des protocoles d'essais et préparation d'une campagne d'investigations à réaliser en crue ou en immédiat post-crue ;
- Identification de gestionnaires de digues prêts à participer à l'opération (Camargue, Loire, Isère, Agly, Aude, etc.) ;
- Suivi d'un ou plusieurs événement(s) de crue ;
- Campagnes de mesures comparatives à sec, quelques semaines ou quelques mois après crue(s) ;
- Analyse comparative des résultats ;
- Méthodologie et recommandations pour des investigations en crue.

8.2.2 Fuites à travers digues et écran

Le livrable est un dispositif de surveillance d'ouvrages en cours de construction (parking) ou en exploitation surveillée (digue qui fuit).

Les tâches prévues sont les suivantes :

- ❑ Identification de plusieurs sites pilote
- ❑ Reconnaissance de premier niveau des ouvrages
- ❑ Sélection d'un ou plusieurs sites et d'une zone d'essai
- ❑ Définition détaillée du dispositif de monitoring
- ❑ Installation du dispositif
- ❑ Mise au point du protocole d'acquisition de données.
- ❑ Acquisition de données en période courante.
- ❑ Définition et réalisation de plusieurs essais de fuite artificielle.
- ❑ Bilan des essais et retour sur la conception du dispositif.

- ❑ Analyse technico-économique du dispositif pour une utilisation sur grands linéaires ou sur zones ciblées.

9 Thème H : Recommandations et publication

9.1. Objectifs

Assurer la diffusion de l'information et vulgariser les acquis du projet dans la pratique.

9.2. Livrables

Un premier livrable est le compte-rendu d'un atelier international. L'objectif est de réunir un panel d'experts afin d'évaluer le démarrage du projet et de contribuer à sa réussite en aidant à l'interprétation des résultats. Les premiers résultats seront présentés à un panel d'expert. Ces derniers évalueront les directions de recherche et proposeront interprétations et améliorations.

Le livrable final du projet est un livre à l'usage des maîtres d'ouvrage, des ingénieurs-conseils et des entrepreneurs dont l'objet sera l'amélioration de la conception et de la maintenance des digues. Le plan du guide est le suivant :

- ❑ Le premier chapitre est consacré à la typologie des phénomènes.
- ❑ Le second chapitre est centré sur la quantification des lois d'érosion
- ❑ Le troisième chapitre est sur les lois de filtre pour lutter contre l'érosion
- ❑ Le quatrième chapitre est un recueil de règles pour la conception
- ❑ Le cinquième chapitre est consacré à la détection des pathologies
- ❑ Le sixième chapitre est consacré à la maintenance et réhabilitation des digues.

Une présentation publique du livrable est prévue en fin de projet. Les associations savantes y seront invitées.

10. Conclusion

L'ingénieur chargé de la sécurité des digues est démuné de bases scientifiques et techniques pour évaluer la marge de sécurité de son ouvrage face à un risque d'érosion interne et optimiser les dépenses de maintenance.

Le Projet National Erosion Interne a la volonté de lui fournir un guide de recommandations pour améliorer le jugement des ingénieurs-conseils et la pratique de la maintenance des maîtres d'ouvrage.

Tous ceux qui sont soucieux de cette amélioration sont conviés à rejoindre ce Projet qui démarre à la fin de l'année 2004.