

## Objectifs

La France compte des milliers de barrages de toutes fonctions, de l'ordre de 8 000 km de digues de protection contre les inondations, 6 700 km de voies d'eau navigables endiguées et plus de 1 000 km de digues d'aménagement hydroélectrique et de grands canaux d'irrigation.

L'érosion interne, qui est définie comme l'entraînement progressif des particules constituant l'ouvrage sous l'action de l'écoulement qui le traverse, est à l'origine de la plupart des ruptures de digues engendrées ces dernières années par des crues. Elle fut responsable des 16 départs de brèches des digues de Camargue durant les crues du Rhône d'octobre 1993 et janvier 1994, ainsi que des brèches de la crue du Gard de septembre 2002 qui a coûté la vie à cinq personnes et causé des pertes équivalentes à 1 200 millions d'€.

En décembre 2003, la crue de la basse vallée du Rhône engendrait plus de 100 points de désordre dont une demi-douzaine de brèches sur les 500 km de digue sollicités, causant 845 millions d'€ de dégâts sur cinq départements.

# Projet National ERINOH

## Érosion INterne des Ouvrages Hydrauliques

### ... suite Objectifs

Le Projet National ERINOH en s'attaquant à l'étude d'un des mécanismes de rupture les plus complexes et dangereux des barrages et des digues a comme objectif de fond essentiel d'améliorer la sécurité des biens et des personnes qui vivent à proximité et/ou à l'abri de ces ouvrages.

Le second objectif fort est d'œuvrer pour la durabilité des aménagements hydrauliques dont les enjeux socio-économiques sont essentiels. Le projet devrait permettre d'économiser 100 millions d'euros de travaux de confortement par la mise au point de méthodes de reconnaissance et de diagnostic plus performantes permettant de définir des travaux répondant mieux à l'optimum technico-économique.

Le Projet National ERINOH vise donc à diagnostiquer la marge de sécurité d'un ouvrage hydraulique à partir d'une meilleure connaissance des manifestations d'une loi globale d'érosion des matériaux.

### Programme réalisé

*A la suite de la synthèse de l'état de l'art et de l'étude de faisabilité du projet, un séminaire a été organisé en 2005 à Aussois, au cours duquel 37 participants indépendants, dont 23 experts étrangers, ont validé les objectifs.*

*Les travaux du Projet National ont été organisés en 7 thèmes (A à G), dont 2 (B et F) ont bénéficié d'un financement de l'Agence Nationale de la Recherche ANR, les 5 autres demeurant dans le cadre du fonctionnement habituel des Projets Nationaux gérés par l'IREX.*



Le barrage des Houches rompu après deux siècles d'exploitation, suite à une érosion le long de sa conduite de vidange. Photo Cemagref

## A

### Réalisation d'une banque de données d'incidents et de ruptures par érosion interne

**Animé par Paul ROYET (Cemagref)**

Les travaux de ce thème ont été consacrés à la création de deux banques de données. La première, gérée par le Cemagref, rassemble des fiches d'incidents remplies par les partenaires.

L'état actuel des connaissances montre que :

- dans plus de 95 % des cas, la rupture est consécutive à l'absence de filtre aval. La première barrière de défense est de très loin le filtre. Cependant elle peut être contournée par un défaut de fondation, de conception ou de réalisation,
- la moitié des ruptures provient de la traversée de conduite. Le manque de filtre aval, le compactage incomplet, les déplacements différentiels entre conduite et terrain et la détérioration de la conduite en sont les quatre causes principales,
- la crête est propice à l'érosion interne, par les fissures (dessiccation, cisaillement du noyau ou tassement différentiel), les trous des fousseurs ou la surverse du noyau,
- le contact entre structure et fondation est une zone sensible aux reports de charge, au décollement consécutif, au contraste de rigidité, au manque de compactage, aux tassements et à la fissuration.

La seconde base de données, gérée par EDF, décrit des ruptures particulièrement bien documentées, en vue de la validation des futurs logiciels modélisant le phénomène dans les études de danger exigées par le décret de 2007.



Fissures en crête de barrage.  
Photo R. Fell

## B

### Lois d'érosion interne dans les sols. Seuils d'arrachement et cinétique d'érosion

**Animé par Stéphane BONELLI (Cemagref)**

Cette action a pour objet de mieux comprendre les phénomènes mécaniques et physico-chimiques qui contrôlent le déclenchement et l'évolution de l'érosion interne, en distinguant les différents modes d'érosion. Elle repose sur des expérimentations originales, primordiales pour la compréhension des phénomènes et leur modélisation.

Quatre configurations de base ont été étudiées :

- l'érosion par écoulement localisé dans une fissure ou un trou (Cemagref et LCPC),
- l'érosion régressive (GèM),
- l'érosion de contact entre deux sols (LTHE),
- la suffusion et le colmatage (GèM, LOMC).

Les résultats acquis sont :

- mise en évidence des seuils et des cinétiques d'érosion fonction de la nature des matériaux et des conditions d'écoulement. Chaque matériau en place peut et doit être caractérisé par deux descripteurs : le seuil d'érosion appelé  $T_c$  contrainte critique et la cinétique d'érosion décrite par le coefficient d'érosion  $k_e$ ,
- comparaison des bancs d'essai et analyse de la variabilité des résultats,
- mise à disposition des bureaux d'étude de bancs d'essais d'érosion : le plus utile est le test d'érosion de trou (TET ou HET Hole Erosion Test).



Grand tumulus d'érosion régressive  
à l'aval d'une digue.  
Photo R. Fell

“ Des expérimentations originales, primordiales pour la compréhension des phénomènes et leur modélisation. ”

## C

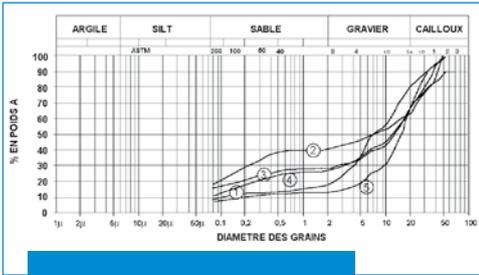
### Modélisation multi-échelles de migration de grains

Animé par **Pierre-Yves HICHER (GèM ECN)**

Ce thème vise à quantifier les phénomènes d'érosion, de transport et de filtration à l'échelle du grain ou de la suspension de grains. Cette connaissance est acquise par l'observation et restituée par une modélisation multi-échelles dans différentes conditions de chargement hydraulique.

Les travaux numériques ont permis de proposer des modèles reproduisant :

- l'érosion de trou dans un barrage homogène (Cemagref),
- l'érosion de trou dans un barrage zoné (EDF),
- l'érosion d'un mélange sable argile (Cemagref),
- l'érosion par un modèle continu (GèM ECN),
- la suffusion et le colmatage (LOMC),
- la liquéfaction statique générée par érosion interne (GèM ECN).



Exemple de graves sujettes à la suffusion.

## D

### Etude de la pérennité des sols traités

Animé par **Michel CHOPIN (MCConsulting)**

Les recherches menées dans ce thème concernent la vérification de la ténacité des coulis d'étanchéité en cours d'injection et de la durabilité des sols traités par ces coulis en cours d'exploitation.

La tenue des coulis en cours d'injection pour stopper des écoulements turbulents est testée au CERMES.

La tenue dans le temps des sols traités par des coulis de ciment ou des suspensions de nano-silice est testée par le GèM ECN.



Les scénarios de défaillance ne se limitent pas à la surverse et à l'érosion interne conduisant au renard.  
Photo SNRS

## E

### Modélisation de la rupture d'ouvrage par renard

Animé par **Jean-Robert COURIVAUD (EDF-CIH)**

La réglementation demande à tout maître d'ouvrage d'identifier tout danger et d'en modéliser les conséquences. ERINOH propose une maquette de logiciel de calcul de l'hydrogramme de rupture suite à un renard. Trois phases sont modélisées : l'agrandissement du trou, l'effondrement du toit et l'élargissement de la brèche. Les deux premières phases ont été modélisées et la première a été validée.

## F

### Méthodes de détection in-situ de l'érosion interne et des fuites

Animé par **Daniel FRANÇOIS (EDF-R&D)**

Plusieurs méthodes géophysiques ont été améliorées soit dans leur application soit dans l'interprétation.

- une PME, Sobesol, rachetée ultérieurement par Fugro, a particulièrement innové en développant une méthode de détection de fuite grand rendement par Polarisation Spontanée (PS), et une localisation des fuites par inversion d'une cartographie PS associée à une tomographie électriques avec l'assistance du LTHE,
- une première évaluation de l'effet des paramètres d'influence interne et externe à l'ouvrage sur les données géophysiques ou électriques et électromagnétiques (LCPC, LRPC de Nantes et CER de Rouen),
- des développements de nouveaux moyens de mesure (un capteur RMT par Sisyphé, trainée aquatique, méthode grand rendement...),
- enfin, différentes campagnes de prospection sur site ont permis de déployer et comparer l'efficacité respective des méthodes de détection développées dans le cadre du projet.
- au titre du thème sur l'impact des réseaux racinaires, les études et travaux ont permis de proposer une série de recommandations pour la gestion des végétaux présents sur les digues.



Investigations à Grand Rendement.  
Radar géologique.  
Étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol.

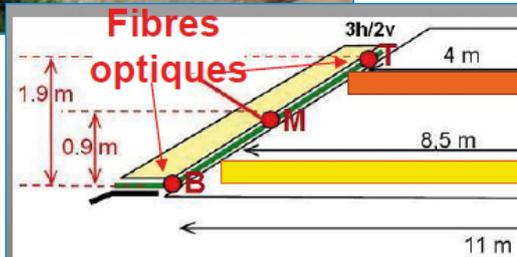
## G

### Tests et expérimentations en vraie grandeur

**Animé par Jean-Jacques FRY (EDF)**

Ces expérimentations ont pour objet de valider les méthodes et outils développés dans le cadre du projet sur chantier ou en vraie grandeur. Elles concernent :

- la validation de la détection des précurseurs de rupture par fibre optique sur les remblais rompus du projet international IJDIJK (EDF et Tencate),
- la mise en évidence des conditions et des conséquences de l'érosion de contact sur une digue à échelle 1 en laboratoire hydraulique (CNR, LTHE et EDF),
- la comparaison de méthodes de détection de fuite sur une digue (EDF),
- la comparaison de méthodes de détection sur le remblai expérimental du CER de Rouen (LRPC Nantes, CER Rouen, LCPC, EDF),
- l'analyse du risque de colmatage de géotextile dans les tranchées drainantes du Trièvre (Cemagref et LTHE),
- la comparaison des bancs d'essai sur des sols de référence (LCPC, Cemagref, LOMC, LTHE, GèM IUT St-Nazaire),
- la comparaison des critères de suffusion sur la grave du Rhin (LOMC, LTHE, GèM IUT St-Nazaire et EDF),
- la mise au point du Géomécamètre, pressiomètre et perméamètre mesurant le développement de l'érosion (UJF/L3SR),
- la mise au point d'un essai d'érosion in situ (IMSRN).



Surveillance par fibre optique.  
Méthode passive : bassin Perine CEMAGREF.



Détection d'une circulation d'eau dans un environnement poreux par la mesure de la distribution du potentiel électrique à la surface du sol. ©EDF

## H

### Actions de valorisation

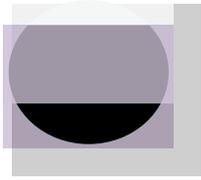
**Animé par Stéphane BONELLI (Cemagref), Daniel FRANÇOIS (EDF), Luc DEROO (ISL) et Jean-Jacques FRY (EDF)**

Trois volumes de recommandations sont les livrables du projet destinés à la profession :

1. Les essais d'érosion : appareillage, procédure, interprétation et domaine d'application,
2. Les méthodes de détection de l'érosion interne appliquées aux ouvrages hydrauliques,
3. L'évaluation et la prévention du risque d'érosion interne.

Brèche digue du Vidourle à Aimargues rive gauche.  
Photo : Mairie d'Aimargues





## Organisation

### La Direction du Projet

- Président : Christian PARENT(IGPC)
- Directeur Scientifique : Jean-Jacques FRY (EDF-CIH)
- Suivi IREX : Christian BERNARDINI (IREX)

### Les partenaires

- Université d'Aix en Provence - Coyne & Bellier - DAEI - EDF - EDG - Egis - ESTP - Fugro - FNTP - GÉM (EC Nantes et IUT St Nazaire) - Hydro-Québec (Canada) - IMSRN - IRSN - ISL - LCPC - LOMC (Université du Havre) - LRPC de Rouen - LTDS de Ecole Centrale de Lyon - LTHE (Université de Grenoble) - MC Consulting - SARG - 3S (Université de Grenoble) - Safège - Sisyphe (Université Pierre-et-Marie-Curie PARIS VI) - SNCF - Solétanche-Bachy - Sotraisol - Symadrem - Tencate - VNF



## Publications

- Les travaux développés dans le cadre du Projet National ERINOH ont fait l'objet de publications dans les revues spécialisées françaises et étrangères, de communications avec actes dans de congrès nationaux et internationaux, et de communications orales dans des ateliers et séminaires.
- Dès à présent la liste peut en être communiquée sur demande à l'IREX et un état complet de ces documents paraîtra dans les recommandations qui seront éditées à la fin du Projet.
- Ce projet s'achèvera en 2012 par la rédaction :
  - des recommandations sur les essais d'érosions,
  - d'un guide sur les méthodes de détection des anomalies dans les ouvrages hydrauliques,
  - d'un guide d'évaluation des risques d'érosion interne.



## Durée Budget

Le Projet National ERINOH a démarré en 2007 pour une durée prévisionnelle de 4 ans.

Le budget global s'élève à 4 328 000 € HT, se décomposant en 2 066 000 € HT pour le projet ANR, dont 583 638 € HT financés par l'ANR, et 2 262 000 € HT pour le Projet National de R&D, dont 452 000 € HT financés par la Direction de la Recherche et de l'Innovation du MEEDDM, le solde en apports en nature et cotisations des Partenaires.



## Applications et retombées du Projet National

■ Le Projet National ERINOH met à disposition des bureaux d'études des bancs expérimentaux pour caractériser la résistance à l'érosion interne :

- le test d'érosion de trou (TET) du Cemagref qui permet d'accéder aux paramètres principaux de la loi d'érosion adoptée. Le Cemagref a aussi participé à la mise au point d'un essai d'érosion au jet (JET),
- l'essai d'émiettement du LCPC qui permet de visualiser avec précision le comportement du sol à l'inhibition et son aptitude à la dispersivité,
- l'érodimètre à jets mobiles (LCPC) qui permet des mesures sur site,
- l'essai triaxial pour évaluer les seuils d'érosion entre suffusion et érosion régressive,
- les colonnes horizontale ou verticale du LOMC (Univ. du HAVRE) qui servent à mesurer les conditions de suffusion, filtration et colmatage,
- le banc d'érosion de contact du LTHE (Univ. GRENOBLE) pour fixer les seuils d'érosion en fonction de la nature des matériaux.

■ Le Projet National ERINOH met à disposition des méthodes de reconnaissance et de surveillance innovantes :

- la température est le meilleur traceur des fuites dans une digue. L'application d'une auscultation thermométrique continue des digues par fibre optique pour la détection des fuites a été validée par ERINOH en France et à l'étranger (projet IJKDIJK) ouvrant la voie à une maintenance préventive des ouvrages, adoptée par EDF,

- la Polarisation Spontanée est, après la température, la méthode de détection des fuites la plus efficace pour la localisation des fuites. La localisation 3D par inversion d'une cartographie PS associée à une tomographie électrique est une avancée majeure, primée en France et à l'étranger,
- l'analyse de l'impact des réseaux racinaires est d'une grande utilité pour les maîtres d'ouvrage, dont certains ont déjà adopté les recommandations qui concernent la gestion des végétaux présents sur les digues.

■ Le Projet National ERINOH met à disposition des scientifiques des modèles physiques, mathématiques et numériques dédiés à des formes spécifiques d'érosion :

- l'érosion de trou dans un barrage homogène (Cemagref),
- l'érosion de trou dans un barrage zoné (EDF),
- l'érosion d'un mélange sable argile (Cemagref),
- l'érosion par un modèle continu (GèM ECN),
- la suffusion et le colmatage (LOMC),
- la liquéfaction statique générée par érosion interne (GèM ECN).

Digues de protection des berges. ©EDF

