

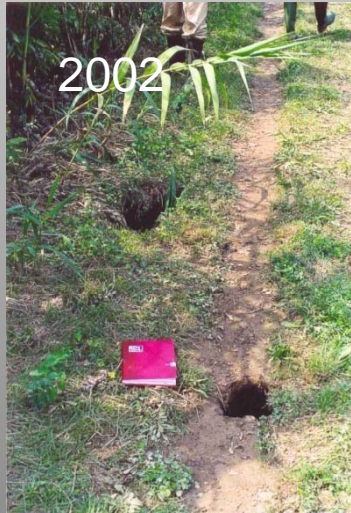


# PROJET ERINOH

## LE PROJET NATIONAL ERINOH ( ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques) 2007-2011



# PROJET ERINOH



Érosion Interne # 1 rupture par an en France



# PROJET ERINOH

## Le Programme en 8 thèmes et 2 financements

- A – Bases de données et grille d'analyse
- B – Seuils et cinétiques d'érosion (ANR)**
- C – Simulation Migration/colmatage
- D – Pérennité des parois et sols injectés
- E – Logiciel de modélisation du renard
- F – Méthodes de détection d'érosion interne (ANR)**
- G – Tests et expérimentations en vraie grandeur
- H – Publications et Recommandations





# PROJET ERINOH

## THEME H : RECOMMANDATIONS

- Volume 1 : ESSAIS DE LABORATOIRE  
(animation Cemagref –LCPC)
- Volume 2 : METHODES DE DETECTION  
(animation EDF)
- Volume 3 : METHODES D'INGENIERIE  
(animation ISL EDF)



# PROJET ERINOH

## ESSAIS DE LABORATOIRE ET CRITERES D'INITIATION

### Les modes d'initiation

- A – Erosion de conduit
- B – Erosion régressive
- C – Erosion de contact
- D – Suffusion

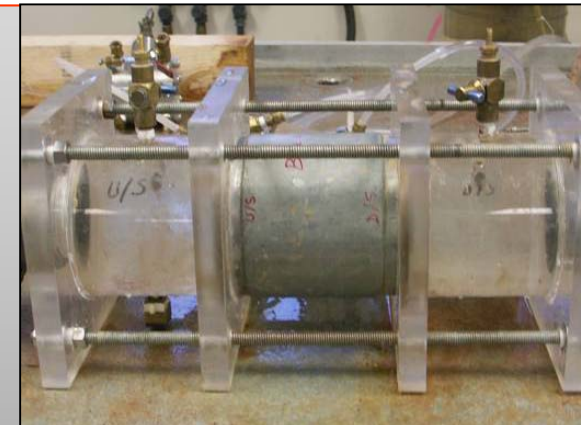
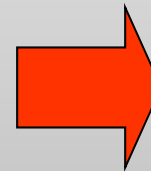
### Les zones d'initiation

- A – Autour des conduites
- B – En crête : fissures et trous
- C – Au contact des ouvrages GC
- D – En fondation

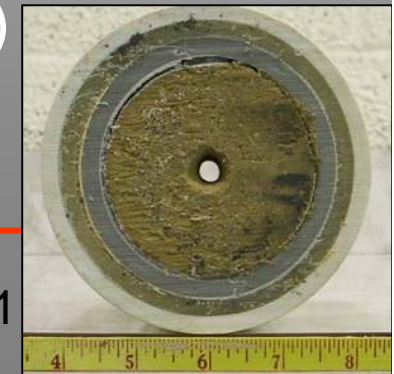
# PROJET ERINOH

## Érosion de conduit

Digue en argile sur  
fondation en argile



Test de HET  
(CEMAGREF  
LCPC)



X

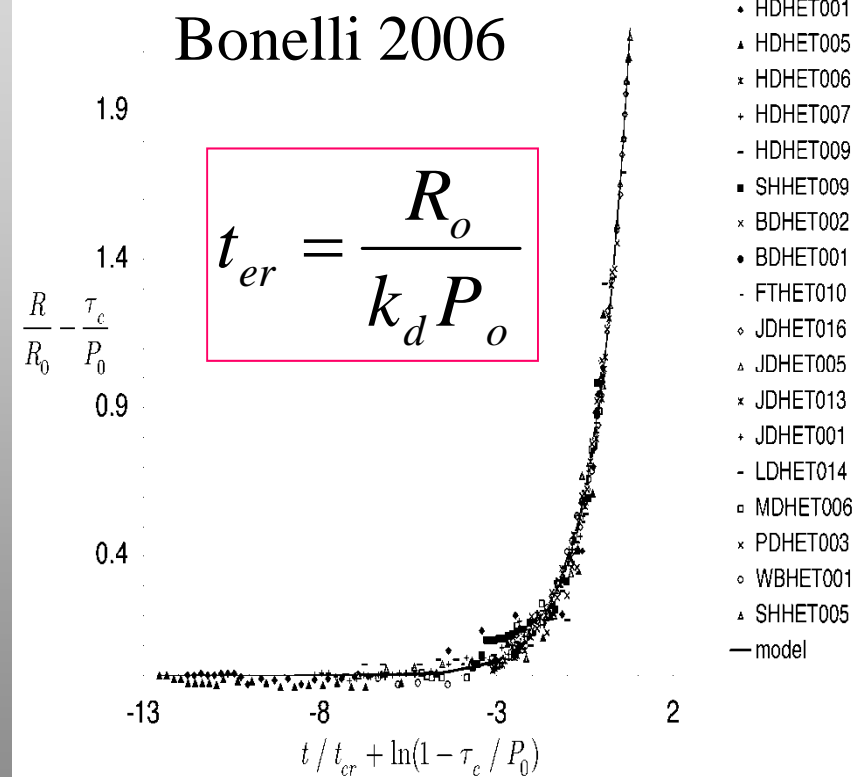
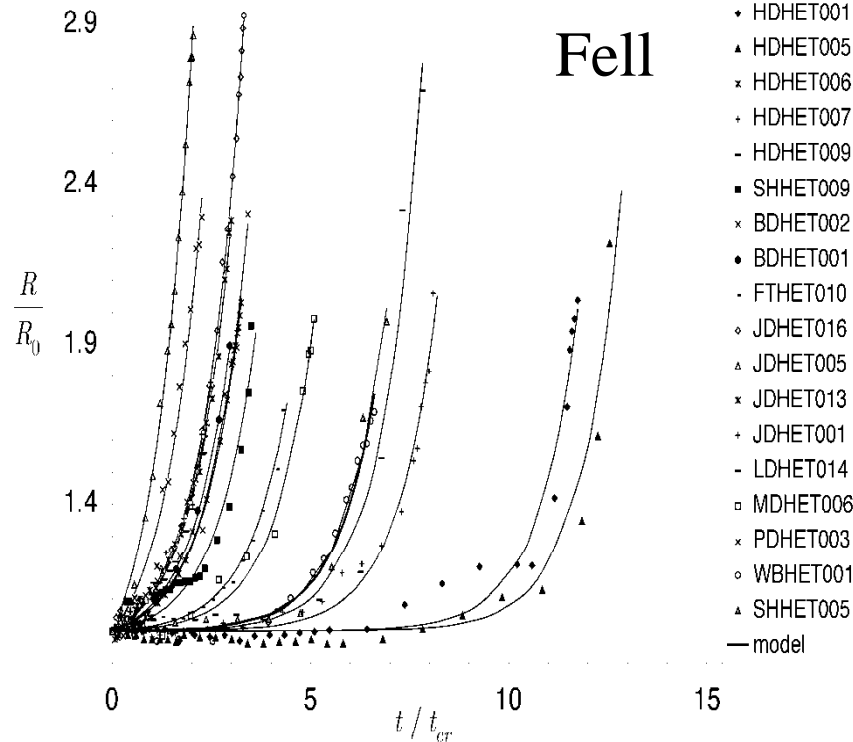
CFMS Paris

27 Janvier 2011



# PROJET ERINOH

## Cinétique d'érosion dans une digue en argile

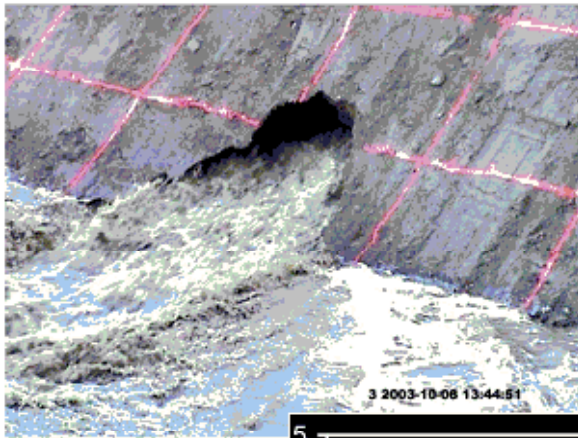




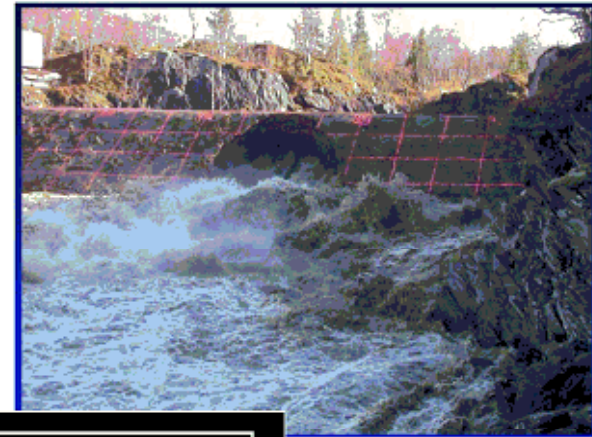


# PROJET ERINOH

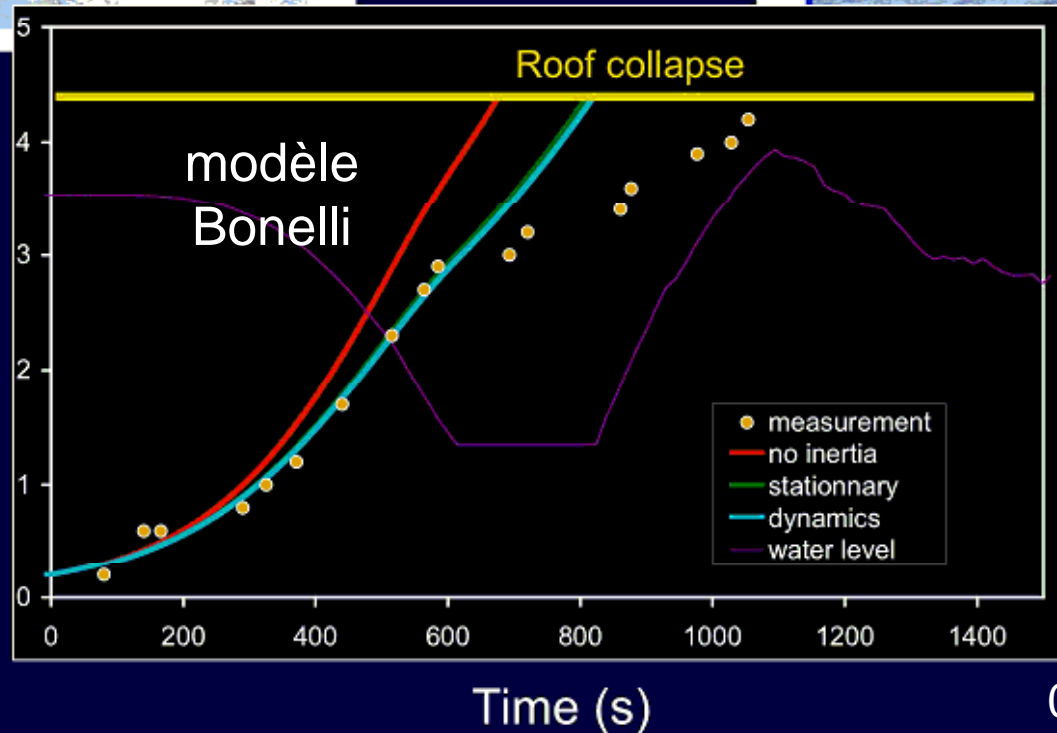
## Calcul de l'hydrogramme de crue



Norway  
*IMPACT*  
 FP5 Project  
 Rossvatn  
 (Norvège)



Radius (m)



Calcul EDF -  
 CEMAGREF



$$\tau_c \approx 5 \text{ Pa}$$

$$k_{er} \approx 10^{-2} \text{ s/m}$$

Mesures 2009

$$\tau_c < 1 \text{ Pa}$$

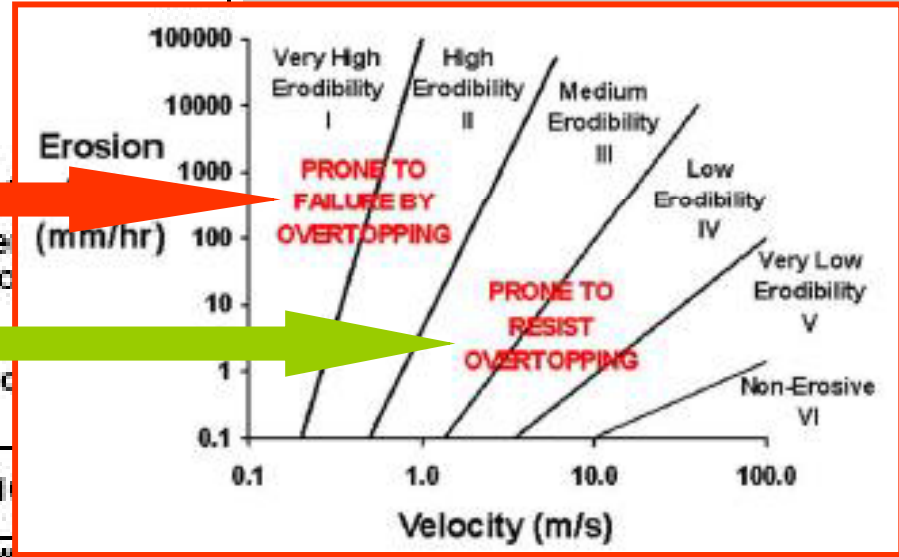
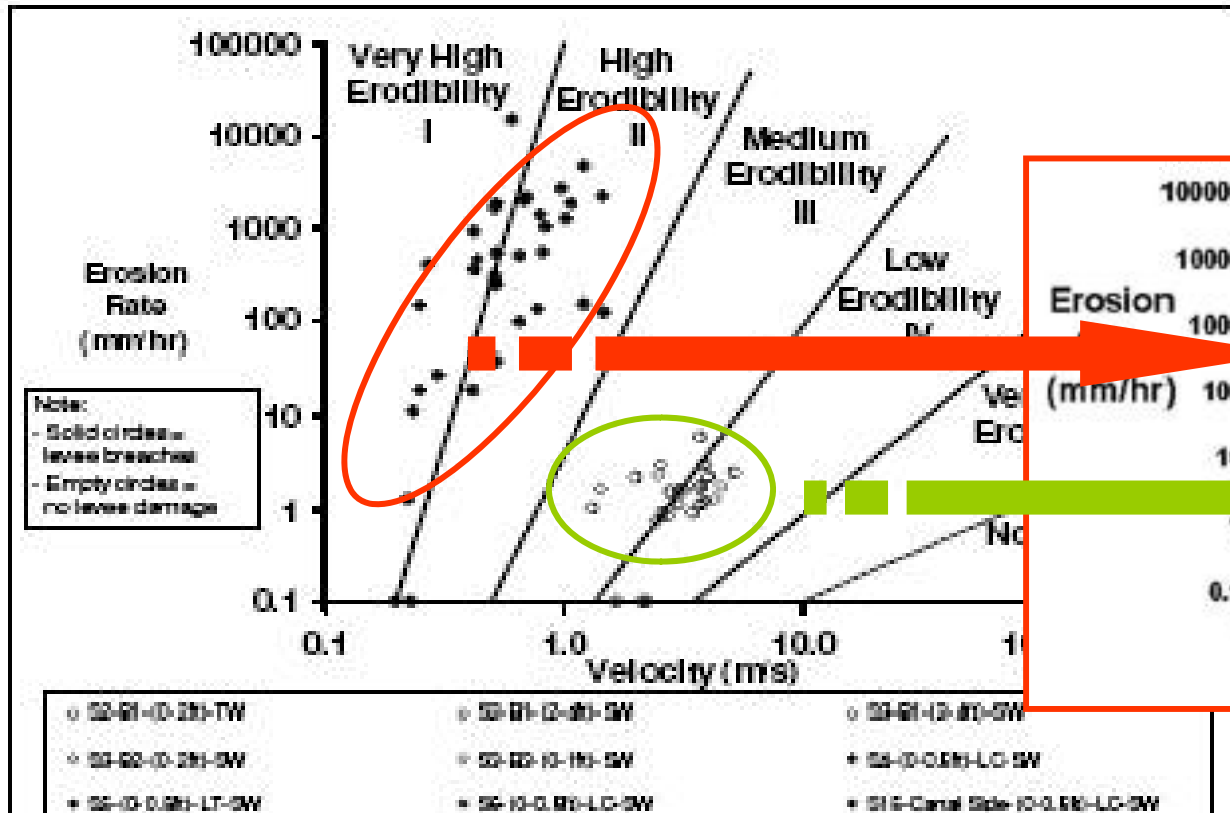
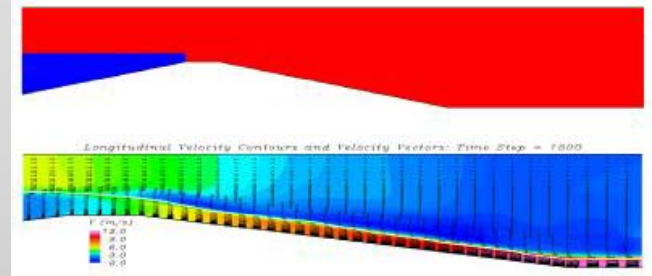
$$0,9 \cdot 10^{-2} < K_{er} < 3 \cdot 10^{-2}$$





# PROJET ERINOH

## RESISTANCE A L'ÉROSION : EXEMPLE DE KATRINA (USA)



Résistance à la submersion (vagues ou tsunamis) d'après J-L Briaud



# PROJET ERINOH

## Thème B : digue en sable argileux, silt, argile dispersive

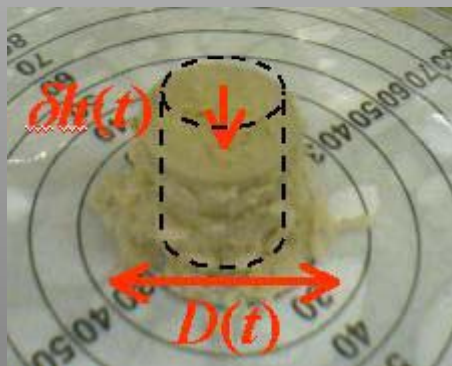
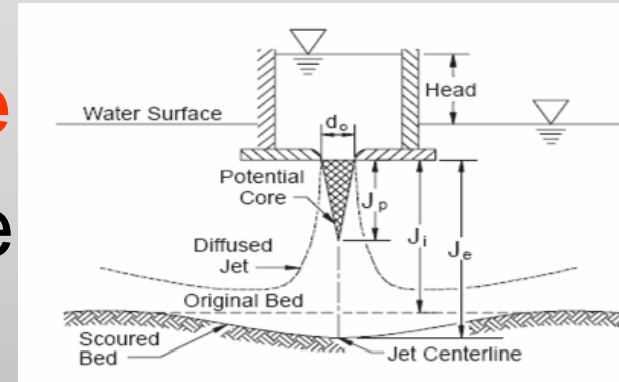


Si HET impossible

=> JET test

=>  $k_d$  et  $\tau_c$

ou essai de dispersion



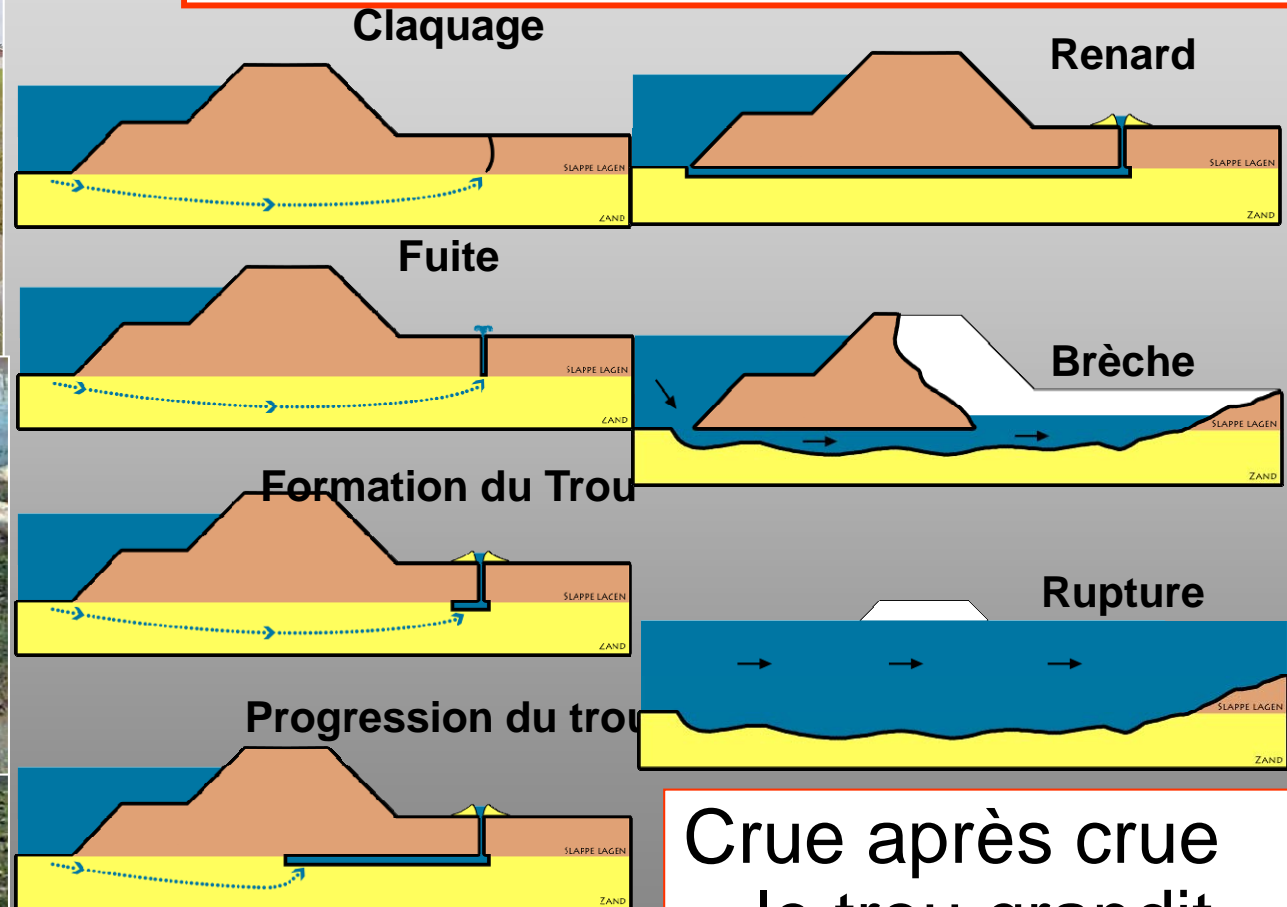
(château de sable)





# PROJET ERINOH

## Érosion régressive Digue en argile sur fondation en sable



Crue après crue  
le trou grandit  
jusqu'à la  
rupture



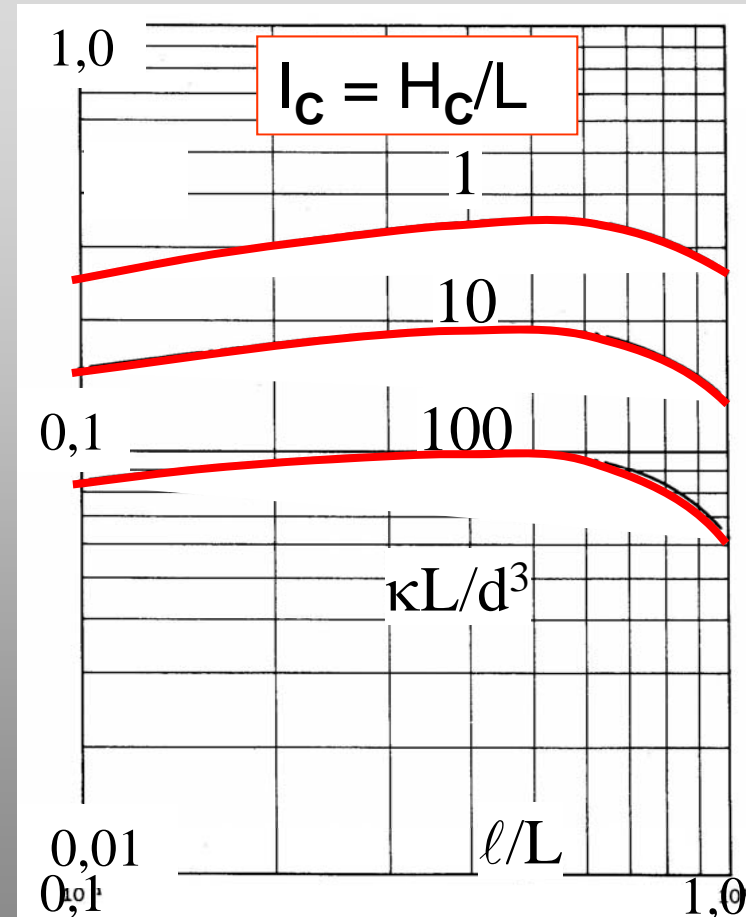
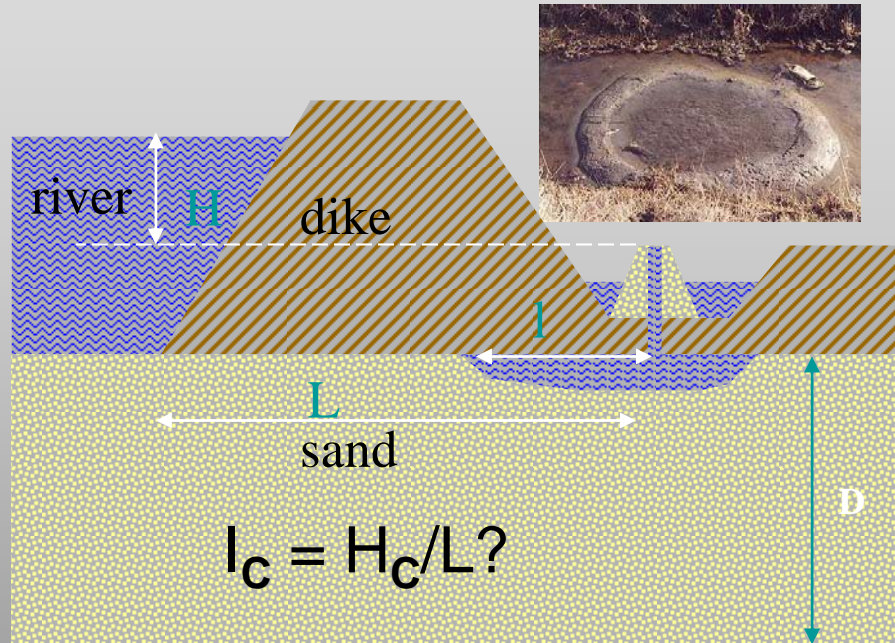




# PROJET ERINOH

## Érosion régressive

## Digue en argile sur du sable



$$\Delta H_c = \alpha \cdot c \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \tan(\theta) (0.68 - 0.10 \ln(c)) \cdot L$$

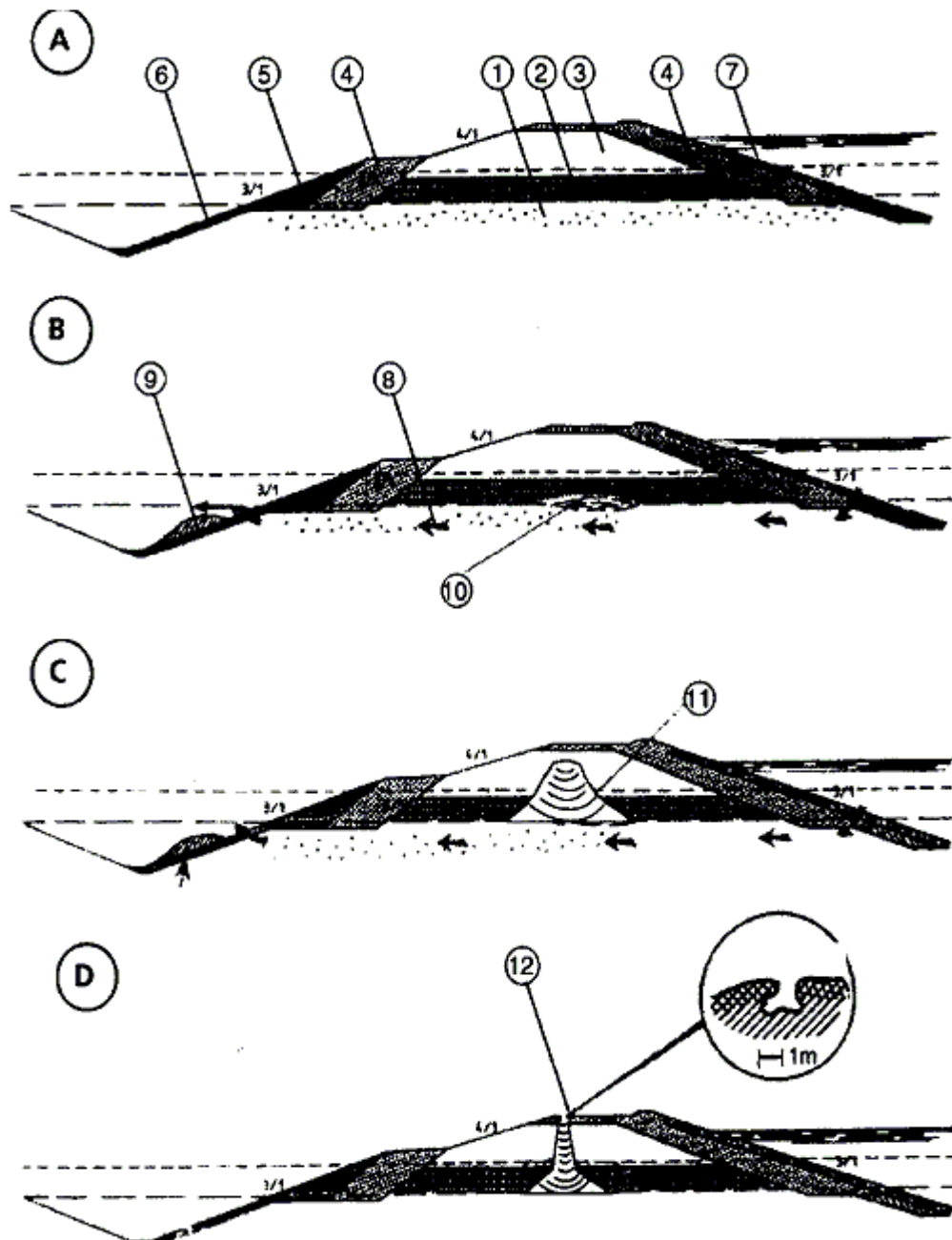
$$\alpha = \left( \frac{D}{L} \right) \left( \left( \frac{D}{L} \right)^{2.8} - 1 \right)^{-1}$$

$$c = \eta d_{70} \left( \frac{1}{\kappa L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Sellmeijer (1988)

# Digue en alluvions : Limon sur/sous gravier

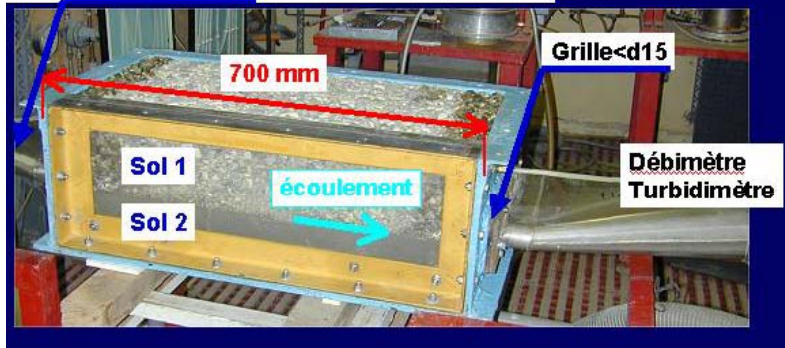
## Érosion de contact



# Digue en alluvions : Limon sur/sous gravier

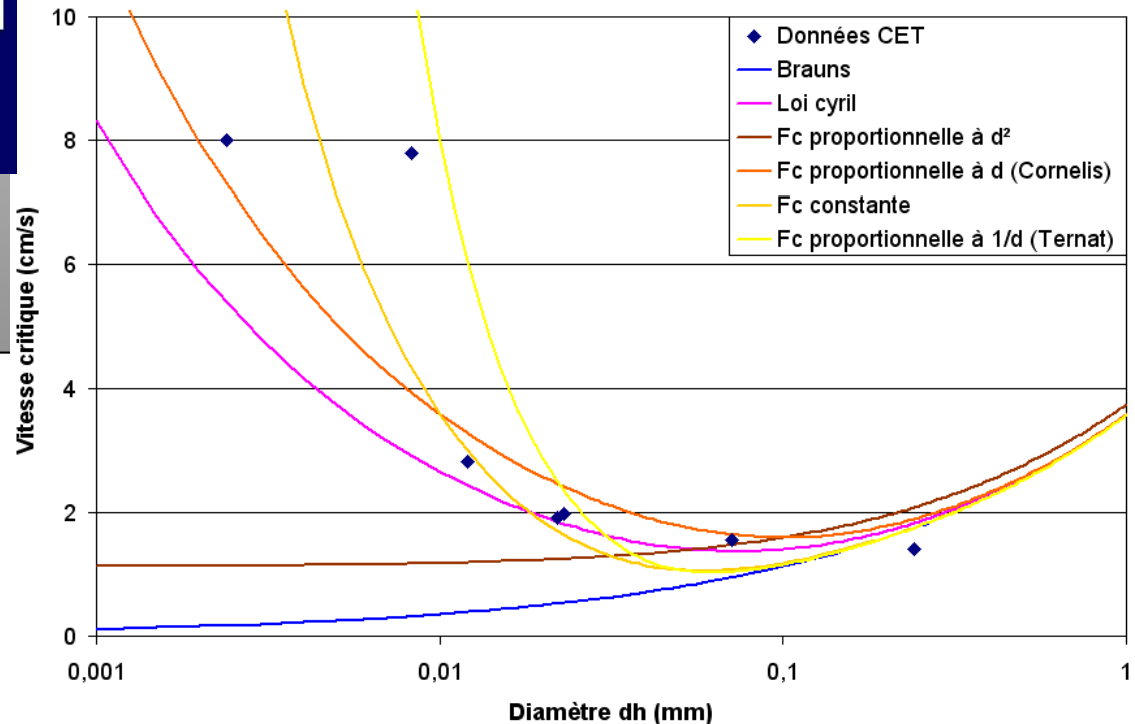
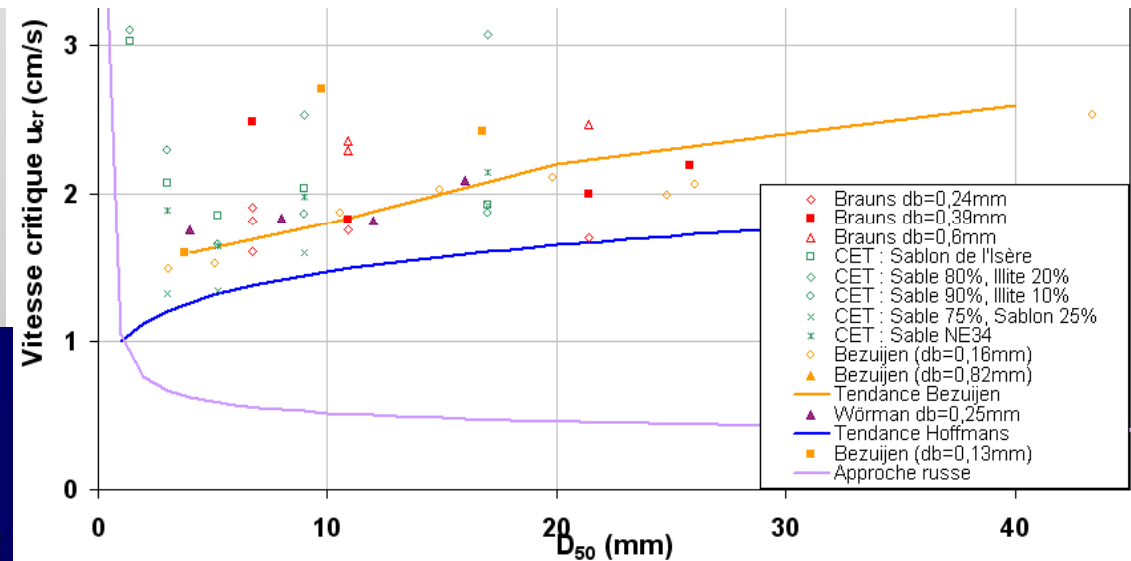
## Érosion de contact

Alimentation par un réservoir à niveau constant avec mesure du débit



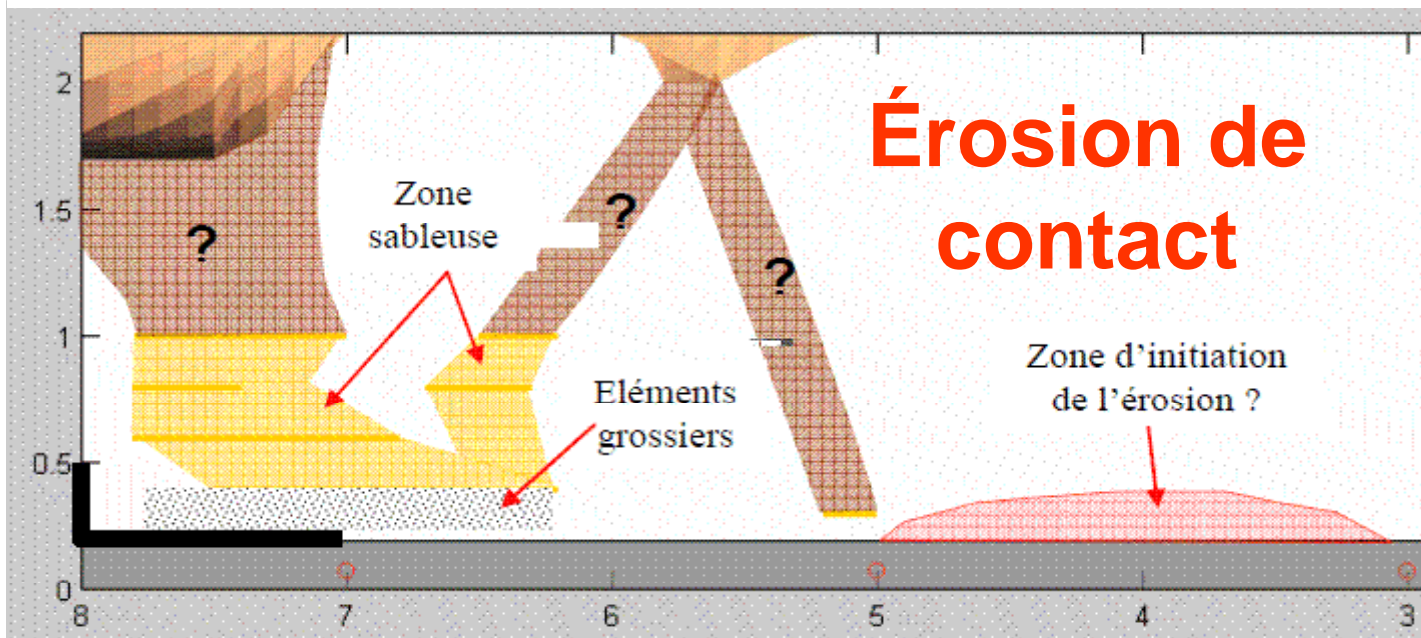
LTHE Y-H Faure, C. Guidoux, R. Beguin

Pas d'érosion si vitesse d'écoulement < #1 cm/s

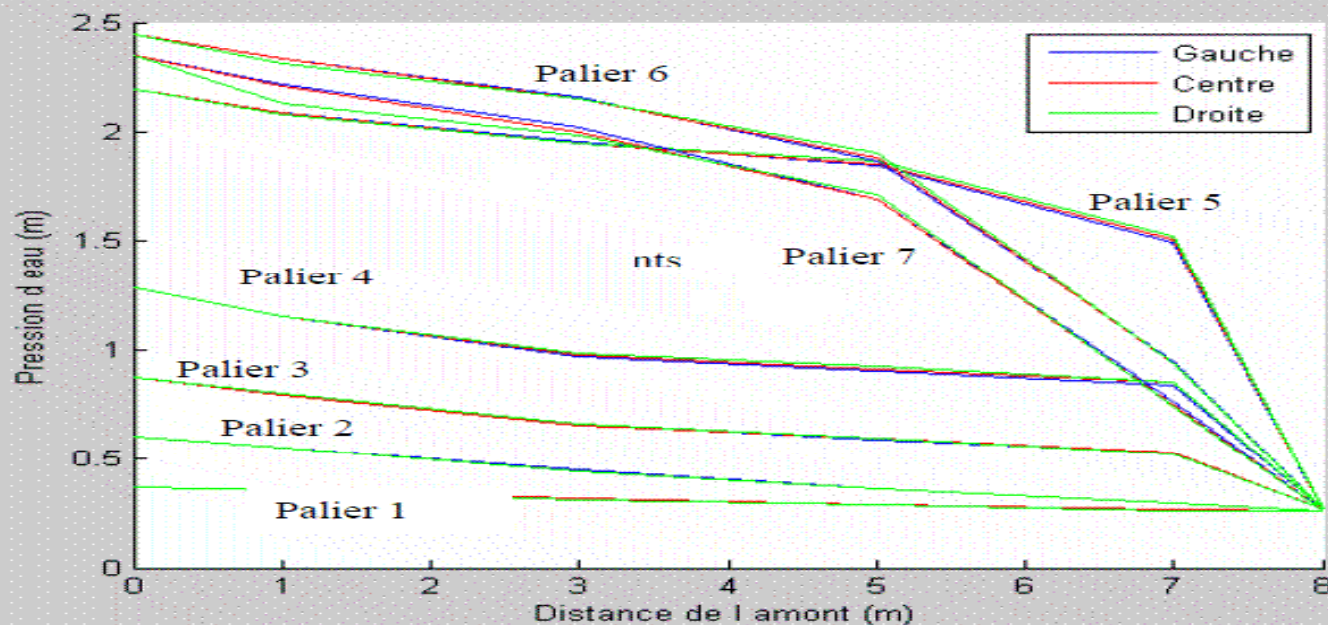




# Digue en alluvions: Limon sur gravier (Labo CNR)

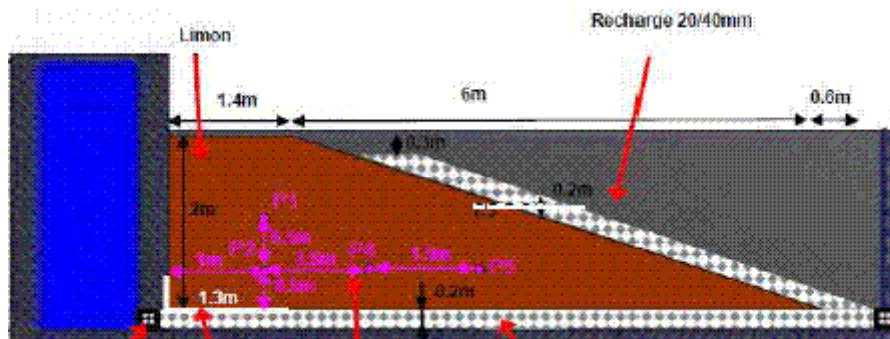


Colmatage  
du gravier  
malgré  
l'absence  
de filtre !  
(Analyse en  
cours)



R. Beguin et  
S. Reynaud,  
M. Scotti

# Digue en alluvions: Limon sur gravier (Labo CNR)



**Érosion  
de  
contact**

renard si  
claquage  
hydraulique

S. Réynaud,  
M. Scotti et  
R. Beguin







# PROJET ERINOH

## Suffusion



Digues en alluvions





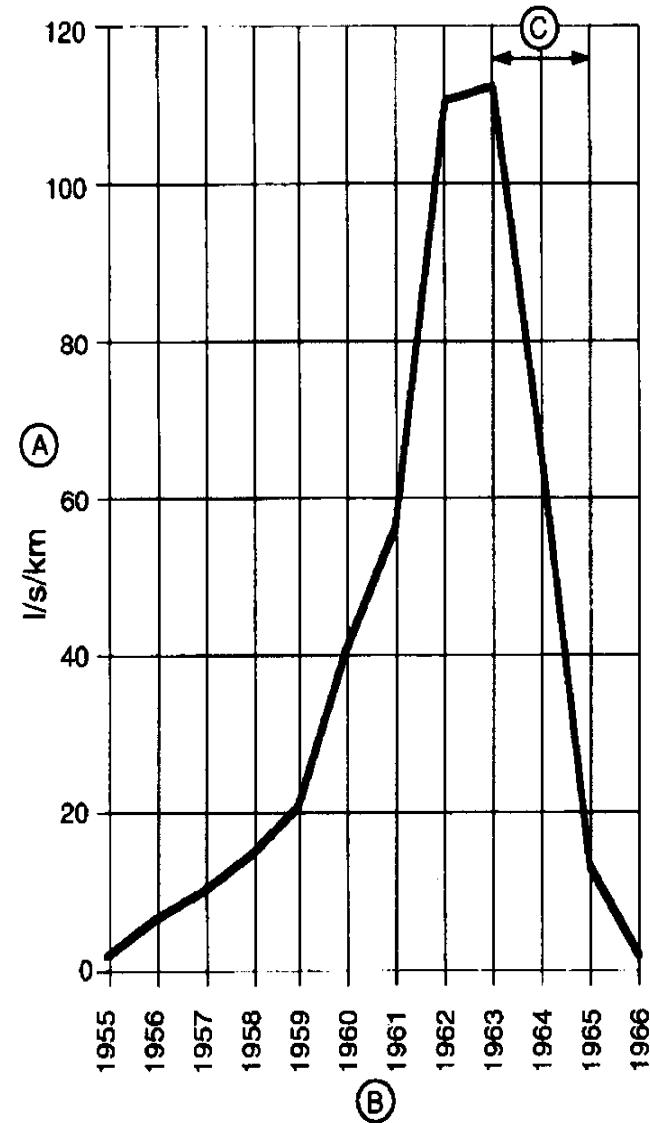
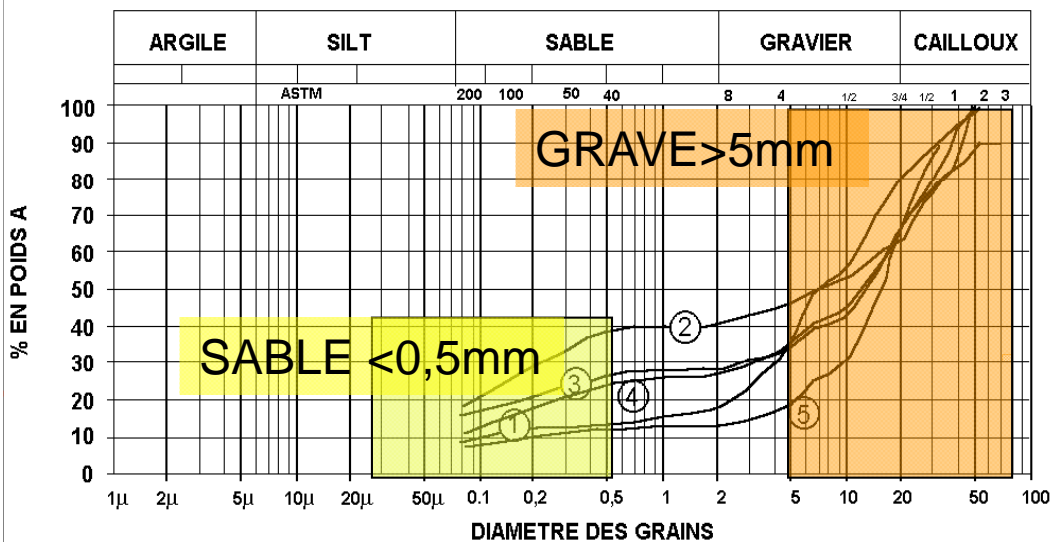


P

# Suffusion

## Digue en alluvions graveleuse

Pas d'érosion si vitesse d'écoulement < # 0,5 cm/s ?  
(M. GOLTZ 2009)



Digue de Cusset - Évolution des fuites au Pk 14.6  
Cusset bank - Point 14.6 leakage variation

- (A) Specific leakage (l/s/km)
- (B) Date
- (C) Grouting



## METHODES DE DETECTION

### MAINTENANCE CURATIVE

#### Quelles investigations ?

Un ensemble de méthodes complémentaires :  
Les 4P (en plus des carottages)

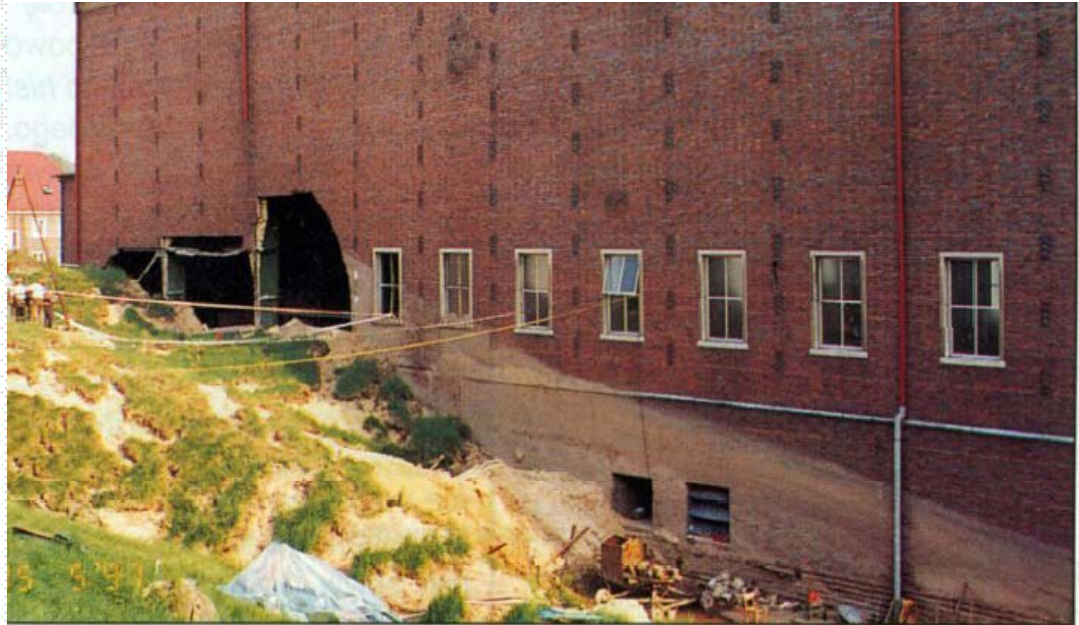
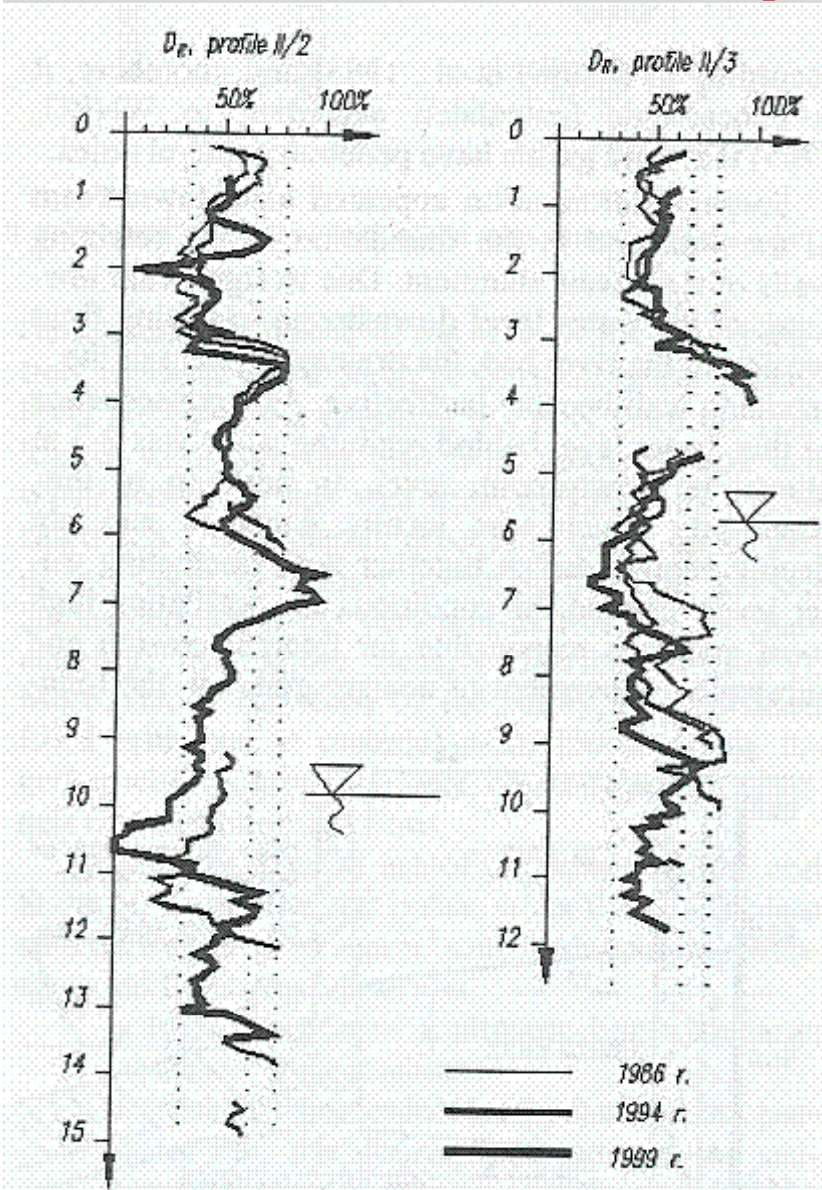
- Panneaux électriques (+ traçage à la saumure)
- PS (cartographie, inversion, grand rendement)
- Pénétromètres**
- Perméafor





# PROJET ERINOH

## L'érosion interne peut mener à la liquéfaction

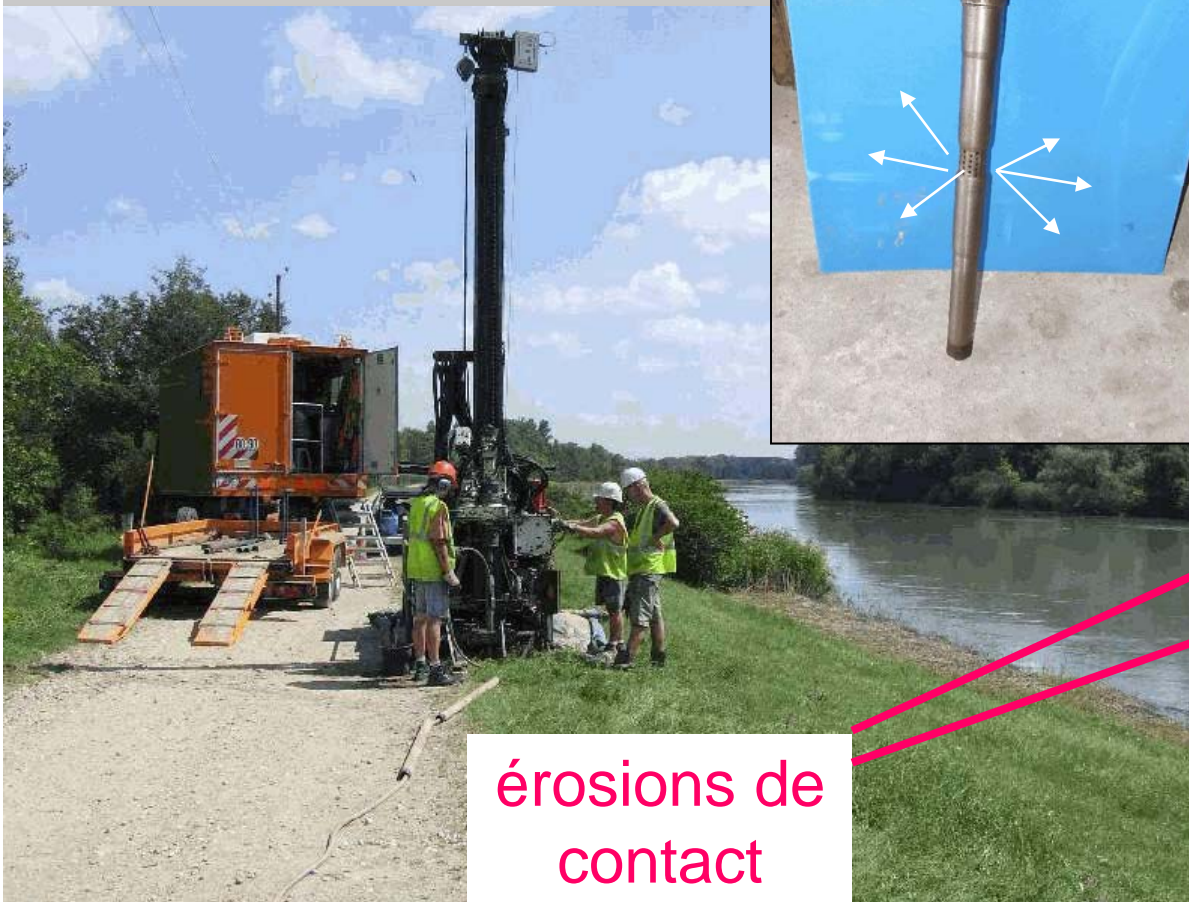




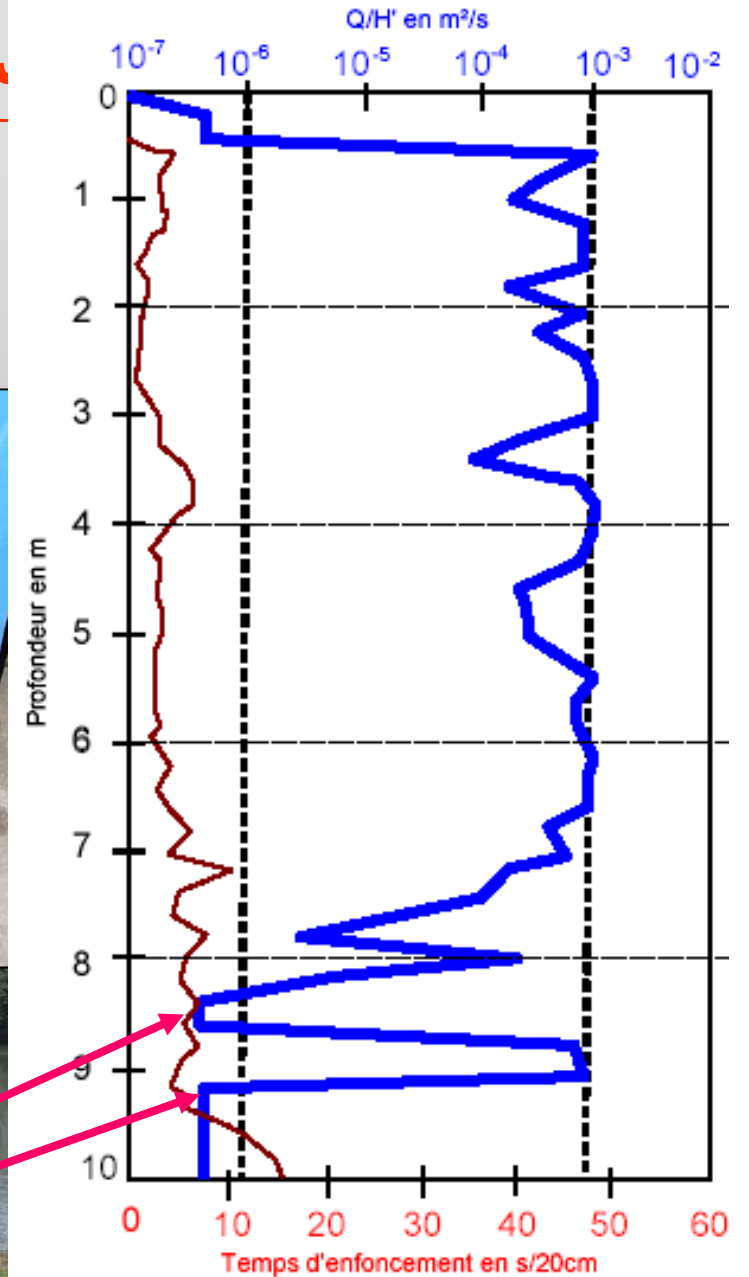


PRO.

# l'érosion de contact : Détection avec le Permeafor



érosions de  
contact



27 Janvier 2011 J-J Fry





# PROJET ERINOH

## METHODES DE DETECTION

MAINTENANCE PREVENTIVE :  
quelle technique permettrait au maître  
d'ouvrage un suivi rigoureux et une  
stratégie d'investissement par étapes ?

Une auscultation « rapprochée »  
dans le temps et dans l'espace





# Le projet IJkdijk



CFMS Paris 27 Janvier 2011 Fry





# PROJET ERINOH

## METHODES DE DETECTION

### MAINTENANCE PREVENTIVE :

En 2009 Deltares (Hollande) organise un test International de comparaison des solutions innovantes de détection de rupture par érosion régressive :

**La détection par fibre optique apparaît la méthode la plus fiable**



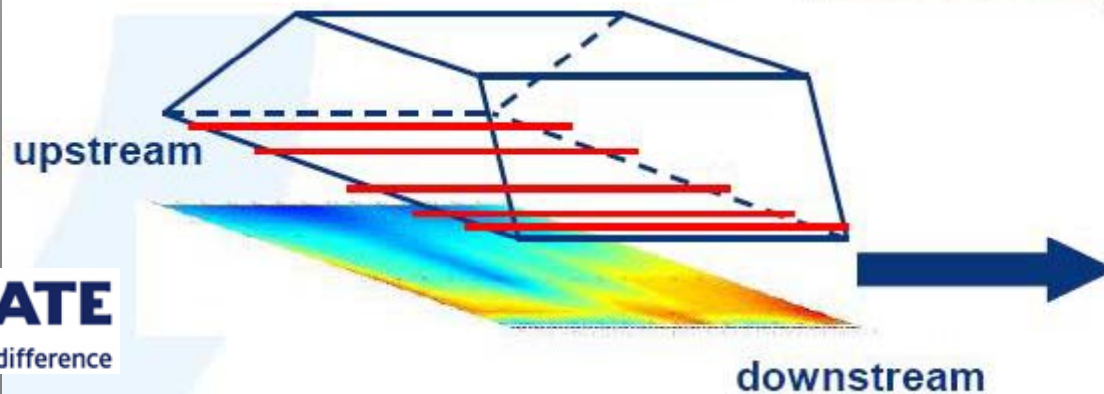
# Validation de la surveillance préventive au projet IJkdijk



Downstream and upstream of the experimental dam



Le site



MONITORING OF SEEPAGE





# IJdijk Project : inspection visuelle

→ Regular visual inspections close to the downstream toe



**BLUE tag**

=

seepage without  
departure of fine  
particles

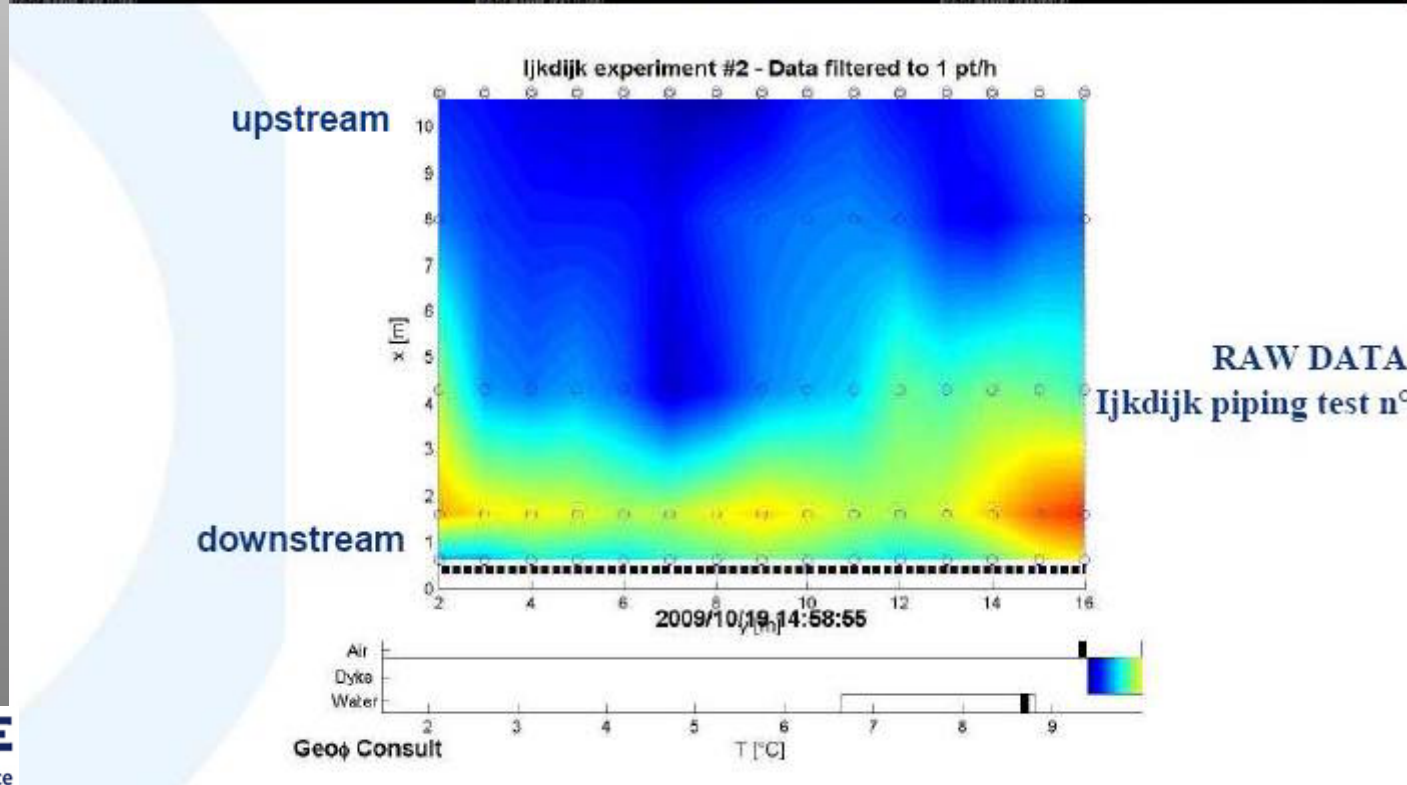
**RED tag**

=

leakage with  
departure of fine  
particles

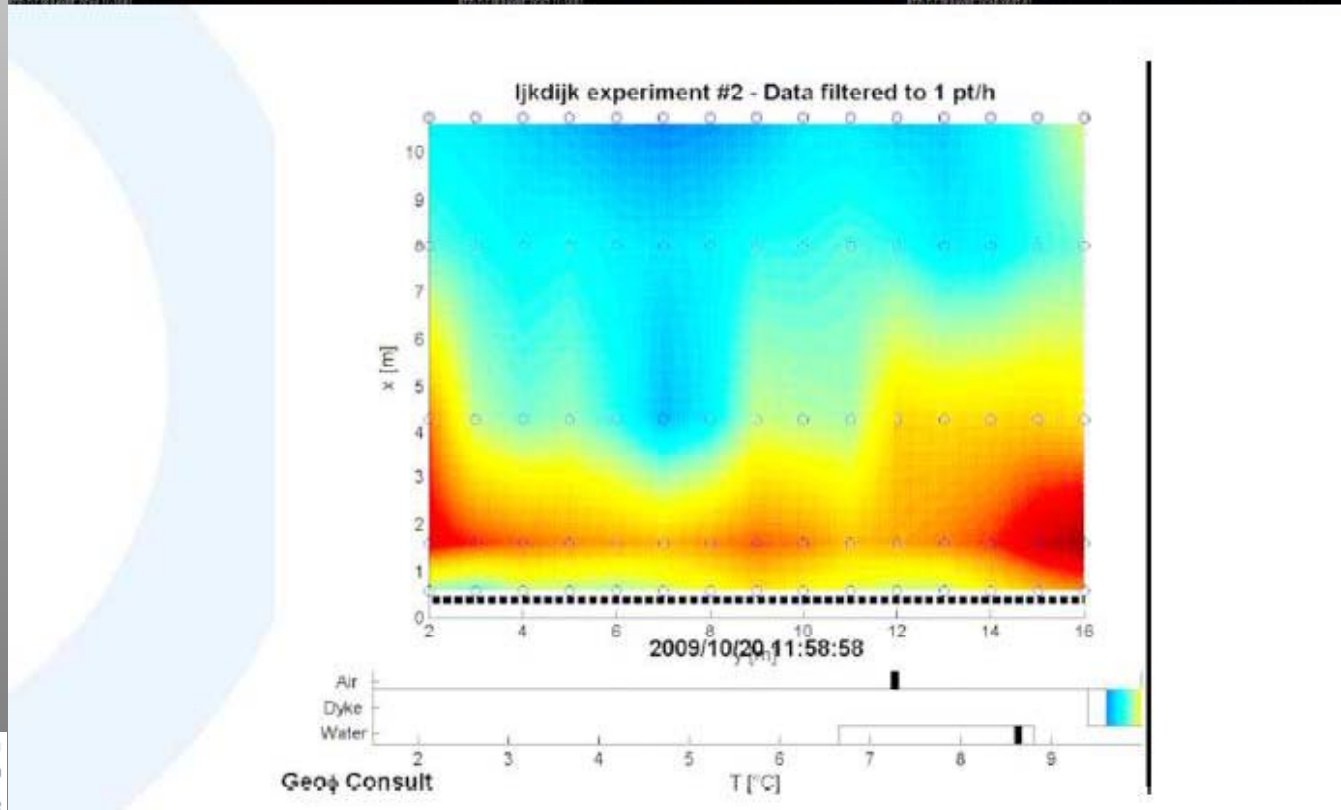


# Surveillance en temps réel par fibre optique





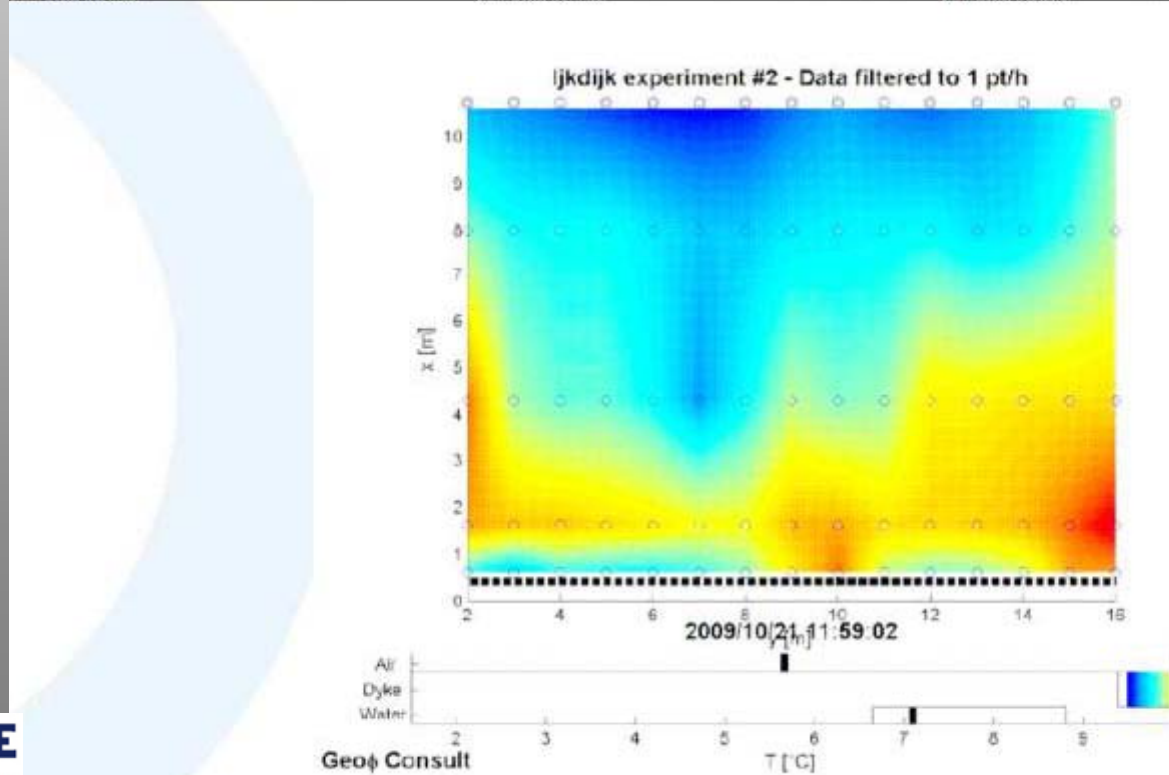
# Surveillance en temps réel par fibre optique





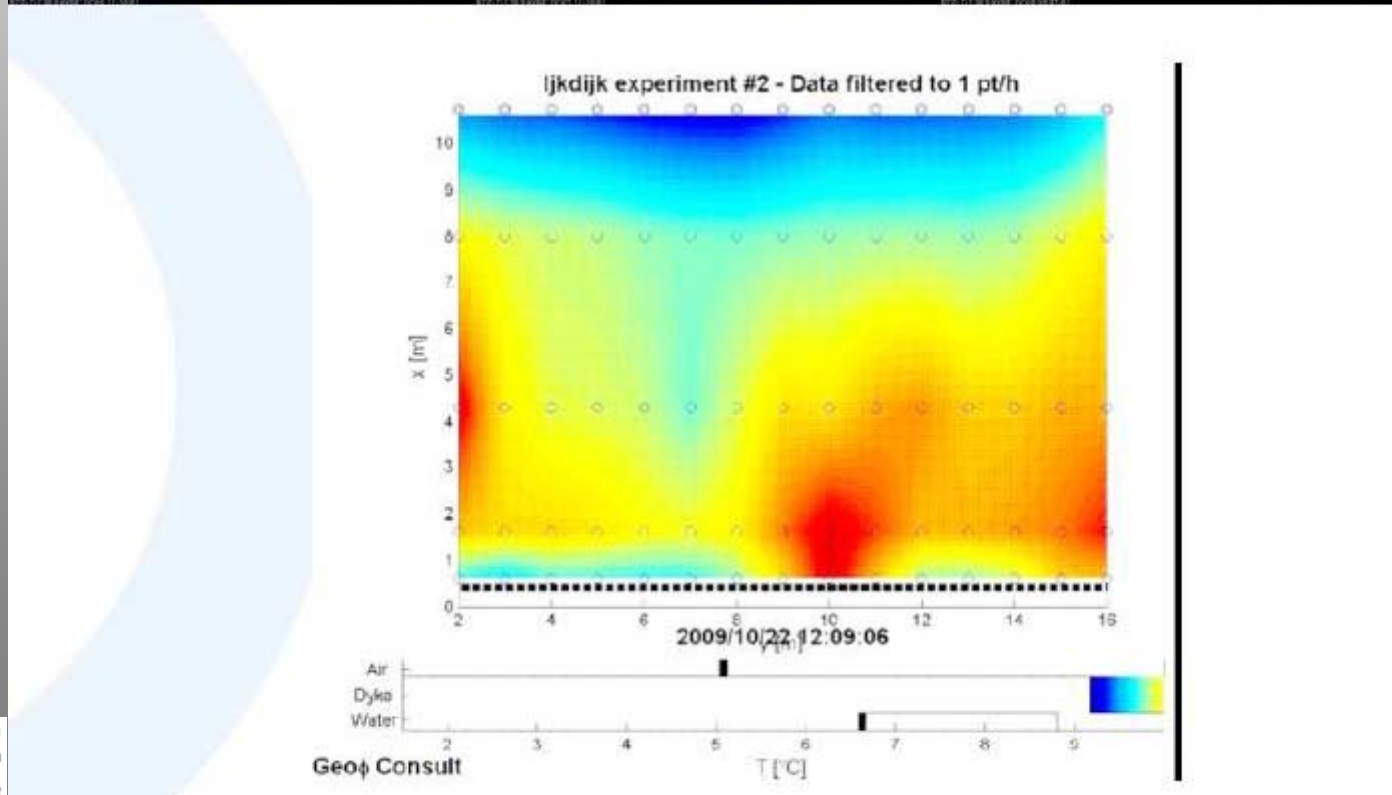


# Surveillance en temps réel par fibre optique



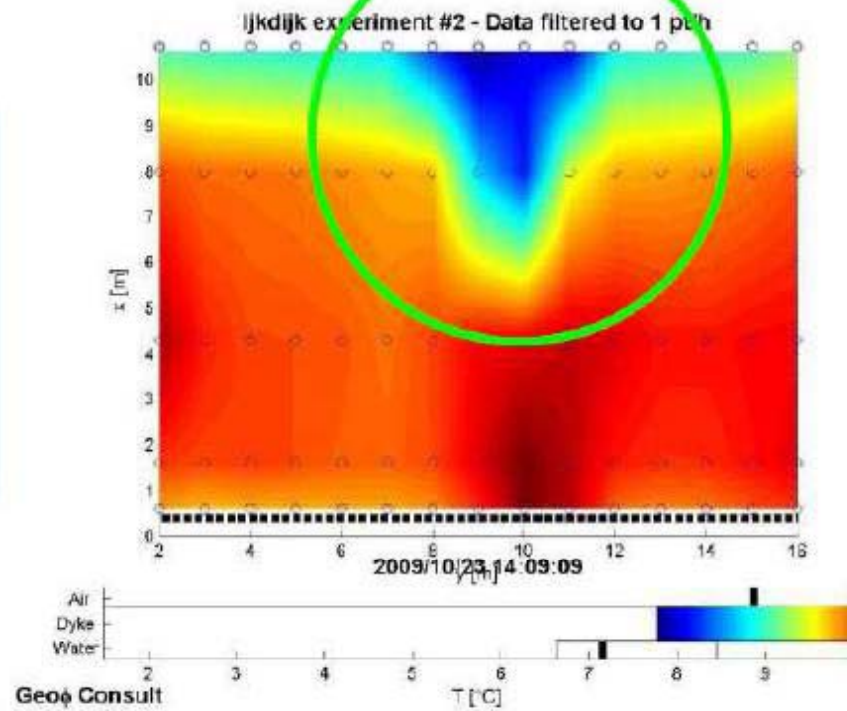


# Surveillance en temps réel par fibre optique





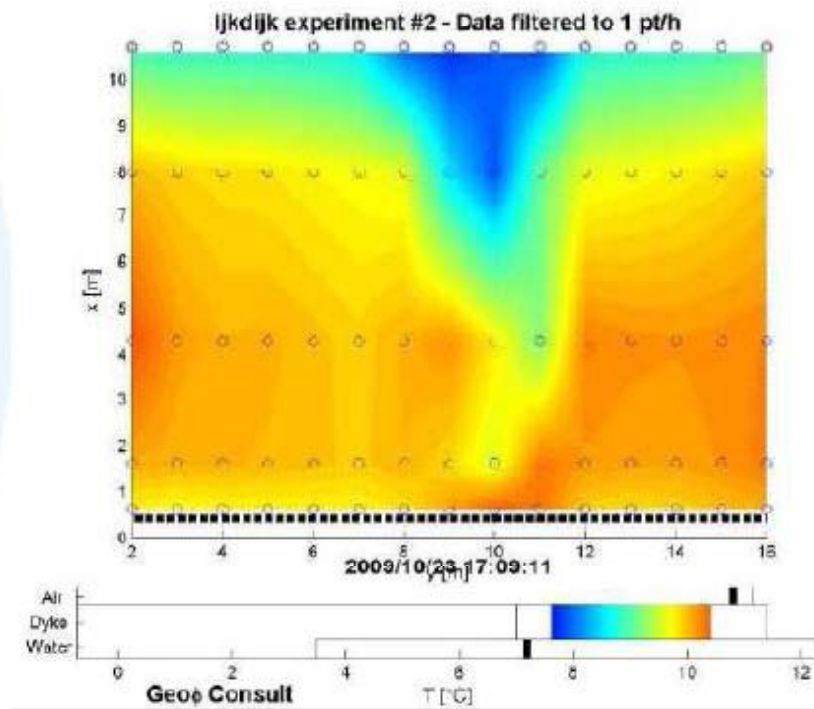
# Surveillance en temps réel par fibre optique





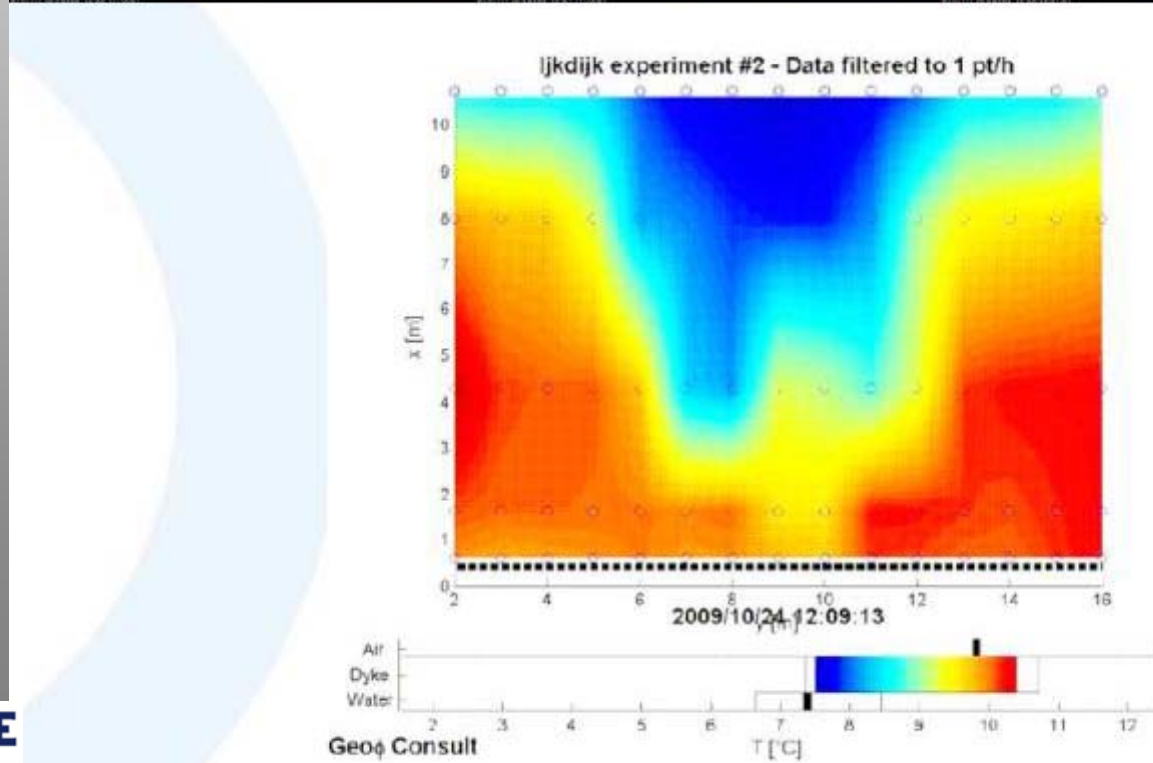


# Surveillance en temps réel par fibre optique



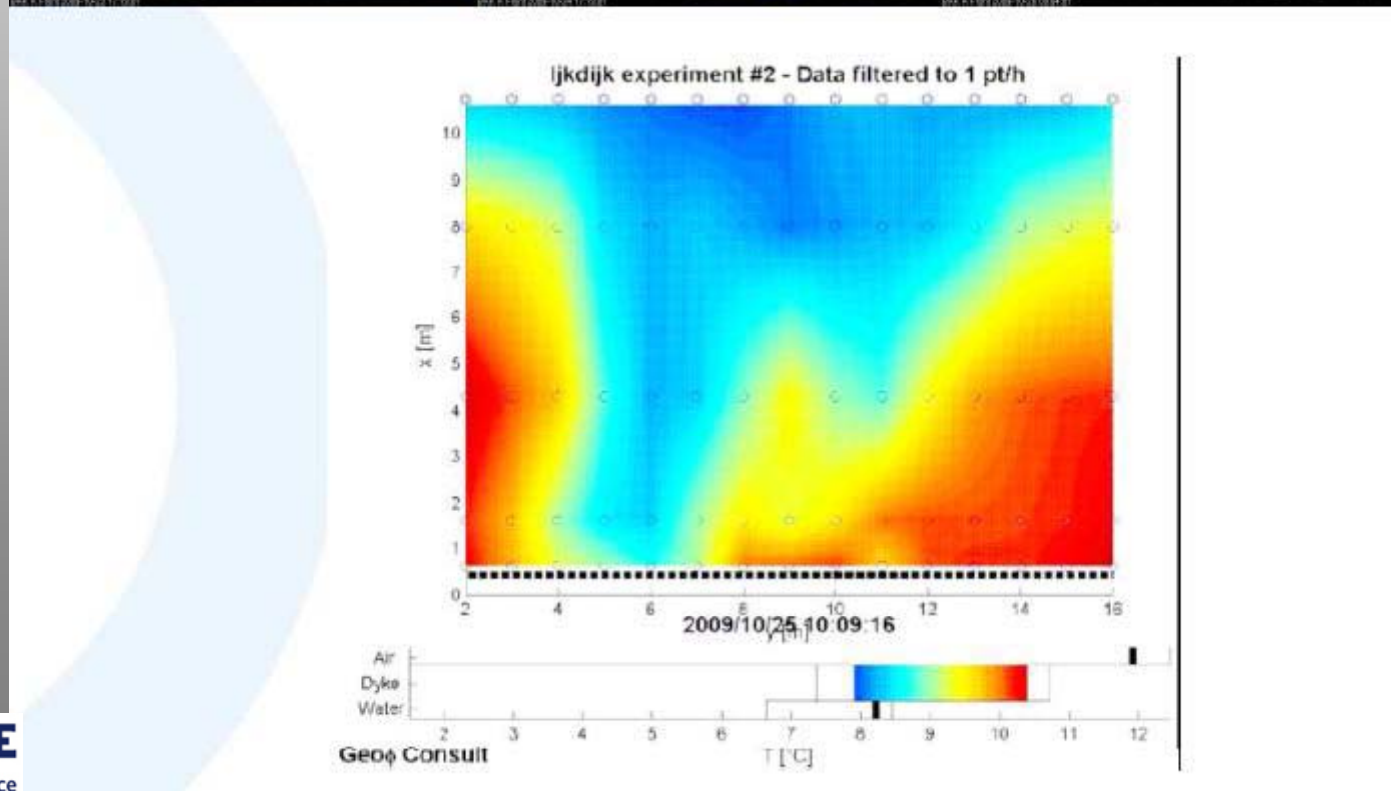


# Surveillance en temps réel par fibre optique



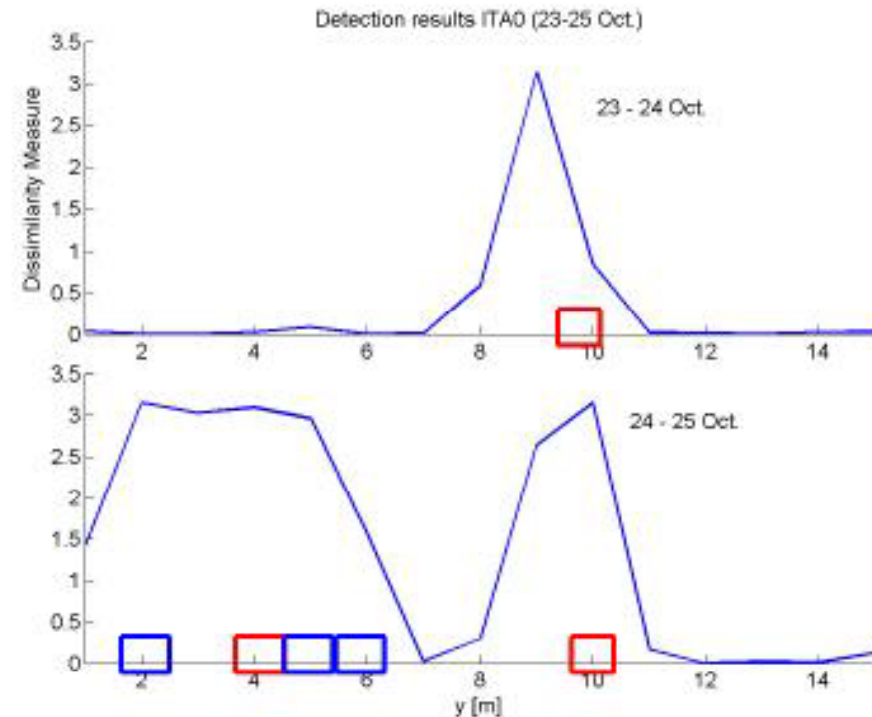
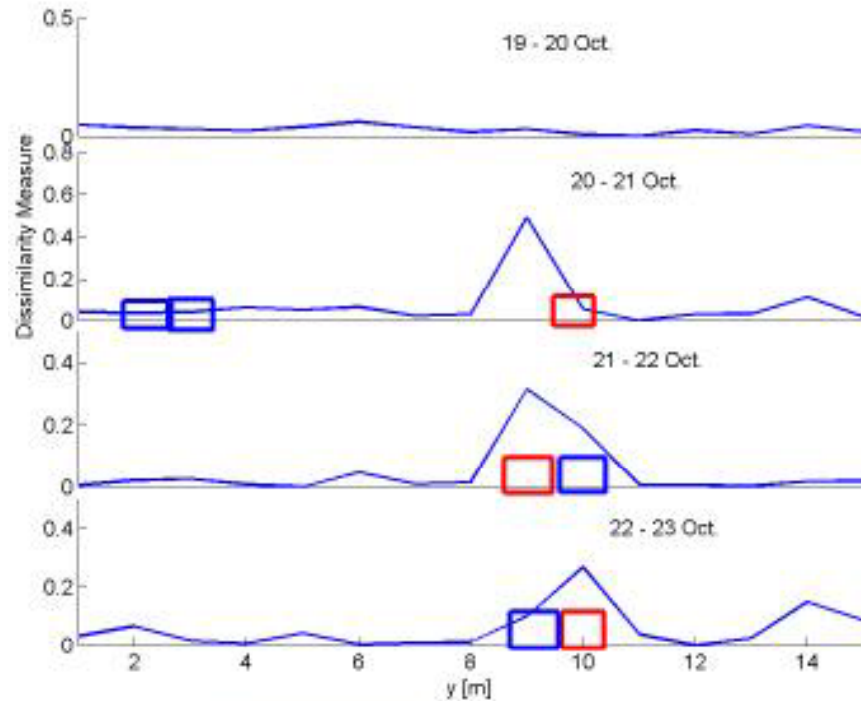


# Surveillance en temps réel par fibre optique





# Seconde interprétation : analyse statistique journalière



2nd Piping Test: duration = 6 days:

- raw data = leakage detection 2 days before rupture
- Signal processing (Daily Analysis Approach)  
= anomalies' detection 5 days before rupture



# Bilan des tests de surveillance préventive

Experimental Phase #	Total Experiment Duration (days)	Precursors : raw data (time before rupture)	Precursors : daily analysis results (time before rupture)
1.	4	3 hours	3 days
2.	6	2 days	5 days
3.	5	31 hours	3 days
4.	5	21 hours	1 day





# PROJET ERINOH

## METHODES DE DETECTION

Suite aux succès constatés par le PN ERINOH de la validation de la détection et du suivi de l'érosion interne par une auscultation distribuée et continue à base de fibre optique

**EDF a décidé d'équiper plusieurs de ces aménagements de ce système de surveillance préventive**

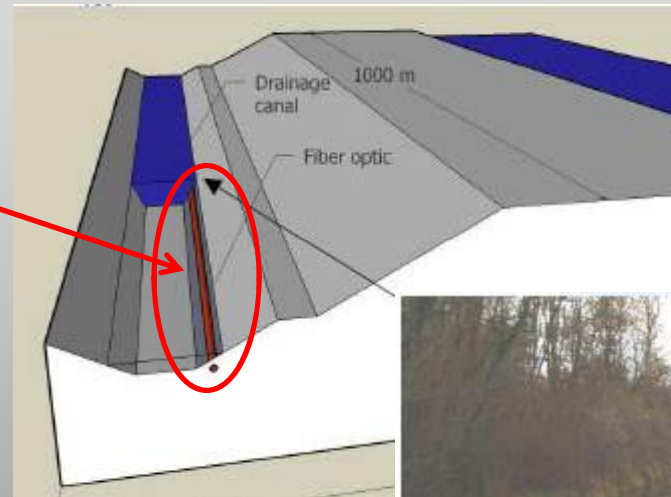




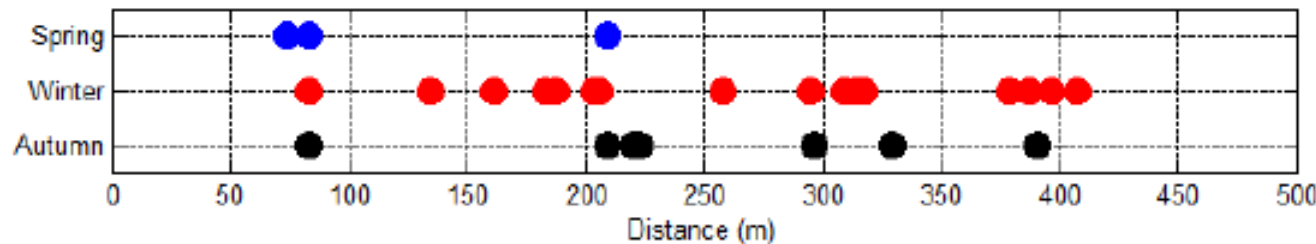
# PROJET ERINOH

## Auscultation des fuites en pied de digue

La fibre optique est installée dans le canal de drainage



Visual inspection : position of leakages (2008)

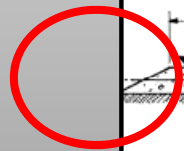
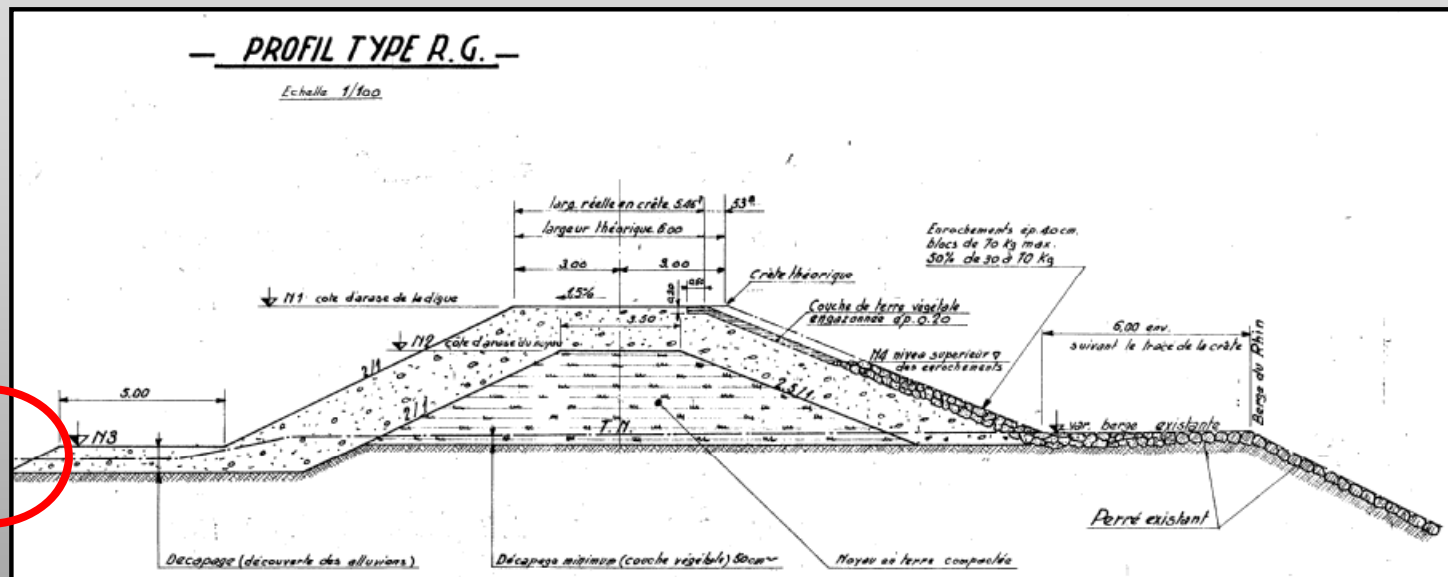


- Pas de besoin de réparation dans l'immédiat

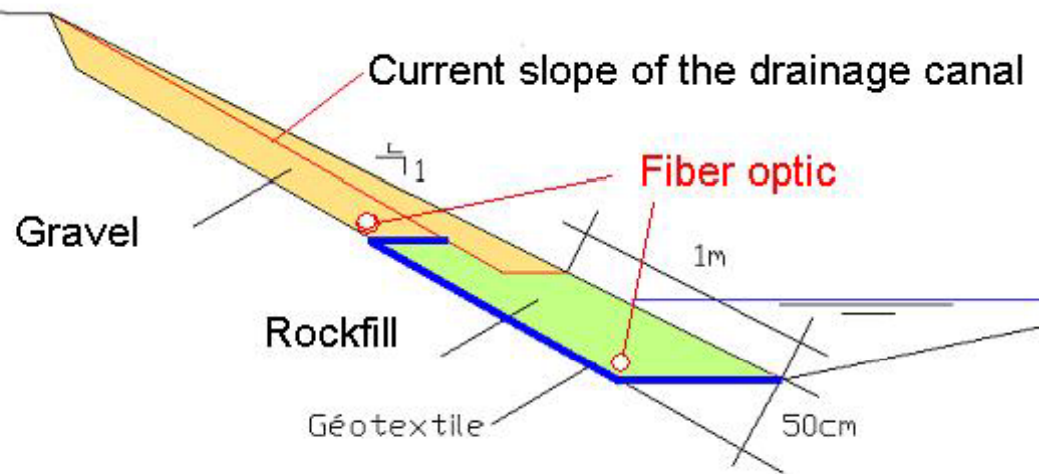


# PROJET ERINOH

## Surveillance de la digue de Markolsheim



Surveillance en  
 pied : 2 fibres  
 optiques : mesures  
 en continu

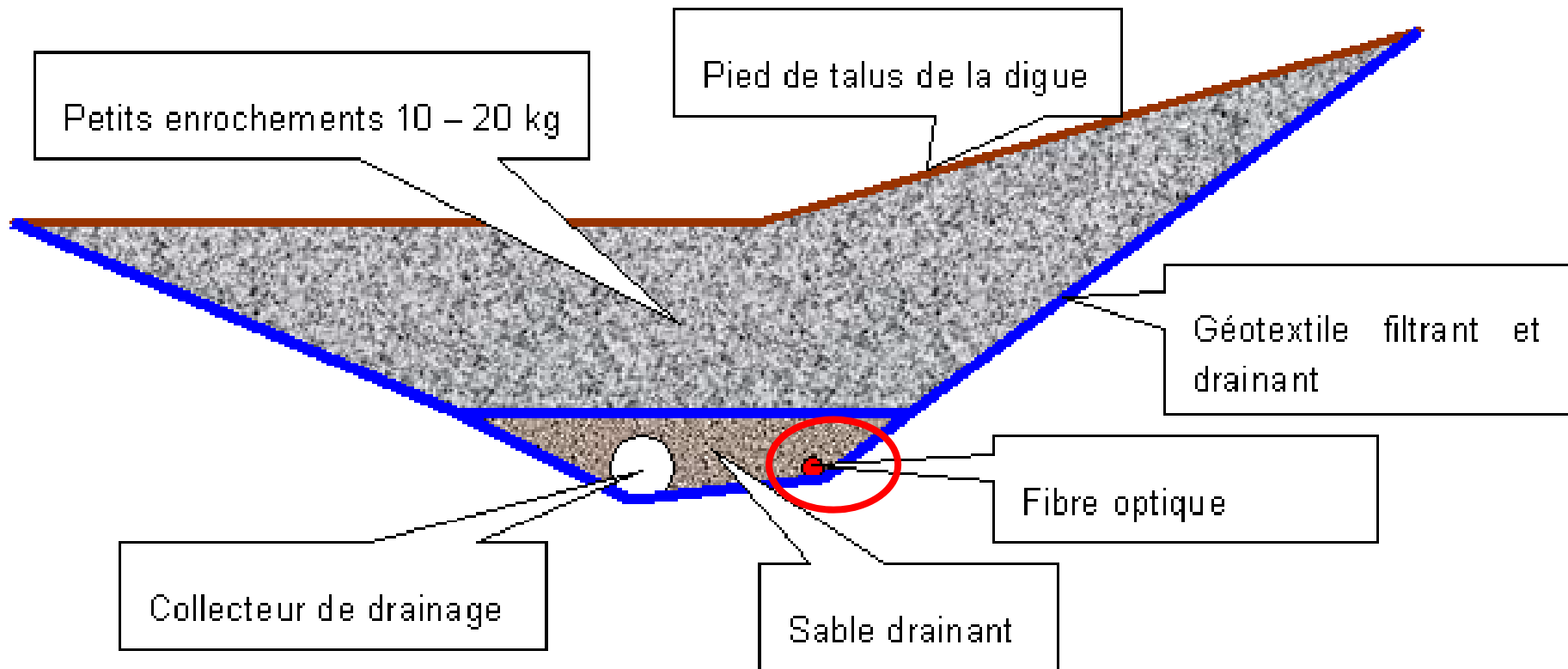




# PROJET ERINOH

## Réhabilitation de la digue de Cusset

Digue 113 ans, fondation très perméable: fibre installée en 2011 mesures en continu/an



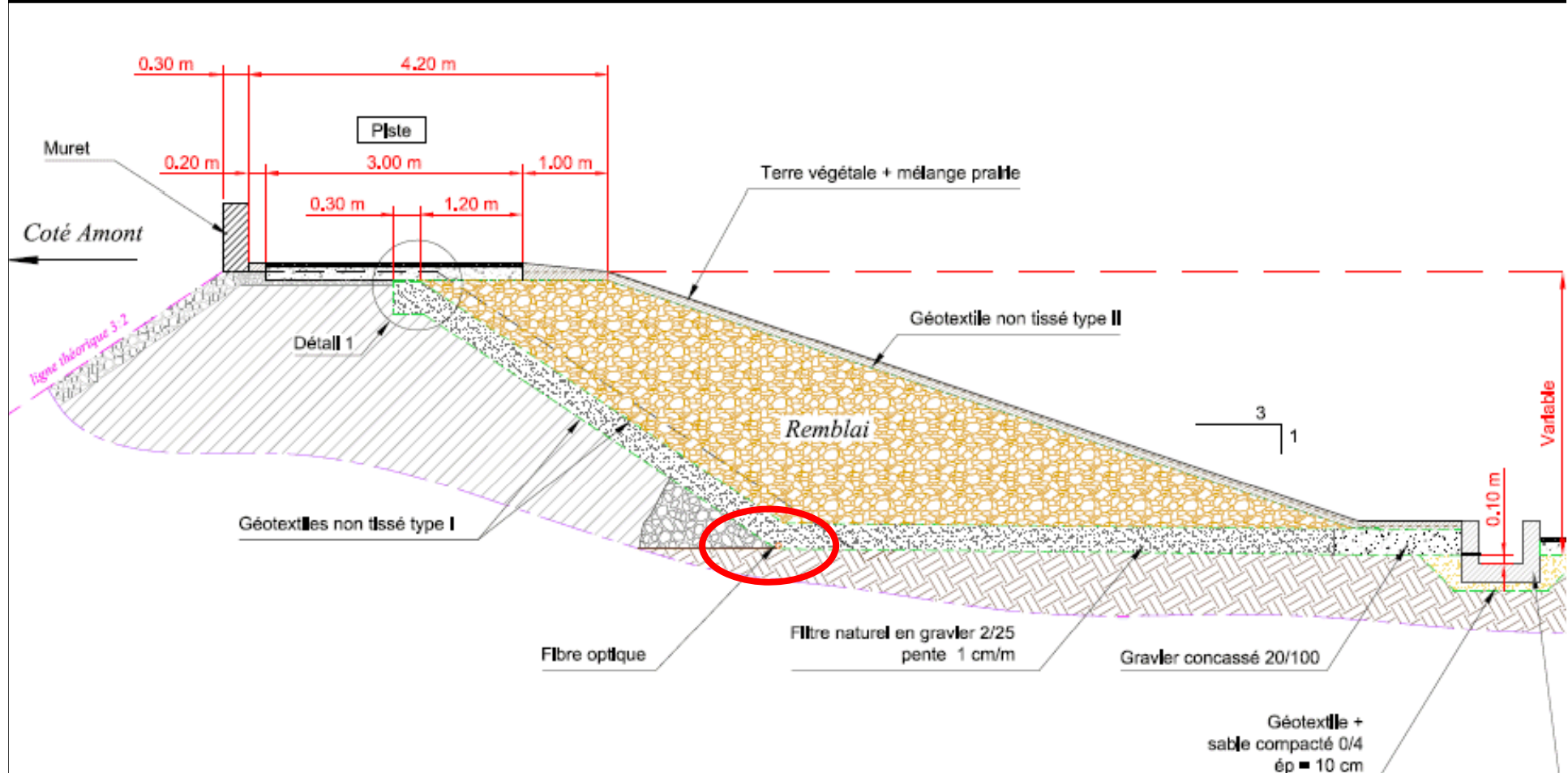




# PROJET ERINOH

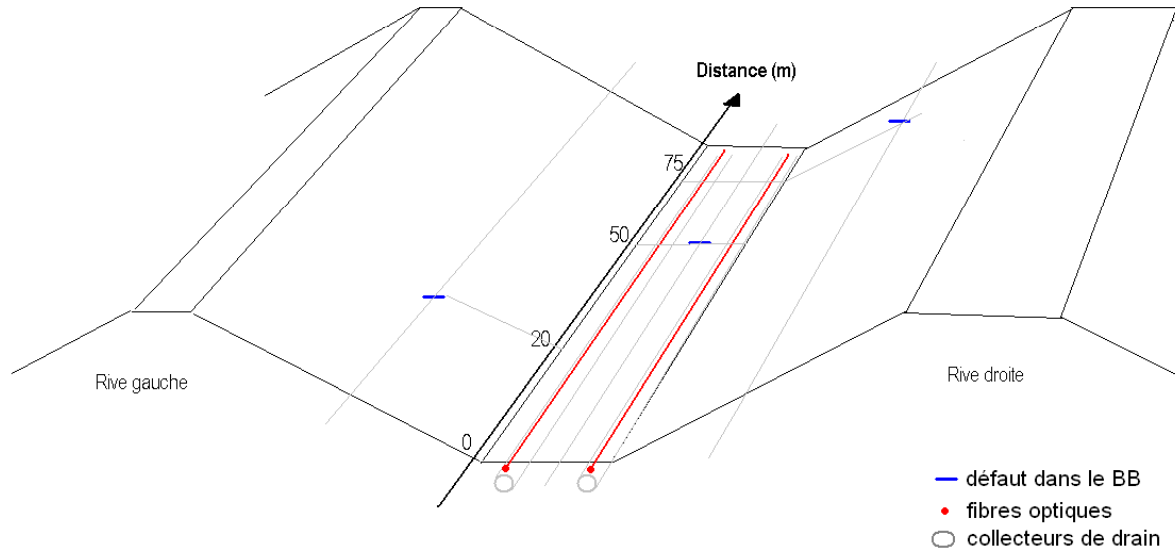
## Réhabilitation de la digue Sud du Lac Mort

Ouvrage ancien, remblai homogène, pente raide :  
fibre optique en pied : 1 à 2 mesures/an



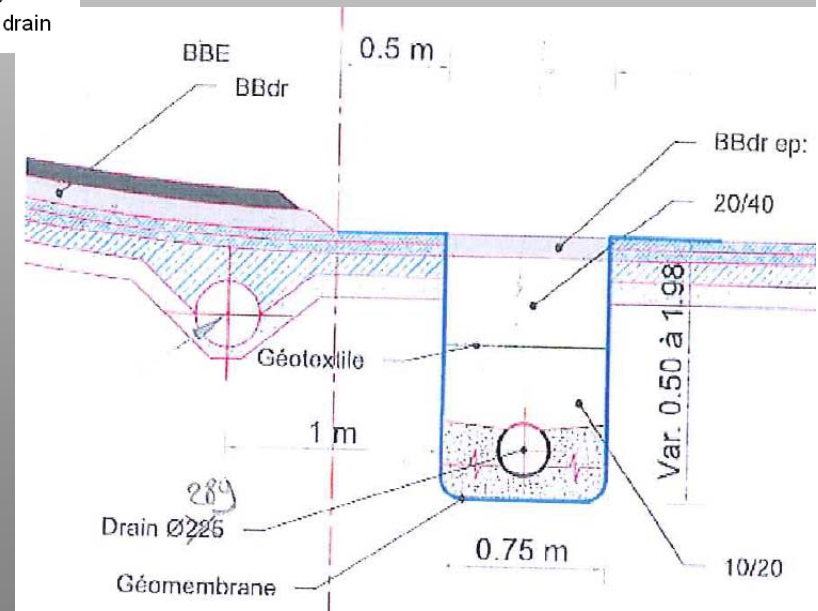


# PROJET ERINOH



## Réhabilitation du canal de Curbans

Durance  
 Bief de 5 km  
 réfection béton bitumineux  
 2 fibres optiques en 2012





## CONCLUSIONS

1. L'érosion interne est le danger principal des digues
2. La détection des zones d'initiation est impérative pour la sécurité
3. Une méthode de détection et de suivi de l'initiation a été validée





# PROJET ERINOH

ERINOH c'est :



et CETMEF, CNR, Coyne et Bellier, EDG, EGIS, CERMES, ESTP, FNTP, TRSN, ISL, MCC, SNCF, SOLETANCHE-BACHY, SOTRESOL, FUGRO, SAFEUGE, TENCATE, VNF sans oublier :



27 Janvier 2011 J-J Fry

