

# Une nouvelle méthode d'analyse pour ouvrage en enrochement



## L'APPROCHE MICROMECHANIQUE

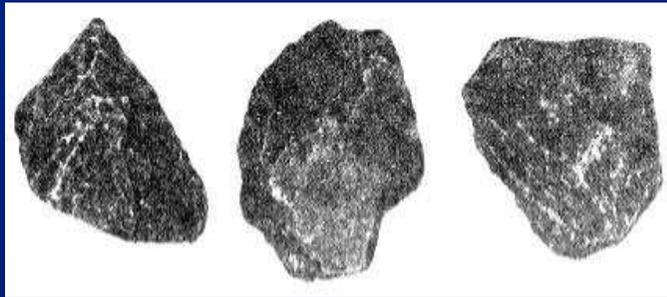
# Les antécédents

- 1965 : MARSAL R.J.** Stochastic processes in the grain skeleton of soil
- 1973 : MARSAL R.J.** Mechanical properties of rockfill
- 1979 : CUNDALL** Discrete Numerical Model for granular assemblies
- 1989 : GRECO** Géomatériaux logiciels de JEAN M. et MOREAU J-J
- 1993 : ITASCA** commercialise en France PFC2D
- 1996 : MAHBOUBI** Simulation numérique discrète du comportement des agglomérats : application au comportement mécanique des enrochements (rapport de contrat EDF – ECL)
- 2001 : FROSSARD E.** The energy approach in granular media mechanics
- 2002 : Projet RGCU MICROBE**

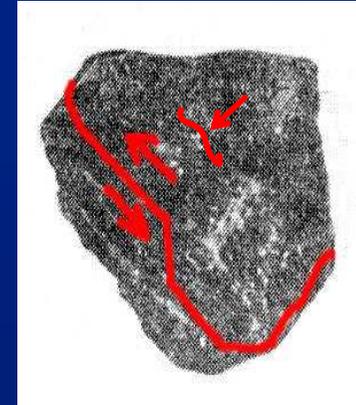


# Une idée de base : modéliser le bloc

Matériau réel

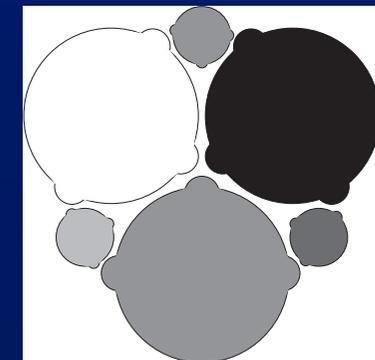
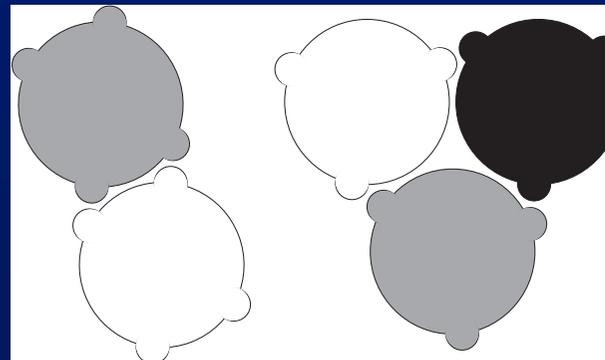
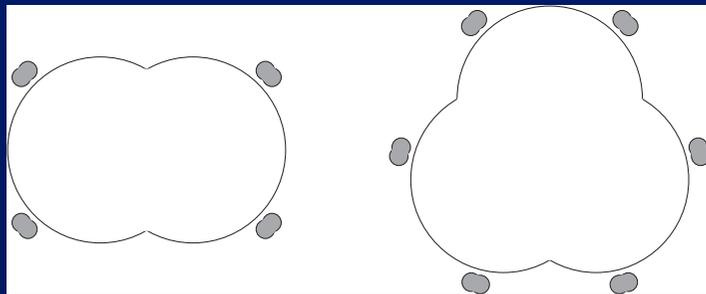


Formes de blocs



Mode de rupture

Matériau modélisé



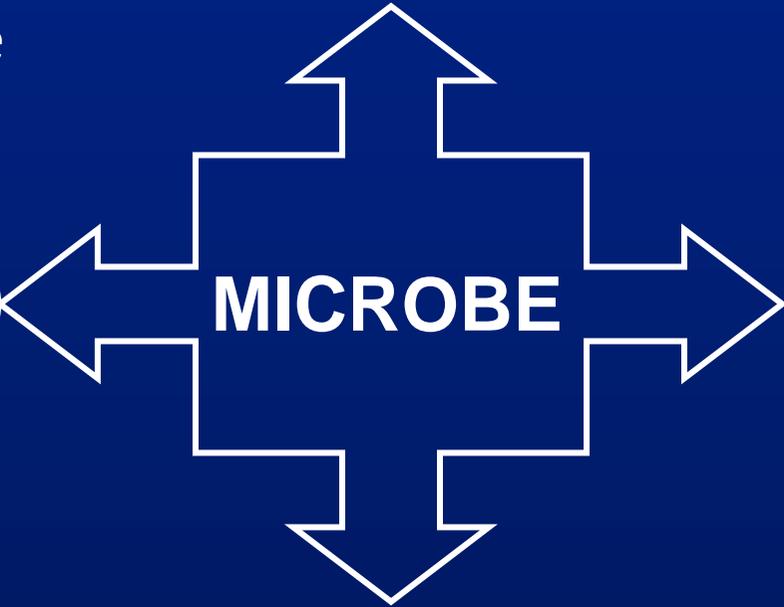


**Un projet**

Une université



Un maître d'ouvrage



Un développeur



Un Ingénieur-conseil

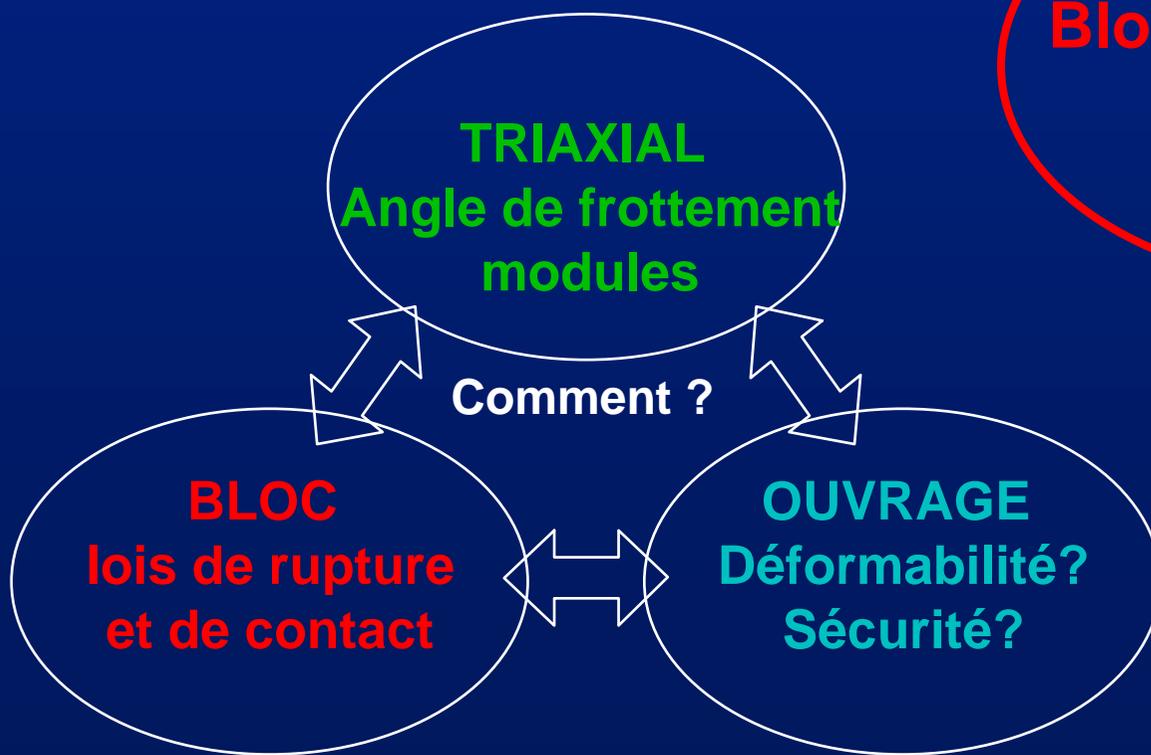


# Une méthodologie

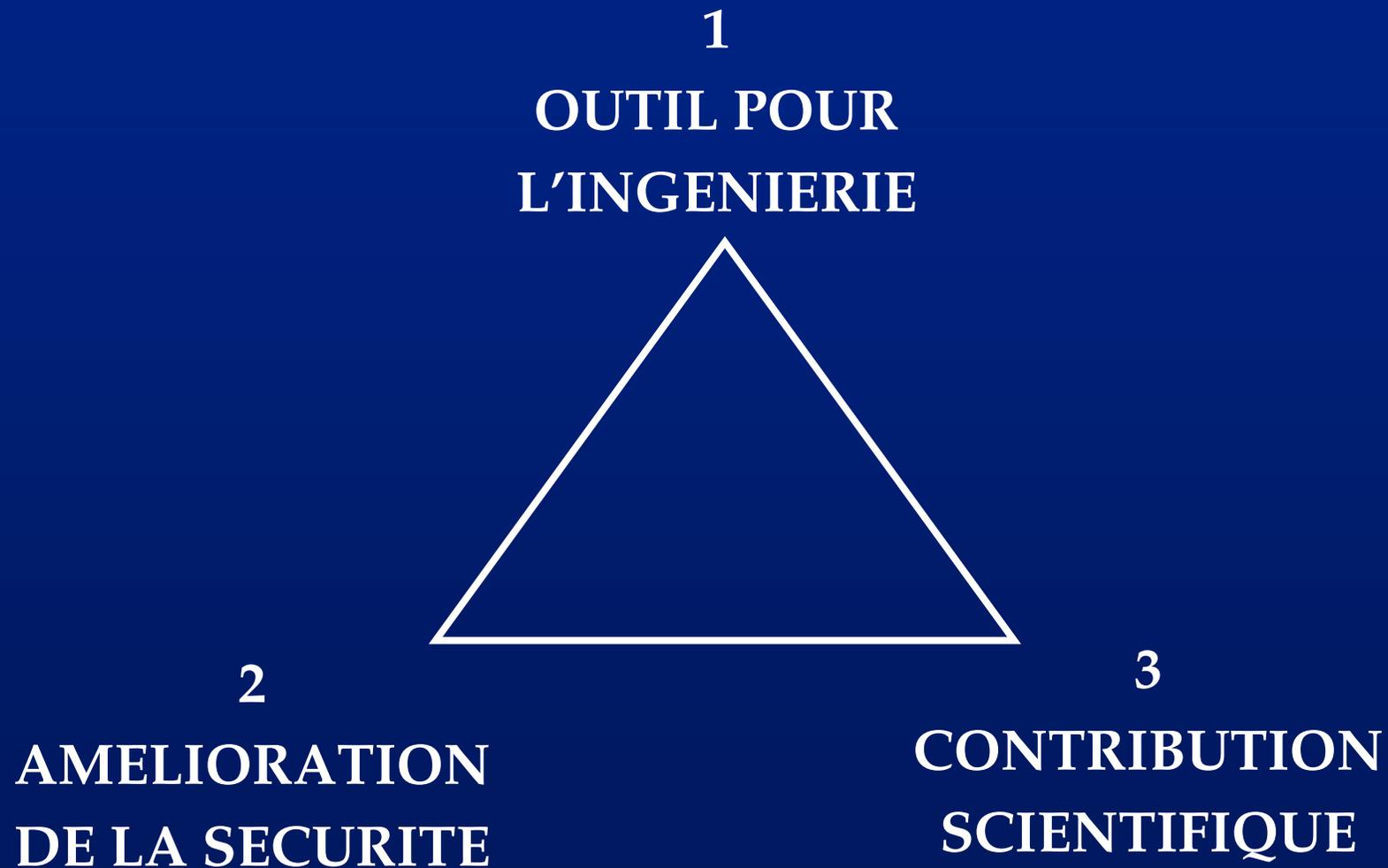
Quels sont les rapports entre :

Justification par calage de :

**Le bloc - le triaxial et l'ouvrage ?**



# Des objectifs



# Des résultats

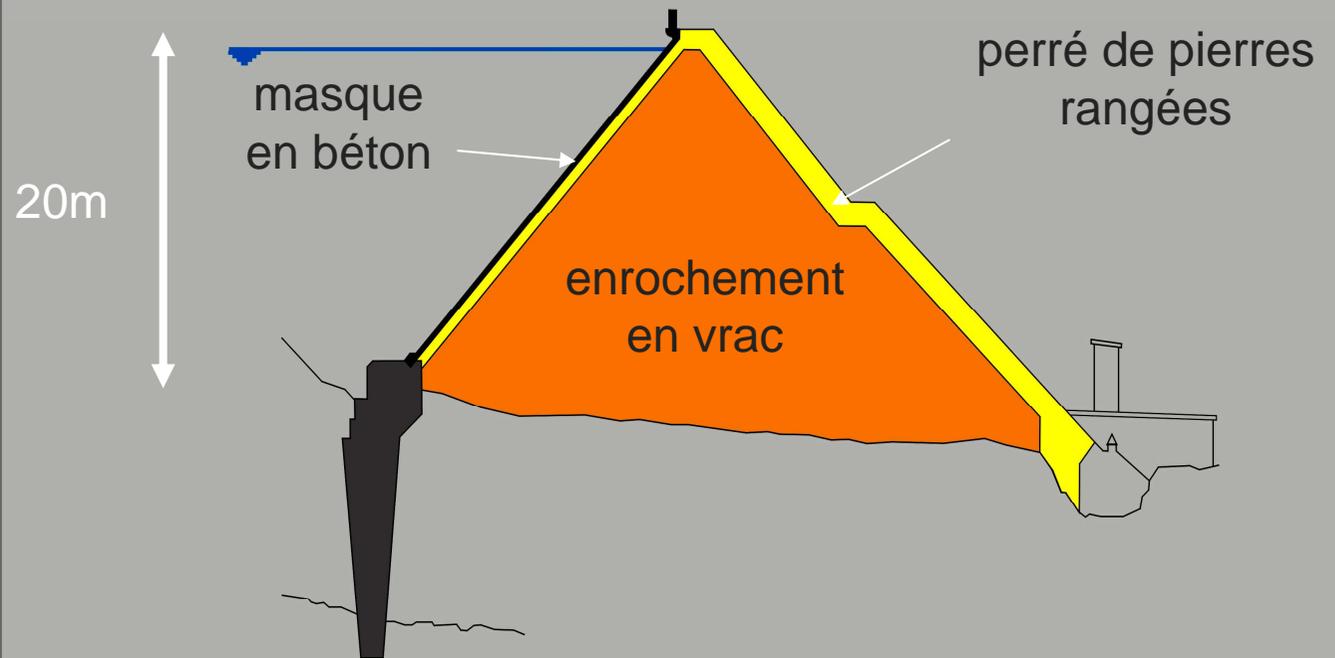
## Analyse du comportement :

- En construction
- À la mise en eau
- Après séisme
- Après 30 ans d'exploitation

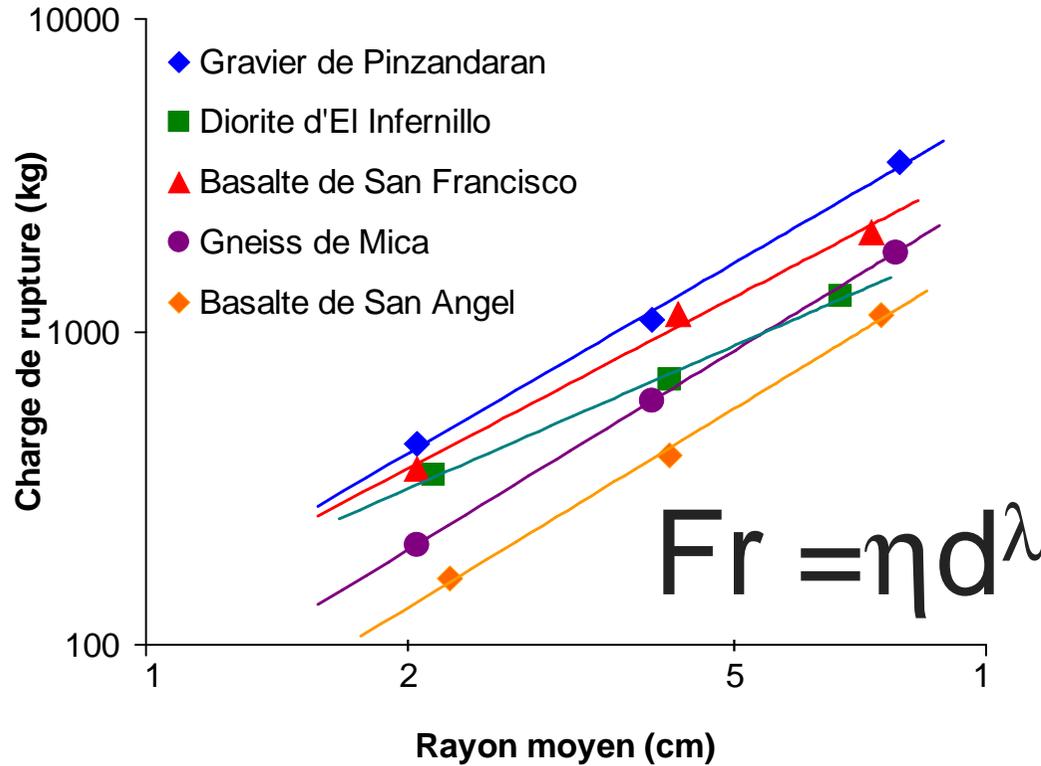
# un barrage des années 50



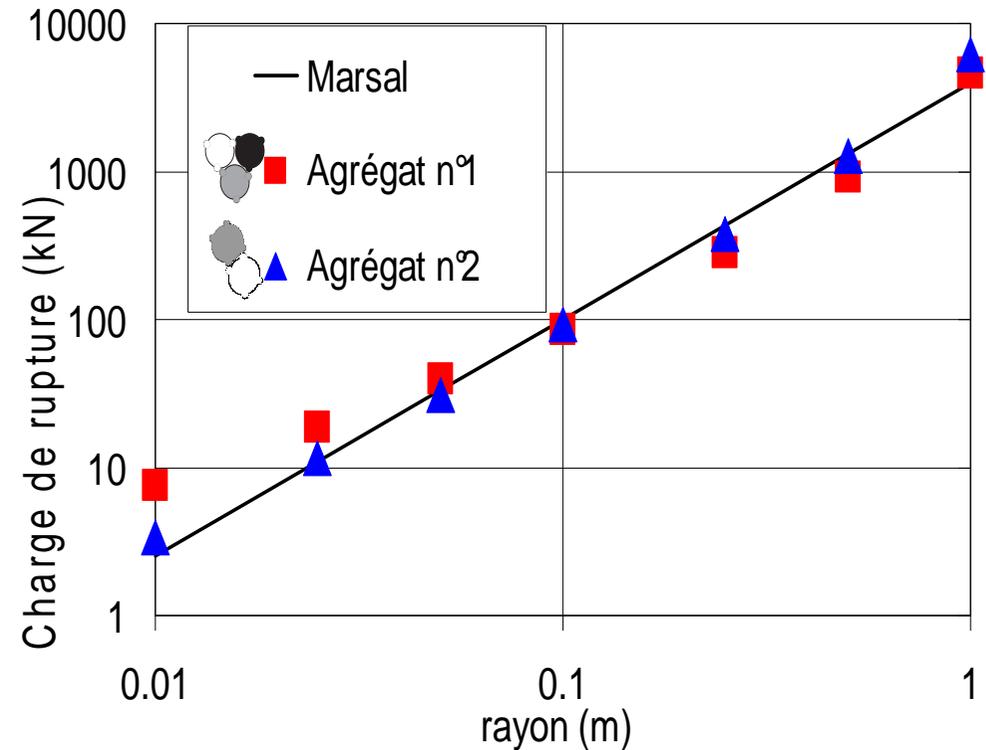
Hauteur 20 m  
fruit H/V = 1/1  
enrochement déversé  
perré rangé à la main  
masque en béton



# Le modèle du grain



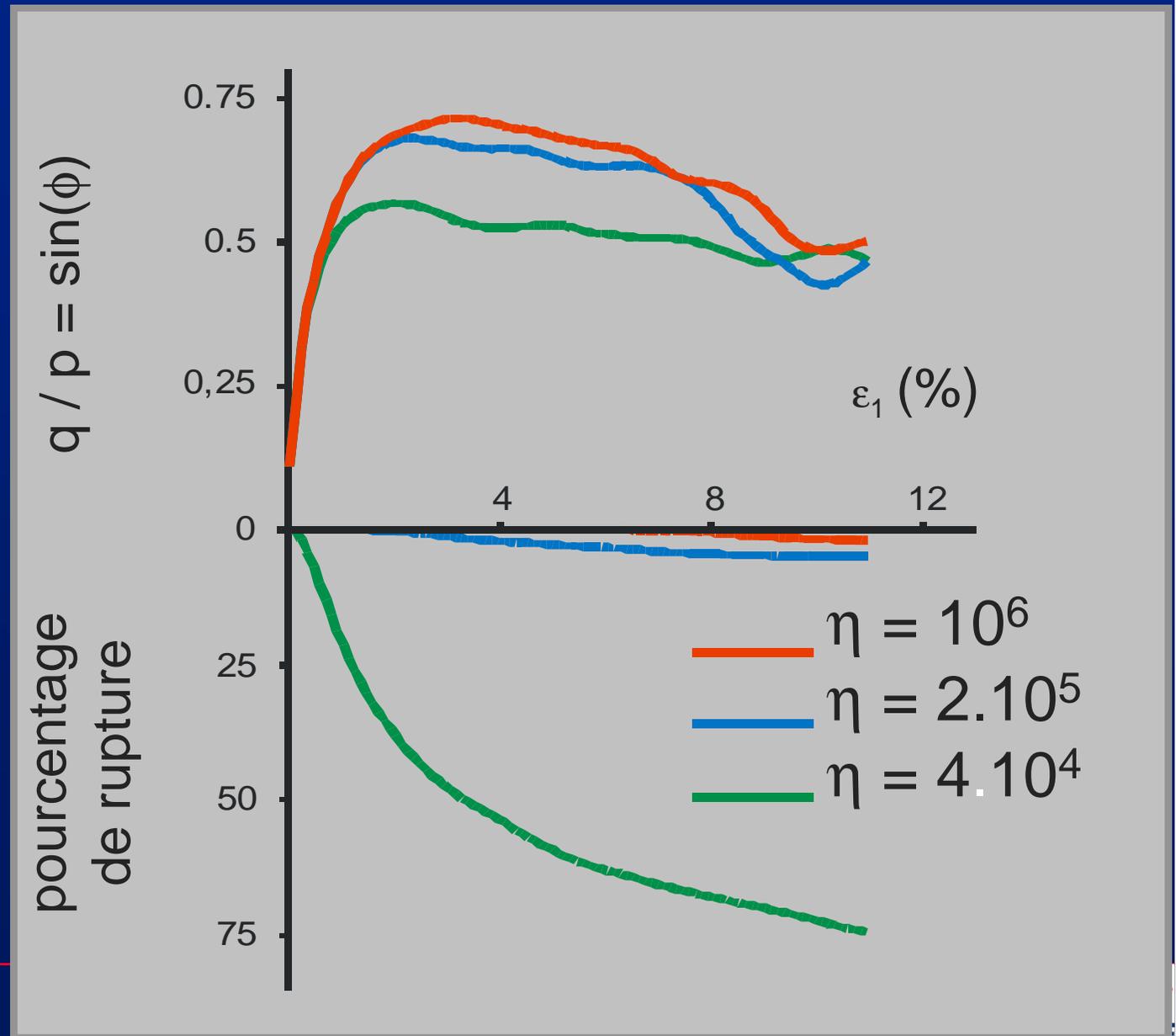
Essais d'écrasement



Calage sur les essais

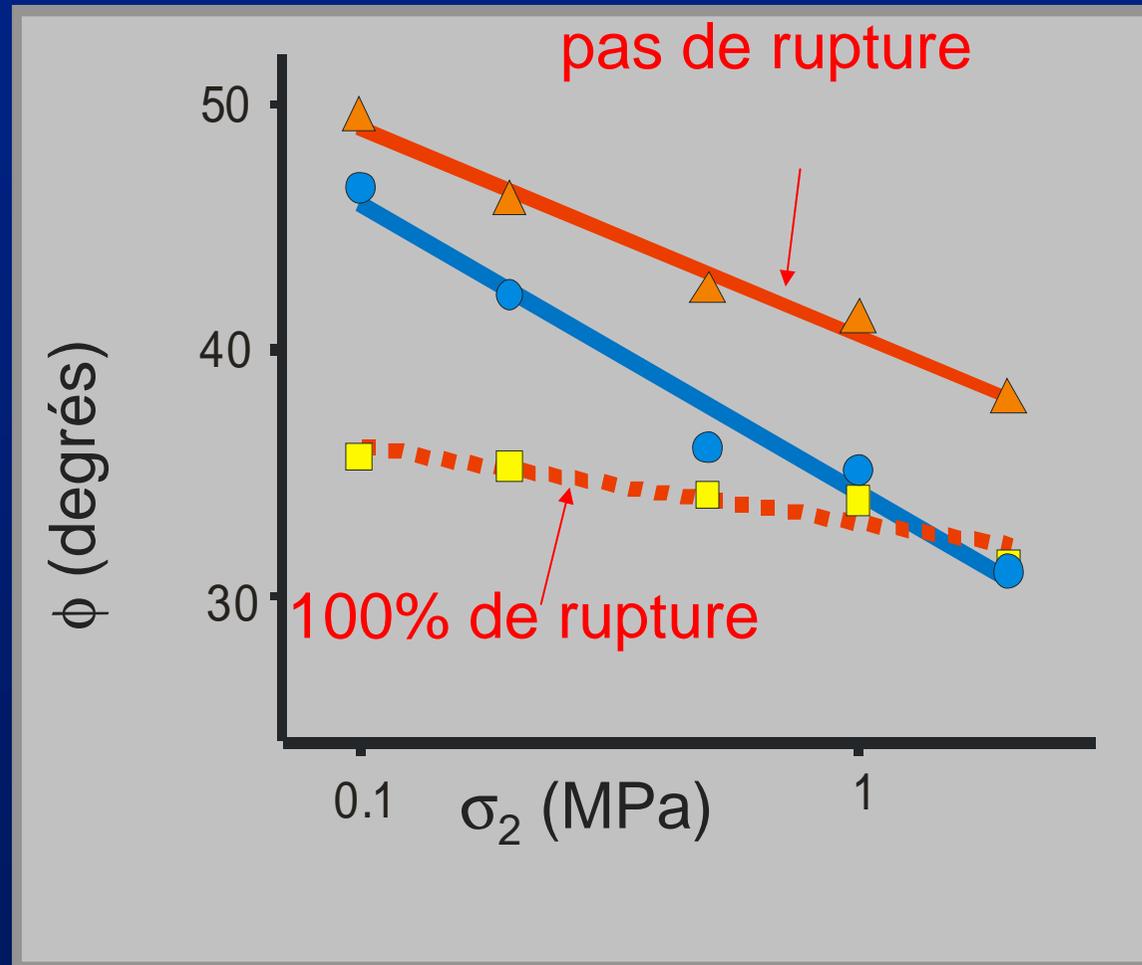
# Le V.E.R. Volume Élémentaire Représentatif

La résistance à  
L'essai triaxial  
dépend de la  
Résistance  
des blocs



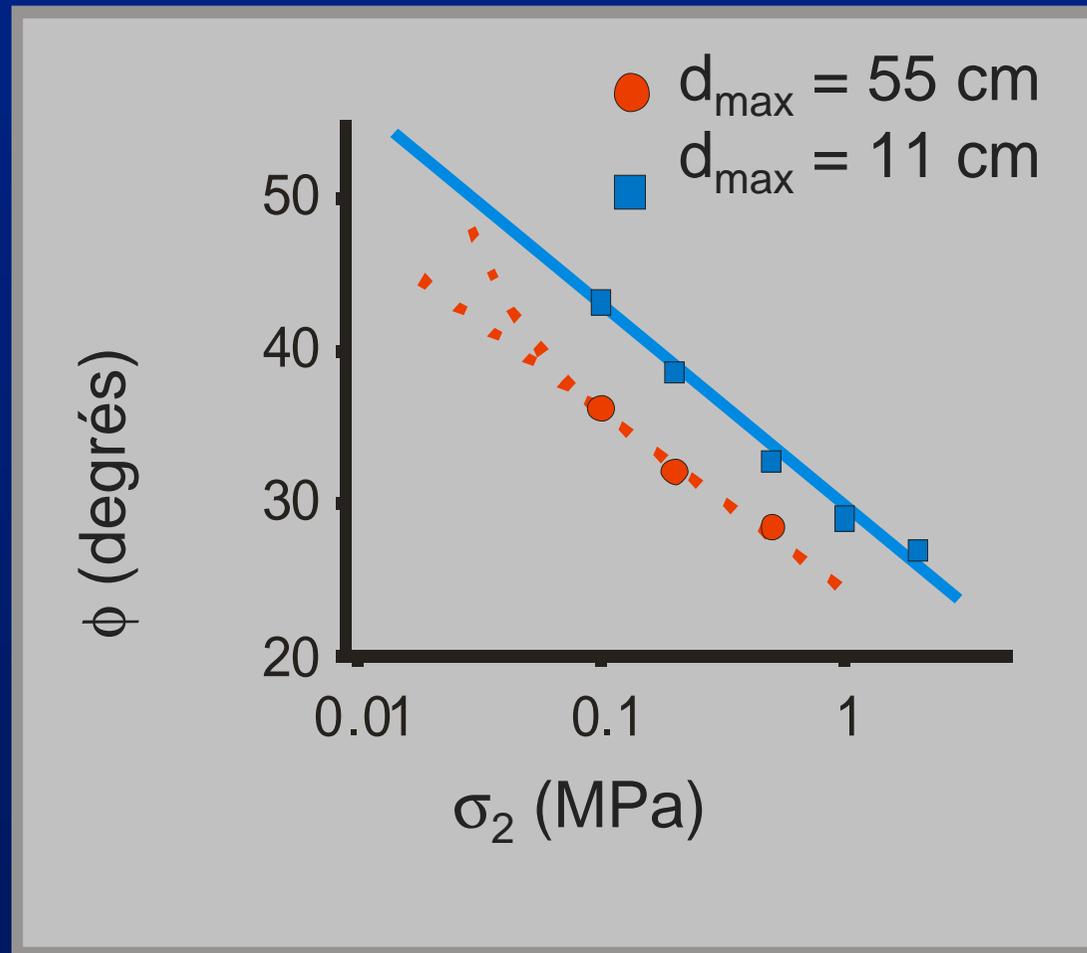
# Le V.E.R. Volume Élémentaire Représentatif

La décroissance de l'angle de frottement par confinement est principalement liée à la rupture des grains



# Le modèle extrapolé à l'ouvrage

L'angle de frottement du matériau réel est obtenu par intégration du modèle calé sur le V.E.R.

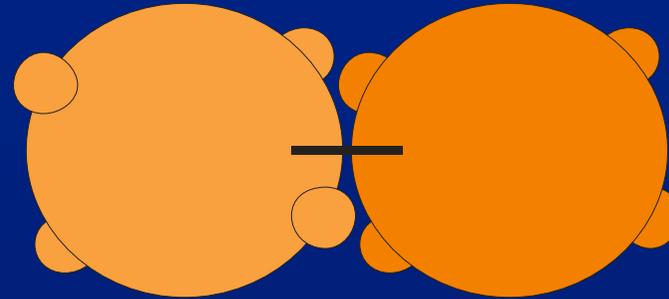


# Le modèle du grain après calage

Forme agrégat  
granulométrie :

$$D_{\max} = 22 \text{ cm}$$

$$CU = 2$$



Résistance : moyenne  $\eta = 3.5 \cdot 10^5$

Coefficient de friction : moyen  $\psi = 35^\circ$

Densité : moyenne ( $e_{2D} = 0,30$ )

Angle de frottement à 100 kPa : faible

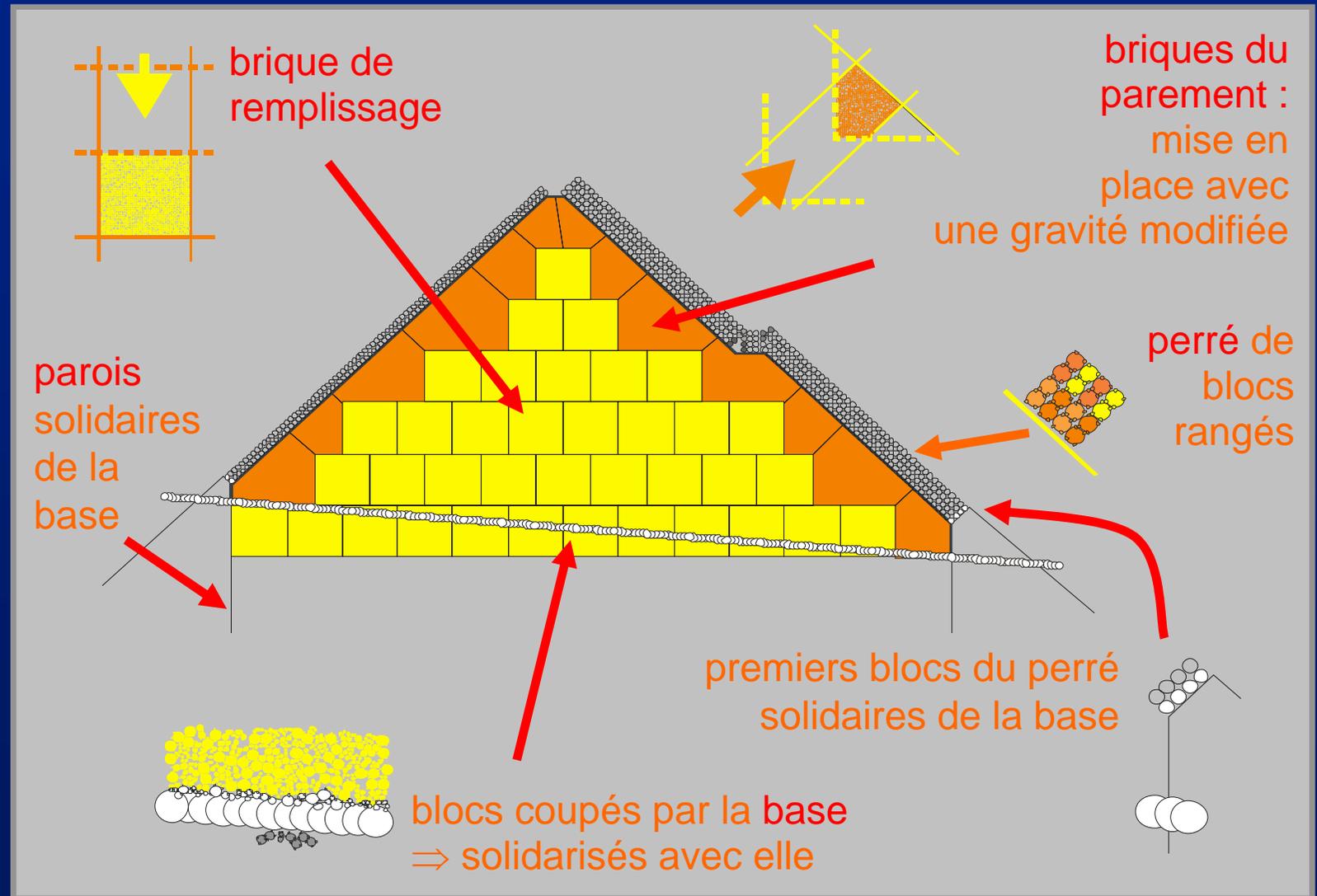
sans rupture  $\phi = 40.5^\circ$

avec ruptures  $\phi = 38.7^\circ$

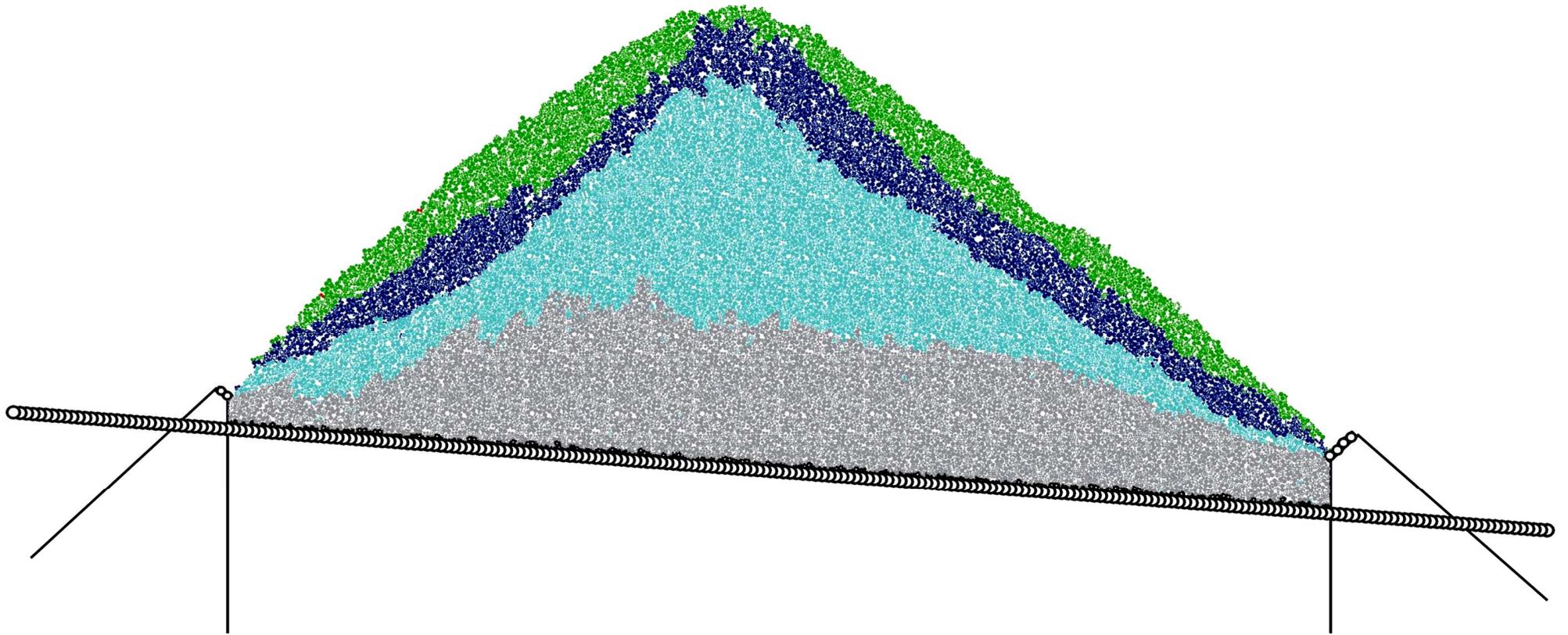
# Le modèle de l'ouvrage

220 000  
particules

22 000  
blocs



# Construction : Instabilité sans perré



1 m – 3 m  
35 cm – 1 m



10 cm – 35 cm  
3.5 cm – 10 cm

# Construction stable avec perré (sans rupture de blocs)

Coefficient de sécurité

$$1.3 < F < 2.0$$

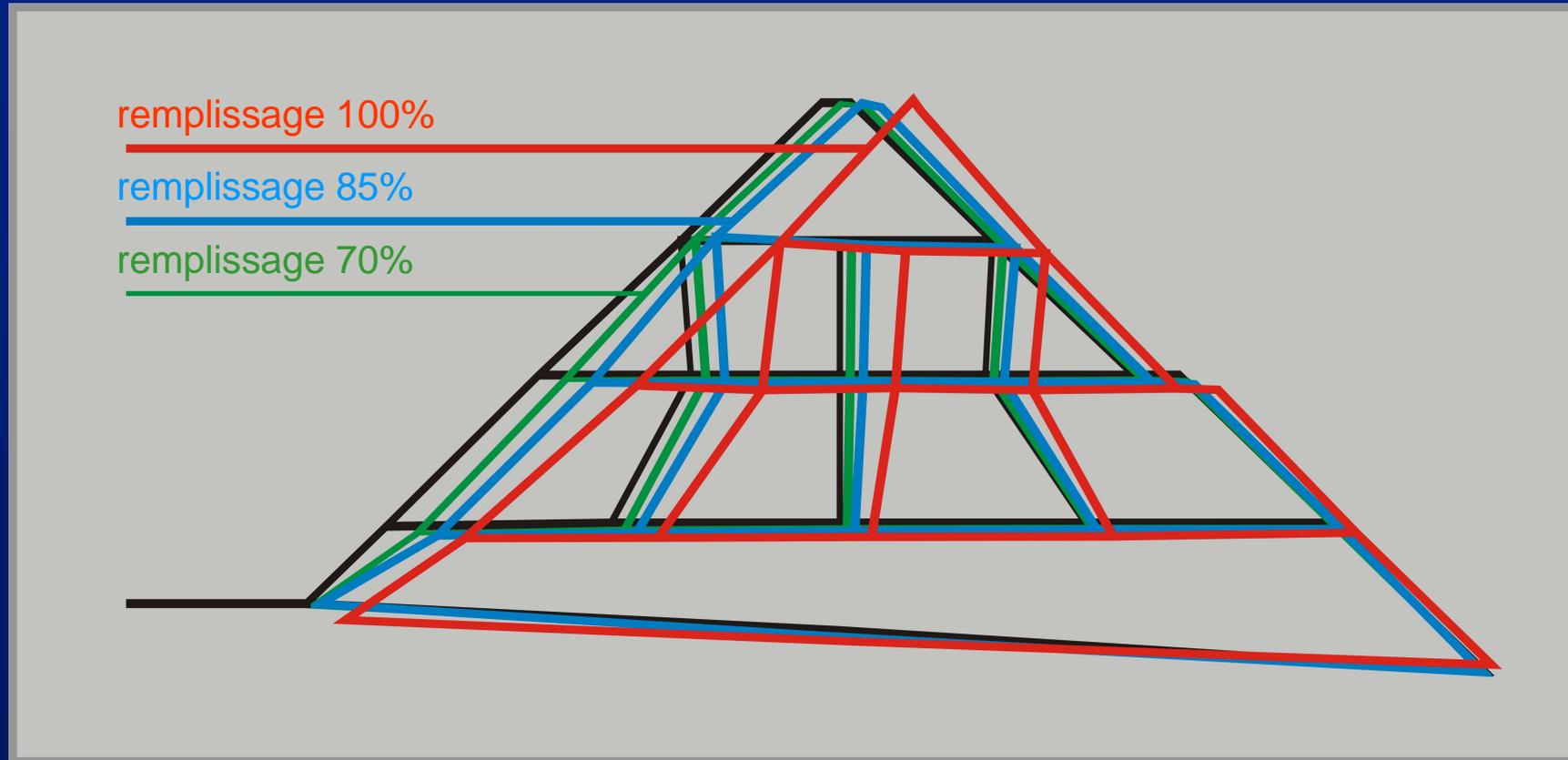
$$\tan \psi^* = \frac{\tan \psi}{F} \quad \tan \phi^* = \frac{\tan \phi}{F}$$

Coefficient pseudo-statique critique

$$0,09 < K_c < 0,16$$

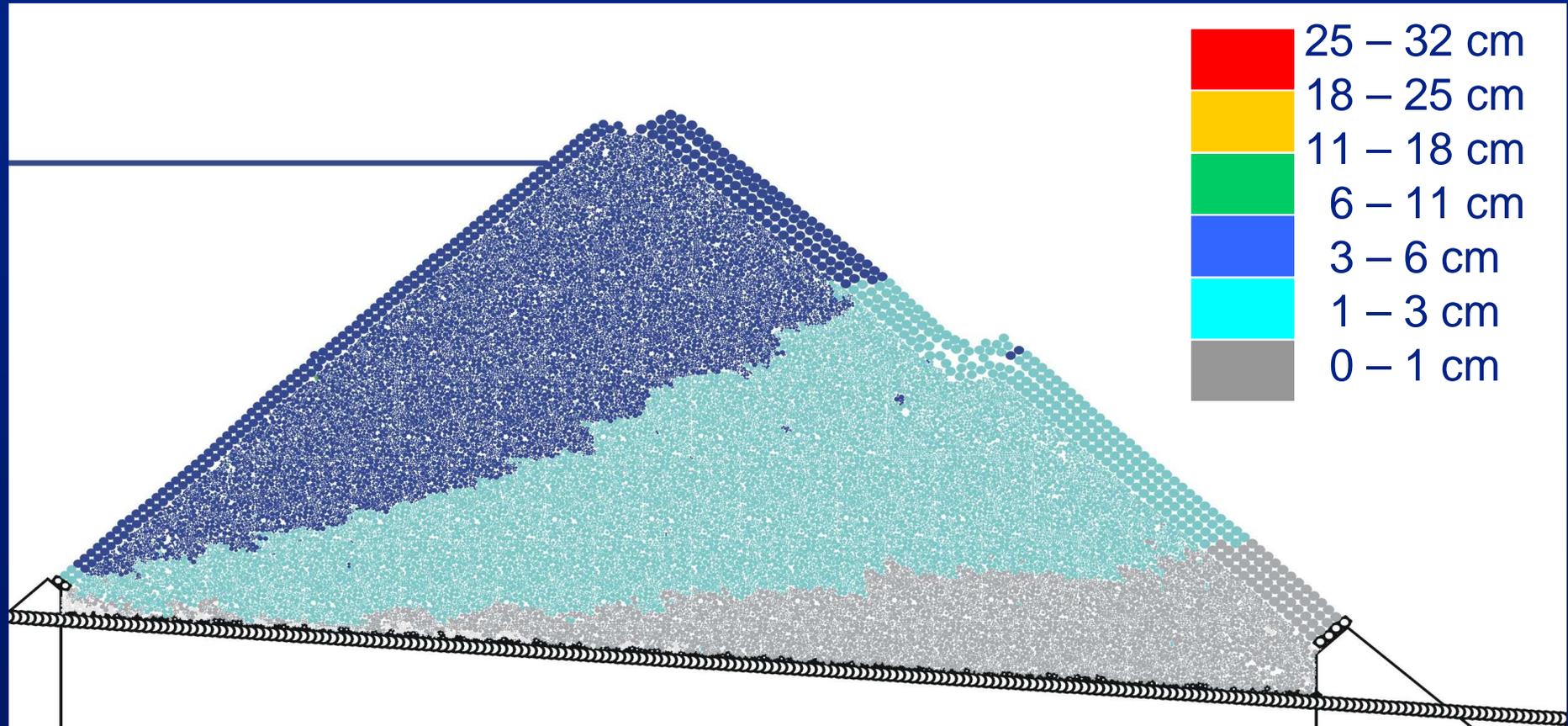
# Mise en eau (sans rupture de bloc)

Construction : tassement 20 cm



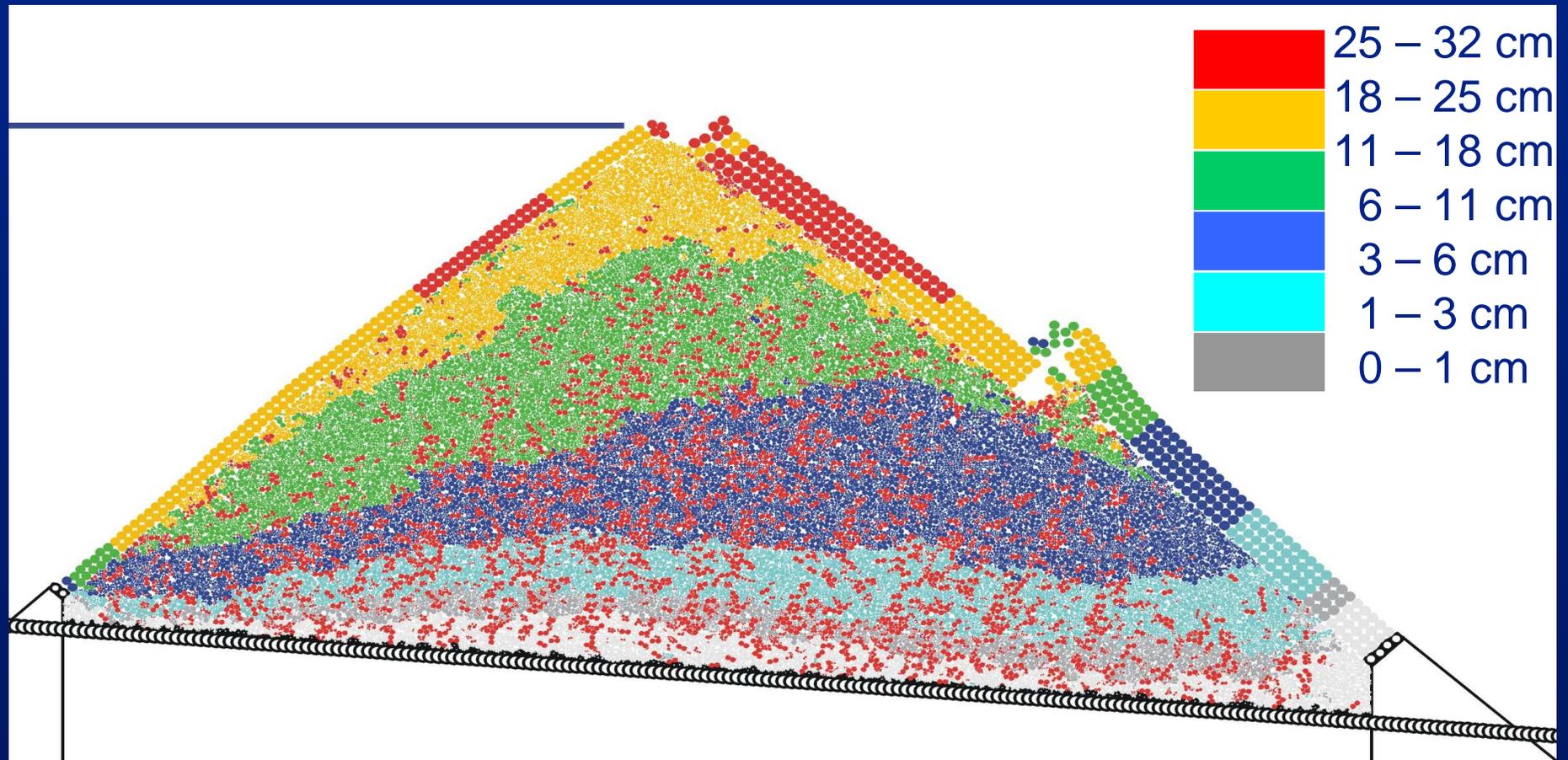
Mise en eau : déplacements horizontaux 10cm

# Mise en eau sans rupture de bloc



Mise en eau : déplacements horizontaux 10cm

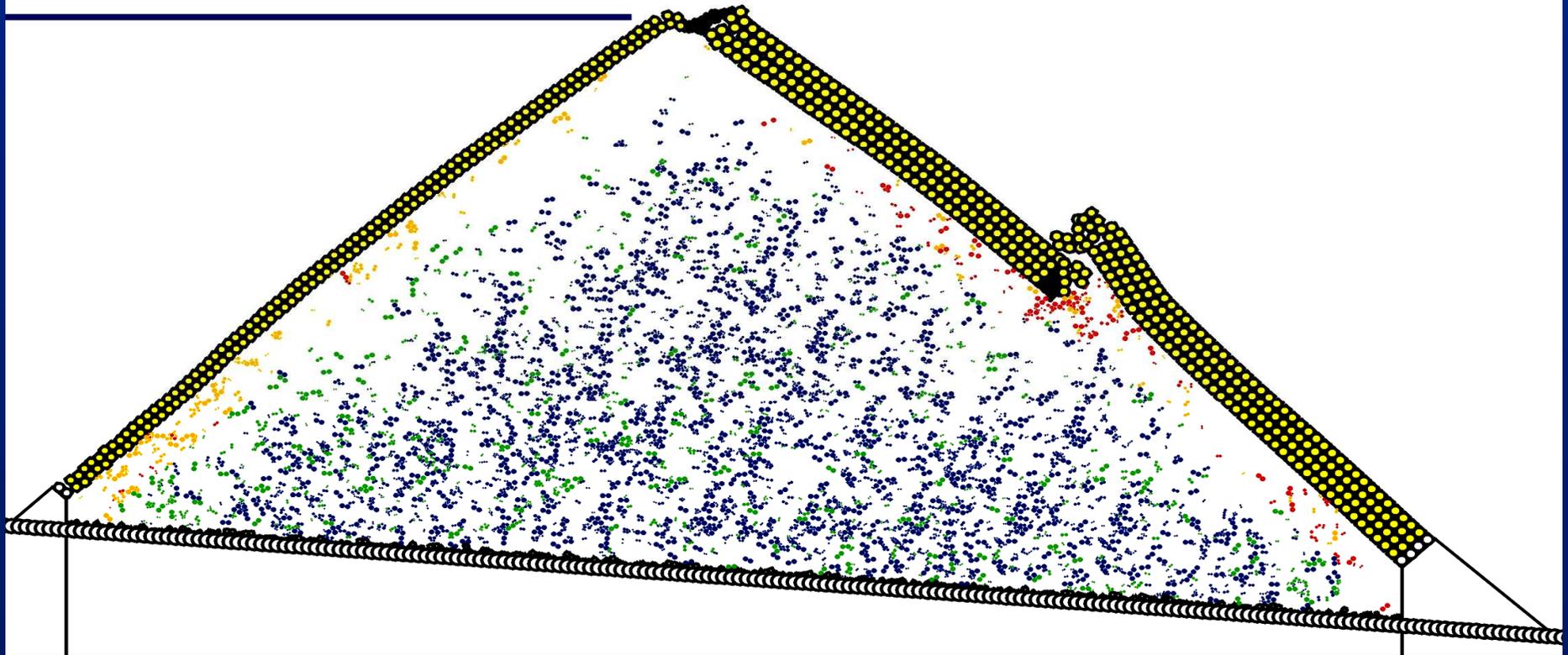
# Mise en eau avec rupture de blocs



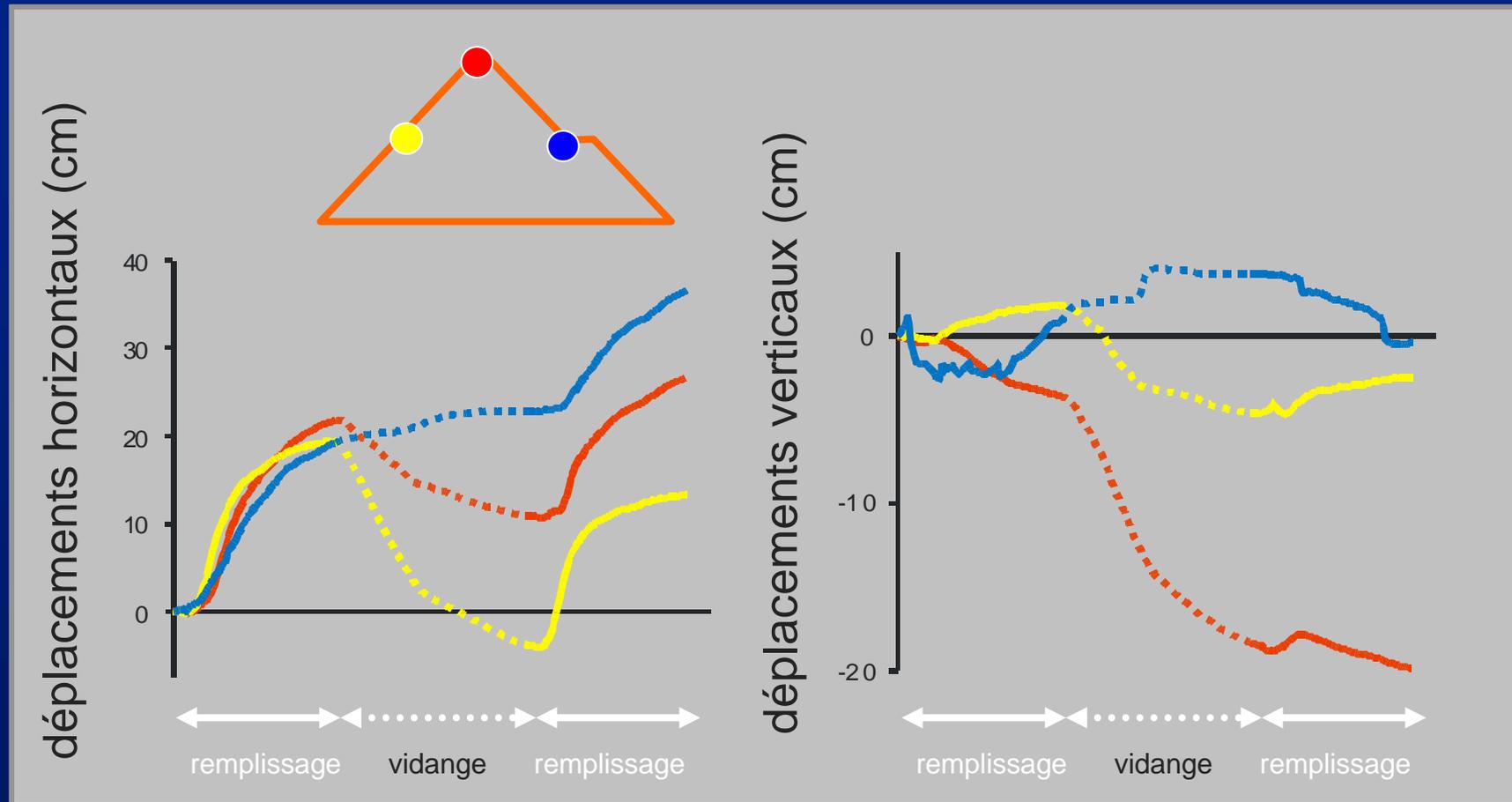
Point rouge : rupture de bloc

# Ruptures dues au remplissage

Blocs cassés en rouge



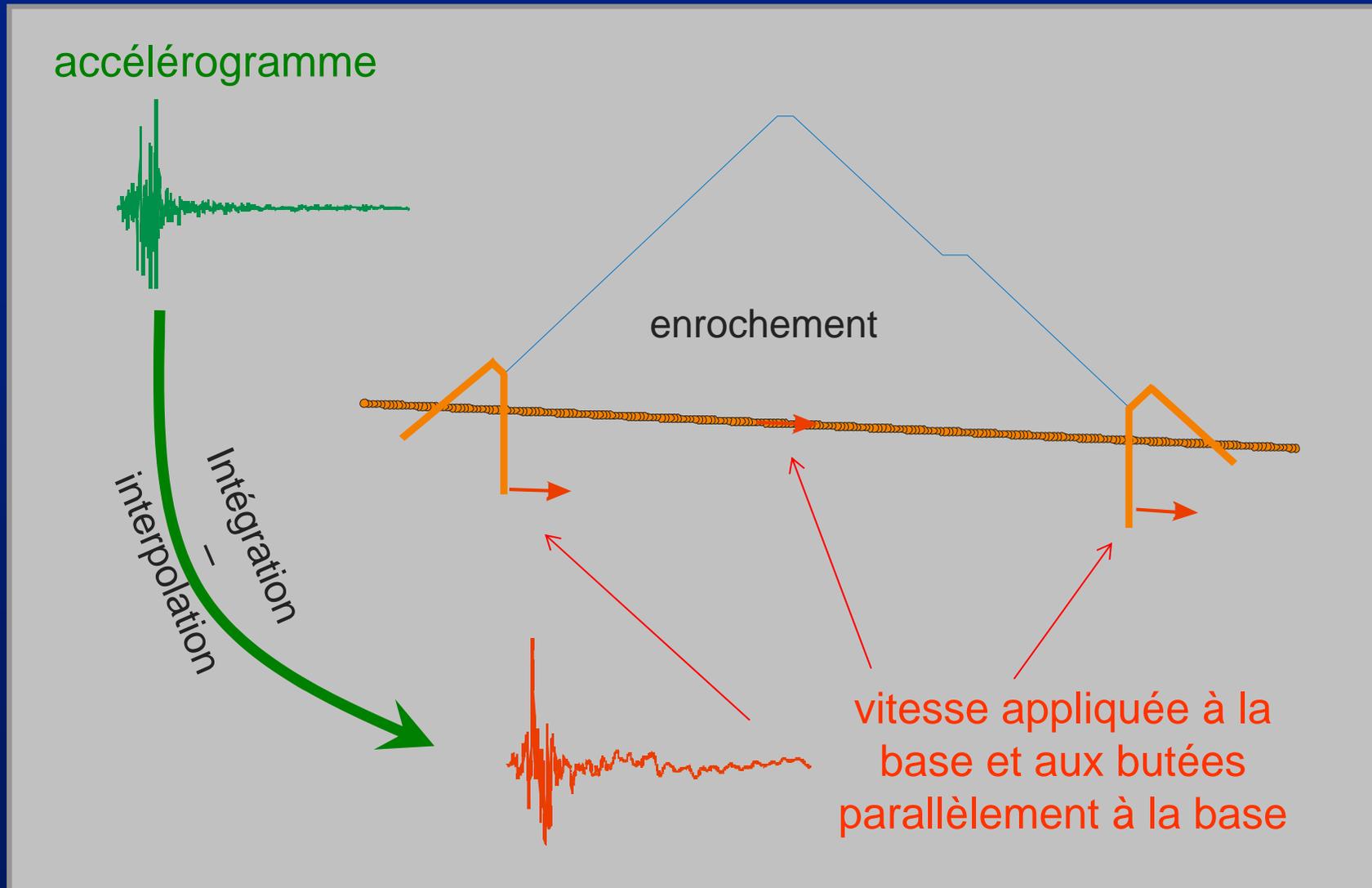
# Vidange et deuxième remplissage



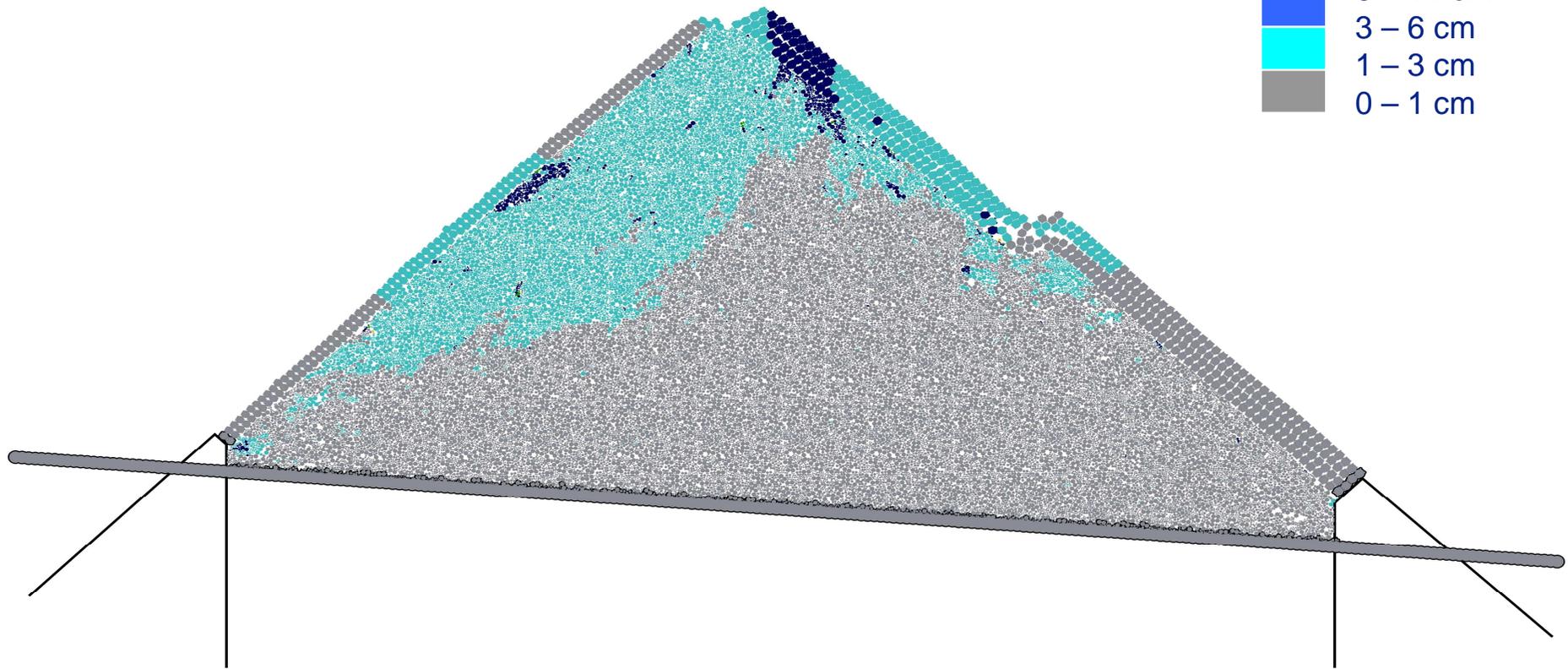
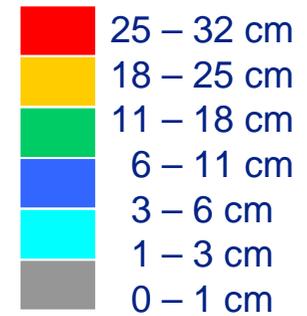
remplissage : déplacements horizontaux

vidange : tassements du parement amont

# Séisme retenue vide

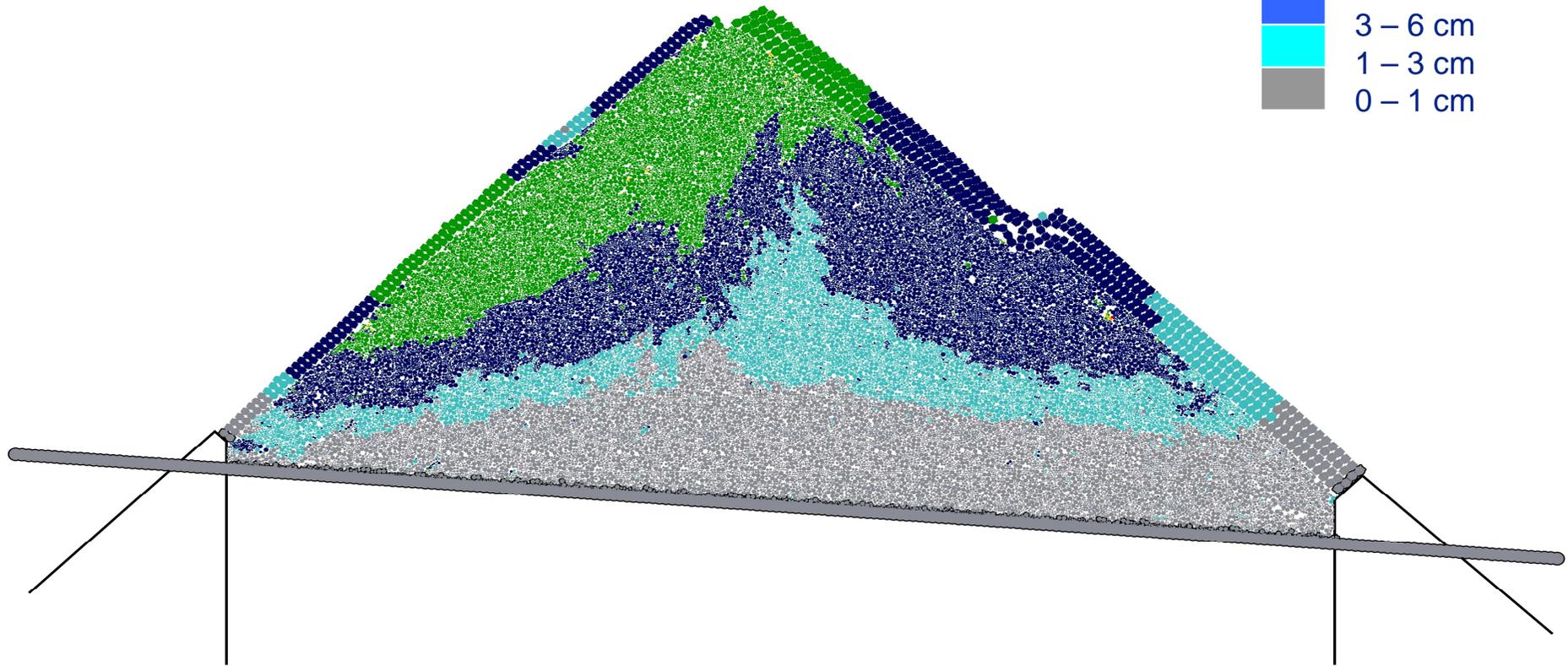
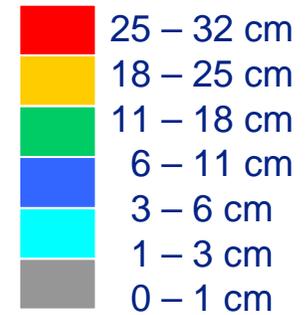


# Séisme 0,1g retenue vide



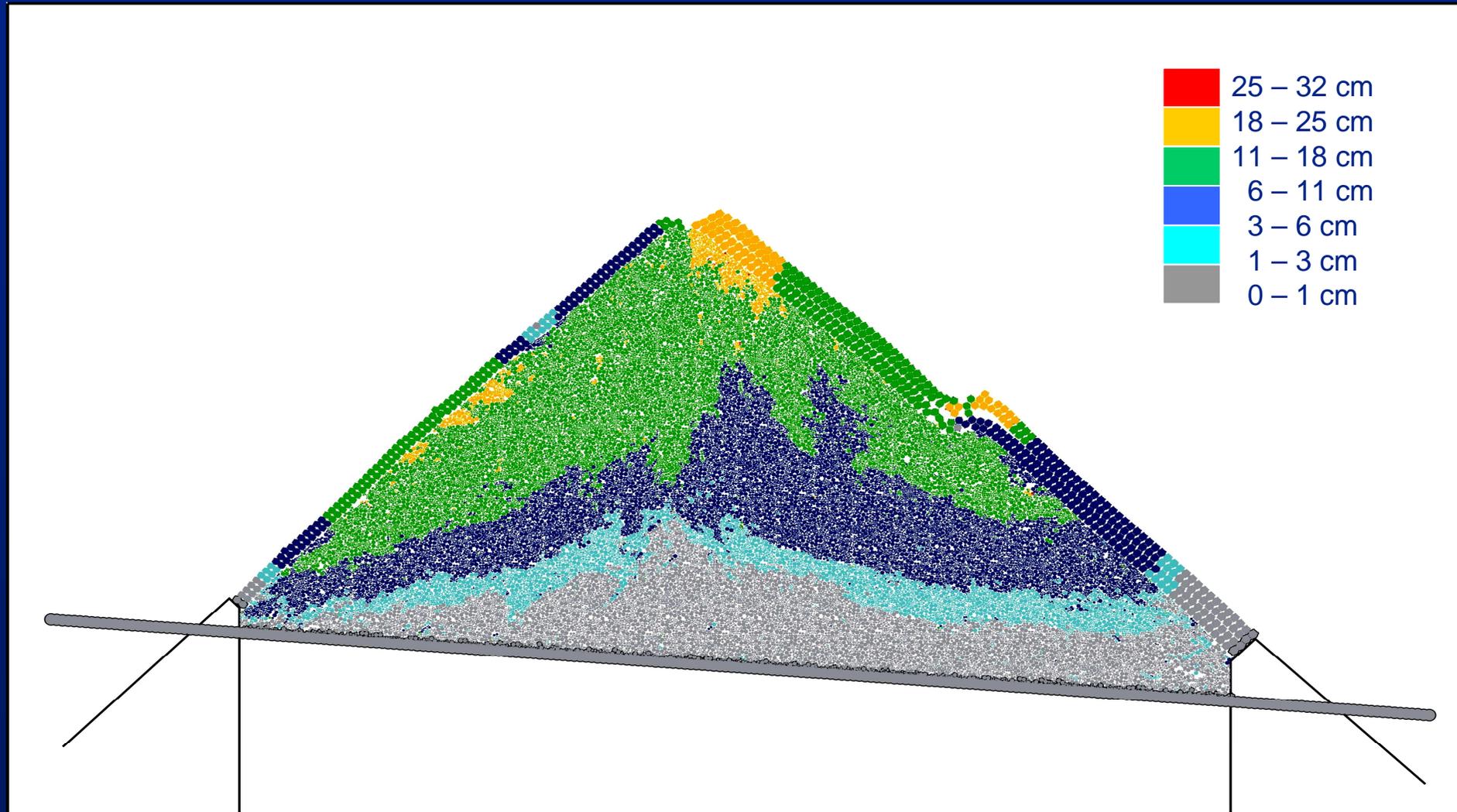
déplacements modérés (< 10 cm) localisés en crête

# Séisme à 0,3 g retenue vide



déplacements entre 10 et 20 cm localisés à l'amont

# Séisme à 0.5 g retenue vide



déplacements >20 cm localisés en crête et en berme

# Séisme à 0,5 g retenue vide

## CONSTATATIONS

nombreuses ruptures (12%  $\Rightarrow$  19%)

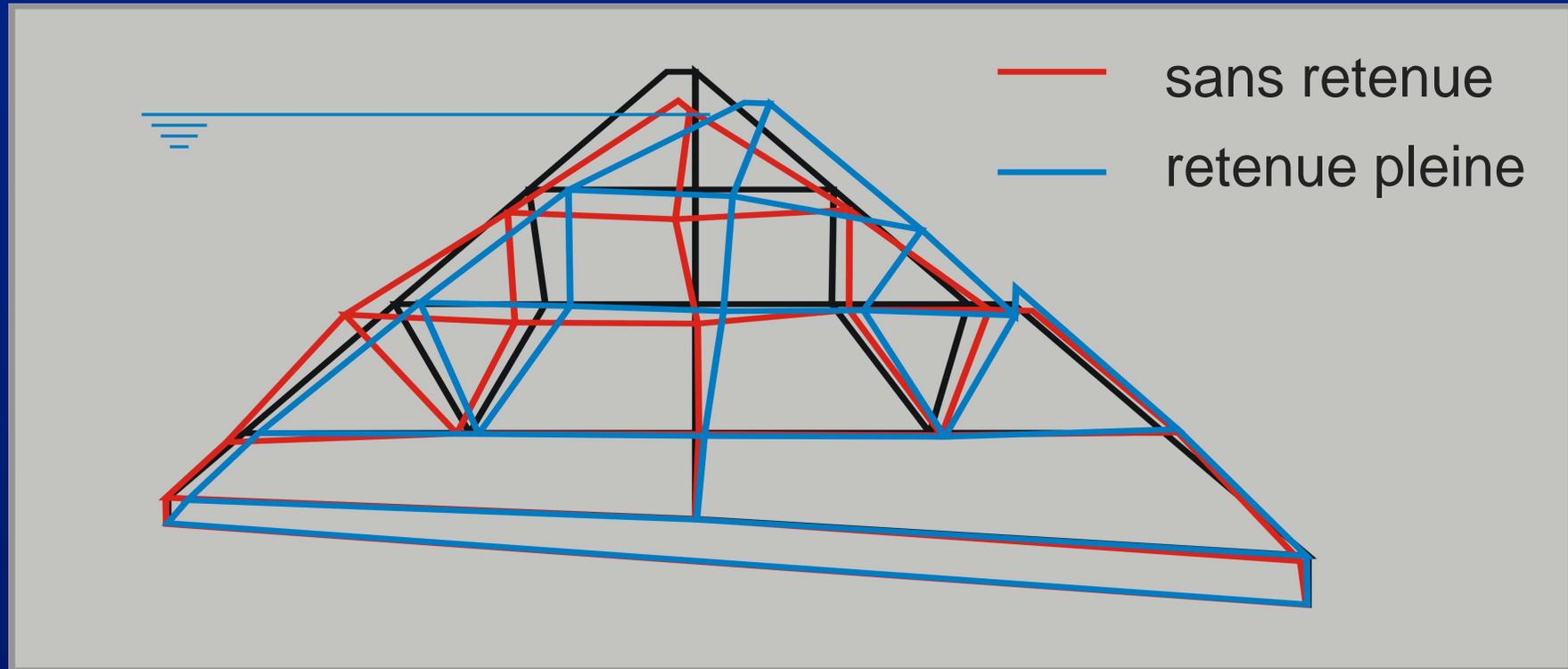
coïncident avec la phase forte du séisme

tassements amplifiés de 12 cm (0,1g) à 34 cm en crête

Perré supérieur poinçonne la berme

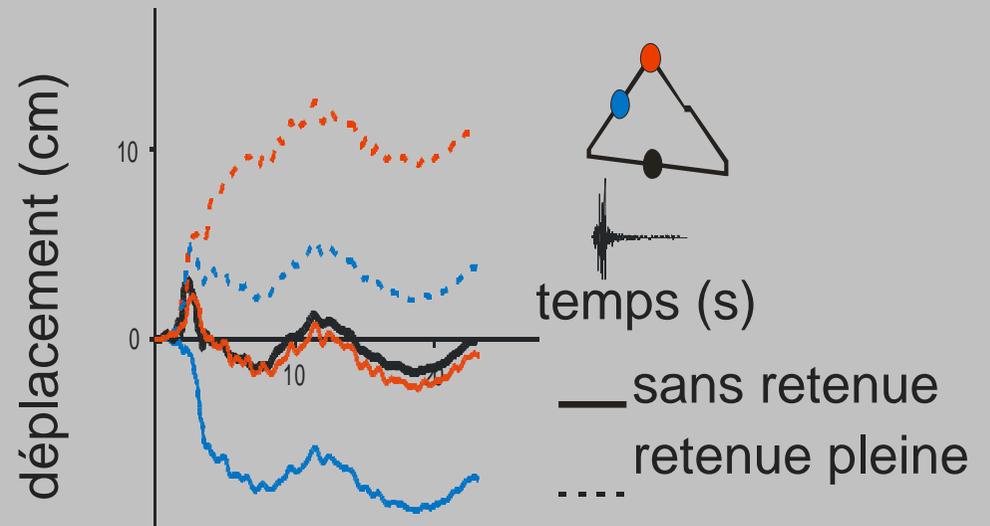
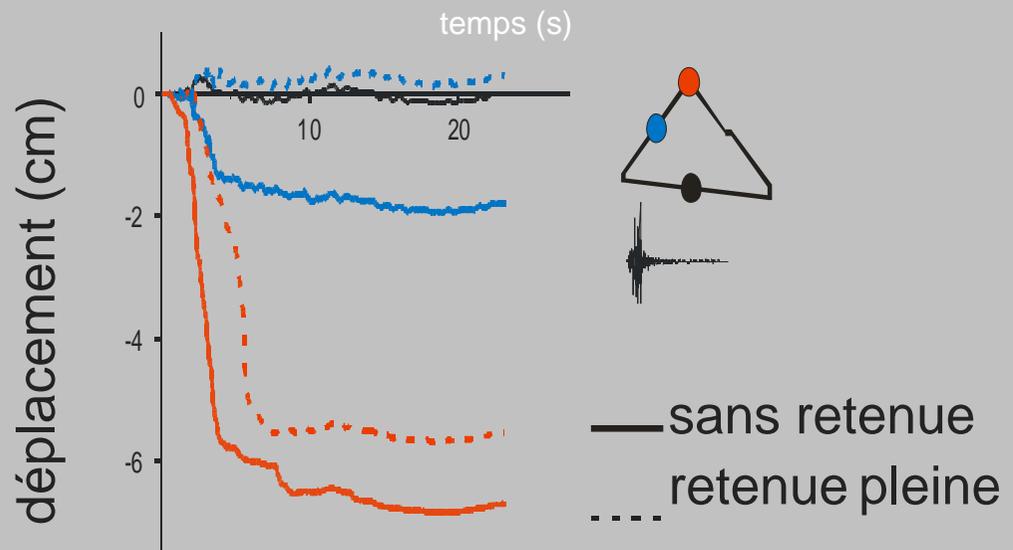
Glissement contenu par le perré

# Séisme à RN



Déplacements horizontaux vers l'aval  
blocage du parement amont  
diminution des tassements

# Séisme avec retenue à RN



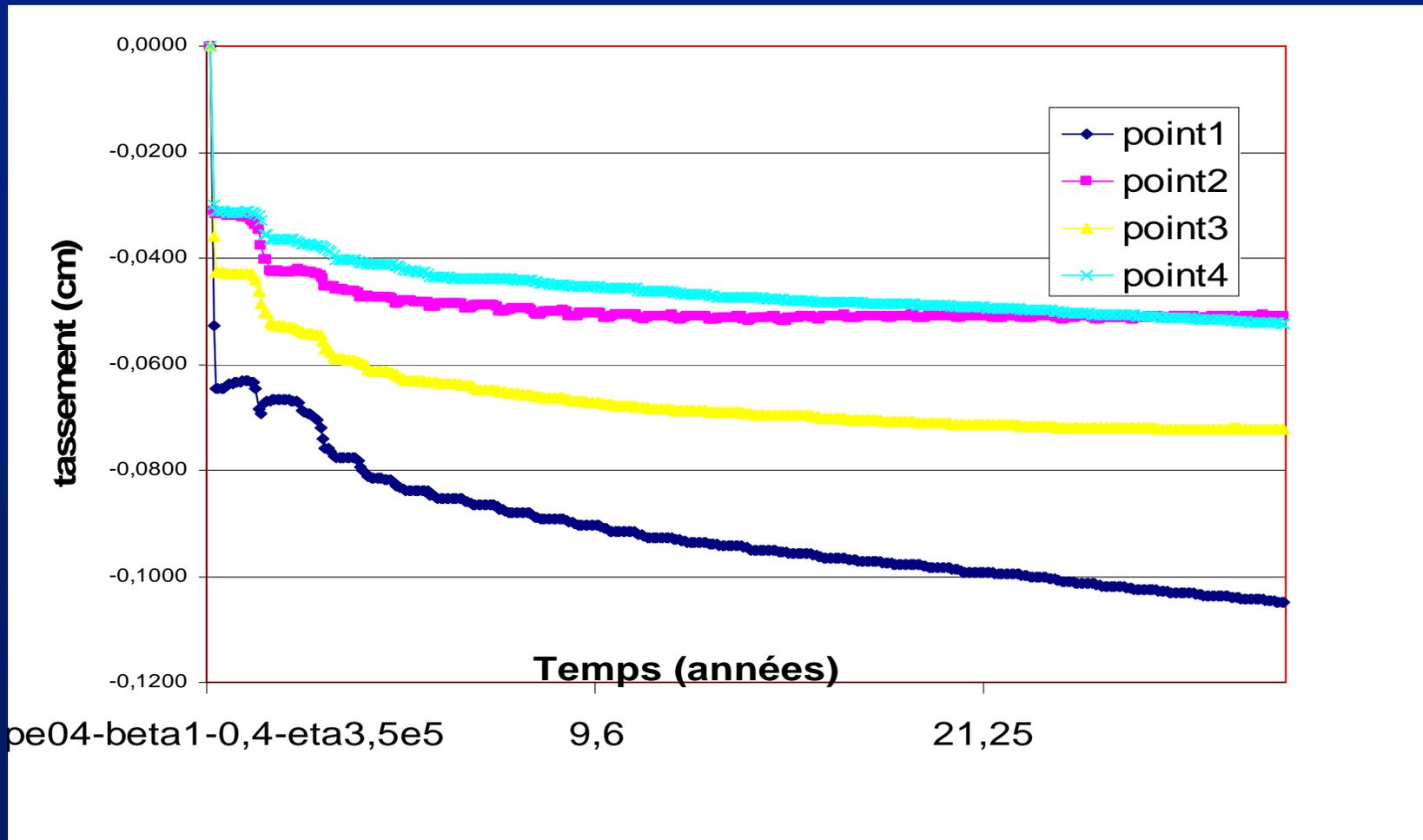
déplacements verticaux

déplacements horizontaux

Influence de la retenue :

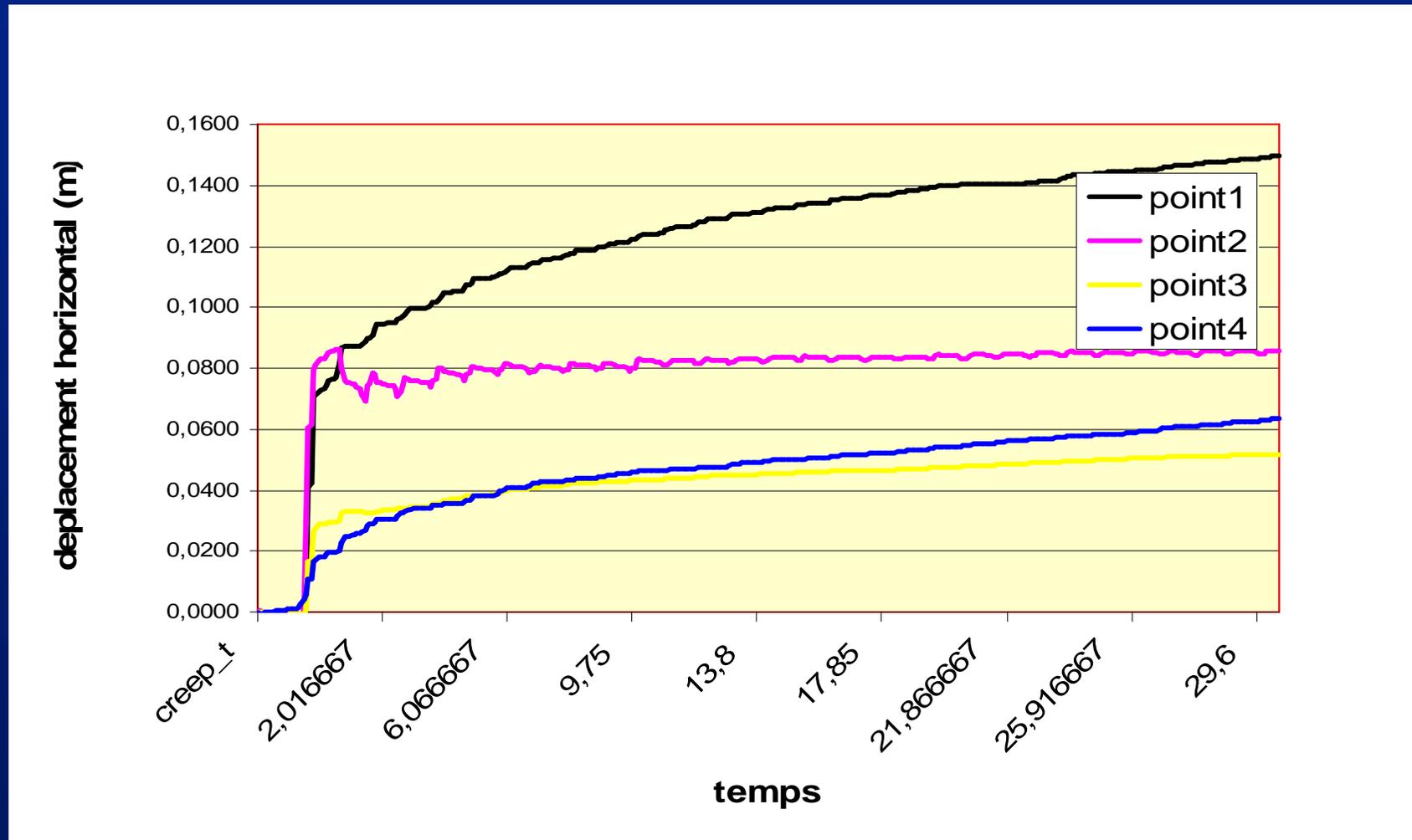
Diminution des tassements augmentation des déplacements vers l'aval

# Exploitation : tassement pendant 30 ans



Au bout de 30 ans, le tassement annuel atteint 0,7 mm

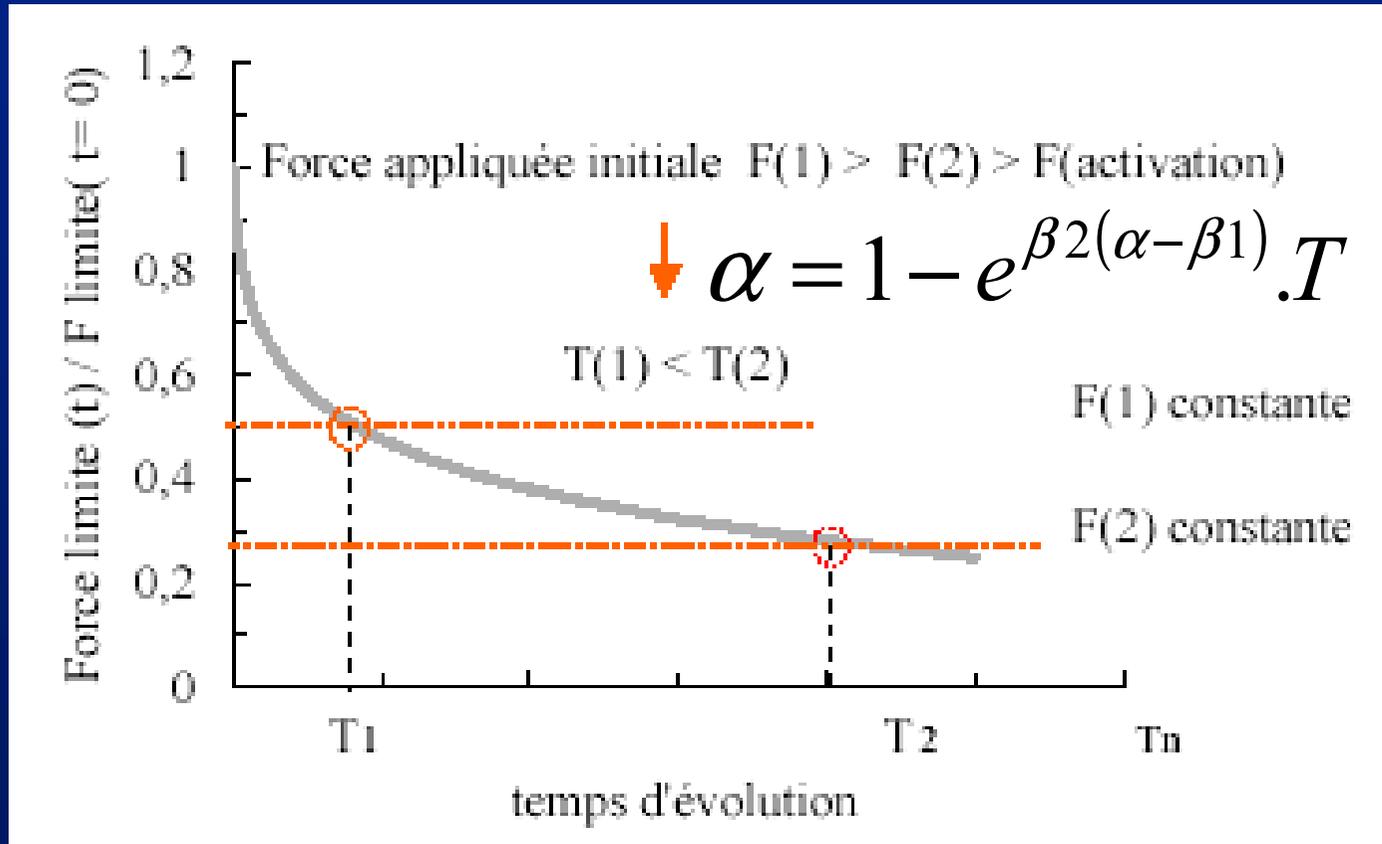
# Exploitation : Déplacements Horizontaux



L'ordre de grandeur du déplacement annuel est 1 mm

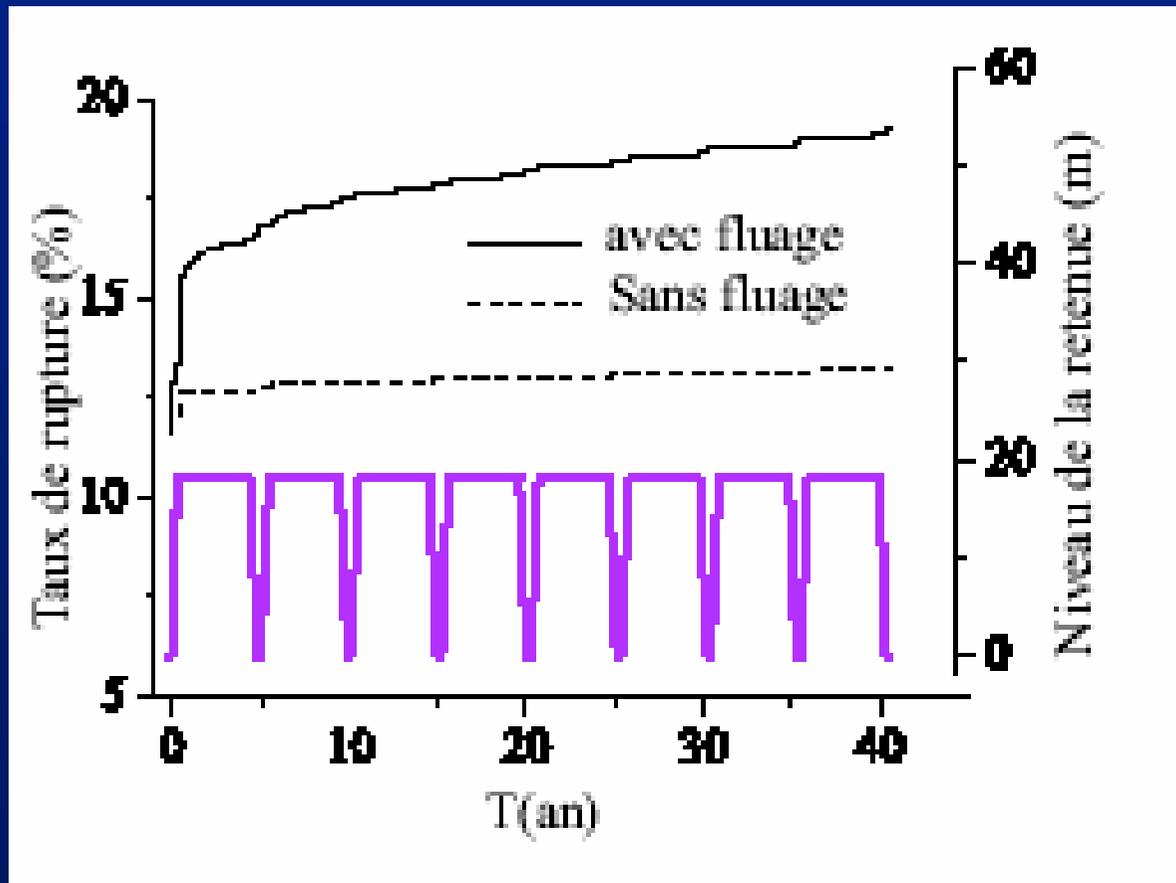
# Exploitation : mouvement avec vieillissement des blocs

$$\alpha = \frac{F(T)}{F(T=0)}$$



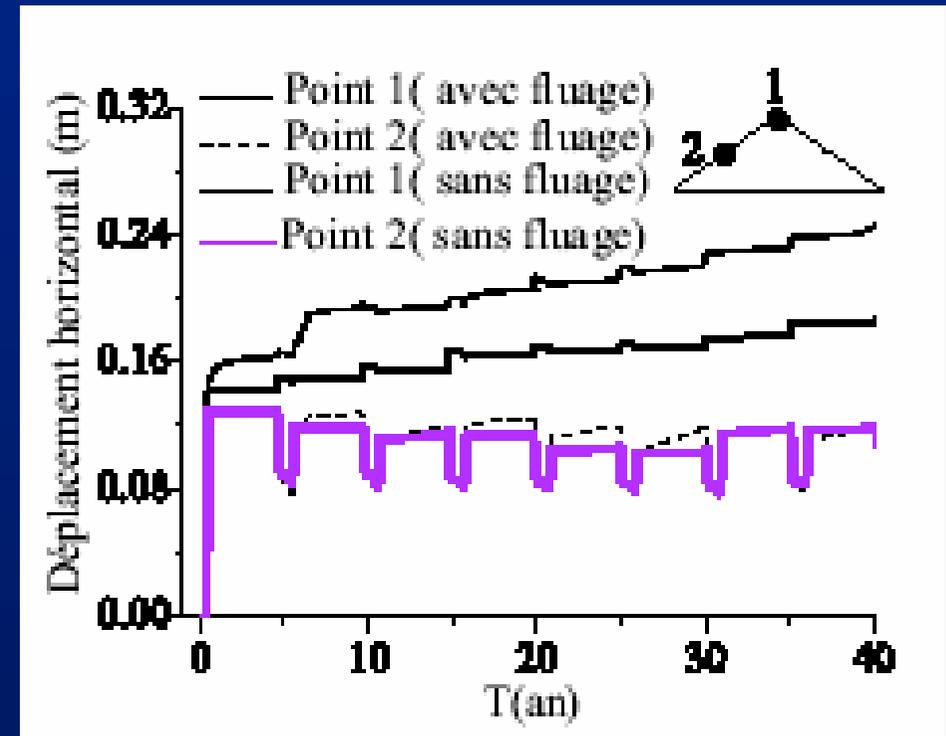
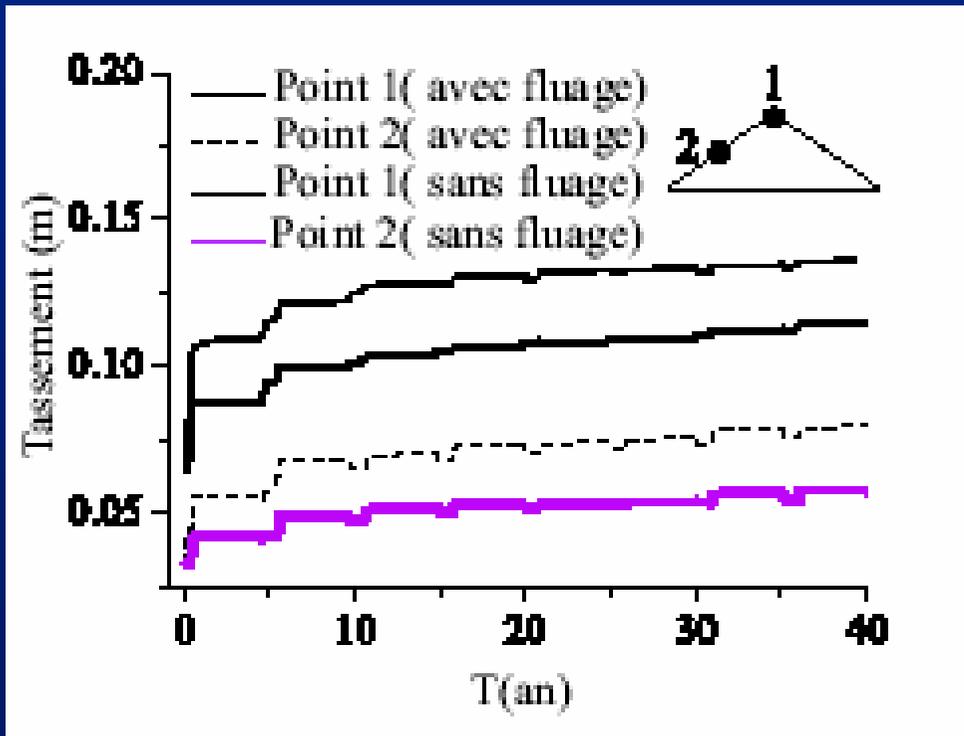
Loi de rupture du bloc en fonction du temps

# Exploitation : mouvement avec vieillissement des blocs



Intégration de la loi de vieillissement du bloc sur 40 ans

# Exploitation : mouvement avec vieillissement des blocs



Augmentation du fluage avec le taux de rupture de blocs :  
 $DZ/DT = 0.7 \text{ mm/an}$  et  $DX/DT = 1.3 \text{ mm/an}$

# Un premier bilan

- Un logiciel est disponible : PFC2D
- Une thèse décrit l'approche : 2004 Rémi DELUZARCHE École Centrale Lyon
- Une seconde thèse est en cours : 2006 Thi Huong TRAN École Centrale Lyon
- Des procédures sont utilisables : ITASCA
- La justification de la méthodologie par comparaison sur un ouvrage n'est pas terminée : EDF
- L'outil est à votre disposition