

Evento finale - Progetto RESBA



# Vulnérabilité des barrages vis-à-vis du risque sismique dans les Alpes Franco-Italiennes

*Vulnerabilità delle dighe contro il rischio sismico nelle Alpi franco-italiane*

Li-Hua LUU - Guillaume VEYLON

*Regione Piemonte*

*Direzione Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Protezione Civile, Trasporti e Logistica*

*Settore Difesa del Suolo (Ing. Gabriella GIUNTA)*

**Webinar**

*3-4 Dicembre 2020*



**INRAE**



**POLITECNICO DI TORINO**



# Contexte sismique de la zone frontalière

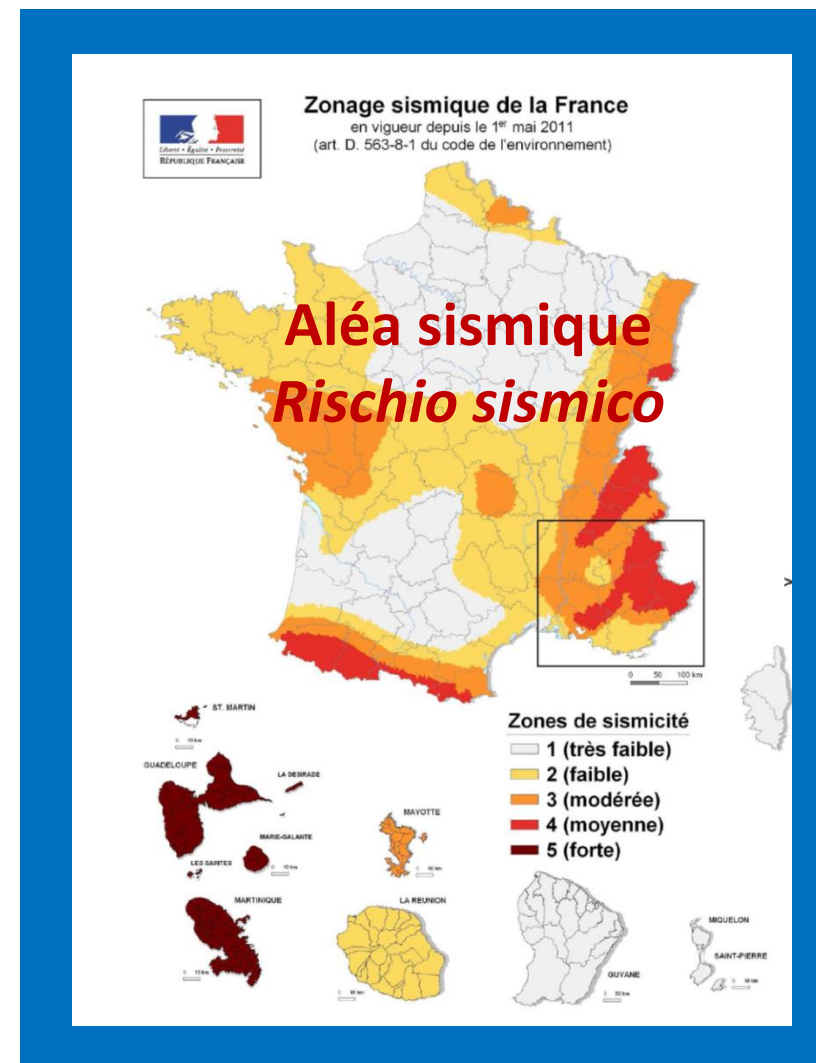
## *Contesto sismico della zona di confine*

### Retenue d'altitude / *Dighe di altitudine*

Production de neige / *Produzione di neve*

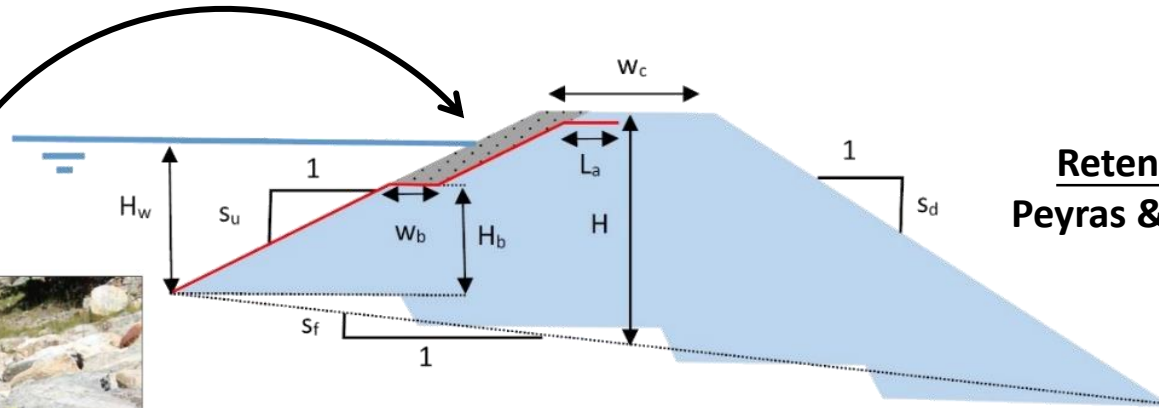
Station de ski / *Stazione di sci*

Nombre / *Numero* > 100



# Géométrie et matériaux des ouvrages

## Contesto sismico della zona di confine



**Retenues d'altitude**  
Peyras & Mériaux (2009)

$10\ 000 < \text{Volume} < 100\ 000\ \text{m}^3$   
 $10\ \text{m} < \text{Hauteur} / \text{altezza} < 20\ \text{m}$   
 $1200\ \text{m} < \text{Altitude} / \text{altitudine} < 2800\ \text{m}$

**Remblai** de moraines et schistes  
**Fondation** rocheuse  
*Terrapieno morenico e scisto*  
*Fondamenta rocciosa*

### Dispositif d'étanchéité

[géomembrane + rip-rap + drainage]

### Dispositivo di impermeabilizzazione

[geomembrana + rip-rap + drenaggio]



**Etude numérique complète - Outil opérationnel ?**

**Studio numeriche completo - Strumento operativo ?**

# Performance sismique d'un barrage par analyse dynamique non-linéaire

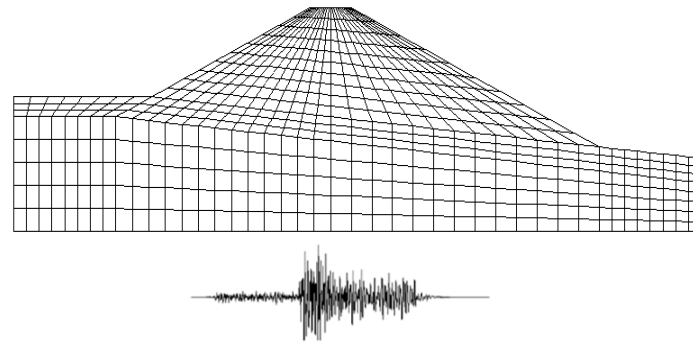
## *Esecuzione sismica di una diga per analisi dinamica non-lineare*

### Modélisation numérique

- Simulations 2D-3D
- Validation

### Outil diagnostique

- Etude paramétrique
- Loi empirique



### Modellazione numerica

- Simulazioni 2D-3D
- Validazione

### Strumento diagnostico

- Studio parametrico
- Legge empirica



**FLAC<sup>®</sup> VERSION 8.1**  
Explicit Continuum Modeling of  
Non-linear Material Behavior

**Modélisation numérique**

*Modellazione numerica*



## Simulation 2D

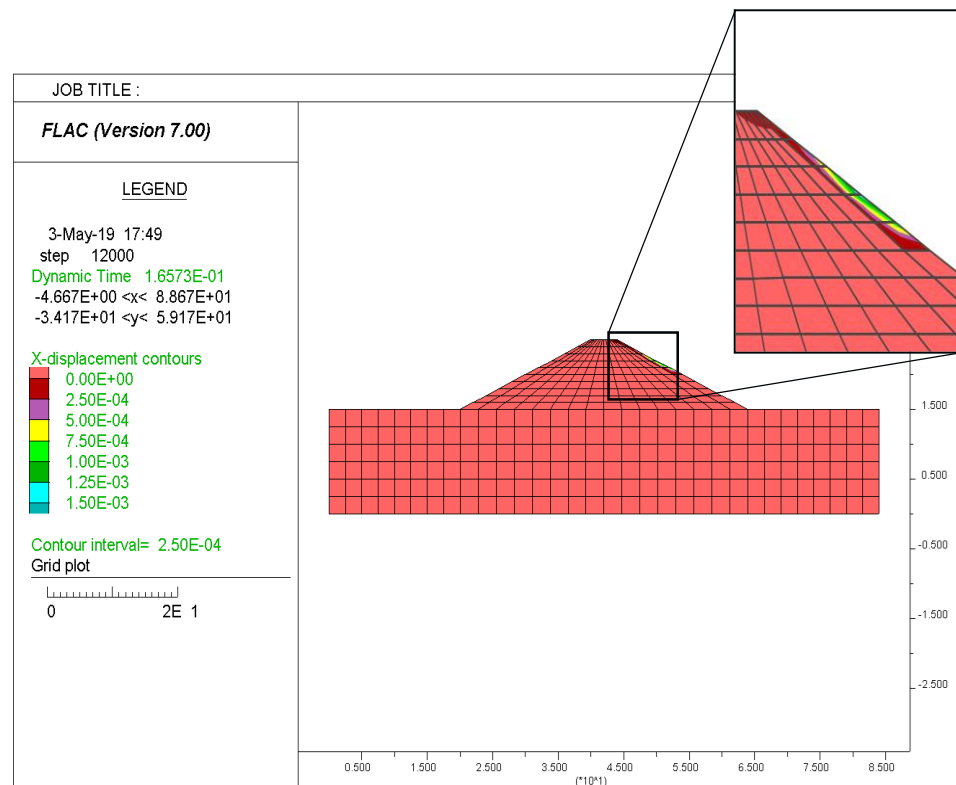
### Sollicitations

Intensité d'Arias

$$I_a = 0.9 \text{ m/s}$$

### Géométrie

- Hauteur = 20 m
- Largeur crête = 4 m
- Pentes des talus = 1/2



## Simulazione 2D

### Richieste sismiche

Intensità de Arias

$$I_a = 0.9 \text{ m/s}$$

### Geometria

- Altezza = 20 m
- Larghezza della cresta = 4 m
- Pendenza del pendio = 1/2

### Propriétés mécaniques / Proprietà meccaniche

- Module cisaillement / Modulo G = 180 MPa
- Cohésion / Coesione = 5 kPa
- Angle de frottement  $\phi$  / angolo di attrito  $\phi = 30^\circ$



**FLAC**® VERSION 8.1  
Explicit Continuum Modeling of  
Non-linear Material Behavior

## Modélisation numérique

*Modellazione numerica*

## Simulation 2D

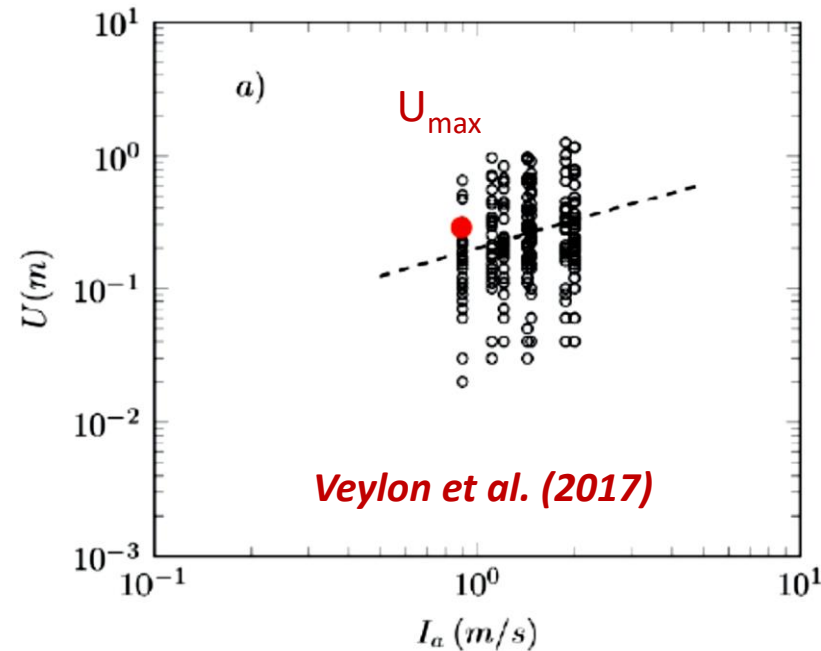
### Sollicitations

Intensité d'Arias  
 $I_a = 0.9$  m/s

### Géométrie

- Hauteur = 20 m
- Largeur crête = 4 m
- Pentes des talus = 1/2

## VALIDATION VALIDAZIONE



## Simulazione 2D

### Richieste sismiche

Intensità de Arias  
 $I_a = 0.9$  m/s

### Geometria

- Altezza = 20 m
- Larghezza della cresta = 4 m
- Pendenza del pendio = 1/2

## Propriétés mécaniques / Proprietà meccaniche

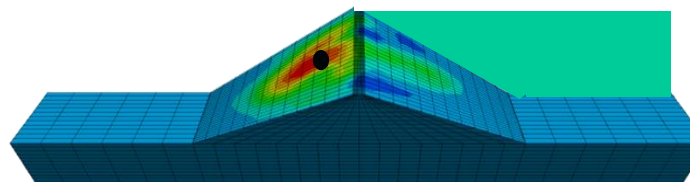
- Module cisaillement / Modulo G = 180 MPa
- Cohésion / Coesione = 5 kPa
- Angle de frottement  $\phi$  / angolo di attrito  $\phi = 30^\circ$



**FLAC<sup>®</sup> VERSION 8.1**  
Explicit Continuum Modeling of  
Non-linear Material Behavior

## Modélisation numérique

### Modellazione numerica



## Simulation 3D

### Sollicitations

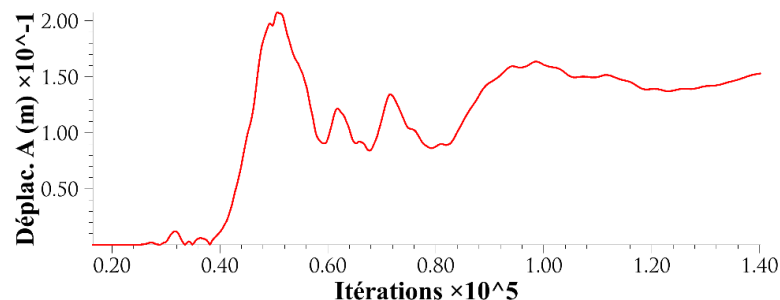
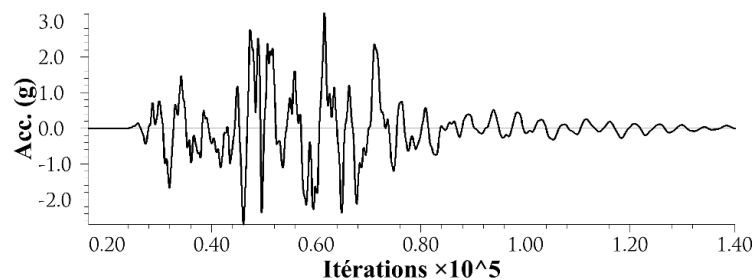
Intensité d'Arias

$$I_a = 0.9 \text{ m/s}$$

### Géométrie

- Hauteur = 20 m
- Largeur crête = 4 m
- Pentes des talus = 1/2

**FLAC3D 7.00**  
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.



## Propriétés mécaniques / Proprietà meccaniche

- Module cisaillement / Modulo G = 180 MPa
- Cohésion / Coesione = 5 kPa
- Angle de frottement  $\phi$  / angolo di attrito  $\phi = 30^\circ$

## Simulazione 3D

### Richieste sismiche

Intensità de Arias

$$I_a = 0.9 \text{ m/s}$$

### Geometria

- Altezza = 20 m
- Larghezza della cresta = 4 m
- Pendenza del pendio = 1/2

## Simulation 3D

### Sollicitations

Intensité d'Arias

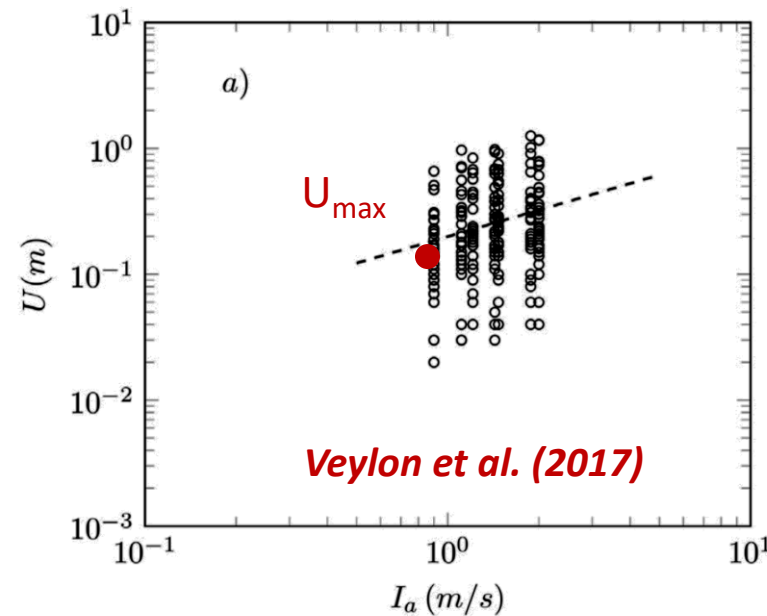
$$I_a = 0.9 \text{ m/s}$$

### Géométrie

- Hauteur = 20 m
- Largeur crête = 4 m
- Pentes des talus = 1/2

## VALIDATION

## VALIDAZIONE



## Simulazione 3D

### Richieste sismiche

Intensità de Arias

$$I_a = 0.9 \text{ m/s}$$

### Geometria

- Altezza = 20 m
- Larghezza della cresta = 4 m
- Pendenza del pendio = 1/2

## Propriétés mécaniques / Proprietà meccaniche

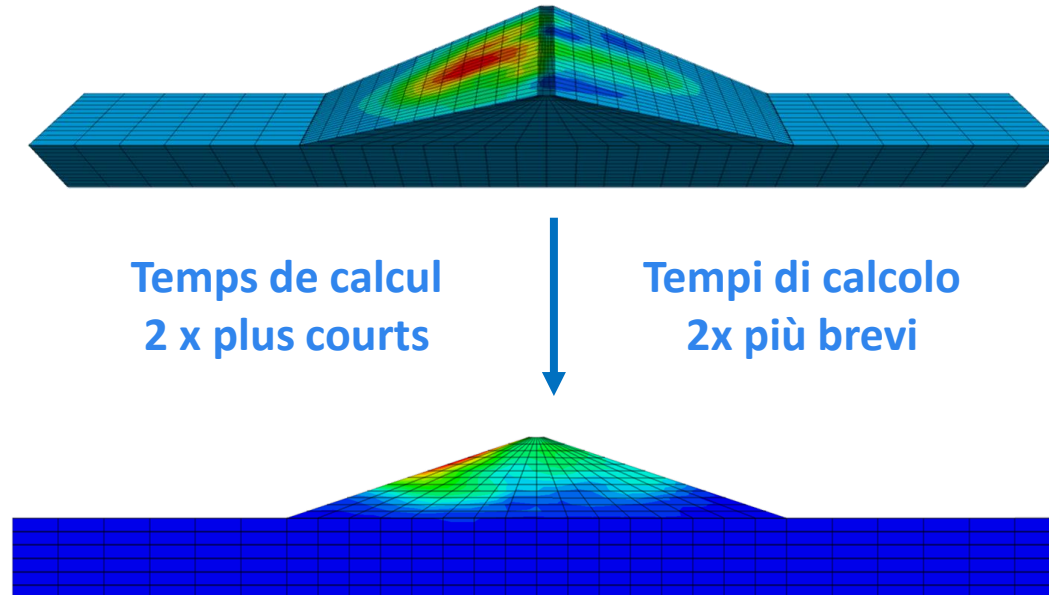
- Module cisaillement / Modulo G = 180 MPa
- Cohésion / Coesione = 5 kPa
- Angle de frottement  $\phi$  / angolo di attrito  $\phi = 30^\circ$



## Outil diagnostique

*Strumento diagnostico*

**Génération d'une grande base de données**  
*Generazione di un database di grandi dimensioni*



## Outil diagnostique

*Strumento diagnostico*

### Etude paramétrique

#### Géométrie

Hauteur = 10-20 m  
Largeur crête = 4 m  
Pentes des talus = 1/2-1/3  
Pente du substratum = 0 – 10°

#### Propriétés mécaniques

Module cisaillement = 180-500 MPa  
Cohésion = 0-10 kPa  
Angle de frottement  $\phi = 30-40^\circ$

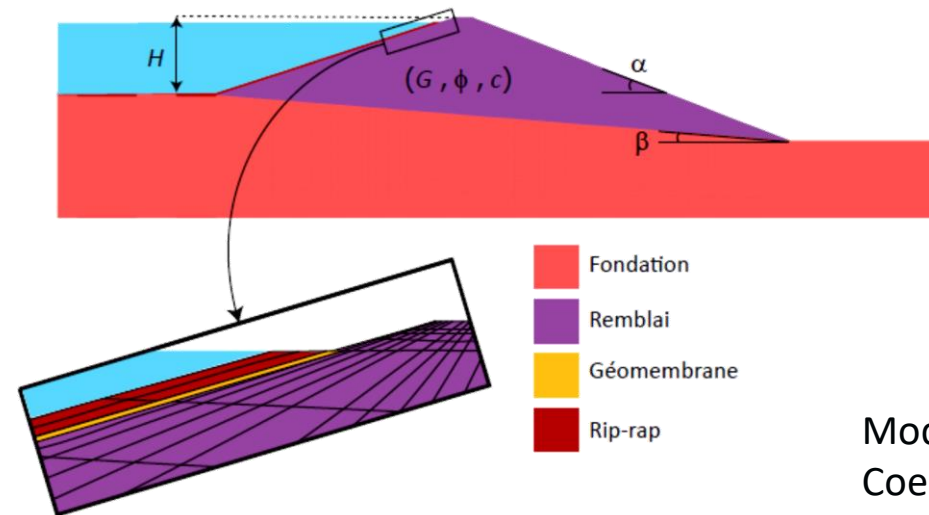
### Studio parametrico

#### Geometria

Altezza = 10-20 m  
Larghezza della cresta = 4 m  
Pendenza del pendio = 1/2-1/3  
Pendenza del substrato = 0 – 10° c

#### Proprietà meccaniche

Modulo G = 180-500 MPa  
Coesione = 0-10 kPa  
angolo di attrito  $\phi = 30-40^\circ$



### Dispositif d'étanchéité / Dispositivo di impermeabilizzazione

Module cisaillement / Modulo G = 10 MPa  
Angle de frottement  $\phi$  / angolo di attrito  $\phi = 22^\circ$

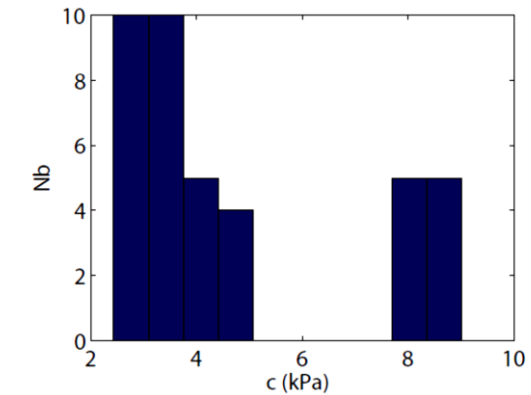
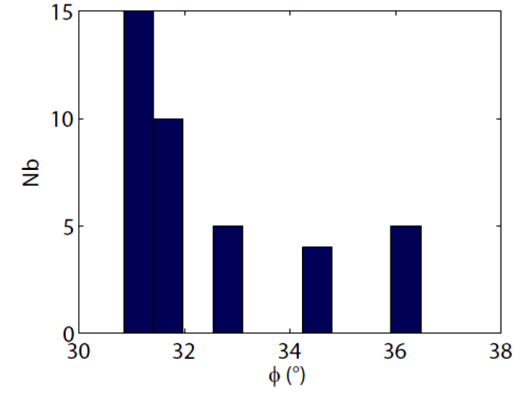
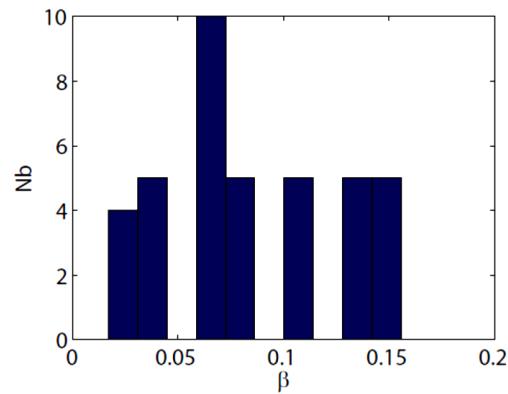
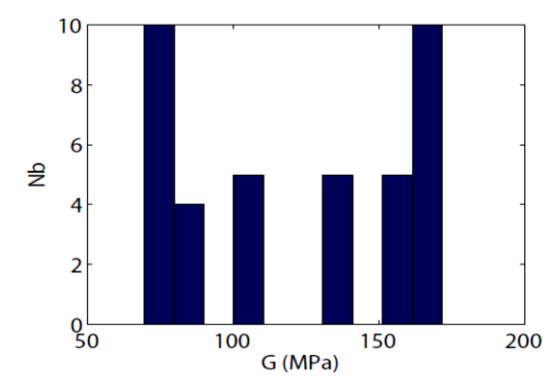
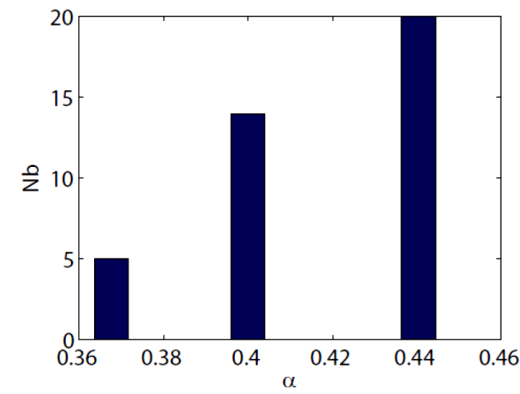
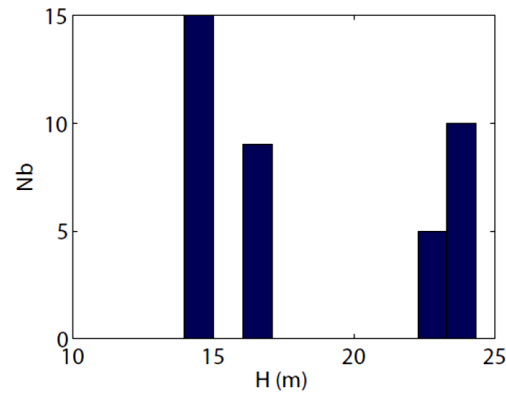
## Outil diagnostique

*Strumento diagnostico*

Etude paramétrique

*Studio parametrico*

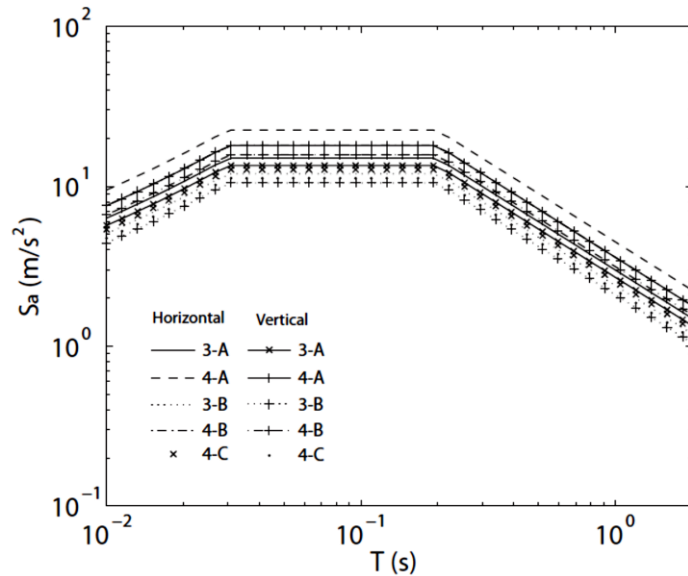
**Tirage aléatoire / Selezione casuale**



## Outil diagnostique

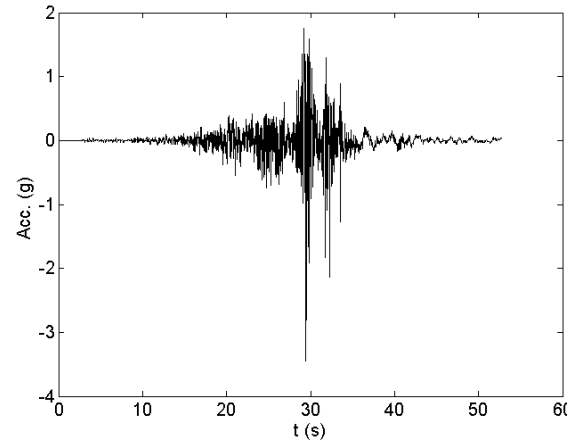
*Strumento diagnostico*

### Etude paramétrique



Spectre de réponse réglementaire  
*Spettro di risposta normativa*  
 (Arrêté du 6 août 2018)

### Studio parametrico



### SeismoMatch

Accélérogramme artificiel  
*Accelerogramma artificiale*

N°	Zone-Class	PGA (m/s <sup>2</sup> )		I <sub>A</sub> (m/s)		τ (s)		V <sub>m</sub> (m/s)		A <sub>eff</sub> (m/s <sup>2</sup> )		A <sub>95</sub> (m/s <sup>2</sup> )	
		hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.		
1	3-A	0.22/0.23	0.28/0.72	12.50/17.95	0.04/0.10	0.14/0.17	0.22/0.23						
2	4-A	0.34/0.31	0.61/1.33	19.79/16.05	0.15/0.18	0.25/0.24	0.33/0.31						
3	3-B	0.16/0.18	0.19/0.44	20.03/18.19	0.07/0.09	0.11/0.15	0.16/0.18						
4	4-B	0.27/0.27	0.40/0.98	15.23/15.46	0.09/0.14	0.21/0.21	0.27/0.26						
5	4-C	0.19/0.19	0.20/0.50	15.79/14.00	0.06/0.09	0.13/0.15	0.19/0.19						

### Sollicitations / Richieste sismiche

- Génération des accélérogrammes à partir de différents spectres sismiques
- Generazione di accelerogrammi da diversi spettri sismici

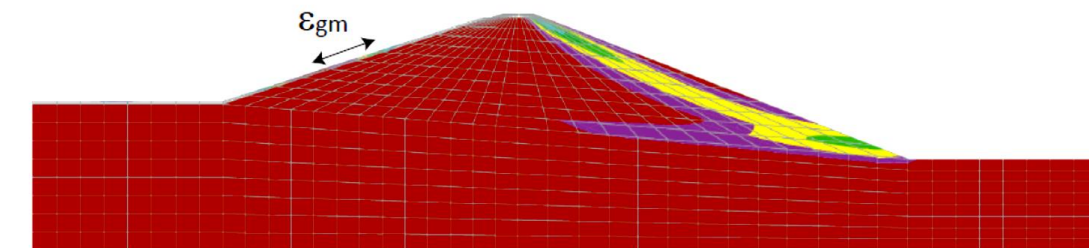
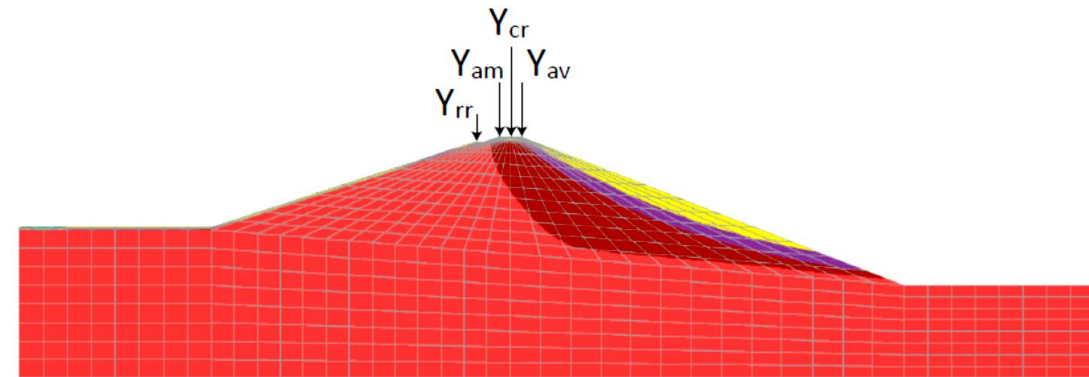
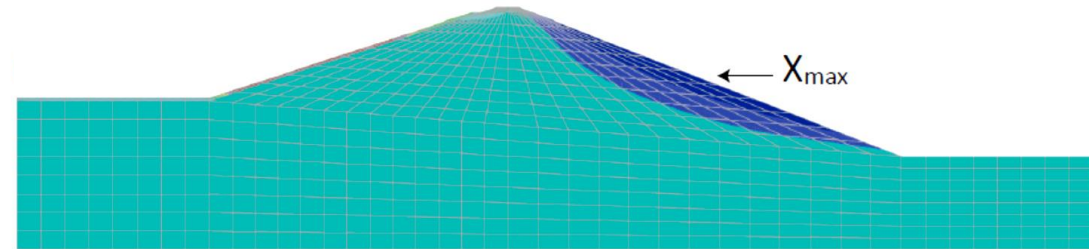
## Outil diagnostique

### Strumento diagnostico

## Indices de performance

### Indici di performance

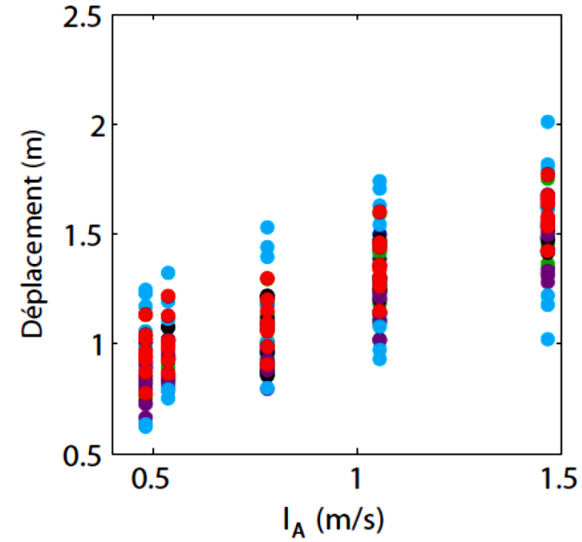
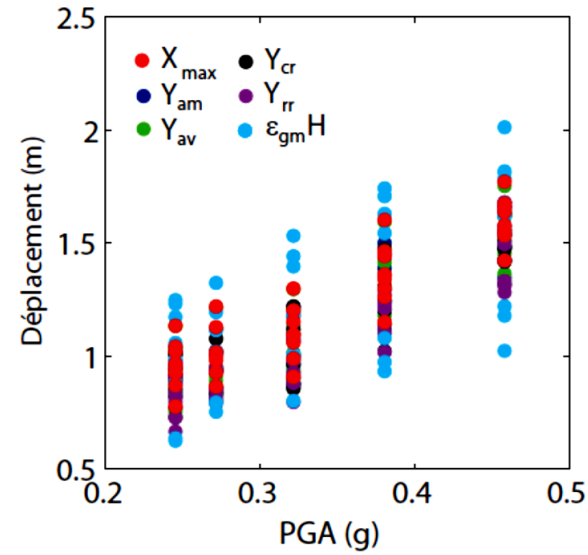
- Déplacement max. horizontal  $X_{max}$
  - Tassement du rip-rap  $Y_{rr}$
  - Tassement en amont  $Y_{am}$
  - Tassement en aval  $Y_{av}$
  - Tassement en crête  $Y_{cr}$
  - Déformation max. géomembrane  $\epsilon_{gm}$ .
- 
- *Mutevole max. orizzontale  $X_{max}$*
  - *Insedimento de rip-rap  $Y_{rr}$*
  - *Insedimento a monte  $Y_{am}$*
  - *Insedimento en valle  $Y_{av}$*
  - *Insedimento a pico  $Y_{cr}$*
  - *Deformazione max. geomembrana  $\epsilon_{gm}$ .*



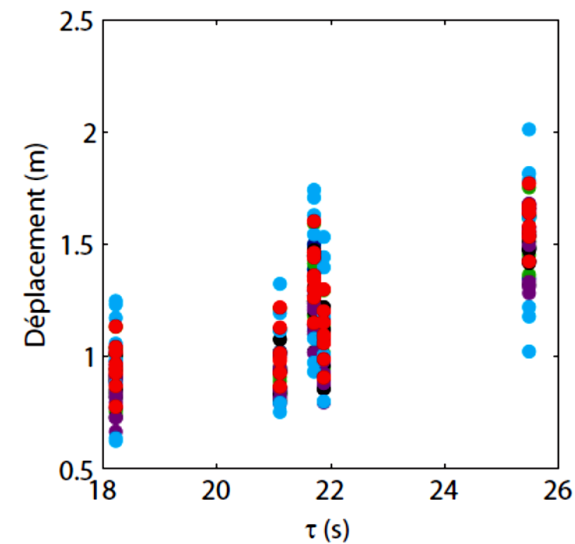
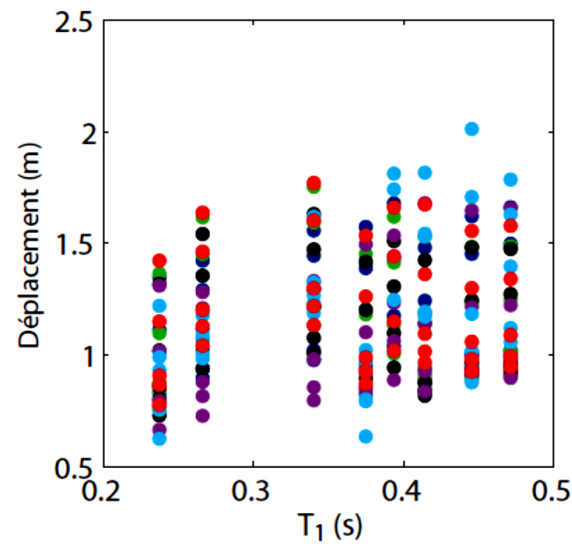
# Outil diagnostique

## Strumento diagnostico

Loi UNIQUE en  
fonction des  
paramètres  
géomécanique ET  
sismique ?



UNICA legge secondo  
parametri  
geomeccanici E  
sismici ?



## Couplage des paramètres / *Combinato di parametri*

Adimensionnement  
du déplacement

*Regolazione dello  
spostamento*

$$\frac{U}{I_A T_1}$$

Période fondamentale de la digue  
*Periodo fondamentale della diga*

Intensité d'Arias du séisme  
*Intensità de Arias del terremoto*

Adimensionnement  
du critère sismique

*Regolazione dello  
criterio sismico*

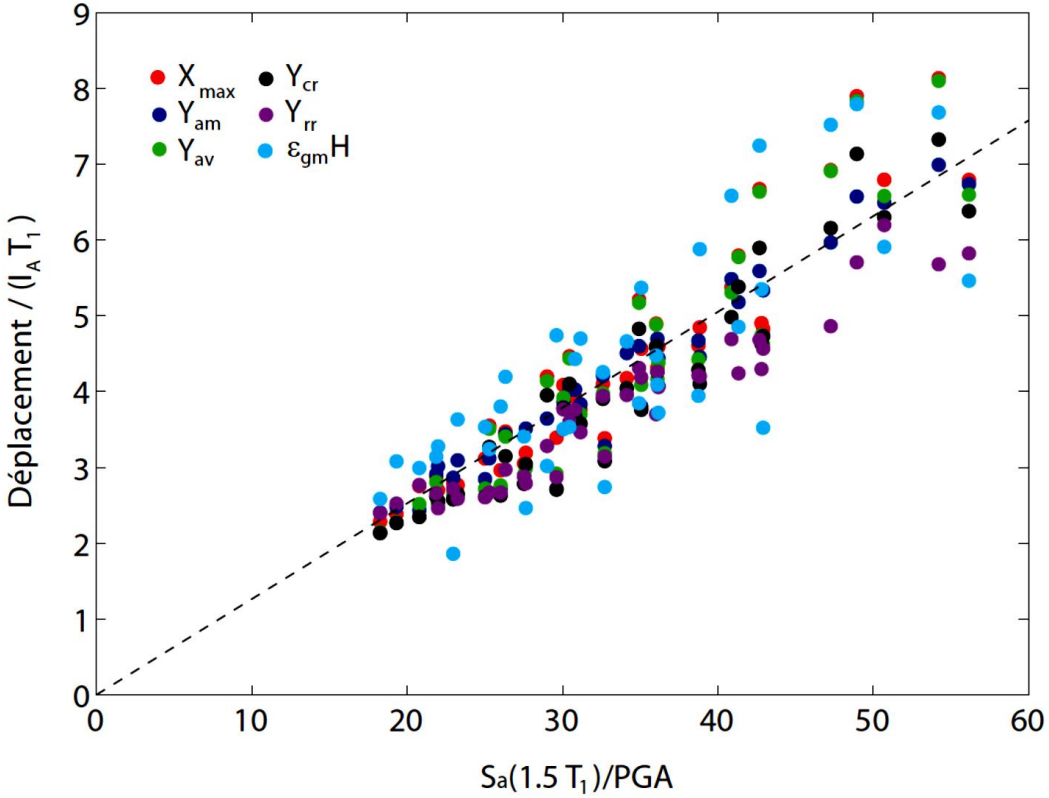
$$\frac{S_a(1.5 T_1)}{PGA}$$

Accélération spectrale à la période  $1.5 T_1$   
*Accelerazione spettrale al periodo  $1.5 T_1$*

Pic d'accélération au sol  
*Picco di accelerazione al suolo*

### Loi empirique / Legge empirica

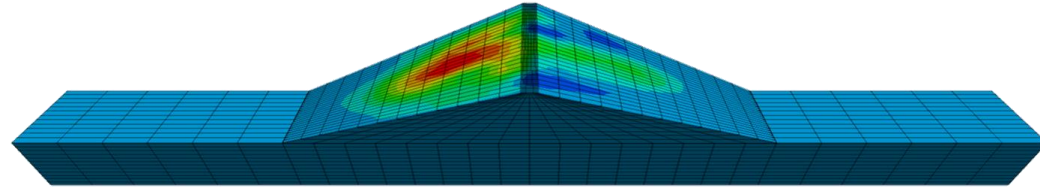
$$\frac{U}{I_A T_1} = 0.1 \frac{S_a(1.5 T_1)}{PGA}$$





## Conclusion / Conclusione

- **Modélisation 2D-3D / Modelli 2D-3D**



**Validation** notre modélisation par comparaison avec des travaux antérieurs basés sur une méthode simplifiée de détermination des **déplacements permanents** (Veylon *et al.* 2017).

**Convalida** della nostra modellazione rispetto al lavoro precedente basato su un metodo semplificato per la determinazione degli **spostamenti permanenti** (Veylon *et al.* 2017).

- **Etude paramétrique / Studio parametrico**

Modélisation complète de la retenue d'altitude, comprenant une pente du site et un **dispositif d'étanchéité par géomembrane**.

Etude paramétrique avec le **tirage aléatoire** des paramètres géomécaniques.

**Modellazione completa dell'invaso altimetrico**, comprendente una pendenza del sito e un **sistema di impermeabilizzazione a geomembrana**.

**Studio parametrico con selezione casuale** di parametri geomeccanici.

## Conclusion / Conclusione

- **Outil diagostique / Strumento diagnostico**

**Relation empirique pour prédire l'amplitude de l'endommagement** en fonction d'un nombre sans dimension comportant à la fois des informations sur les spécificités géotechniques de l'ouvrage et sur l'aléa sismiques du site.

**Relazione empirica per prevedere l'ampiezza del danno** in funzione di un numero adimensionale comprendente sia informazioni sulle specificità geotecniche della struttura sia sulla pericolosità sismica del sito.

$$U = 0.1 \frac{S_a(1.5 T_1)}{PGA} I_A T_1$$

← Période fondamentale de la digue  
← Periodo fondamentale della diga

← Paramètres sismiques  
← Parametro sismico

- **Valorisation / Valutazione**

**Publication** d'un article scientifique dans « *Bulletin of Earthquake Engineering* » (Springer) en rédaction.

**Communications nationale et internationale** CFBR et CIGB en prévision.

**Pubblicazione** di un articolo scientifico su « *Bulletin of Earthquake Engineering* » (Springer) per iscritto.

Comunicazioni nazionali e internazionali CFBR e CIGB in preparazione.

Merci  
*Grazie*