



<http://www.afps-seisme.org/>

Dominique Batista, Cerema,  
Laboratoire d'Aix en Provence

Risques gravitaires induits et ouvrages  
géotechniques : observations post-  
sismiques et retour d'expérience

JT AFPS  
Renforcement au séisme des  
constructions existantes  
Arette, le 29/09/2017

# Partie 1

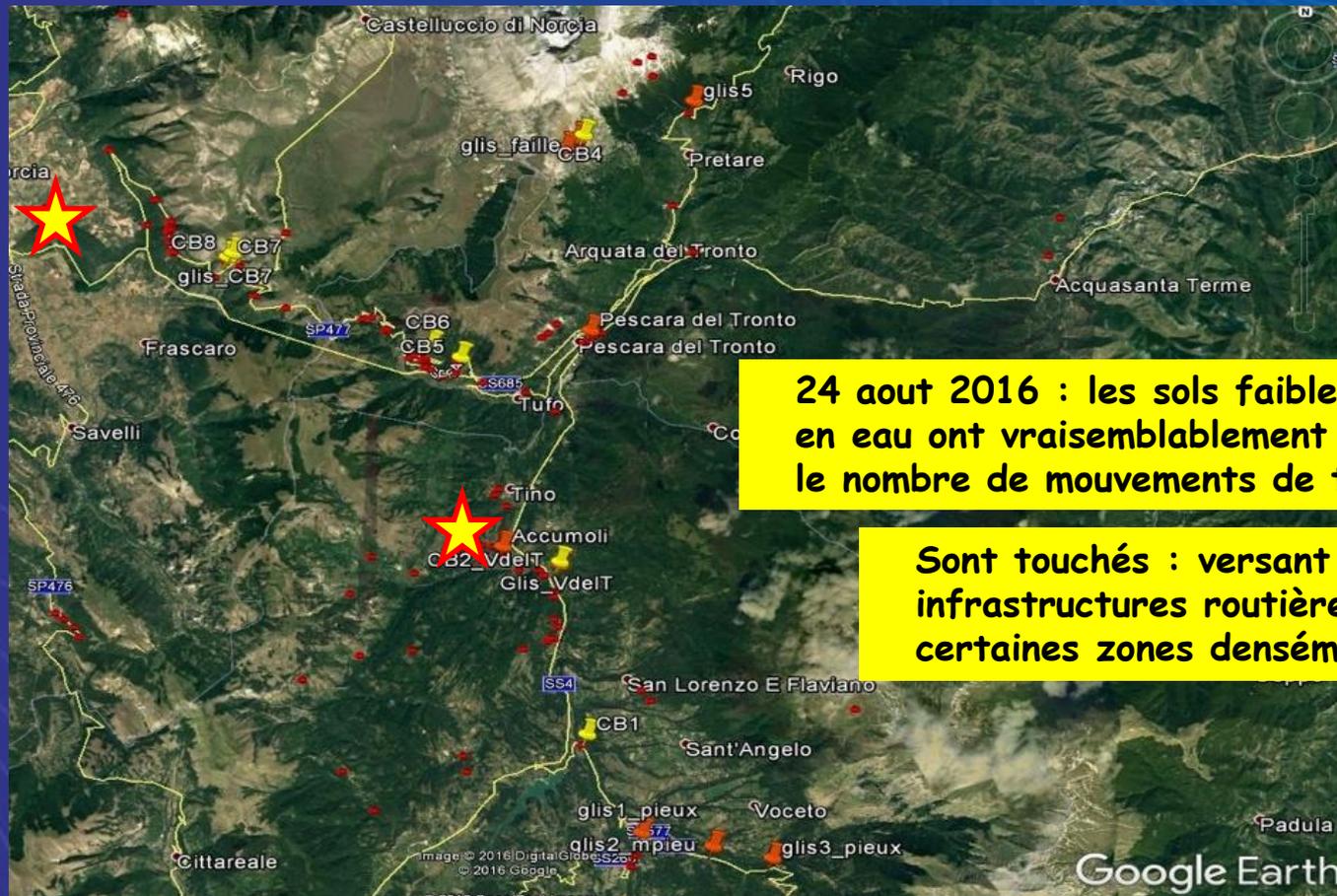
(effets induits sur les mouvements  
gravitaires)

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Mouvements de terrain



Plus de 140 mouvements de terrains recensés dans la zone épacentrale par l'ISPRA, le CERI puis par le GEER.



**24 août 2016 : les sols faiblement saturés en eau ont vraisemblablement limité le nombre de mouvements de terrain induits**

**Sont touchés : versant naturels, infrastructures routières certaines zones densément habitées.**

Mouvements de terrains recensés : points rouges : ISPRA, CERI, punaises jaunes et oranges AFPS

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia Chutes de blocs

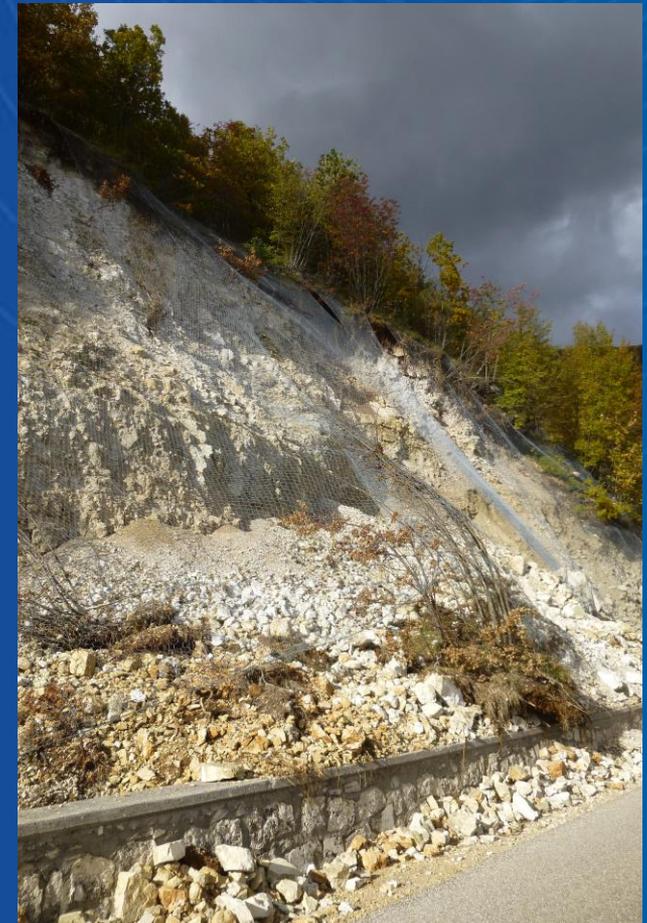


De nombreuses instabilités rocheuses affectant plus ou moins le réseau routier

Routes secondaires à flanc de versant



Amplification d'instabilités déjà connues  
Fragilisation du matériel,  
Augmentation de la sensibilité pour des dynamiques ultérieures

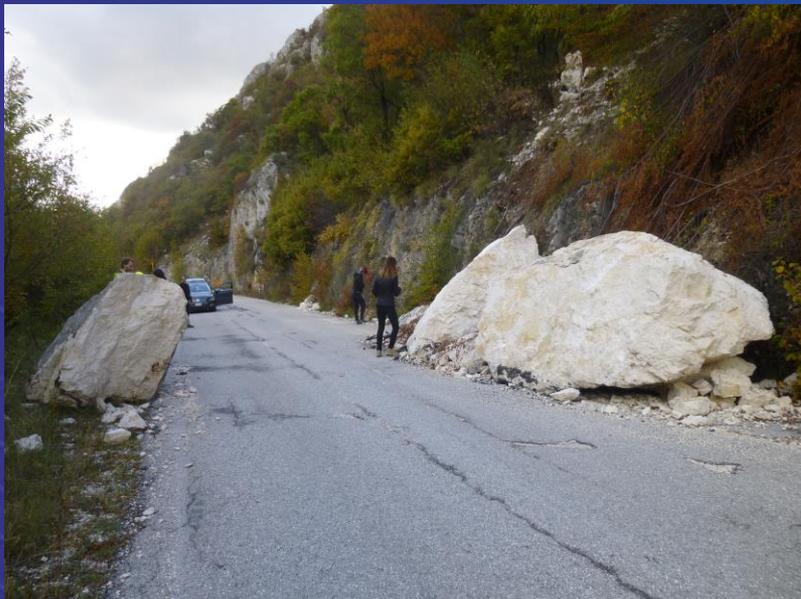


# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

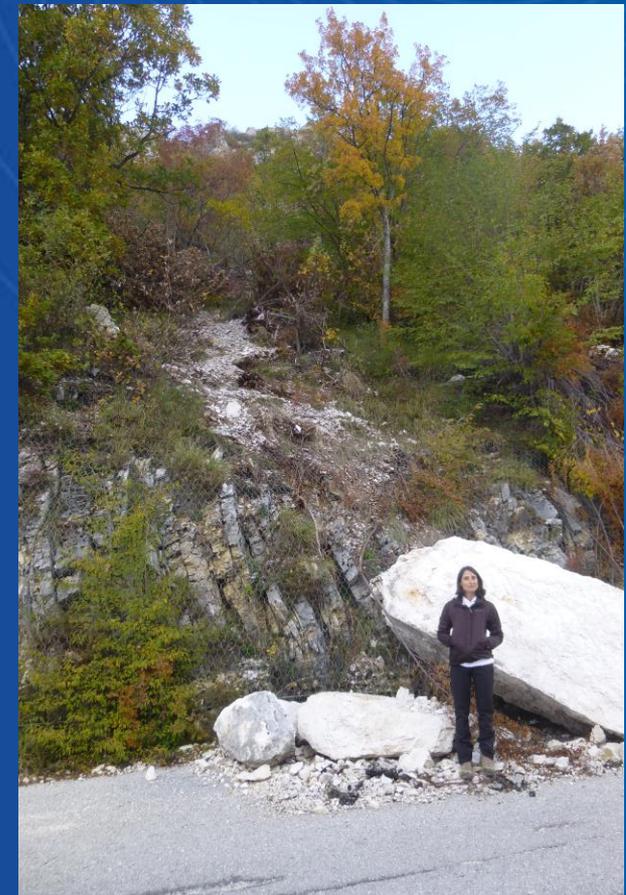
## Chutes de blocs



Routes secondaires à flanc de versant



Chutes de blocs de l'ordre de  $5 \text{ m}^3$  ayant entraîné la fermeture de la route



# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Chutes de blocs



Routes structurantes : SS260



Chutes de blocs provoquant la ruine du système de protection existant  
Réalisation d'une déviation et d'un merlon pour permettre le rétablissement de la circulation

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Chutes de blocs



Routes structurantes : SS4 (Pescara del Tronto)



Chutes de blocs provoquant la ruine du filet de protection existant  
Mise en œuvre d'une protection provisoire pour permettre le rétablissement de la circulation en alternat  
Construction d'un nouveau filet de protection

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Glissements de terrain



glissements de terrains affectant les routes entre Arquata et Castelluccio



Glissement au nord du village de Pretare (intersection N89 et SP477)

- de 30m de dénivelée
- affectant un versant d'éboulis argileux saturé d'eau
- a provoqué la ruine par cisaillement du mur de soutènement
- a neutralisé partiellement la route

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Glissements de terrain



glissements affectant le bord aval de la route SP477 reliant Pretare a Castelluccio



Glissement situé à l'aval de la faille  
du monte Vettetore :

- réactivation d'un glissement ancien
- sur un linéaire cumulé de près de 300m



Glissement affectant la chaussée  
à proximité de Castelluccio

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Glissements de terrain



glissements affectant la route SR260 à proximité d'Amatrice



- plusieurs glissements affectant la demi chaussée aval
- formations argileuses partiellement saturées d'eau
- une même technique de confortement mise en œuvre sur l'ensemble des sites :  
paroi discontinue de pieux de 600mm de diamètre  
et de 15m de profondeur

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Glissements de terrain



glissements affectant le village de Pescara del Tronto



Affaissement du versant à l'aval du village

Village construit en bord d'une falaise de plus de 20m de hauteur

- dépôt de pente du pléistocène
- débris calcaires dans une matrice argilo sableuse
- cohésion précaire

déchaussement de la couche de tuf  
située en bord de village provoquant  
des chutes de bloc



# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Glissements de terrain



glissements affectant le village de Pescara del Tronto



Suite au séisme du 24 août, apparition de nombreuses fractures dans le village :

- fractures de 50 à 150m de longueur parallèles au versant
- ouvertures de 5 à 10cm, rejets verticaux atteignant 20cm

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Glissements de terrain



glissements affectant le village de Pescara del Tronto



Amorce d'un mécanisme de rupture de la falaise identifiée après le séisme du 24 août :

- perte de cohésion du matériau



Rupture fragile de la falaise lors du séisme du 30 octobre

- liée à la disparition de la cohésion
- retour à une pente résiduelle de sol
- destruction complète du contrefort illustrant la violence du phénomène

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Glissements de terrain



glissements affectant la SP209 entre Visso et Norcia (séisme du 30 octobre)



Glissement de terrain de grande ampleur

- favorisé par un contexte pluvieux (≠ 24 aout)
- a modifié le cours du Fiume Nera
- chaussée envahie par le cours d'eau et ensevelie par le pied du glissement
- empêchant toute circulation et compliquant toute intervention

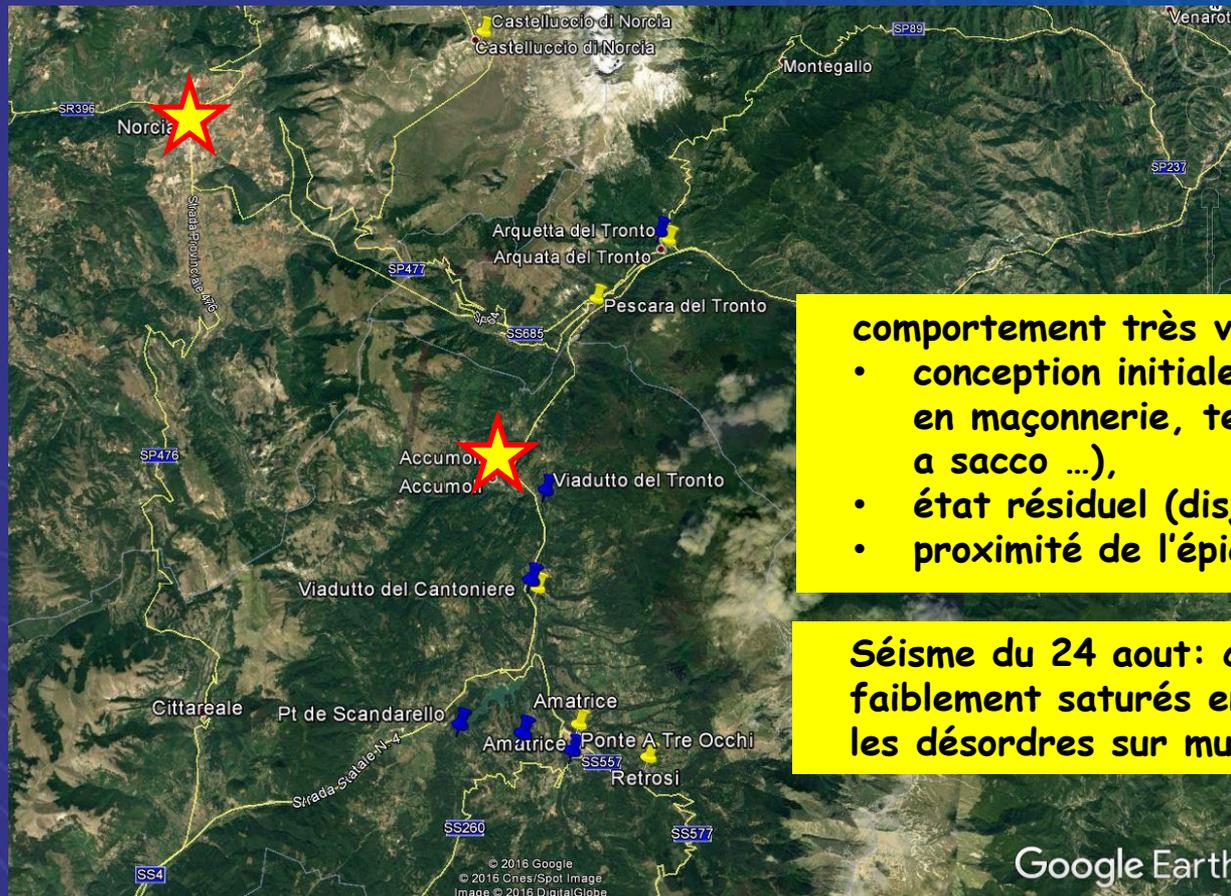
# Partie 2

(effets induits sur les ouvrages de  
soutènement)

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia Infrastructures et réseaux



Les infrastructures de transport et réseaux ont été localement endommagés : ouvrages d'art modernes et anciens en maçonnerie, ouvrages de soutènement ...



- comportement très variable en fonction de
- conception initiale (ouvrages anciens en maçonnerie, technique du muratura a sacco ...),
  - état résiduel (disjointoiements)
  - proximité de l'épicentre.

**Séisme du 24 aout: comportement des sols faiblement saturés en eau qui a limité les désordres sur murs de soutènement**

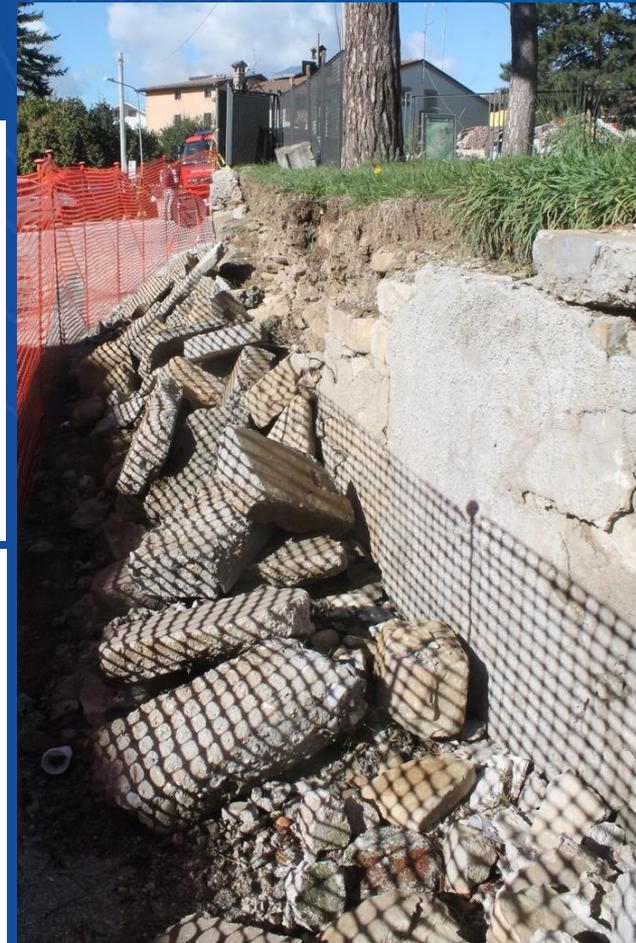
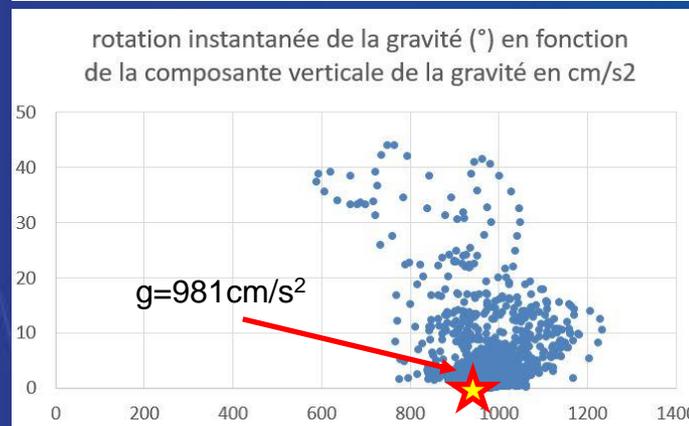
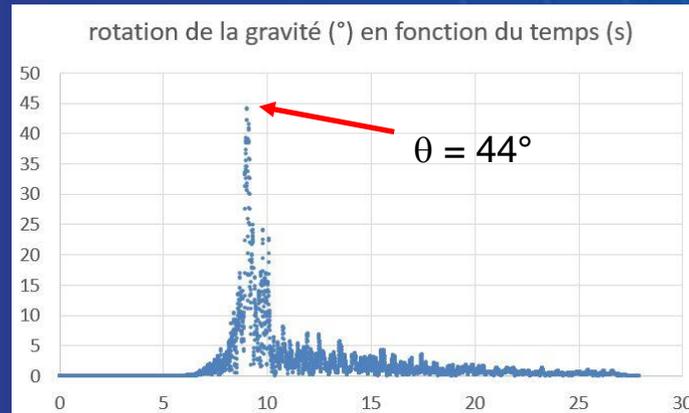
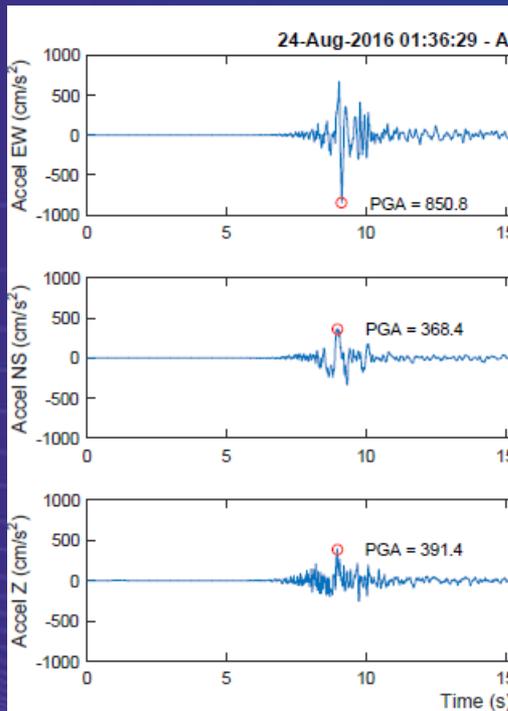
Ouvrages observés : ouvrages d'art (repères bleus)  
ouvrages de soutènement (repères jaunes)



# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages de soutènement

Séisme du 24 août sur Amatrice : rotation maximale de la gravité de  $44^\circ$   
rotation  $\rightarrow$  frottement bloc/bloc  
 $\Rightarrow$  glissement des pierres de couronnement,  
« expulsion des blocs »



# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages de soutènement

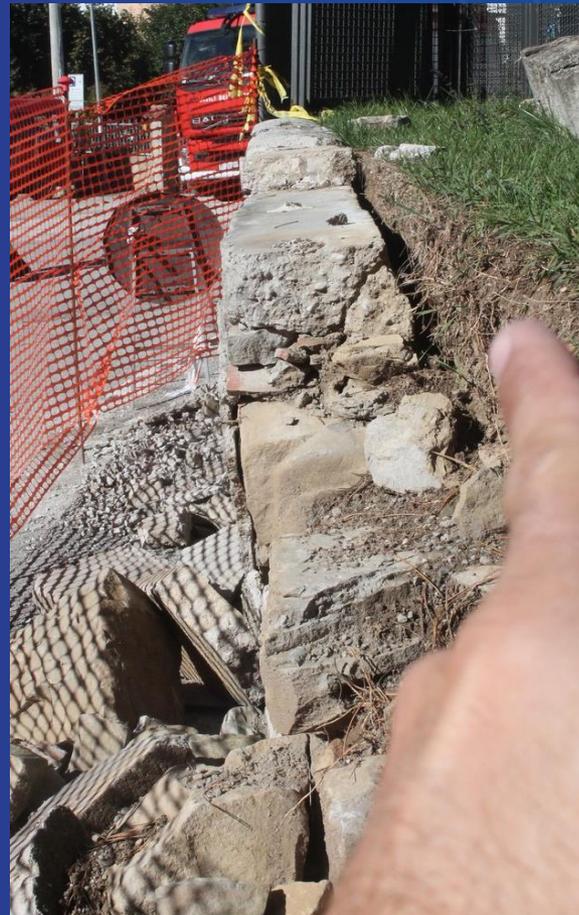


Séisme du 24 août sur Amatrice : rotation instantanée de la gravité de 45°

- Rupture d'un mur de 1,4m par déversement

Pourtant ...  
aucun signe de poinçonnement  
du sol ou de glissement du mur

- Rupture du mur sans rupture  
du sol !
  - sols non saturés
  - cohésion par capillarité
- rupture liée aux  
seules actions inertielles



# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages de soutènement



Séisme du 24 août, mur renforcé par clouage (Castelluccio di Norcia) montrant l'efficacité du clouage en tête de mur



- absence de désordres sur la partie clouée malgré l'altération des joints
  - rupture et déversement du parapet témoignant de l'intensité sismique
- ➔ absence de désordres de type poinçonnement et glissement
- ➔ efficacité du clouage en tête vis-à-vis du déversement

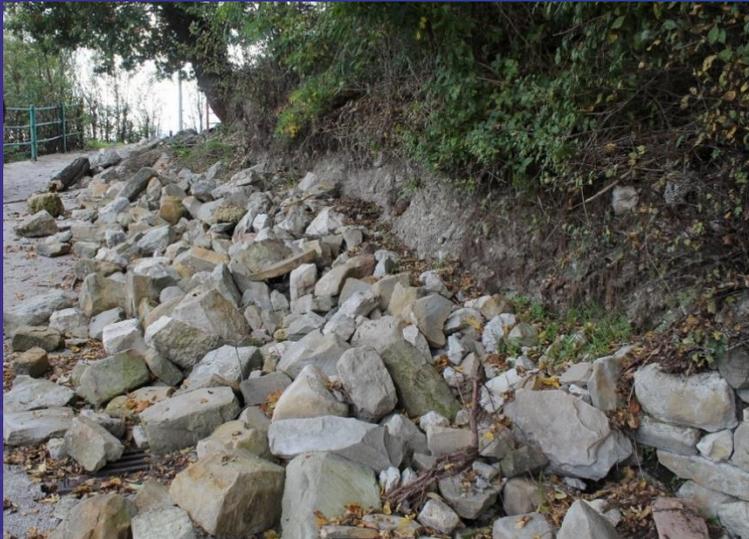
Mur maçonné de plus 3m renforcé par une ligne de clous en partie haute  
Castelluccio di Norcia

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages de soutènement



Rupture d'un mur en pierres sèches à Pescara del Tronto (séisme du 24 août)



Rupture d'un petit mur en pierres sèches

- mur de 1m de hauteur
- propagation des blocs sur une bande de plus de 2m de largeur
- déversement aux extrémités
- Aucun signe de rupture géotechnique
  - ≠ poinçonnement du sol
  - ≠ glissement du mur
  - ≠ rupture en poussée du sol (qui tient verticalement)
  - sols non saturés => cohésion par capillarité
- Rupture par déversement liée aux seules actions inertielles



# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages de soutènement

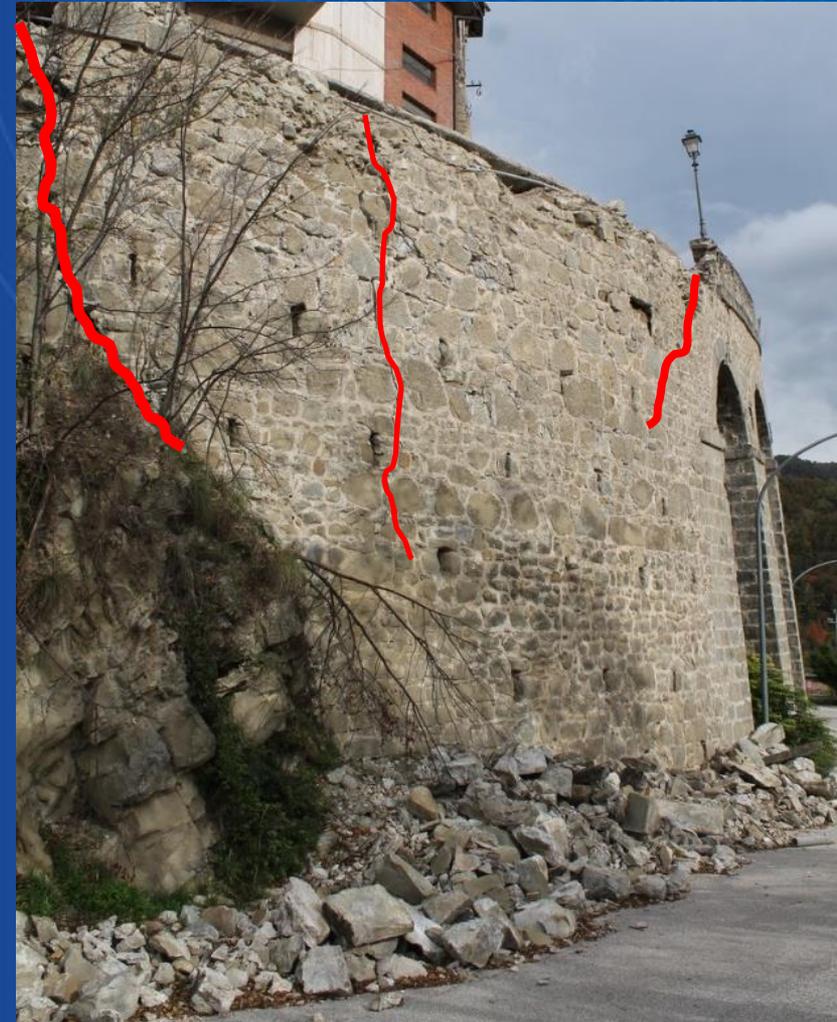
Séisme du 24 août : Arquata del Tronto



fracture de la chaussée avec rejet vertical dessinant une cuvette de tassement dans la zone d'influence du mur

- fractures multiples de la maçonnerie
- déversement de la tête du mur

- ➔ rupture interne du mur par excès d'excentrement et déversement
- ➔ aucun signe de glissement et poinçonnement du sol



# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages de soutènement



Comportement des murs présentant un fruit positif significatif



Bon comportement des murs en béton armé présentant des fruits de l'ordre de  $14^\circ$

- $\neq$  poinçonnement du sol
- $\neq$  glissement du mur
- $\neq$  déversement

# Partie 3

(effets induits sur les ponts)

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages d'art



Désordres sur les murs en retour du pont A Tre Occhi sur la SR260 à Amatrice



- déversement de la partie haute du mur
- décollement des blocs disposés au parement (« muratura a sacco » : parement maçonné fin recouvrant un remplissage de blocs sans liant)
  - affaissement de 20cm de la chaussée
  - zone clouée montrant un bon fonctionnement (murs et tympans)

déversement du mur en retour de 9m

- rupture par cisaillement des contreforts en béton non armé
- muratura a sacco : ≠ comportement de mur poids
- structure de mur peu compatible avec une telle hauteur sauf renforcement par clouage ...



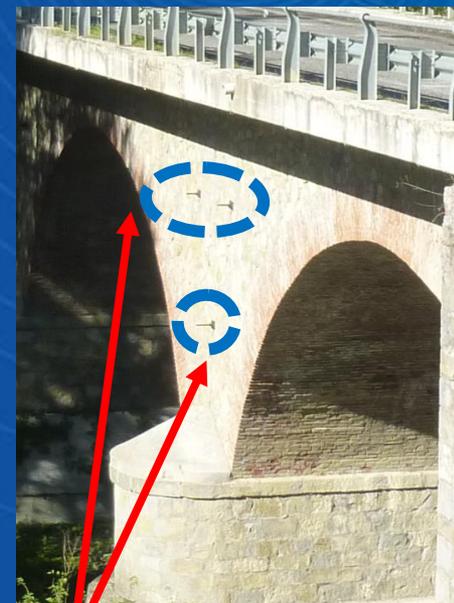
ouvrage fermé à la circulation

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages d'art



Désordres récurrents sur le pont A Cinque Occhi en amont du lac de Scandello



décollements récurrents et ruine de la maçonnerie des tympans

- infiltrations d'eau lessivant le mortier
- altération généralisée des joints
- défaut d'accrochage du parement de type muratura a sacco littéralement expulsé par les actions inertielles

Le clouage : une solution bien adaptée à ce type de pathologies



Ouvrage exploité en l'état

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : ouvrages d'art



### Comportement des murs en retour des viaducs modernes (séisme du 24 août)



#### Culée du viaduc del Tronto sur la SS4 (proche d'Accumoli)

- fracturation à l'interface culée/mur en retour traduisant un glissement centimétrique des murs en retour
- l'ouvrage est resté traficable par les secours et
- est désormais parfaitement exploitable après rechargement de la chaussée

#### Viadotto del Cantoniere sur la SS4

- culée présentant un tassement pluri-cm visible sur chaussée
- mur en retour de type poids en béton avec un fruit de 15° montrant un bon fonctionnement (mur de 6,5m de hauteur)

# Séismes d'Accumoli, Visso et Norcia

## Effets induits : quelques conclusions

### Conclusions et retours d'expériences géotechniques



- endommagements géotechniques et structurels liés aux successions de séismes permettant d'expliquer des ruptures fragiles ( ex. rupture de la falaise de Pescara)
- faible saturation des sols expliquant le relatif « bon » comportement des versant et murs lors du séisme d'aout
- Pour les murs :
  - peu de ruptures par glissement (reconsidérer les approches déplacement Newmark)
  - peu de ruptures par poinçonnement (faible saturation des sols ?)
  - beaucoup de rupture par déversement (actions inertielles) et décollement du parement (faiblesse constructive du muratura a sacco)
- Efficacité du clouage pour améliorer le comportement des ouvrages maçonnés au déversement et pour améliorer l'intégrité des murs type « muratura a sacco »

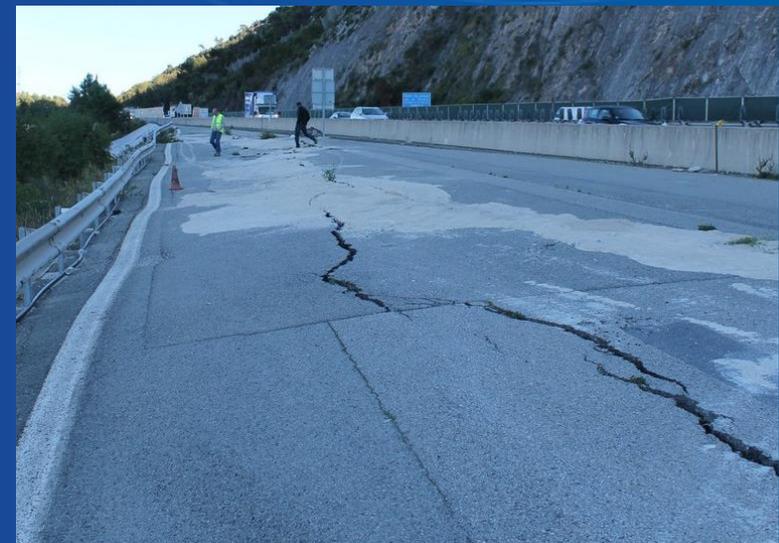
# Partie 4

(quelques exemples de renforcement  
sismique)

# Renforcement au séisme d'un grand glissement



## Confortement d'un grand glissement autoroutier en zone sismique



- Glissement profond (20m) en conditions statiques
- Fissurations et tassements sur chaussée
- Régressions du talus aval ... arrachement

# Renforcement au séisme d'un grand glissement



Un confortement massif permettant d'améliorer la stabilité du site en statique



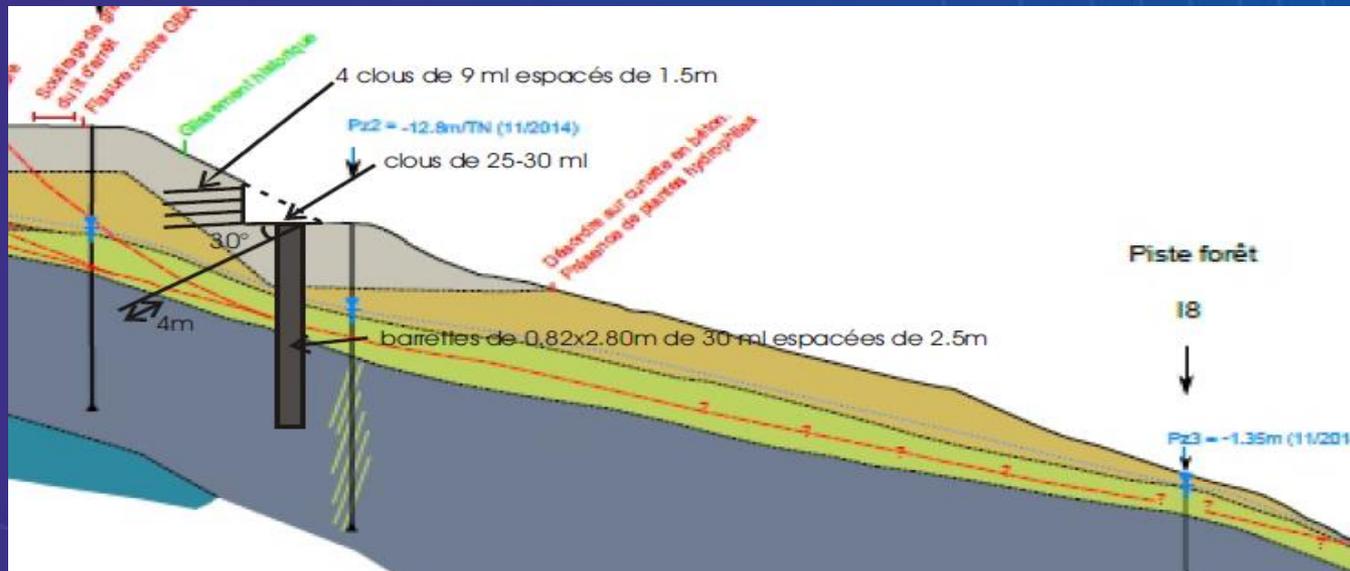
Confortement sur 250ml

- 101 barrettes de 30m de profondeur espacées de 2,4m
- 100 tirants de 30ml (>300t)
- Paroi clouée de 10m

# Renforcement au séisme d'un grand glissement



Un confortement massif se soldant par une sécurité faible au séisme ...



- confortement sismique hors de portée (avec les coefficients de sécurité EC8, NFP94-270)
- Recherche d'une sécurité minimale  $F > 1$
- éviter une rupture fragile du versant en cas de séisme

Pour les justifications en situations accidentelles y compris pour les vérifications sismiques, nous adopterons les coefficients suivants :

- $\Gamma_{PI} = 1$ ,
- $\Gamma_{qs} = 1$ ,
- $\Gamma_{a,clou} = 1,0$
- et on recherchera un coefficient de sécurité global  $F = 1,0$

# Renforcement au séisme d'un grand glissement

Un confortement massif se soldant par une sécurité faible au séisme mais permettant d'éviter des ruptures fragiles.



- 100 tirants de 50mm (500t)
- Paroi clouée de 10m

# Renforcement au séisme d'un bassin militaire



Forme de radoub de 17m de hauteur

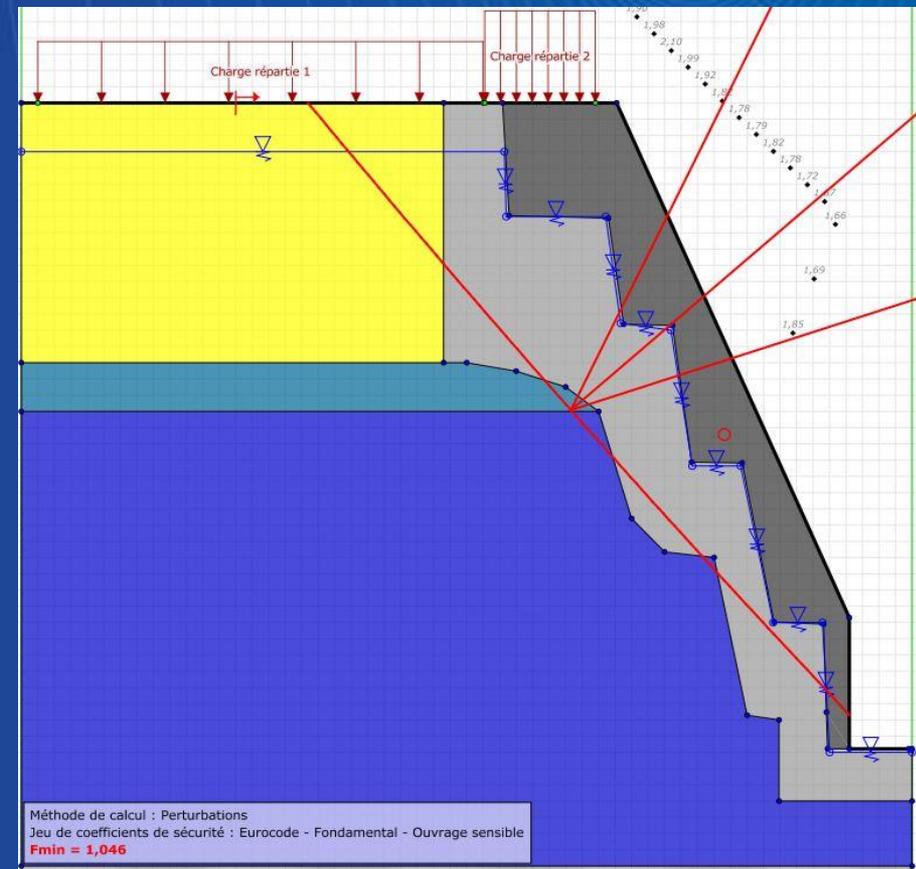
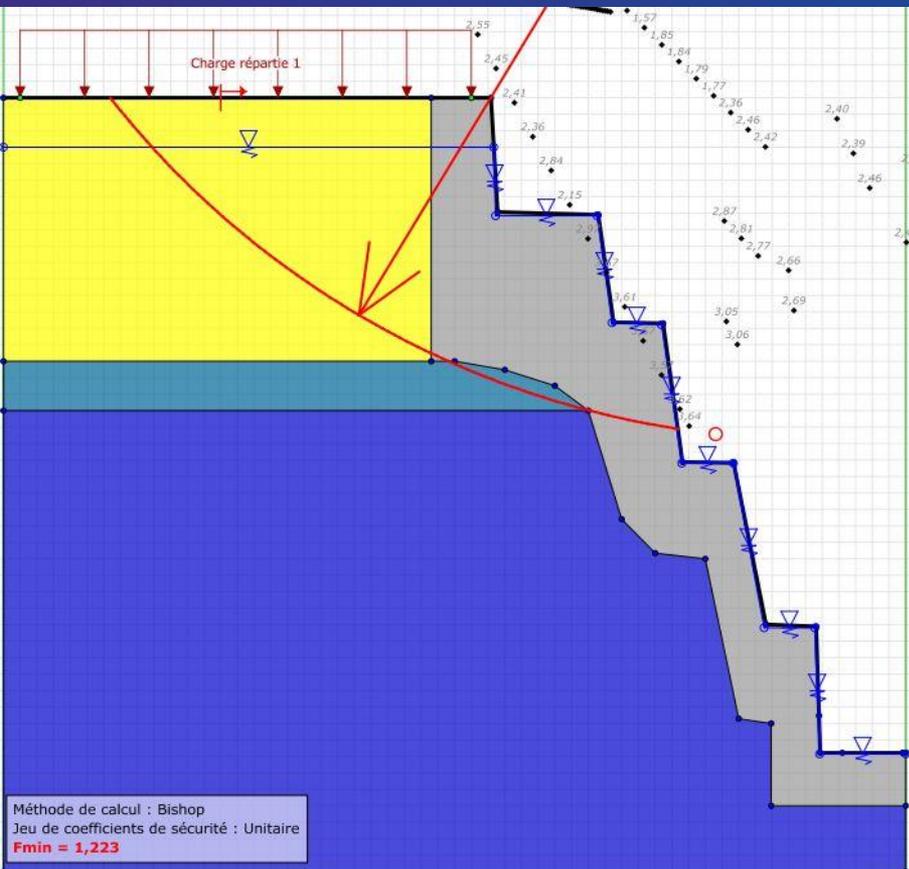


- Ouvrage massif en maçonnerie
- Fondé au rocher (schistes et schistes altérés)
- Confortement nécessaire de l'ouvrage
- Prise en compte d'un spectre sismique majoré (Fukushima)

# Renforcement au séisme d'un bassin militaire



## Confortement vis-à-vis des situations statiques



- Confortement par une coque massive (variant de 0,6 à 3,5m)
- Améliorer l'intégrité de la maçonnerie

# Renforcement au séisme d'un bassin militaire



## Confortement vis-à-vis des situations sismiques

- Une sécurité insuffisante sous condition sismique ( $F=0,85$ )
- Confortement par clouage
  - Permettant d'améliorer l'ancrage au rocher
  - Le comportement au déversement
- 9 niveaux de clous variant de 9m à 20m de longueur
  - diamètre 120 mm
  - armés de barres de 32 mm.
  - maillage : 2,0 m x 1,5 mètres.

