

LES PLÉNIÈRES 2010 DU LCPC ET DU Sétra

Sciences et techniques
du **Génie Civil**

**JOURNÉES
OUVRAGES D'ART**
LILLE - 16 ET 17 JUIN 2010

RETOUR D'EXPERIENCE DU SEISME DE L'AQUILA

- | | |
|-----------|----------------------------|
| D. Davi | - CETE Méditerranée / DOA |
| A. Vivier | - Systra (ex-Sétra) |
| D. Criado | - CETE Méditerranée / LRPC |

SOMMAIRE

- Retour sur les caractéristiques du séisme
- Dégâts observés sur les infrastructures routières
- Tentatives d'interprétation
- Test de la méthodologie Sismoa
- Conclusions

Retour sur les caractéristiques du séisme

• Données sismologiques

Date : 6 avril 2009 (1:32 AM)

Magnitude : 5,8 (Richter) ; **Prof. :** 8,8 km

(remontée de faille à 1-2 km de la surface)

Décrochement de faille normale : 20 cm

Forte directivité NE-SO

Acc. max. au rocher : 0,67g (environ 2x règlement!)

Forte composante verticale ($a_v = 1,2 a_H$ localement!)

Forts effets de site (amplifications locales d'un facteur 2 à 3!)

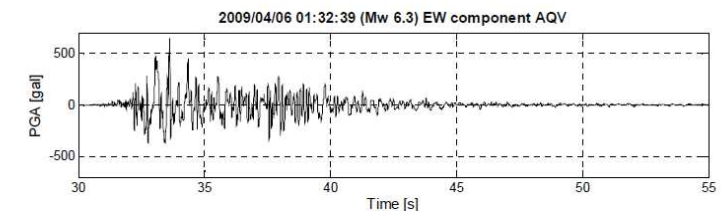
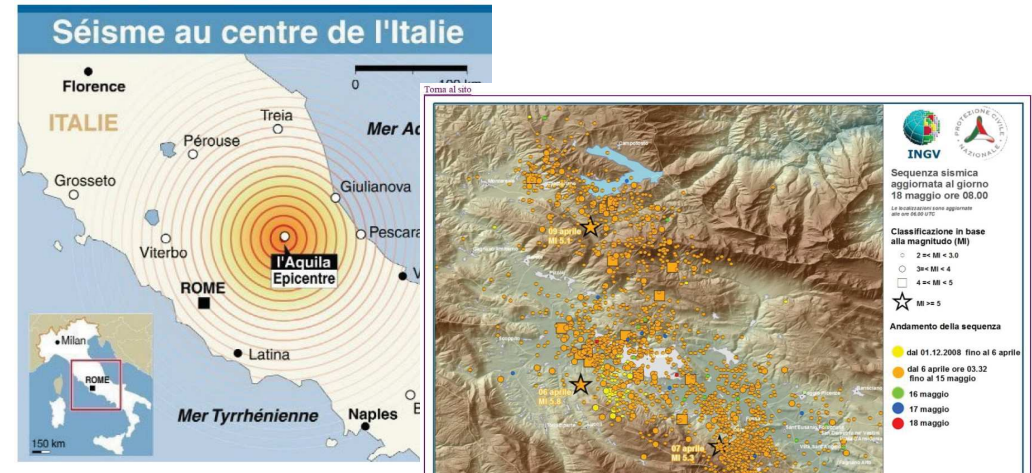
Intensités EMS98 : VII < I_{EMS98} < IX (destruction généralisée)

Durée : 80s

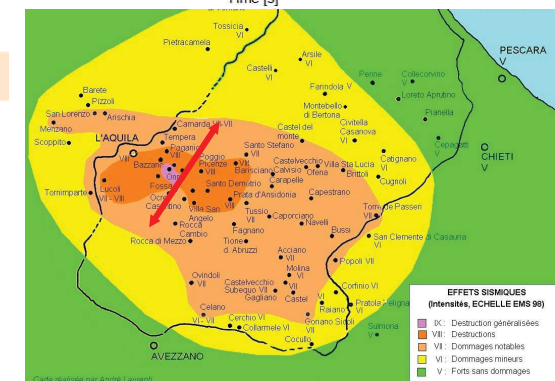
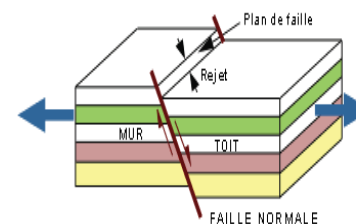
+ de 10 000 répliques la 1^{ère} semaine (dont 2 $M_w > 5$)

+ fort séisme italien depuis Irpina (1980)

ressenti jusqu'à Rome (110 km)



Déformation cassante - Régime extensif



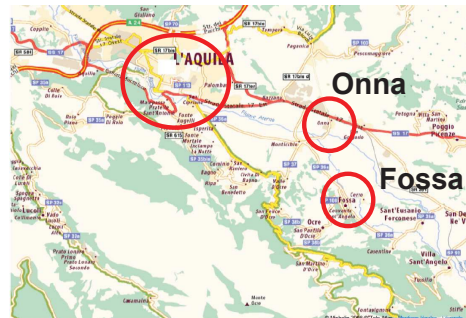
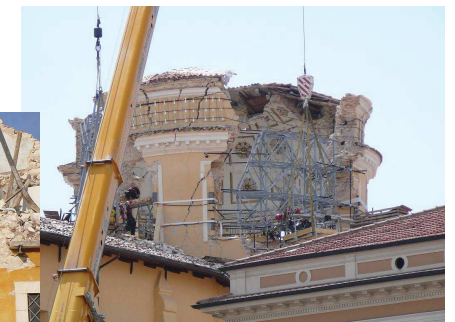
Retour sur les caractéristiques du séisme

• Bilan matériel et humain

(bilan à 2 mois après la catastrophe, sur une région comptant environ 68 000 hab.)

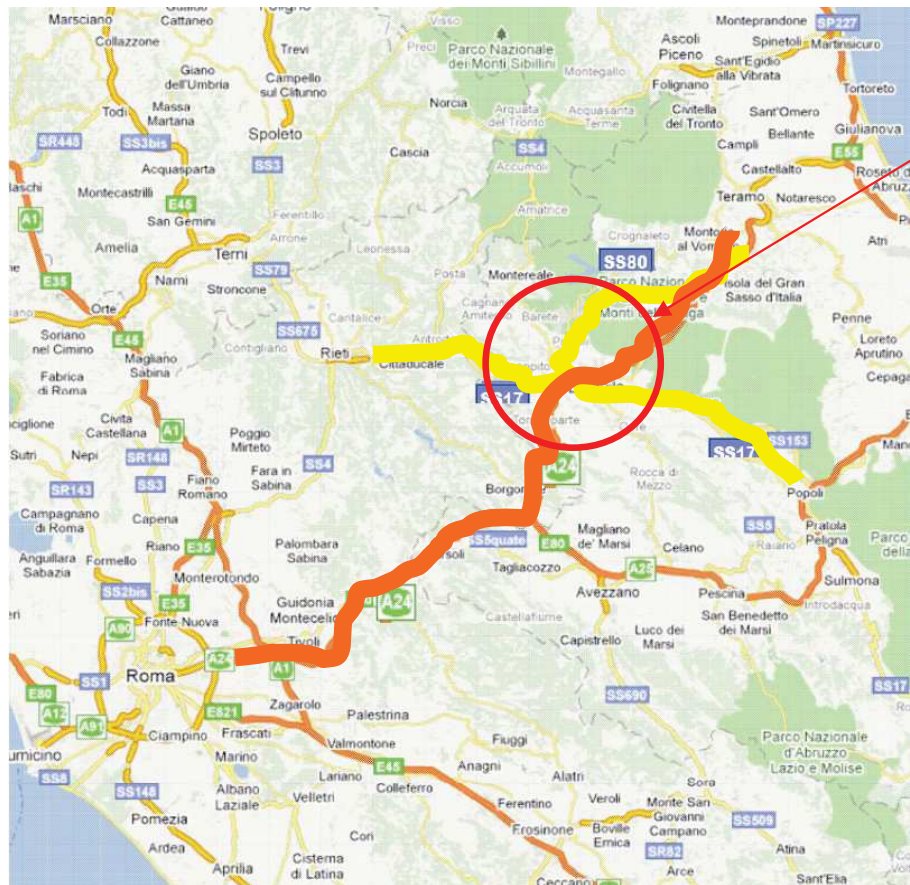
- 300 morts
- 1 000 blessés
- 26 000 sans-abris logés sous tentes
- 32 000 réfugiés en hôtels et privés
- 15 000 bâtiments détruits + 10 000 à réparer
- Coût des réparations évalué à 3Mds €
- 26 villes et villages sérieusement endommagés

notamment l'Aquila, Fossa et Onna...



Dégâts observés sur les infrastructures

• Choix des itinéraires d'étude

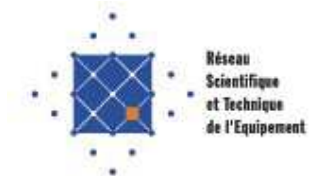


Périmètre
d'étude

Réseau structurant de la région de l'Aquila

(desserte + accès des secours)

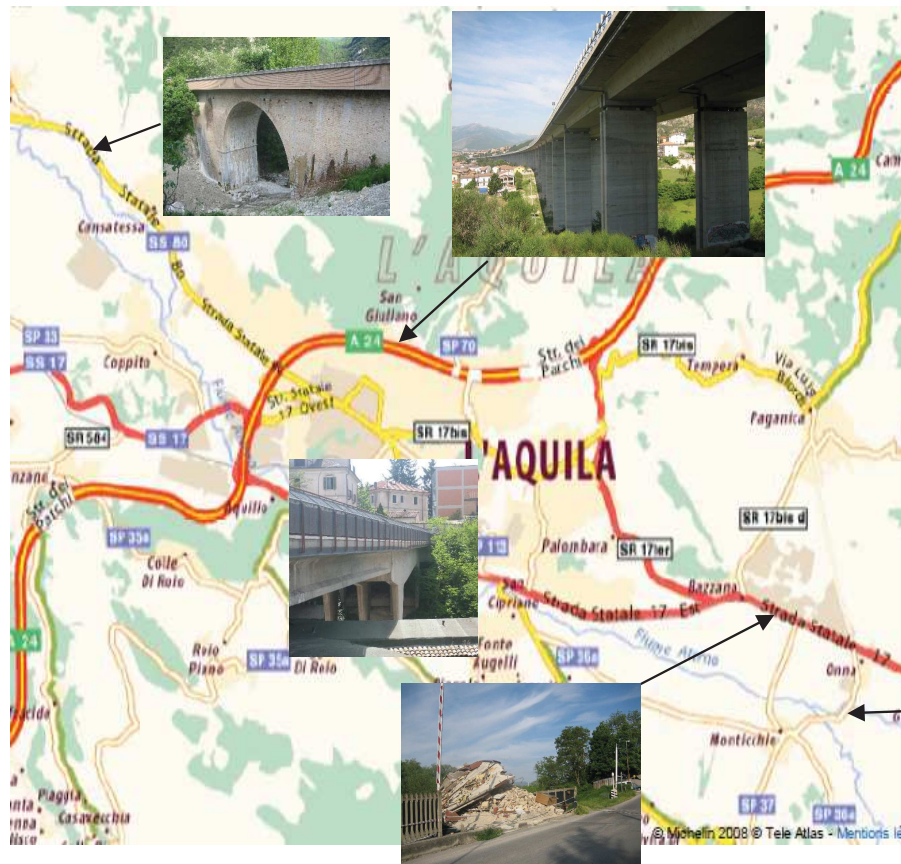
- l'A24 reliant Rome à Teramo
- la SS80 reliant Teramo à l'Aquila
- la SS17 reliant Rieti à Popoli
- Quelques OA secondaires endommagés relevés dans la presse



Réseau
Scientifique
et Technique
de l'Équipement

Dégâts observés sur les infrastructures

• Choix des itinéraires d'étude



Certaines similitudes avec le contexte Niçois/PACA

- **Urbanisme :**

Villes historiques + villages pierres

- **A24 / A8 :**

Succession de viaducs et de tunnels autoroutiers

- **SS80 / Vallées du Var et de la Tinée :**

Itinéraires de montagne



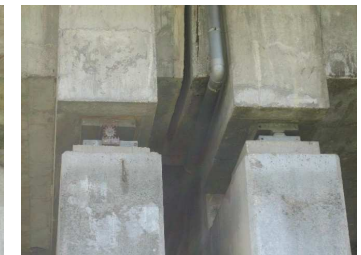
Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Les viaducs autoroutiers



Généralement :

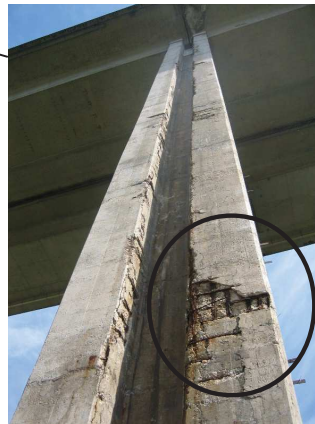
- Multi-travées iso-statiques
- Grande longueur
- Hauteur variable
- Piles rectangulaires ou portiques
- Appareils d'appui néoprène ou à crémaillère
- Butées transversales



Dégâts observés sur les infrastructures

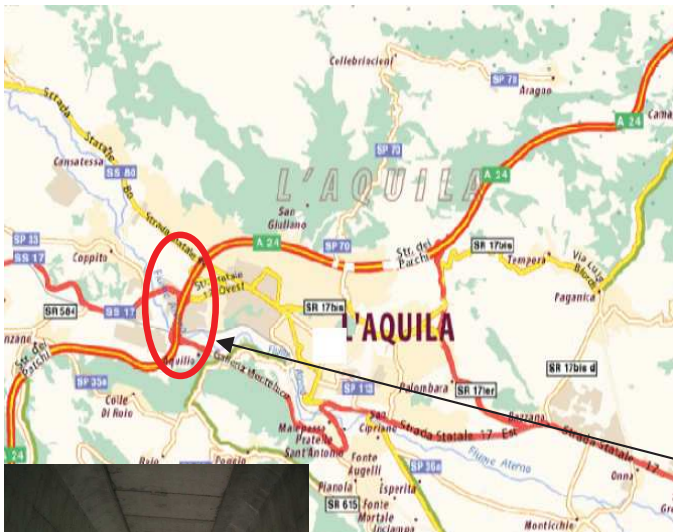
- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Les viaducs autoroutiers

Éclatements du béton d'enrobage :
Séisme ou corrosion ?



Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Les viaducs autoroutiers



Entrechoquement longitudinal des travées indépendantes :

- Endommagement des abouts de travées
- Endommagement des joints de chaussée et trottoir
- Déformation résiduelle des appareils d'appui
- « Pianotage » des dalles de chaussée (témoignage)

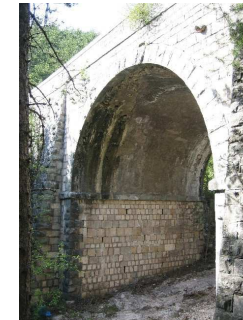
➔ Réouverture rapide à la circulation après inspections visuelles et réfection de l'enrobé



Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Les ponts en maçonnerie

- Déstructuration de la maçonnerie sur certaines parties d'ouvrages
- Chute d'un tympan
- Bon comportement des voûtes



Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Les ouvrages courants

Peu ou pas de dégâts...



A24



Dégâts observés sur les infrastructures

• Analyse des dégâts sur les ouvrages

• Les ouvrages de soutènement

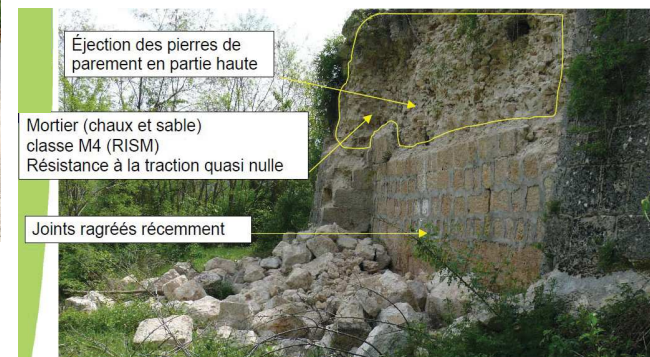
- Bon comportement général par rapport au niveau d'accélération subi
- Effondrement de quelques ouvrages en pierres sèches
- Rupture partielle de murs en maçonnerie (par basculement ou rupture interne)
- Observation d'un nouveau mode de ruine par éjection de maçonneries



SS17, Aquila



E. BERTRAND CETE Méditerranée



Éjection des pierres de parement en partie haute

Mortier (chaux et sable)
classe M4 (RISM)
Résistance à la traction quasi nulle

Joints ragrés récemment

Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Autres types de structures...



Arc béton (SS80)



Voûte béton (SS80)



Couverture pare-blocs (SS80)



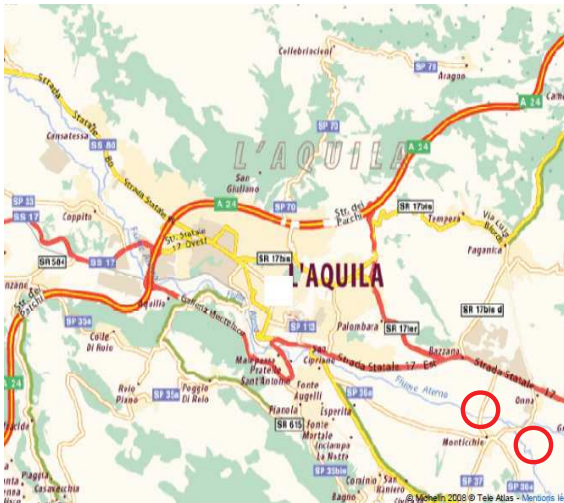
Ouvrages secondaires (Onna et Fossa)



Pont cantilever (centre de l'Aquila)

Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Les 2 OA secondaires à proximité de Onna et Fossa...



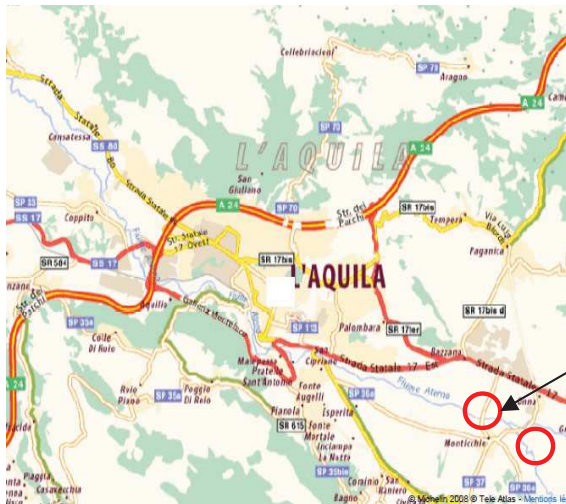
Fossa



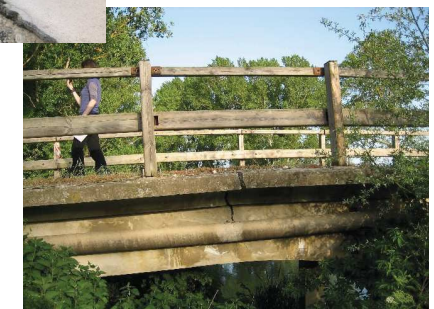
(Source Internet)

Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - Les 2 OA secondaires à proximité de Onna et Fossa...



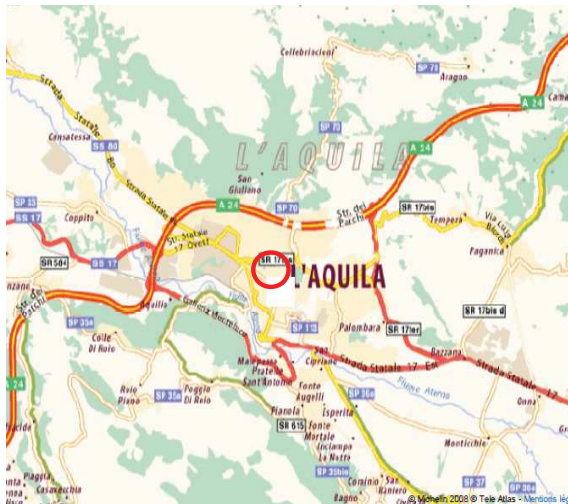
Onna



- Piles « allumettes »
- Dispositions constructives inadaptées
- Tassement des remblais d'accès
- Rupture d'une canalisation d'eau

Dégâts observés sur les infrastructures

- Analyse des dégâts sur les ouvrages
 - L'ouvrage cantilever dans le centre de l'Aquila



- Entrechoquement longitudinal tablier/culées
- Ripage transversal du tablier
- Basculement de la culée Ouest

➔ *Ouvrage fermé à la circulation*



Dégâts observés sur les infrastructures

- Effets induits

- Éboulements rocheux sur la SS80

(Observés jusqu'à 45 km du centre de l'Aquila)

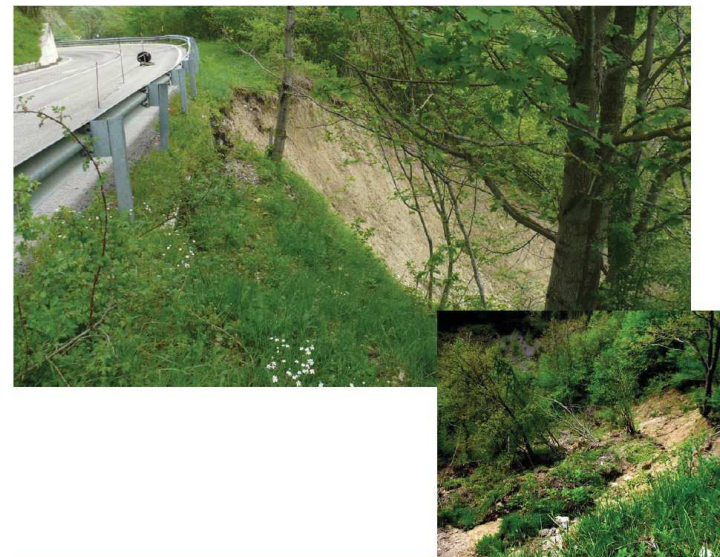
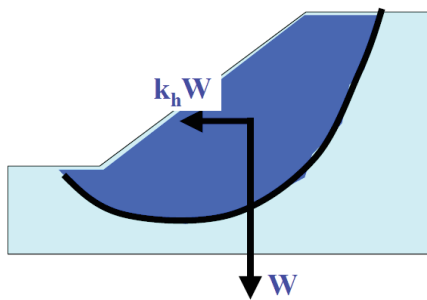


Dégâts observés sur les infrastructures

• Effets induits

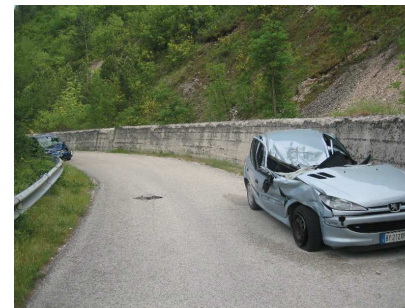
- **Glissements de terrain sur la SS80**
(Observés jusqu'à 45 km du centre de l'Aquila)

- peu nombreux (zone montagneuse mais plutôt rocheuse),
- ré-activation de zone en mouvement.



Dégâts observés sur les infrastructures

- Effets induits
 - Chutes de blocs à Fossa

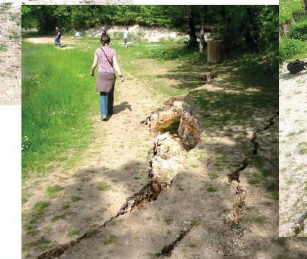


Dégâts observés sur les infrastructures

• Effets induits

• Autres...

- Pas de trace de liquéfaction dans la vallée de l'Alterno
- Peu ou pas d'indices de ruptures de faille en surface
- Effondrement de cavités souterraines (centre de l'Aquila)
- Glissements des berges (lac Sinizzo)
- Accès condamnés à cause d'effondrements de bâtiment, ou de risque d'effondrement de maisons



Dégâts observés sur les infrastructures

- Effets induits

- Illustration des seuils de déclenchement des effets induits



*Glissement de terrain
(SS80, 35 km de l'Aquila)*



Dégâts observés sur les infrastructures

• Bilan sur le comportement général du réseau routier

Très peu de dégâts sur les ouvrages d'art, comparativement aux bâtiments, hormis :

- 2 OA secondaires très endommagés (dont 1 effondré) près de Onna et Fossa
- 1 OA coupé à la circulation dans le centre de l'Aquila
- Quelques dégradations mineures sur certains viaducs de l'A24
- 1 voûte maçonnée partiellement endommagée (tympans effondrés)
- Quelques murs de soutènement effondrés ou abîmés



Le réseau routier a globalement très bien fonctionné, permettant l'afflux rapide des secours de toute l'Italie

Dégâts observés sur les infrastructures

• Bilan sur le comportement général du réseau routier

La bonne tenue des infrastructures routières : une des clés de l'efficacité des secours

- + de 2000 pompiers ont afflué de toute l'Italie
- Environ 1500 véhicules de secours (beaucoup dès les premiers jours)
- Accès initial par la SS17 puis par l'A24



➔ *Le bilan humain aurait pu être beaucoup plus lourd en cas de rupture d'itinéraire*

Tentatives d'interprétation

• Des aspects structuraux favorables

- Voûtes maçonnées et petits ouvrages généralement peu vulnérables



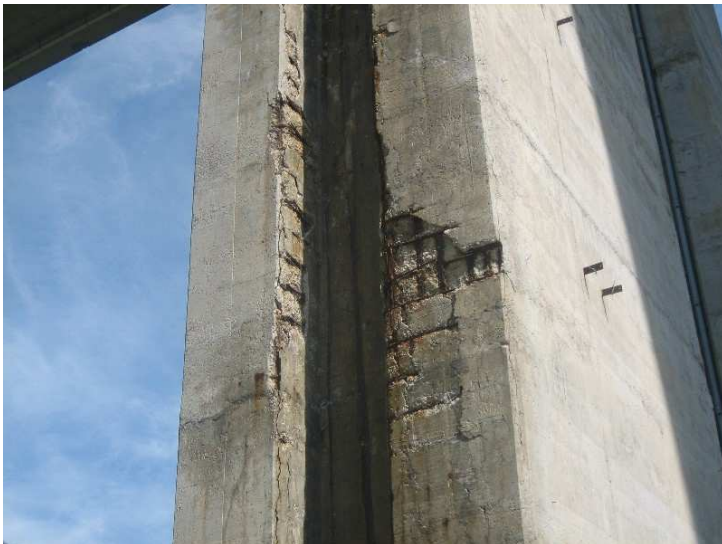
- Des viaducs plutôt souples et butés transversalement



Tentatives d'interprétation

• Des aspects structuraux favorables

- Des viaducs en « vrai » béton armé (*contrairement à de nombreux bâtiments*)



Tentatives d'interprétation

• Des typologies potentiellement à risque

- Viaducs à travées indépendantes
- Susceptibilité à l'entrechoquement ou à l'échappement d'appui longitudinal



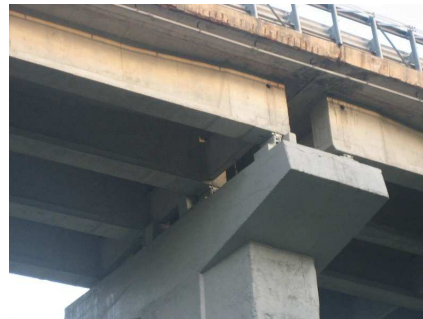
Kobé (Japon, 1995)



Taiwan, 1999



*San Fernando
(USA, 1971)*



Tentatives d'interprétation

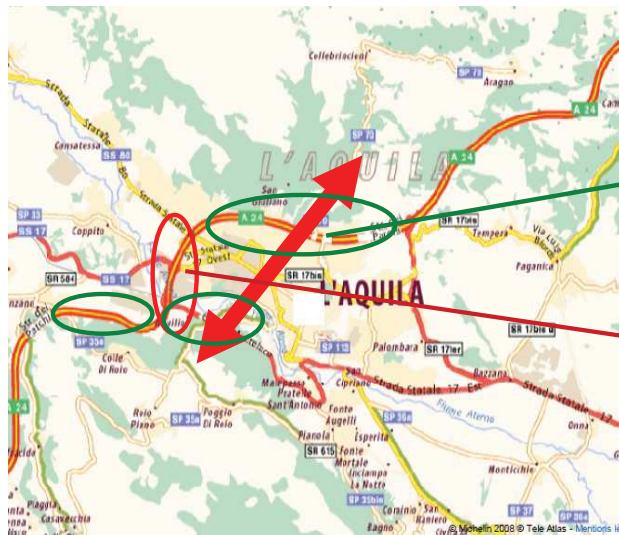
• Retour sur les caractéristiques du séisme

- Une puissance avérée

- Mais certains aspects favorables vis-à-vis des ouvrages d'art

- Une directivité préférentiellement orientée NE-SO

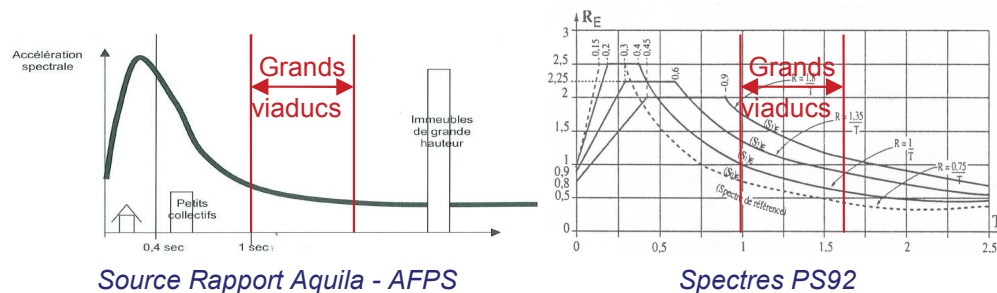
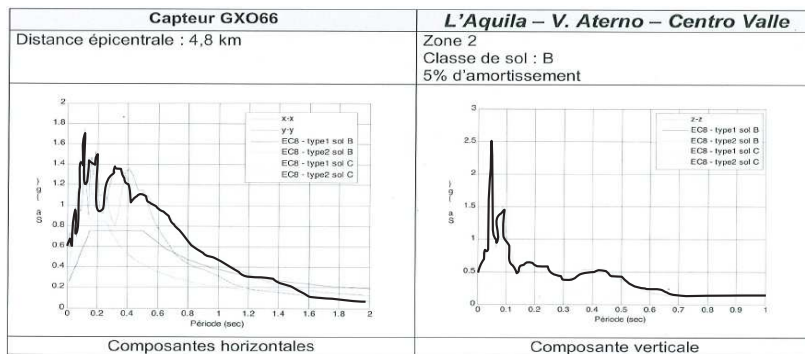
(mécanisme de faille et déplacements résiduels)



Tentatives d'interprétation

• Retour sur les caractéristiques du séisme

- Une puissance avérée
- Mais certains aspects favorables vis-à-vis des ouvrages d'art
 - Un spectre hautes fréquences



Test de la méthodologie Sismoa

• Philosophie du test

Sismoa = une approche d'analyse sommaire qualitative de la vulnérabilité des OA,

- Enveloppe :

- Indépendante de la directivité du séisme

- Supposée couvrir plusieurs types de signaux (contenu spectral, durée, profondeur, distance à la source...)

- Et conservative :

- Calibrée sur la base de spectres et caractéristiques matériaux réglementaires (coefficients de sécurité)

Tests concluants :

Ouvrage supposé peu vulnérable



peu endommagé

Ouvrage supposé vulnérable



endommagé ou non

Test négatif :

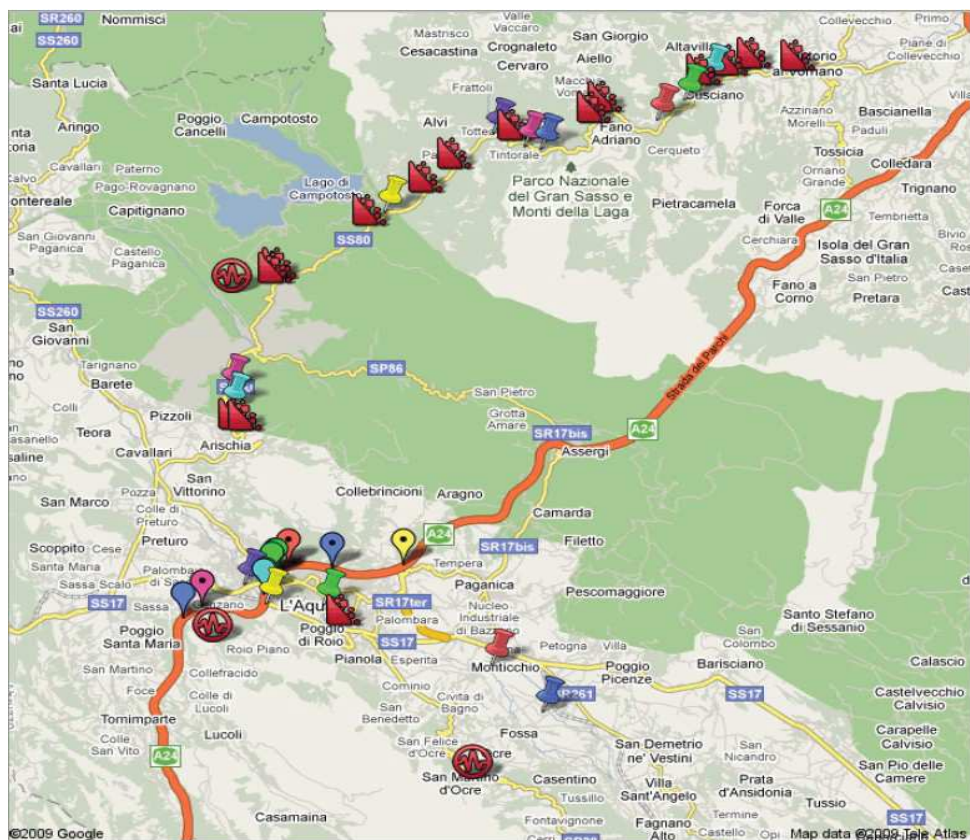
Ouvrage supposé peu vulnérable



endommagé



Test de la méthodologie Sismoa

• Résultats et interprétations








Séisme de l'Aquila Mission post-sismique




-  [6 avril 2009](#)
Mw = 6.3
-  [7 avril 2009](#)
Mw = 5.5
-  [9 avril 2009](#)
Mw = 5.4




-  Effets induits
-  Ponts

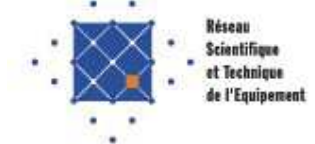
Test de la méthodologie Sismoa

• Résultats et interprétations

Pont 1 : Pont caisson béton	Pont 3 : Pont caisson béton	Pont 4 : Pont caisson béton	Pont 5 : Pont VIPP	Pont 7 : Pont VIPP
Eclatement en pied de piles	Aucun dommage	Décalage transversal ?	Aucun dommage	Aucun dommage
				
$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,75 0,70 0,05 1,00 0,75	$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,70 1,00 0,75 0,35 0,70	$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,60 1,00 0,19 0,30 0,60	$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,70 0,50 0,19 0,42 0,35	$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,90 0,10 1,00 - 0,90

Pont 2 : Pont béton	Pont d'Onna : Pont à nervures	Pont d'Aquila centre : Pont nervures béton
Aucun dommage	Fissures de cisaillement sur piles Eclatement du béton sur piles Fissures sur le tablier Basculement culées	Décalage transversal ? Chocs tablier/culées
		
$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,40 0,10 0,19 0,35 0,14	$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,55 1,00 0,01 0,60 0,55	$V_{général}$ $V_{tablier}$ $V_{culées}$ V_{piles} V_{vibra} 0,55 1,00 0,19 1,00 0,55

SS80 km 55	SS17 pont 9	SS80 km 20
Fissures tympan Chutes de blocs	Aucun dommage	Fissures tympan et piédroits Chutes de blocs
		
$V_{général}$ V_{voute} $V_{culées}$ V_{vibra} 0,80 1,00 - 0,80	$V_{général}$ V_{voute} $V_{culées}$ V_{vibra} 0,85 0,37 - 0,31	$V_{général}$ V_{voute} $V_{culées}$ V_{vibra} 0,80 0,75 - 0,60



Test de la méthodologie Sismoa

• Résultats et interprétations



➔ **Test globalement concluant**

- Résultats (trop?) conservatifs
- Incertitudes sur accélérations subies (secousse principale + répliques)
- Certaines données manquantes ou approximatives (fondations, règlement utilisé, dispositions constructives...)

Conclusions (1/2)

« Opportunité » des missions post-sismiques



- Confrontation à la réalité du phénomène physique
- « Compréhension » du comportement des structures par l'observation et l'analyse des dégâts
- Expérience humaine / Échanges d'expertises / Collaboration internationale
- Test et calibrage des outils de prévention (un champ d'expérimentation à échelles réelles)

Conclusions (2/2)

Principaux enseignements

- Bon comportement général des OA et infra. routières par rapport aux bâtiments :
 - Certaines caractéristiques structurelles favorables
 - Spécificités du séisme (contenu spectral, directivité)
- Un des éléments clé de la gestion de crise et de l'efficacité des secours
- Seuils de déclenchement très bas des effets induits
- Test Sismoa plutôt concluant (trop conservateur?)
- Confirmation de la vulnérabilité des tympans des ponts en maçonnerie (voûtes elles-mêmes peu vulnérables)
- Importance de la qualité des dispositions constructives dans la tenue des ouvrages