

# Mission post-sismique CETE Méditerranée - Sétra

## Séisme de l'Aquila du 6 avril 2009

Aurélié Vivier, Denis Davi

### Introduction

Le tremblement de terre a eu lieu dans une vallée de la chaîne appennine, près de la ville de l'Aquila (cf. figure 1) le 6 avril 2009 à 3 h 32. Le séisme, de magnitude,  $M_w$  de 6.3, a été ressenti jusqu'à Rome à une centaine de kilomètres et a fait plus de 350 victimes.

De nombreux bâtiments et maisons individuelles ont été touchés (15 000 détruits et 10 000 à réparer) et de nombreuses chutes de blocs et glissements ont été observés un peu partout dans la région.

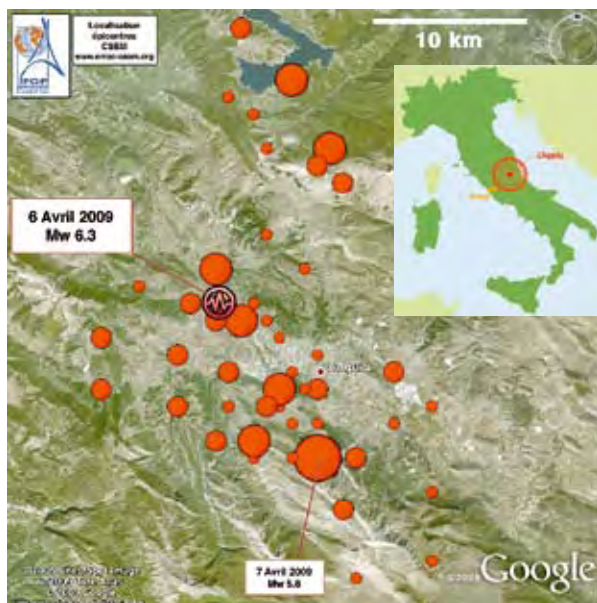


Figure 1 : localisation et magnitude des secousses sismiques

Source : INGV

Le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) Méditerranée, en collaboration avec le Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), a mis en place une mission post-sismique afin de tirer les leçons de ce séisme. Cette mission s'est déroulée du 11 au 16 mai 2009 et était composée de 7 personnes : Christian Thibault (LRPC de Nice), Lucie Chever (CETE Méditerranée/DREC/SBC), Remi Chaille (CETE Méditerranée/DREC/SBC), François Dunand (Géoter), pour l'étude des bâtiments et David Criado (LRPC Aix), Denis Davi (CETE Méditerranée/DCEDI/DOA) et Aurélié Vivier (Sétra) pour l'étude des ouvrages d'art et des murs de soutènement.

Nous tenons à remercier les autorités italiennes ainsi que les équipes de secours pour leur accueil et pour nous avoir permis d'accéder aux différents sites.

### Caractéristiques du séisme

#### Une puissance avérée

Le tremblement de terre qui a frappé la région des Abruzzes s'est traduit par de nombreuses secousses, dont quatre de forte magnitude :

- 6 avril :  $MW = 6.3$
- 7 avril :  $MW = 5.5$
- 9 avril :  $MW = 5.4$  et  $Mw = 5.2$

Les épicentres de ces secousses étaient à des profondeurs relativement faibles de 8 à 16 km, ce qui explique en partie les importants dégâts dus aux ondes de surfaces.

De plus, les niveaux d'accélération enregistrés sont importants (cf. figure 2) puisque les accélérations au rocher atteignent des valeurs jusqu'à  $6.7\text{ m/s}^2$  et la composante verticale était localement très forte (1.2 fois l'accélération horizontale).

Il est intéressant de comparer cette accélération mesurée à l'accélération réglementaire. Selon la carte de zonage sismique de la zone, l'Aquila est en zone 1 (risque élevé) ce qui correspond à une accélération nominale de  $2.5$  à  $3\text{ m/s}^2$ . Le séisme subi était donc environ deux fois plus violent que le niveau réglementaire vis-à-vis duquel les constructions neuves doivent être dimensionnées. Les études du Laboratoire de Nice ont en outre montré l'importance des effets de site sur la zone (cf. figure 3). La ville de L'Aquila repose sur des dépôts alluvionnaires récents comme une grande partie de la vallée. Les villages d'Onna et de Fossa reposent quant à eux sur des sols de type limons. Une amplification de 2 à 3 fois l'accélération au rocher a été observée dans ces zones de sols alluvionnaires.

Les ouvrages d'art, au même titre que les bâtiments et habitations individuelles (qui ont subi un sort beaucoup moins favorable), ont donc été largement et indéniablement mis à l'épreuve.

### Une forte directivité

Les témoignages mentionnent une forte directivité NE-SO, confirmée par les mécanismes de faille représentés sur la carte (cf. figure 4).

### Un spectre « basses périodes »

Le rapport « report\_RAN\_20090406 » fournit les spectres (cf. figure 5) correspondants au séisme de L'Aquila.

Nous pouvons observer que le spectre a un fort contenu aux basses périodes. Les grands ouvrages ont une période de 1,5 s environ, ils se situent donc sur la branche descendante du spectre, avec une accélération divisée par 6 à 8 par rapport au pic, soit environ  $1\text{ m/s}^2$  au rocher. Par contre, les constructions individuelles sont beaucoup plus raides, avec des périodes autour de 0.4 s pour les bâtiments de 4 étages, soit au niveau du plateau du spectre.

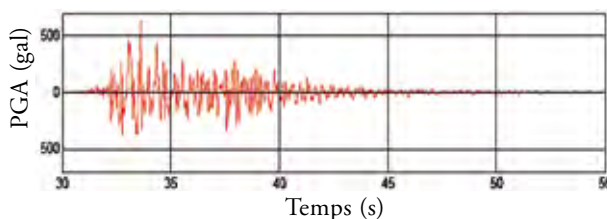


Figure 2 : accélérogramme du séisme du 6 avril 2009 – Source : d'après les données de l'INGV

Station			Distance (km)	PGA (g)
N°	Nom	Sol		
570012	FRR4	Rocher	11,076	0,023
570011	FRR6	Alluv.	11,985	0,044
570034	FRR3	Rocher	12,372	0,012
580009	FRR1	Rocher	11,807	0,010
580033	FRR5	Alluv.	12,677	0,035
580034	FRR2	Mégabèche	12,363	0,015

Figure 3 : valeur des pics d'accélération (PGA) relevés aux stations du réseau de Roio, réplique du 18 avril 2009,  $M_w = 3.8$  – Source : rapport Etienne Bertrand (LRPC de Nice)

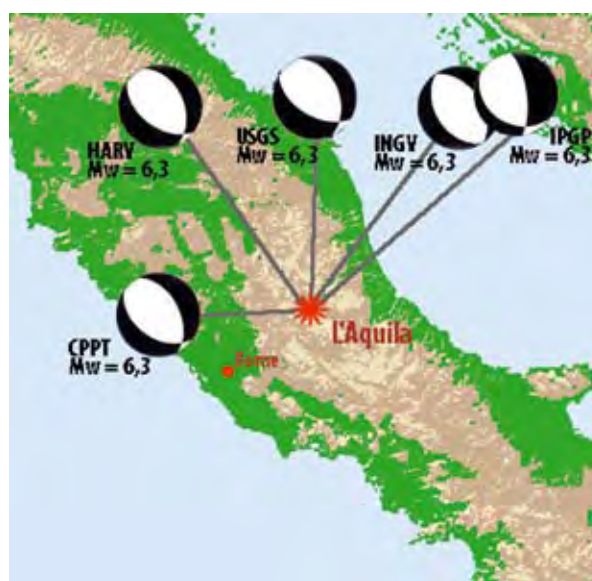


Figure 4 : mécanisme de failles – Source : d'après EMSC

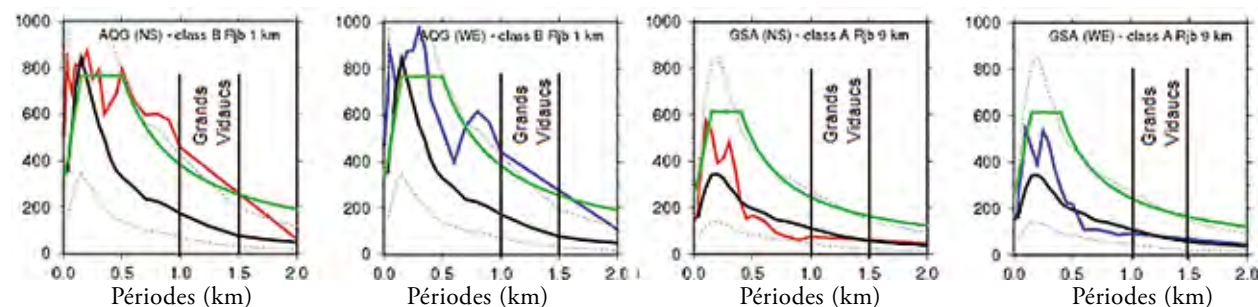


Figure 5 : spectres du séisme : noir : code italien ITA08 GMPE, rouge et bleu : séisme, vert : EC8 – Source : d'après le rapport « report\_RAN\_20090406 »

## Comportement général des itinéraires routiers et dégâts observés sur les ouvrages d'art

### Choix des itinéraires d'étude

Le réseau structurant de la région de l'Aquila, est le suivant, (cf. figure 6) :

- A24 autoroute reliant Rome à Teramo : L'A24 est une autoroute composée de nombreux ouvrages et tunnels, notamment autour de l'Aquila. Seuls quelques ouvrages ont été faiblement endommagés ;
- SS80 route nationale reliant Teramo à l'Aquila : La SS80 est une route encaissée de montagne, qui a été coupée par des chutes de blocs et glissements de terrain, seul un pont en maçonnerie a été endommagé ainsi que quelques murs de soutènement. Elle est redondante avec l'A24 pour l'accès depuis la côte adriatique, ce qui favorise l'acheminement des secours en cas de rupture d'un des deux axes ;
- SS17 route nationale reliant Rieti à Popoli : La SS17 est une route de vallée peu encaissée qui comporte donc peu d'ouvrages d'art. Nous n'avons pas relevé de dommages sur les ouvrages, les murs ou d'effets induits sur cet itinéraire ;
- réseau secondaire reliant les villes et villages de la vallée et le centre de l'Aquila : Des ouvrages endommagés nous avaient été signalés sur ces routes (près de Onna et de Fossa) ou dans le centre de l'Aquila, nous les avons également inspectés.

Notre analyse s'est donc focalisée sur les 3 axes principaux de desserte de la zone, sur un rayon de l'ordre de 40 km autour du centre de l'Aquila. Nous avons choisi ces itinéraires car ils caractérisent le réseau structurant de la région et devaient permettre l'accès des secours depuis toute l'Italie. De plus, ils étaient très hétérogènes, ce qui était intéressant en termes de comportements. Enfin ces itinéraires présentent de nombreuses similitudes avec ceux de la région de Nice (urbanisme, A24-A28, SS80-Vallée Var/Tinée).

### Analyse des dégâts observés par typologie d'ouvrages rencontrés

Les typologies d'ouvrages sont variées d'un itinéraire à l'autre.

#### Autoroute A24

Sur l'Autoroute A24, les dix ouvrages inspectés étaient essentiellement des VPP, des ponts à nervures et caissons en béton à travées indépendantes datant des années 70 et en assez bon état général (cf. figure 7).



Figure 6 : réseau routier autour de l'Aquila – Source : Sétra



Figure 7 : repérage des ouvrages sur l'A24 – Source : Sétra





Figure 8 : grands viaducs de l'autoroute A24 – Source : CETE Méditerranée, Sétra

Parmi les ouvrages les plus marquants, figurent des viaducs de grande longueur et dont la hauteur des piles peut atteindre jusqu'à 40 m (cf. figure 8). Ces ouvrages présentent pour la plupart des butées parasismiques de blocage transversal du tablier, témoignant de la prise en compte du séisme lors de leur construction. Ils sont en très grande majorité constitués de travées indépendantes bloquées longitudinalement par un dispositif métallique sur un des appuis et libres sur l'autre du fait de l'emploi d'appareils d'appui à crémaillère permettant les mouvements de rotation et de translation dans l'axe de l'ouvrage (dilatations thermiques) (cf. figure 9).

Les autres ouvrages, de taille plus modeste, reposent généralement sur des appareils d'appui en élastomère fretté.

Les ouvrages courants de petites dimensions (de une à trois travées) n'ont subi aucun dommage.

Concernant les grands viaducs situés dans la partie Nord du tronçon autoroutier, nous avons relevé très peu de dégâts à l'exception de quelques éclatements du béton d'enrobage des piles (cf. figure 10), sans qu'il soit facile de déterminer si cet éclatement est dû au séisme ou à la corrosion (le séisme ayant alors seulement fait s'effondrer des morceaux déjà partiellement décrochés).

Seule la section en pied de la pile la plus haute du pont 1 (40 m environ, cf. figure 10 photo 3) semble indiquer que la section de béton armé a subi des sollicitations importantes (endommagement plus profond par compression du béton sous l'effet du moment fléchissant).



Figure 9 : appareils d'appui fréquemment rencontrés sur les ouvrages de l'A24 (néoprènes et crémaillères) – Source : CETE Méditerranée, Sétra



Figure 10 : pont 1 de l'A24, éclatement du béton d'enrobage – Source : CETE Méditerranée, Sétra



Figure 11 : pont de la bretelle de l'échangeur de l'Aquila ouest A24 Pont 11 (à gauche) Pont 12 (à droite) – Source : CETE Méditerranée, Sétra

Concernant les ouvrages du tronçon Ouest, notamment sur le viaduc de la bretelle de l'échangeur de l'Aquila Ouest (cf. figure 11, A24 Pont 11), nous avons observé des traces de chocs entre travées (au droit des joints de chaussées) et au niveau des culées. Selon certains témoignages, « la route était en escalier ». Le hourdis supérieur étant constitué de dalles préfabriquées, celles-ci ont pu se mettre en toit (pianotage) suite aux mouvements des différentes travées, ce qui a nécessité de les remettre à leur place et de refaire l'enrobé. Si les caissons des différentes travées n'ont globalement pas subi de décalages importants, certains appareils d'appui en élastomère présentent en revanche des déformations résiduelles potentiellement dues au séisme.

Un entrechoquement longitudinal de travées a également été observé sur le pont 12 (cf. figure 11), malgré la présence de butées longitudinales. Les butées étaient en effet visiblement trop faibles pour retenir l'ouvrage. Les autres ouvrages n'ont pas subi de dégâts, malgré des hauteurs de piles et des longueurs de travées similaires et souvent en l'absence de butées.

Dans la direction transversale, nous n'avons pas observé de dommages notables. Lorsqu'il y avait des butées transversales, celles-ci ont généralement conservé leur jeu. Seul l'ouvrage de la bretelle de l'échangeur d'Aquila ouest (A24 Pont 4), a subi un léger décalage transversal d'une des travées, mais il n'est pas sûr que cela soit imputable au séisme.

### Route nationale SS80

Nous avons inspecté onze ouvrages sur la SS80 (cf. figure 12). Deux typologies d'ouvrages sont observables sur cet itinéraire :

- Ponts en maçonnerie

Ces ponts de pierres ou de briques sont constitués d'une ou plusieurs voûtes. Ils sont de dimensions très variables. Ils ont été construits avant les années 70 et donc avant les premières règles parasismiques. Ils présentent un état de santé relativement correct pour ce type de structure ;

- Pont en arc béton, VIPP portique béton, pont à voûte béton

Ces ouvrages en béton de typologie un peu particulière se situent sur des axes issus de la SS80 et franchissant la rivière en fond de vallée. Ils datent probablement des années 70 et présentent un état de santé variable selon les ouvrages, les pathologies rencontrées correspondant la plupart du temps à des écailllements du béton d'enrobage provoqués par la corrosion des armatures.



Figure 12 : repérage des ouvrages sur la SS80 – Source : Sétra





Figure 13 : pont en maçonnerie SS80 km 20 – Source : Sétra

Nous avons relevé des fissures sur les tympans et des chutes de blocs au niveau des murs latéraux et des tympans des ponts en maçonnerie avec piédroits et de hauteur supérieure à 9 m (Ponts SS80 km 20, SS80 km 44, SS80 km 55).

Dans cette catégorie d'ouvrages, celui qui a le plus souffert du séisme est sans conteste le pont situé au km 20 (cf. figure 13), dont un tympan entier s'est effondré conduisant à la coupure de la circulation sur la moitié de la chaussée.

En ce qui concerne le pont en arc béton (SS80 km 43), le VIPP portique béton (SS80 km 35) et le pont à voûte béton (SS80 km 44), peu ou pas de dommages ont pu être relevés, malgré une typologie a priori vulnérable et un état de corrosion parfois avancé dans certaines sections critiques censées participer à la reprise des efforts horizontaux.

Seul le pont à voûtes béton (cf. figure 14) présentait un éclatement du béton d'enrobage au niveau d'une des trois voûtes, ainsi qu'au niveau d'un des piédroits. Il est possible que ces dégâts soient dus à la secousse sismique. Aucun élément concret ne permet néanmoins de confirmer cette hypothèse.

#### Route nationale SS17, centre de l'Aquila et routes secondaires

La SS17, dont le tracé se situe dans la vallée, possède relativement peu de ponts (cf. figure 7, paragraphe « Analyse des dégâts observés par typologie d'ouvrages rencontrés »). Nous avons inspecté cinq ouvrages sur cet itinéraire ainsi que dans le centre de l'Aquila et sur les routes secondaires. Deux typologies d'ouvrages se distinguent :

- Ponts en maçonnerie

Ces ponts de pierres ou de briques sont constitués d'une ou plusieurs voûtes. Ils sont de dimensions très variables. Ils ont été construits avant les années 70 et donc avant les premières règles parasismiques. Comme les ouvrages de la SS80, ils présentent un état de santé relativement correct pour ce type de structure ;

- VIPP et ponts à nervures

Les deux petits ponts près de Onna et Fossa, sans doute les plus endommagés par le tremblement de terre de l'Aquila, de même que celui coupé à la circulation dans le centre de l'Aquila, entrent dans cette catégorie. Ils datent des années 70 et sont en assez bon état général même si des traces de corrosion des armatures sont visibles en certains endroits de la structure.



Figure 14 : pont à voûtes béton (Pont SS80 km 44) – Source : CETE Méditerranée, Sétra



Figure 15 : pont de l'Aquila centre – Source : CETE Méditerranée, Sétra

Les ponts en maçonnerie identifiés sur la SS17 étaient le plus souvent sans piédroits et présentaient des hauteurs réduites par rapport à ceux de la SS80. Aucun dommage n'a été observé sur ces ouvrages (SS17 Pont 9), excepté sur le Pont 6, qui présentait un éclatement de tympan.

Le pont de l'Aquila centre (cf. figure 15, photos 1 et 3), présente des marques importantes d'entrechoquement longitudinal (notamment au niveau des joints de chaussée) et ce malgré la présence de piles encastrées. De plus, on note un basculement des culées (cf. figure 15, photo 2).

Dans la direction transversale, on observe également un décalage sur le pont de l'Aquila centre (cf. figure 15, photo 4), qui semble être imputable au séisme. Si les dégâts observés ne semblent pas à première vue de nature à remettre en cause la fonctionnalité de l'ouvrage, les autorités italiennes ont néanmoins pris la décision de le fermer à la circulation. L'interprétation que nous pouvons en faire au regard de la géométrie globale de la structure, semble indiquer un basculement de culées, potentiellement révélateur de désordres structurels graves.

À notre arrivée sur le site du pont de Fossa effondré, l'ouvrage avait déjà été entièrement déposé. En

revanche, le pont d'Onna (cf. figure 16), bien que fermé à la circulation, était toujours en place. L'observation des dégâts subis par la structure, constituée d'un tablier à poutres en béton armé encastré sur des piles très minces et peu robustes a permis de nous éclairer sur le comportement de ces ouvrages situés à proximité de l'épicentre du séisme.

Nous avons ainsi observé une dégradation importante des parties supérieures des piles et des poteaux de culées au niveau de l'encastrement dans le tablier sous l'effet des moments fléchissants et contraintes de cisaillement induits par le séisme (cf. figure 16, photos 2 et 4).

Pour le pont d'Onna (et probablement Fossa), les aciers des piles étaient lisses. Les aciers longitudinaux étaient en nombre insuffisants (un par coin), les aciers transversaux a priori inexistant, et les jonctions poteaux - poutres ne réalisaient pas un ancrage. Les piles ont donc rompu par cisaillement et absence de confinement vis-à-vis des effets de la flexion.

Un tassement important des culées, combiné à la composante verticale du séisme a par ailleurs entraîné un basculement important de la travée de rive, matérialisé par une large fissuration verticale (1 à 2 cm) associée à une rupture des aciers longitudinaux sur toute la hauteur de la dalle et une rotation du tablier



Figure 16 : pont d'Onna (tablier, piles et culées) – Source : CETE Méditerranée, Sétra



(cf. figure 16, photo 3) et des fissures transversales dues à un affaissement et un endommagement des culées, des fissures de cisaillement et un éclatement du béton d'enrobage au niveau des piles et des poteaux de culées.

### Retour sur les caractéristiques du séisme

Comme nous l'avons vu au niveau des caractéristiques du séisme, le séisme était d'une puissance avérée avec des accélérations jusqu'à  $6.7 \text{ m/s}^2$  au rocher, amplifiées par les effets de site. Les ouvrages d'art ont donc été largement sollicités.

Le séisme présentait également une forte directivité NE-SO. Elle s'est traduite par une sollicitation préférentiellement transversale sur les ouvrages du tronçon Nord de l'autoroute A24, dont la vulnérabilité longitudinale a été évoquée précédemment et a par conséquent sans doute joué favorablement dans leur bonne tenue (cf. figure 17). À contrario, les ouvrages du tronçon Ouest ont subi une sollicitation préférentiellement longitudinale, qui s'est d'ailleurs traduite par un certain nombre de défaillances (principalement entrechoquements de travées) (cf. figure 17).

De plus, compte tenu de la teneur en basses périodes du spectre, l'accélération ressentie par ces ouvrages est donc relativement faible, ce qui explique le peu de dégâts observés par rapport aux constructions individuelles beaucoup plus raides. À noter qu'un séisme différent caractérisé par un contenu hautes périodes plus prononcé aurait très probablement conduit à des dégâts plus importants sur les viaducs.



Figure 17 : sollicitation des ouvrages selon la directivité du séisme  
Source : Sétra

### Conclusions de l'inspection

L'analyse des dégâts subis par les ouvrages d'art lors du séisme de l'Aquila révèle donc un comportement globalement satisfaisant des ouvrages d'art par rapport aux dégâts importants observés sur les bâtiments, et aux nombreux glissements de terrain et chutes de blocs.

Cela est probablement dû au respect d'un certain nombre de règles parasismiques : présence d'aciers Haute Adhérence (sauf pour le pont de Fossa effondré et le pont d'Onna fortement endommagé), espacement réduit des aciers transversaux 150 mm (A24, pont 1), présence de butées parasismiques, piles élancées associées à appareils d'appui en néoprènes, donc souplesse des appuis. Par contre, beaucoup de viaducs sont à travées indépendantes, il y avait donc un risque d'échappement d'appui ou de chocs entre travées, les butées longitudinales étant absentes ou trop petites mais seuls des entrechoquements mineurs ont été observés.

Les ponts en maçonnerie se comportent bien sous séisme car les efforts sont en général insuffisants pour décompresser la voûte. Les seuls dommages observés touchent les tympans latéraux de forte hauteur qui subissent les effets de la poussée dynamique du remplissage, comme cela a pu être observé sur le pont de la SS80. En revanche, la vulnérabilité au séisme est fortement liée à l'état de santé de l'ouvrage, le séisme ne jouant que le rôle d'accélérateur de l'état de dégradation.

Enfin, les caractéristiques du séisme étaient également favorables aux ouvrages.

Ce bon comportement, notamment pour les viaducs de l'A24, a permis aux secours venant de toute l'Italie d'accéder à la zone rapidement et efficacement. Sans ce maintien de la continuité du réseau routier structurant, on peut affirmer que la crise aurait été de toute évidence beaucoup plus grave.



## Test de la méthode Sismoa pour l'analyse sommaire de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art

### Présentation de la méthode

La méthode Sismoa est une procédure d'évaluation sommaire du risque sismique sur les ouvrages d'art existants. C'est une méthode qualitative et empirique. Qualitative car elle repose sur les données géométriques et typologiques des ouvrages. Empirique car elle s'inspire des dommages observés lors des séismes passés pour évaluer la vulnérabilité des différents éléments structurels de l'ouvrage. Les résultats permettent donc d'identifier les éléments structuraux sensibles et aboutissent à l'évaluation d'une valeur de vulnérabilité sismique par ouvrage.

La méthode Sismoa s'inscrit dans une méthode plus générale d'évaluation du risque sur les itinéraires, Sisroute qui intègre notamment la caractérisation de l'aléa vibratoire et des effets induits (chutes de blocs, glissements de terrain, liquéfaction), qui peuvent bloquer la route.

La vulnérabilité d'un ouvrage au phénomène vibratoire est évaluée par son indice global de vulnérabilité  $V_{\text{vibra}}$ . L'indice va de 0 pour une présomption de dommages très faibles à 1 pour la ruine.

$$V_{\text{vibra}} = V_{\text{général}} \times \max(V_{\text{voûte}} ; V_{\text{tablier}} ; V_{\text{culées}} ; V_{\text{piles}})$$

$V_{\text{général}}$  : coefficient variable de 0 à 1, traduisant la sensibilité d'ensemble de l'ouvrage. Il dépend de la méthode de dimensionnement au séisme de l'ouvrage lors de sa conception ( $V_{\text{méth}}$ ), du type d'ouvrage ( $V_{\text{type}}$ ) et de son état de santé ( $V_{\text{état}}$ ).

$V_{\text{voûte}}$  : valeur de vulnérabilité des voûtes en maçonnerie.

$V_{\text{tablier}}$  : valeur de vulnérabilité du tablier et des appareils d'appui.

$V_{\text{culées}}$  : valeur de vulnérabilité des culées.

$V_{\text{piles}}$  : valeur de vulnérabilité des piles intermédiaires.

La méthode Sismoa fournit donc un indice global de la vulnérabilité sommaire d'un ouvrage d'art. Cet indice est global pour l'ouvrage et enveloppe des indices de vulnérabilité des différents éléments structurels et de la direction considérée. De plus, il ne tient pas compte du contenu fréquentiel du séisme vis-à-vis de la fréquence propre de la structure.

### Philosophie du test

Un des objectifs de la mission était de tester la méthode Sismoa sur les ouvrages de différents itinéraires autour de l'Aquila, de configuration assez proche de celles que l'on peut trouver en France, afin de comparer les vulnérabilités présumées de ces ouvrages aux dommages observés. Nous avons donc testé les ouvrages de l'autoroute A24, des routes nationales SS80 et SS17, qui offrent un panel intéressant de typologie d'ouvrages.

Le test sera considéré concluant dans les deux cas suivants :

- l'ouvrage évalué peu vulnérable par Sismoa est peu endommagé ;
- l'ouvrage évalué vulnérable par Sismoa est endommagé ou non. Dans le dernier cas, l'approche étant enveloppe pour différentes caractéristiques de séisme (directivité, contenu fréquentiel...), elle sera alors sécuritaire.

Le test sera non concluant si des ouvrages évalués comme peu vulnérables sont endommagés.

Pour effectuer ses tests, nous avons procédé à de nombreux relevés sur les ouvrages notamment sur les tabliers et les piles. Ces relevés consistaient souvent en des estimations et non des mesures précises, car malheureusement le plus souvent nous n'avions pas de moyen d'accès facile et nous n'avons pas pu obtenir les plans des ouvrages.

## Résultats du test et interprétation

### Ponts en maçonnerie

La vulnérabilité des ponts en maçonnerie est basée sur les leçons des séismes passés et dépend des dimensions de l'ouvrage (cf. figure 18) :

- épaisseur du tablier à la naissance des voûtes et à la clef ( $h_1$  et  $h_2$ ),
- longueur du mur en tête et en pied ( $L_t$ ,  $L_p$ ),
- hauteur du piédroit ( $h_p$ ),
- présence de tirants passifs.

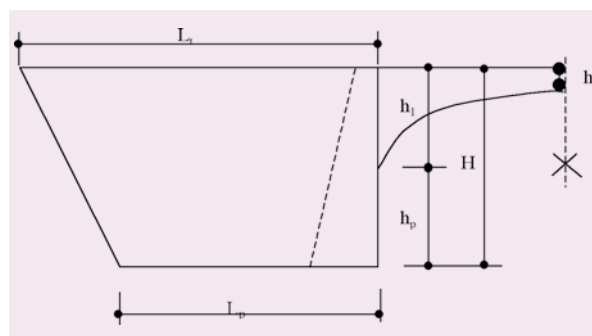


Figure 18 : dimensions et notations utilisées dans la méthode Sismoa, pour les ponts en maçonneries – Source : Sétra

La méthode Sismoa a fait ressortir trois ouvrages sur les cinq étudiés, avec des indices de vulnérabilité supérieurs à 0.60, qui correspondent aux ouvrages ayant subi des dommages. L'indice de vulnérabilité est donc toujours sécuritaire par rapport aux dommages constatés, comme le montre le tableau ci-dessous.

SS80 km 55					SS80 km 40					SS80 km 20				
Fissures tympan Chutes de blocs					Aucun dommage					Fissures tympan et piédroits Chutes de blocs				
					Photo non disponible									
$V_{général}$	$V_{voute}$	$V_{culées}$	$V_{vibra}$		$V_{général}$	$V_{voute}$	$V_{culées}$	$V_{vibra}$		$V_{général}$	$V_{voute}$	$V_{culées}$	$V_{vibra}$	
0,80	1,00	-	<b>0,80</b>		1,00	0,30	-	<b>0,30</b>		0,80	0,75	-	<b>0,60</b>	
SS17 Pont 6					SS17 pont 9									
Eclatement de tympan					Aucun dommage									
$V_{général}$	$V_{voute}$	$V_{culées}$	$V_{vibra}$		$V_{général}$	$V_{voute}$	$V_{culées}$	$V_{vibra}$						
0,95	1,00	-	<b>0,95</b>		0,85	0,37	-	<b>0,31</b>						







### Ponts à travées indépendantes caisson béton ou VIPP

Nous avons effectué des relevés sur neuf ponts à travées indépendantes sur l'autoroute A24. La méthode Sismoa est basée sur la vulnérabilité des différents éléments :

- vulnérabilité du tablier au travers du biais, courbure, de la présence de butées, du risque d'échappement d'appui, de sa géométrie, et du type d'appareils d'appui ;
- vulnérabilité des culées au travers du type de culées et des dispositifs latéraux ;
- vulnérabilité des piles au travers du type de liaison avec le tablier et de la géométrie des piles.

La méthode Sismoa a fait ressortir sept ouvrages avec des indices de vulnérabilité supérieurs à 0,60, la cause principale étant l'échappement d'appui longitudinal des travées. Sur les ponts 11 et 12, nous avons effectivement relevé des traces de chocs entre travées. Pour le pont 1, le risque provient des appareils d'appui et des piles élancées, des éclatements de béton ont en effet été observés.




L'indice de vulnérabilité est donc globalement sécuritaire par rapport aux dommages constatés, comme le montre le tableau suivant.

Pont 1 : Pont caisson béton					Pont 3 : Pont caisson béton					Pont 4 : Pont caisson béton				
Eclatement en pied de piles					Aucun dommage					Décalage transversal				
														
V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>	V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>	V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>
0,75	0,70	0,05	1,00	<b>0,75</b>	0,70	1,00	0,75	0,35	0,70	0,70	1,00	0,19	0,30	0,60
Pont 5 : Pont VIPP					Pont 7 : Pont VIPP					Pont 8 : Pont VIPP				
Aucun dommage					Aucun dommage					Aucun dommage				
														
V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>	V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>	V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>
0,70	0,50	0,19	0,42	0,35	0,90	0,10	1,00	-	0,90	0,70	0,50	0,12	0,33	0,35
Pont 10 : Pont VIPP					Pont 11 : Pont caisson béton					Pont 12 : Pont nervures béton				
Aucun dommage					Chocs entre travées et culées Pianotage Distorsion appareils d'appui					Chocs entre travées et culées Distorsion appareils d'appui				
Photo non disponible														
V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>	V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>	V <sub>général</sub>	V <sub>tablier</sub>	V <sub>culées</sub>	V <sub>piles</sub>	V <sub>vibra</sub>
0,75	1,00	0,27	0,35	0,75	0,70	1,00	0,07	0,21	0,70	0,70	1,00	0,07	0,60	0,70

### Travées continues

Nous avons effectué des relevés sur trois ponts à travées continues, le premier franchissant l'autoroute A24, le second étant dans l'Aquila centre et le troisième franchissant le Fuime Aterno près d'Onna.

La méthode Sismoa conclut à un indice de vulnérabilité de 0.55 pour les ouvrages de l'Aquila centre et de Onna et à 0.14 pour le franchissement de l'A24. Des chocs entre les culées et le tablier traduisant un mouvement du tablier pour les ponts de Onna et l'Aquila centre (en effet  $V_{\text{tablier}} = 1$ ) ont effectivement été observés. Par contre, les piles de l'ouvrage d'Onna étaient totalement cisailées alors que  $V_{\text{piles}} = 0.60$ . Cela peut s'expliquer par leurs faibles dimensions et la présence d'aciers lisses et par le fait que l'ouvrage est situé très proche de l'épicentre, il a donc subi une accélération maximale. Le pont franchissant l'A24, n'avait pas de dommages. L'indice de vulnérabilité est donc en accord avec les dommages constatés, comme le montre le tableau ci-dessous.

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				
														
$V_{\text{général}}$	$V_{\text{tablier}}$	$V_{\text{culées}}$	$V_{\text{piles}}$	$V_{\text{vibra}}$	$V_{\text{général}}$	$V_{\text{tablier}}$	$V_{\text{culées}}$	$V_{\text{piles}}$	$V_{\text{vibra}}$	$V_{\text{général}}$	$V_{\text{tablier}}$	$V_{\text{culées}}$	$V_{\text{piles}}$	$V_{\text{vibra}}$
0,40	0,10	0,19	0,35	0,14	0,55	1,00	0,01	0,60	0,55	0,55	1,00	0,19	1,00	0,55

### Conclusion sur la méthode Sismoa

Nous pouvons donc conclure que le test est satisfaisant car tous les ouvrages ayant subi des dommages ont été détectés par l'analyse Sismoa. Certains ouvrages ont été pressenti vulnérables par la méthode Sismoa mais ne présentaient aucun dommage. En effet, il faut garder à l'esprit que la méthode est globale et indépendante des caractéristiques du séisme. Ces ouvrages auraient peut être subis des dégâts sous un séisme différent (direction, magnitude, fréquence).

Il aurait été intéressant d'avoir accès à des cartes d'accélération enregistrées couvrant toute la zone du séisme pour connaître l'accélération qu'ils ont réellement subie, et ainsi valider nos observations. Si l'on se fixe comme première hypothèse le niveau d'accélération réglementaire au rocher, soit  $3\text{m/s}^2$ , (ce qui est bien inférieur aux niveaux observés), nous aboutissons à la carte suivante de risque simulée à partir des vulnérabilités Sismoa (cf. figure 19).

Le risque pressenti était donc important pour tous les ouvrages.



Figure 19 : carte de risque selon la méthode Sismoa – Source : Sétra



## Conclusion de la mission

---

En conclusion, le tremblement de terre de l'Aquila, dans un contexte marqué par une urbanisation et une typologie de constructions et d'ouvrages assez comparables à celles que l'on peut trouver en France métropolitaine (en particulier dans la région PACA) a révélé un comportement des ouvrages d'art et des infrastructures routières globalement très satisfaisants comparativement à celui des bâtiments et maisons individuelles. Les caractéristiques structurelles et la conception des ouvrages d'art (typologie, souplesse, qualité des dispositions constructives, butées parasismiques) mais également certaines spécificités favorables de ce séisme (directivité, contenu fréquentiel hautes fréquences) permettent d'expliquer ce bon comportement.

La bonne tenue des réseaux routiers et leur opérationnalité immédiate après la secousse se sont d'ailleurs révélées des éléments clefs pour l'acheminement et l'organisation des secours et la gestion de crise.

La mission nous a également permis d'avoir un retour d'expérience sur le comportement des ouvrages sous séisme et de tester l'outil Sismoa, d'analyse préliminaire de la vulnérabilité sismique des ouvrages d'art (Bulletin ouvrages d'art n° 43). Le test s'est révélé concluant, confirmant notamment pour les ouvrages en maçonnerie la robustesse des voûtes et la vulnérabilité des tympans, même si l'outil semble globalement conservateur. Cet outil sera disponible début 2010 auprès du Sétra et sur le site de la DTRF et Pile (<http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>).

Enfin, ce séisme nous rappelle l'importance des dispositions constructives pour un bon comportement sismique des structures de génie civil. Pour les ouvrages d'art, il est donc essentiel de se référer à l'Eurocode 8 ou au guide Sétra à paraître « Ponts en zone sismique - Guide de conception » pour les ouvrages neufs et au guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants » pour les ponts existants ■