

Dynamique et causes de l'effondrement du viaduc de Morandi à Gênes

P. Villani*,

* Politecnico di Milano - Département de Génie Civil et Environnemental, Italie
paola.villani@polimi.it

Résumé

Les conjectures erronées formulées pour l'effondrement du viaduc de Morandi à Gênes ont peut-être été formulées dans la soudaine recherche d'un bouc émissaire ou, peut-être plus pénible, pour des raisons économiques et politiques: mais les données recueillies, les études effectuées, les éléments rapportés dans mes analyses ne prouvent pas l'effondrement structurel comme cause de la chute du viaduc sur le Polcévera. L'effondrement a été tragique et peut-être aurait pu être évité: les gestionnaires de la route, avec un système d'alerte météorologique de haut niveau et d'un avertissement d'orage électrique dans des circonstances extraordinaires, aurait dû mettre en place toutes les procédures de sécurité. L'étude qui se présente ici, avec photographies et analyses précises, explique comment les impacts du changement climatique avec l'incapacité à prédire le risque ont entraîné l'effondrement du viaduc.



Figure 1 Effondrement du viaduc de Morandi à Gênes sur la photo prise par l'hélicoptère

1. Description de l'état du pont

Le viaduc du Polcevera a été continuellement étudié et consolidé périodiquement. Depuis 1990, le viaduc de Morandi était endommagé par des attaques chimiques et physiques sur des matériaux [1]. Autour des haubans ont été trouvés des symptômes de dégradation superficielle (béton fortement carbonaté, fissures locales). En 1992, une inspection détaillée a mis en évidence des dommages caractérisés par des solutions de continuité localisées à proximité de la tour de suspension ainsi que par un degré élevé d'oxydation des câbles internes, de nombreux torons cisailés et / ou des réductions de section significatives. Pour cette raison, les pylônes 9 et 10 ont eu des interventions de modernisation structurelle [Note 1]. Des nœuds de torsion ont également été observés sur les tirants du pylône n ° 9 en raison des conditions de contrainte différentes entre le béton précontraint autour des tirants et le tablier en béton précontraint. [Note 2].

C'est la raison pour laquelle de nombreux ingénieurs ont cité la viscosité du béton qui a donné lieu à une chaussée pas horizontale.

Déjà au début des années 80, ceux qui traversaient le viaduc étaient contraints de faire des hauts et des bas à cause des déplacements des structures du tablier, des problèmes non prévus lors de la phase de conception.

Des corrections répétées de nivellement d'asphalte ont permis de ramener la chaussée à des conditions semi-horizontales acceptables.

Également en 2018, des travaux étaient en cours pour renforcer le tablier en béton précontraint et il était prévu de moderniser les tirants.

Le manque d'horizontalité est révélateur d'une extension progressive des tirants

Chaque tirant est constitué de brins de 352 ½ "de diamètre tandis que la poutre principale est dépourvue de renforcement longitudinal sauf aux extrémités en porte-à-faux et aux zones proches des supports intermédiaires. [Note 3].



Figure 2 Detachment of the concrete cover, carbonation and oxidation of the reinforcements

Déjà en 1994 [1], deux tirants du pylône 9 présentait une déformation modale non conforme aux attentes.

Les tirants en béton précontraint protègent l'acier des torons contre la corrosion (environnement marin susceptible d'être attaqué par les chlorures). Pour ce qui concerne la réparation des tirants ont été effectués les tests suivants

- sur le béton: les ultrasons; essai d'arrachement; broyage de carottes; enquêtes de force; détermination de l'épaisseur du béton affecté par la carbonatation
- sur l'acier: essais en laboratoire sur des échantillons de barres et de torons

Le viaduc a été soumis à des activités de vérification et de surveillance continues, qui se sont poursuivies même après 1994; des inspections périodiques et des diagnostics ont permis de contrôler l'ensemble du viaduc (tirants, caissons, dalles, poutres, supports, pylônes) :

- Check-up des haubans par réflectométrie
- Investigations diagnostiques sur les attaches des pylônes 9 et 10
- Caractérisation dynamique des systèmes équilibrés 9 et 10
- Études de diagnostic sur les poutres de panneaux externes en béton précontraint



Figure 3 Des réseaux ont été placés pour éviter les pertes matérielles



Figure 4 [Source Spea Engineering - Janvier 2016] Investigations diagnostiques sur les haubans des piles 9 et 10. Les carottes réalisées montrent une oxydation dans les torons, une corrosion et une rupture des câbles précontrainte. La gaine protectrice est oxydée à l'intérieur. Corrosion du lien interne dans le hauban de la pile 10. La carotte examine uniquement l'armure secondaire [Note 3].

- Études diagnostic sur les poutres en béton précontraint

Mesures de réflectométrie temporelle sur les barres de précontrainte

L'état de conservation des tirants des pylônes 9 et 10 était convenable; cependant, les résultats des tests de réflectométrie ont montré une lente tendance à la dégradation des câbles constituant les tirants (réduction de la surface totale des câbles de 10% à 20%)

Il y a eu des fuites de matériaux au cours de la période 2011-2016, peut-être à la suite de l'inondation du 4 octobre 2010. Mais le viaduc de Morandi ne figure pas sur la liste des interventions urgentes. Conséquences: détachement de la couverture de béton, carbonatation et oxydation des armatures. Des réseaux ont été placés pour éviter les pertes matérielles.



Figure 5 Les pompiers et de nombreux ingénieurs ont immédiatement retrouvé des traces d'explosion

2. Description de l'accident

Le 14 août 2018 vers 11 h 36 heure locale (09 h 36 UTC), pendant une tempête de pluie torrentielle, un tronçon de Viaduc Morandi de 257 mètres est effondré. Des témoins oculaires ont signalé que le pont avait été frappé par la foudre avant de s'effondrer. Le nombre exact de véhicules impliqués n'a pas encore été déterminé certainement 35 voitures et 4 camions ont été déclarés tombés du pont. L'effondrement du viaduc de Morandi n'est pas dû à une défaillance structurelle: les éléments collectés présentés ici comme dans un incident probant classique ne prouvent pas que l'effondrement structurel est la première cause de l'effondrement du viaduc. Les pompiers et de nombreux ingénieurs ont immédiatement retrouvé des traces d'explosion. Les images du 14 août 2018 étaient très claires. Les pompiers se déplacent sur une surface recouverte de gravier et de petits éboulis de pierres dans toute la zone du viaduc du Polcevera à Cornigliano.

Dans cette zone également, les toits de certains entrepôts se sont effondrés sous le viaduc de Morandi, où le camion vert est resté bloqué.

Celles-ci témoignent d'une explosion: les ruines sont complètement différentes de celles découvertes en cas d'effondrement structurel. Deux effondrements distincts qui se sont produits en quelques minutes. Le premier effondrement s'est produit du côté de Cornigliano, un effondrement qui a également endommagé les hangars sous-jacents.

Le deuxième effondrement a été déterminé par le pylône numéro 9 qui a cédé car il n'était plus contrebalancé.



Figure 6 Les pompiers se déplacent sur une surface recouverte de gravier et de petits éboulis de pierres dans toute la zone du viaduc du Polcevera à Cornigliano

3. Causes

La webcam de «Autostrade per l'Italia» (le plus grand opérateur de routes à péage en Italie) clarifie la dynamique de l'effondrement du viaduc de Morandi..

De la vidéo intégrale [Note 4] nous savons à quelle vitesse les véhicules allaient et par conséquent où ils se trouvaient au moment de la catastrophe.

Un camion-citerne blanc est en transit sur le tronçon autoroutier, il se dirige directement vers le sud. Il est suivi par un camion vert..

Dans la vidéo à 00h55 - un camion jaune emploie environ 35 à 40 secondes pour entrer dans la section du pont qui dans la suite s'est effondré. Comme on peut voir sur les images de la webcam ce camion est près du pylône 9 après 50 secondes. Le camion-citerne blanc [Figure 7, Véhicule A] transite à 2:11 minutes - à 3:00 minutes, il est sur la chaussée puis effondrée. En fait, à la minute 2:28, il vient de dépasser la courbe - et à la minute 2:36 se trouve exactement dans la position où le camion vert restera bloqué .



Figure 7 Un camion-citerne blanc est en transit sur le tronçon autoroutier, direction sud..



Figure 8 Le camion vert en transit sur le tronçon autoroutier, direction sud.

À 2:37 minutes, le camion rouge Alba passe - précédé par le camion à bobine métallique - poids total 44 tonnes: les deux tomberont sous le viaduc du Polcevera.

Le trafic le long de la chaussée qui tout de suite s'est effondrée est très lent et avance à une vitesse inférieure à celle utilisée dans la courbe de la première section du viaduc.

L'explosion est visible à 3:41..

Le camion vert passe à 3h10 - il se bloque à quelques mètres de la section effondrée.

Et dans la webcam sous le pylône 9, vous voyez une lueur soudaine [Note 5] Immédiatement après que le pont se déplace et ensuite s'effondre.



Figure 10 Dans la webcam sous le pylône 9, vous voyez une lueur soudaine Webcam sous le pylône 9: au sommet, le reflet du viaduc sur le toit mouillé. C'est une image pertinente qui aide à déterminer la vitesse à laquelle le pont s'effondre et la provenance des débris.

Cette image explique les premières phases de l'effondrement.

4. Preuves disponibles

Ce camion-citerne blanc c'est la clé pour résoudre l'effondrement du viaduc de Polcevera. En observant les images est clairement visible le véhicule tracteur de la citerne entre les débris du pont..



Figura 11. Le tracteur de la citerne entre les débris du pont.



Figura 12. Le tracteur de la citerne entre les débris du viaduc et maintenant dans la zone de débris sous enquête

C'est une semi-remorque avec une citerne elliptique pour le carburant ou ADR [Note 6]. La citerne métallique entièrement en aluminium et d'une longueur d'une vingtaine de mètres en transit sur un pont lors d'un violent orage, attire les éclairs. Les camions citernes sont fournis par le système de mise à la terre statique [Note 7]. La résistance de connexion décharge à la terre les charges électrostatiques pouvant être créées lors de l'utilisation des camion-citerne (pour le mouvement de fluide ou l'écoulement de liquides à l'intérieur des tubes flexibles de décharge). La législation italienne interdit le chargement et le déchargement du camion-citerne ADR en cas de tempête. La mise à la terre est une bande de métal (généralement en cuivre), souvent visible, décrochée, traînée, touche l'asphalte. La ligne de mise à la terre du camion - peut-être oubliée sans doute - a apporté le contact. La «foudre négative de nuage à la terre» a déjà très probablement touché la tour de suspension, probablement l'un des tirants au sommet du pylône 9 et la foudre

ascendante «stepper leader» a été générée en termes de décharge positive et plus rapide. et intense: il s'est propagé provoquant l'explosion du camion-citerne.

Un éclair “stepped leader” positif et ascendant à une vitesse de cent mille km par heure et détermine une décharge électrique de l'ordre de 100 kA.

Cet éclair est invisible en raison de la vitesse qui le caractérise et pour cela, il n'apparaît dans aucune des images de la caméra, mais dans la décharge de retour, il détermine un bref flash lumineux et une détonation. La forte détonation entendue par tous les témoins. Certains témoins ont cité le grondement, peut-être une foudre, tout le monde a vu l'effondrement.

Quelqu'un [Note 8] a déclaré qu'il était arrivé à un endroit abrité, s'était arrêté et était descendu du véhicule; il a entendu une détonation puis un fort mouvement d'air qui l'a poussé contre un mur.

Le 14 août 2018, il y a une alerte météo sur Gênes: des éclairs se produisent dans la région. Un orage éclaire Gênes toute la nuit [Note 9].



Figure 13 Les toits effondrés de certains entrepôts sous le viaduc de Morandi

Mais personne n'imagine - car cela n'est jamais arrivé auparavant - qu'il faut arrêter le transit sur autoroute pour les citernes ADR.

Il n'y a pas de paratonnerres sur le pylône du viaduc de Morandi.

L'explosion du camion-citerne a provoqué le déplacement de tout le viaduc de Morandi et d'une selle Gerber, d'où l'effondrement du tablier du pont du côté de Cornigliano.



Figure 14 The position of the deck beyond the street lamp Cornigliano bank river road [Nota 10]

Ici, nous voyons le tablier s’effondrer au sol avec une roto-translation sur l’axe horizontal. Au même instant, l’ossature porteuse s’est effondrée à cause de la séparation de la selle Gerber.

Sans appui, la partie restante du pont a été suspendue quelques instants sur les tirants du pieu 9 qui s’est ensuite effondré à certains moments. À terre reste le tracteur, il aura été poussé et laissé tomber dans l’explosion. La citerne est explosée et on ne peut pas la retrouver.

Le tracteur est noirci. Un logo sur la porte du véhicule et rien d’autre. Un autre camion blanc à proximité mais aucune trace de la citerne.

Un tank de vingt mètres de longueur et contenant en moyenne 41 000 litres de carburant ou de ADR a disparu. Les effondrements sont généralement verticaux.

Mais dans ce cas, l’explosion a déclenché une dynamique différente et, par conséquent, dans la première section de tablier effondrée, la zone touchée est plus grande que celle située exactement à la verticale du viaduc. L’explosion était une terrible fatalité, un foudre “stepped leader” intéressait le pont juste à ce moment qu’il passait un camion-citerne chargé d’ADR ou de carburant et, fatalité décisive, qui roulait avec le système d’échouement décroché dans la chaussée détremée.

La position du tablier de pont au-delà de la lampe d’éclairage public sur la route en rivage du Cornigliano. Le tablier du pont est tourné: pont routier d’une largeur de 18 mètres qui s’effondre en un instant mais qui lors de l’effondrement tourne à 90 °.

Un événement insolite et extraordinaire.

Quelle force est nécessaire pour faire pivoter et déplacer des objets de 36 mètres de long, 18 mètres de large et pesant 916 tonnes?.

5. Conclusion

Cette destruction a été une terrible fatalité et peut-être évitable: l’opérateur d’autoroute n’a pas pensé - avec une alerte météo orange et un avertissement de tempête électrique en cours – d’appliquer toutes les procédures existantes pour charger et décharger les citernes. Il y a beaucoup de travail sur la politique du changement climatique, mais beaucoup moins sur la relation entre la sécurité routière et les conditions météorologiques. Le climat change et nous devons développer des protocoles de sécurité.

[Note 1]

Retrofit: la disposition des nouveaux câbles externes de la traverse du pont au sommet des pylônes. Certains serre-câbles en acier reliés à la traverse du pont et au sommet de l'antenne ont été placés le long du hauban au moyen de blocs d'ancrage en acier.

[Note 2]

En 1992, lors d'un contrôle de 90 mètres au sommet du pylône 11, sur les tirants du côté de Gênes (côté nord), le ciment avait laissé une partie de l'acier à découvert, ce qui avait entraîné la corrosion de dissolution environ 30% des brins.

Les actions auxquelles travaillait l'acier porteur de la tige (environ 7 000 kg) étaient bien inférieures à la capacité de résistance de l'acier qui la constituait (15 000 kg).

[Note 3]

Description du pont

La zone du système équilibré comprend trois pieux à haubans (pieux 9, 10 et 11) reliés entre eux par des câbles en béton armé précontraints. Les trois encorbellement à haubans sont constitués de quatre éléments de base: antenne, chevalet, pont et tirants.

Le viaduc principal a les suivantes portées théoriques:

- une travée de 43,00 m
- cinq travées de 73,20 m
- une travée de 75,313 m
- une travée de 142,655 m
- une travée de 207,884 m
- une travée de 20,50 m
- une travée de 65,10 m

Tringles sur l'empilement: répartition de la traction dans le système de suspension consolidée:

haubans en béton précontraint (côté Gênes) (7 560 T (kN))

3 + 3 câbles externes secondaires (côté Gênes) (7 560 T (kN))

6 + 6 câbles externes principaux (côté Gênes) (17 040 T (kN))

haubans en béton précontraint (côté Savona) (6 420 T (kN))

3 + 3 câbles externes secondaires (côté Savona) (6 420 T (kN))

6 + 6 câbles externes principaux (côté Savona) (17 040 T (kN))

Les portées, d'une longueur aussi différente, trouvent leur lien conceptuel dans une série de ponts en béton précontraint, tous de la même portée d'une longueur de 36,00 m, simplement supportés par une série de systèmes spéciaux, parmi lesquels on peut distinguer deux types de base différents:

- Le système supportant les plus petites portées est constitué de deux piliers inclinés reliés au sommet par une double poutre en porte-à-faux de longueur variable. Le tout en béton armé, porté par un radier de fondation qui repose à son tour sur des pieux forés de 110 cm de diamètre et d'une longueur pouvant aller jusqu'à 40,0 m.

- Le système supportant les plus petites portées est constitué de deux piliers inclinés reliés au sommet par une double poutre-console de longueur variable. Le tout en béton armé, porté par un radier de fondation qui repose à son tour sur des pieux forés de 110 cm de diamètre et d'une longueur pouvant aller jusqu'à 40,0 m.

- Le encorbellement équilibré pour les travées principales. Ce système consiste en une poutre continue à trois travées reposant sur quatre supports, avec deux bras en porte-à-faux soutenant les poutres susmentionnées de 36,00 m. Les deux supports externes de la poutre à trois travées sont fournis par les ancrages de deux haubans précontraints passant au-dessus d'un mât (tour de suspension) situé dans l'axe du système.

- Le sommet du mât est à 90,00 m au-dessus du sol et à environ 45,00 m au-dessus du pont de la chaussée.

Chaque système équilibré comprend:

1. Un radier de fondation nervuré en béton armé reposant sur des pieux rigides de 150 cm de diamètre.
2. Tréteau spécial en béton armé composé de quatre courbures en forme de "H" juxtaposées et reliées les unes aux autres par des éléments croisés. Les sommets des chevalets donnent des supports élastiques à la poutre de pont.
3. Un mât ou tour de suspension ("antenne") constitué de quatre pieds inclinés avec des liaisons adéquates dans les deux sens (longitudinal et transversal) de manière à former un véritable cadre, mais de manière à maintenir indépendante la tour elle-même du système de pont à chevalets.
4. Une poutre de pont continue en béton précontraint, de type cellulaire, avec dalle supérieure et inférieure et six nervures longitudinales, reposant sur le tréteau visé au paragraphe 2. La liaison entre le tablier et les

haubans est réalisée par une poutre transversale rigide, également en béton précontraint, dont les saillies de chaque côté du tablier fournissent l'ancrage des deux haubans passant sur le sommet du mât à 9 000 m d'altitude. Enfin, des enveloppes de béton ont été coulés autour des câbles; la fonction de ces coques, comme on le sait, est, en plus de protéger l'acier, de réduire également l'allongement du câble lors du passage de charges en mouvement car les coques elles-mêmes ont été précontraintes.

[Note 4]

Viaduc de Polcevera: la webcam de «Autostrade per l'Italia» (le plus grand opérateur de routes à péage en Italie)

<https://www.youtube.com/watch?v=t4JY3UIdLLU>

<https://www.ilfattoquotidiano.it/2018/09/26/ponte-morandi-nessuna-manomissione-dei-filmati-di-autostrade-la-polizia-diffonde-il-video-integrale-prima-del-crollo/4651206/>

http://www.ilsecoloxix.it/p/multimedia/genova/2018/09/26/ADlbKQrB-integrale_autostrade_telecamera.shtml

[Note 5] http://www.ansa.it/sito/videogallery/italia/2018/08/20/il-momento-del-crollo-ripreso-dalle-telecamere-collocate-sotto-il-ponte_401a0c5a-bb0b-44dc-b80c-8909db8ad8db.html

[Note 6] Les classes de marchandises dangereuses selon l'ADR sont les suivantes: Classe 1 Matières et objets explosibles, Classe 2 Gaz, y compris les gaz et vapeurs comprimés, liquéfiés et dissous, Gaz inflammables (p. Ex. Butane, propane, acétylène)...

[Note 7]

Le système détermine si la résistance de connexion entre le camion-citerne et la terre vérifiée est égale ou inférieure à 10 ohms. 10 ohms est l'exigence de référence reprise dans plusieurs normes internationales, dont la plus importante est la norme américaine NFPA 77 «Pratique recommandée pour l'électricité statique» et la norme européenne Cenelec CLC / TR: 50404

[Note 8]

Declared statement <https://www.youtube.com/watch?v=5FLs-nZQXiw>

[Note 9] La déclaration de l'ARPA Ligurie (Agence régionale de protection de l'environnement) indique qu "'il reste actuellement une importante structure de tempête sur la mer de Ligurie accompagnée d'une intense activité électrique dont la trajectoire est constamment surveillée par le centre d'opérations".

[Note 10] Route de la rivière Cornigliano <https://goo.gl/maps/1iSuahc9JrJ2>

Références

[1] Gentile C., Martinez y Cabrera F. (1996), Effetti del consolidamento del sistema di sospensione sul comportamento dinamico di un ponte strallato, Studi e Ricerche vol.17, Politecnico di Milano

[2] Camomilla G., Pisani F., Martinez y Cabrera F. (1995), Repair of the stay cables of the Polcevera Viaduct in Genova, Italy

[3] Morandi R. (1979), The long-term behaviour of viaducts subjected to heavy traffic and situated in an aggressive environment: the viaduct on the Polcevera in Genoa
<http://doi.org/10.5169/seals-25613>

[4] Villani P. (2019), Dinamica e cause del crollo del viadotto Morandi a Genova, Sistemi di Logistica

[5] Villani P. (September 11, 2018), Polcevera: dinamica del crollo del viadotto Morandi, Protecta, Roma

[6] Villani P. (2014), Le indagini relative alla responsabilità degli enti proprietari della strada [Les enquêtes liées à la responsabilité de propriétaire de la route], dans le livre "Indagini e rilievi nei sinistri stradali" [investigations et enquêtes sur les accidents routier], Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna