



L'effondrement du Pont Morandi à Gênes

Bruno GODART (IFSTTAR)



IESF, Comité Génie Civil et Bâtiment , le 6 juin 2019

Projets similaires par Riccardo MORANDI



Maracaibo (VE)
1962



Rome (IT)
1964



Genes (IT)
1966



Rome (IT)
1967



Rome (IT)
1970



Beida (LY)
1970



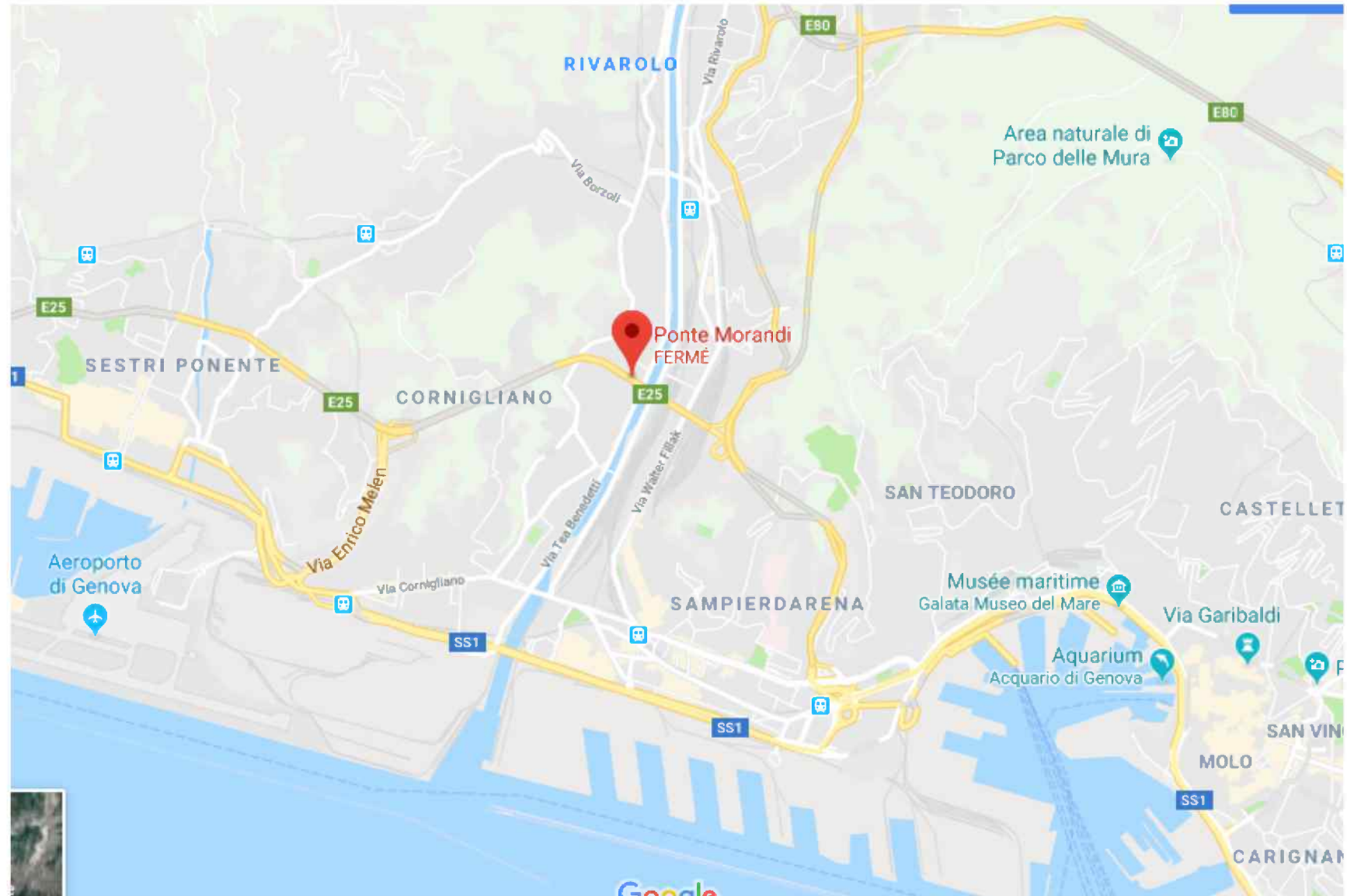
Baranquilla (CO)
1974



Vietri di Potenza
1977

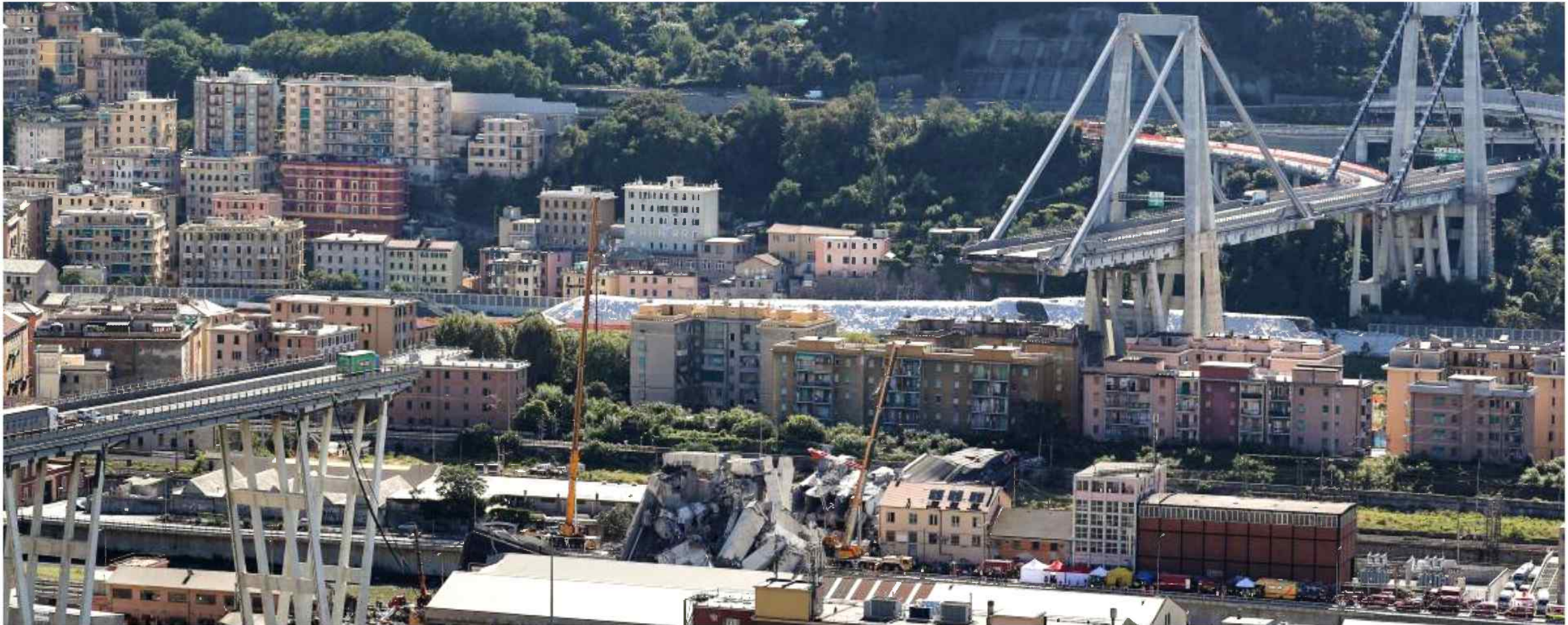
Un pont stratégique...

- Sur l'autoroute A10 qui relie l'Italie à la France par la côte
- Géré par Austostrate (concessionnaire)
- Encore appelé : viaduc de Polcevera



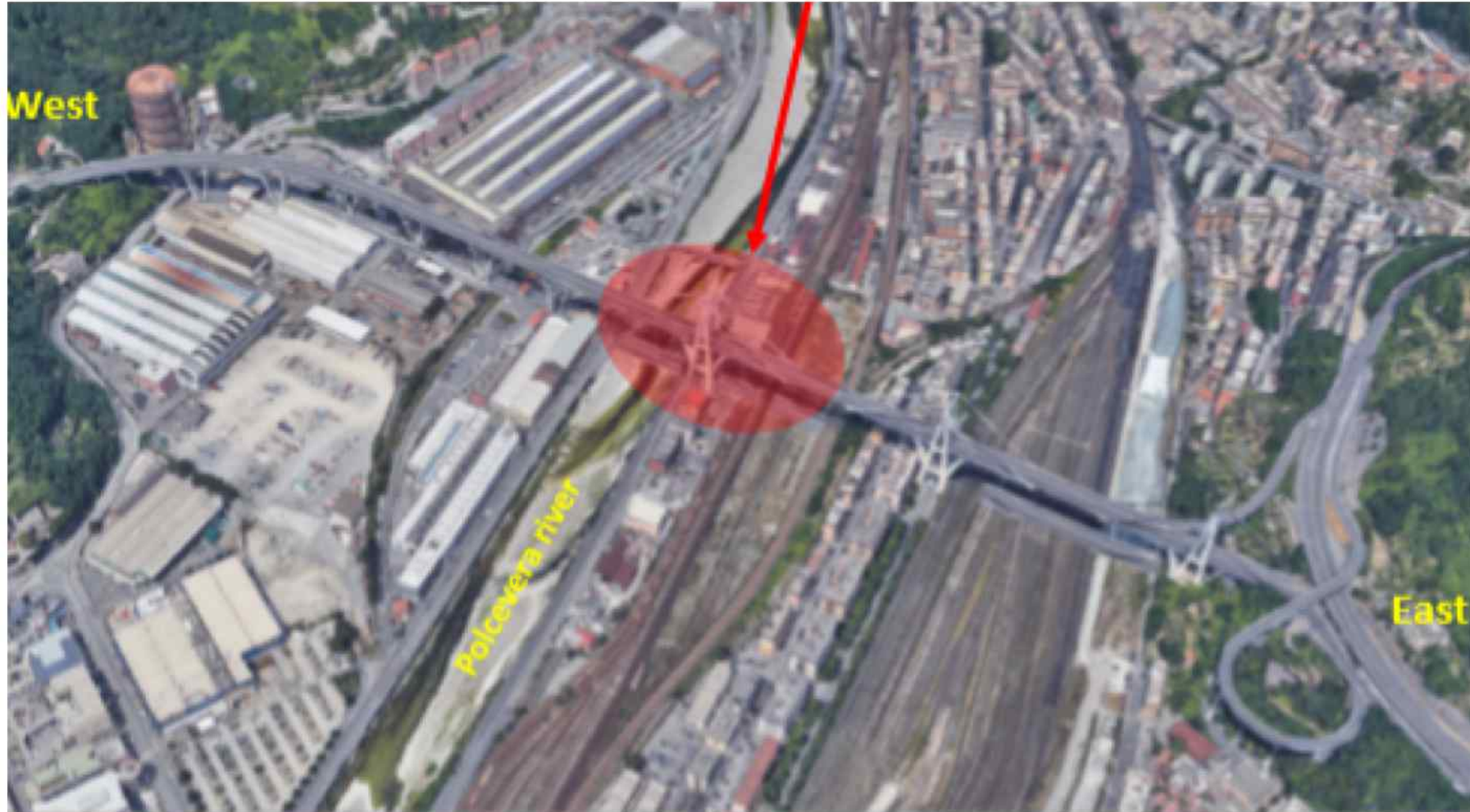
Effondrement le 14 août 2018 à 11h35...

- 243 m effondré – (171 m + 2 travées isostatiques de 36 m)
- 43 morts dont 4 français

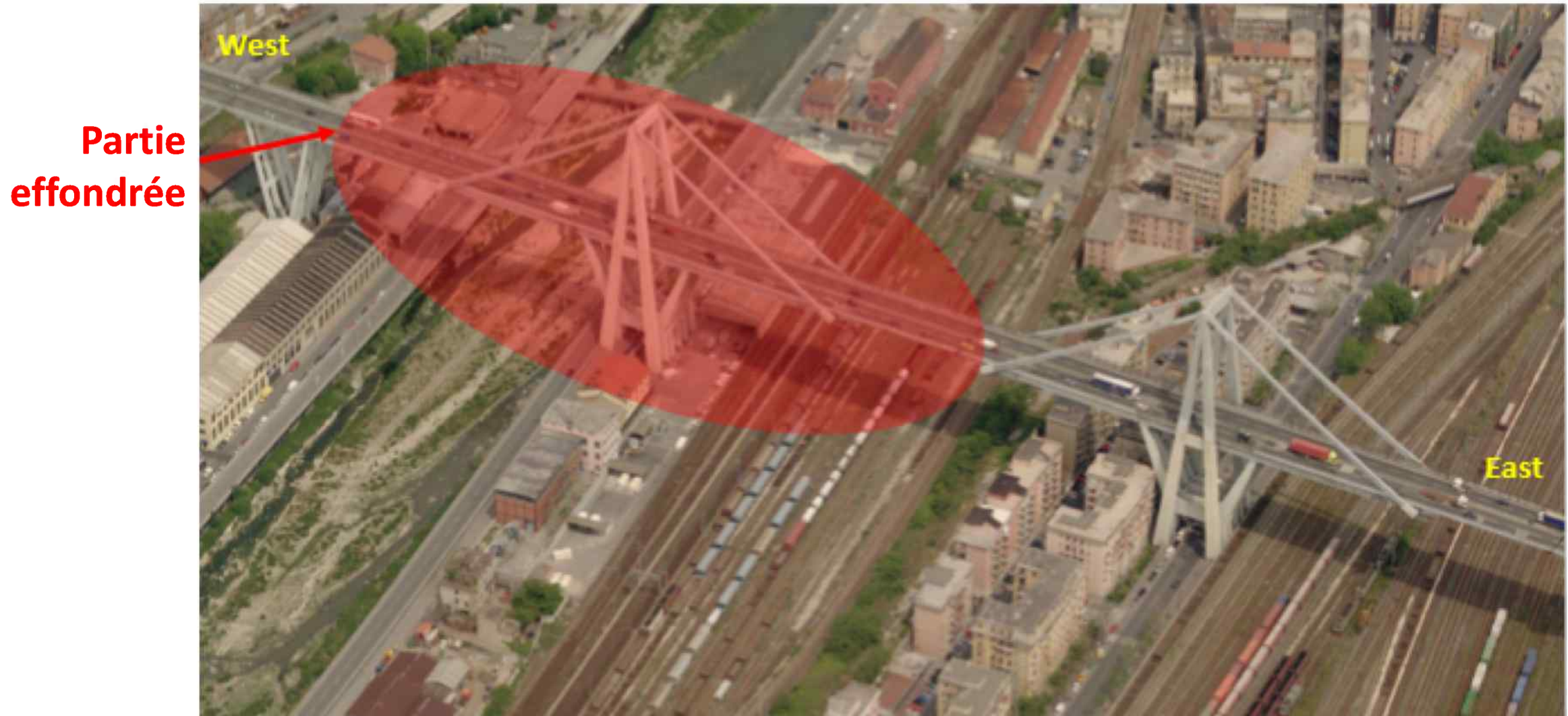


Effondrement...

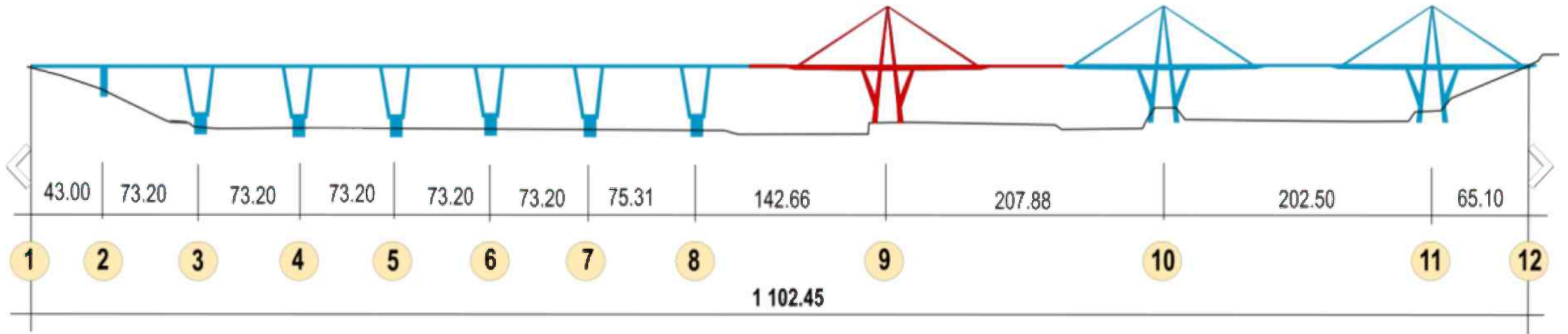
Partie effondrée



Effondrement...



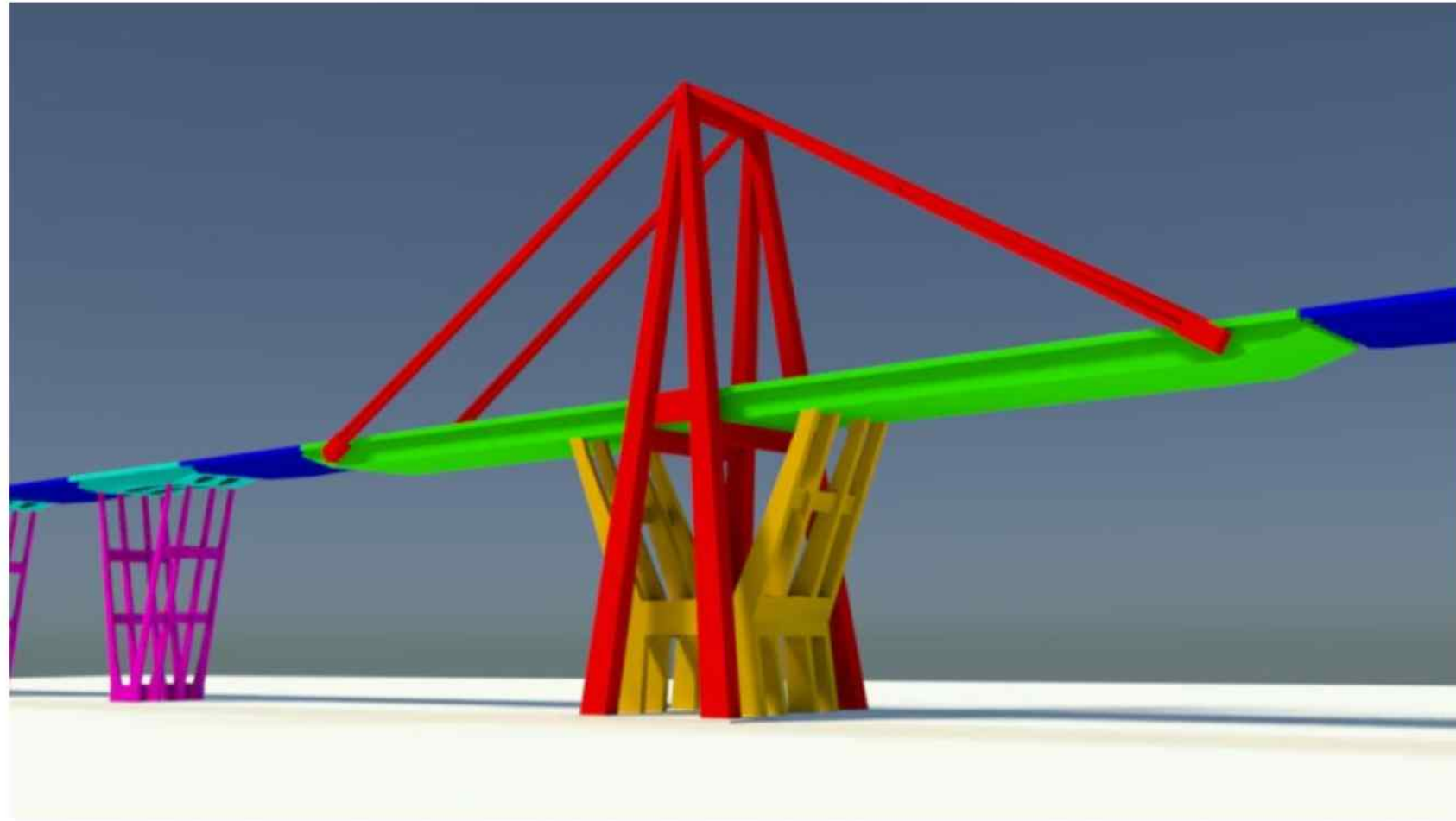
CONCEPTION ET CONSTRUCTION



- Construction 1962 – 1966 (mis en service en 1967)
- Longueur 1121, 4 m - 11 travées -
- Largeur 18 m
- Travée la plus longue : 208 m

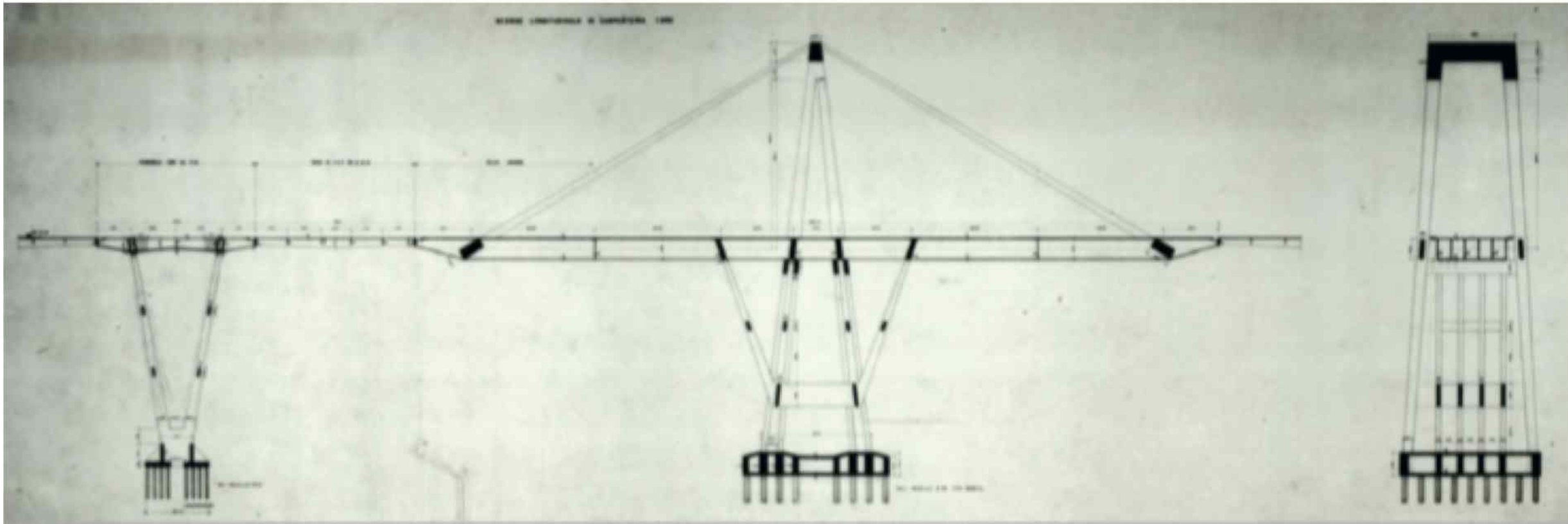
CONCEPTION ET CONSTRUCTION

- Un appui avec 4 boutons inclinés de section variable de 4,5 x 1,2 à 2 x 1,2 m supportant le tablier sur une longueur de 21 m / axe de symétrie
- Un pylône avec 2 structures en A entretoisées qui converge à 45 m au dessus du tablier
- Un tablier composé d'un caisson multicellulaire à 5 alvéoles de hauteur variant de 4,5 à 1,8 m ;
- Dalle sup et inf d'épaisseur 16 cm
- 6 âmes d'épaisseur variant de 18 à 30 cm.
- Ancrage des haubans situés à 75m de l'axe de symétrie
- Deux parties de tablier en encorbellement sur 10 m.



CONCEPTION ET CONSTRUCTION

- Le tablier repose sur 4 système d'appui : les 2 systèmes de butons et les 2 systèmes de support par haubans
- Aucune connexion entre le tablier et le pylône
- 2 travées isostatiques de type Gerber composées chacune de 6 poutres préfabriquées et précontraintes



CONCEPTION ET CONSTRUCTION



Les deux parties en cantilever sont construites par encorbellement à l'aide de 9 voussoirs successifs de 5,50 m de long sur équipement mobile. Pendant cette phase, le tablier est maintenu par des câbles extérieurs provisoires qui passent sur le tablier et s'ancrent dans chaque paire de voussoirs.

CONCEPTION ET CONSTRUCTION

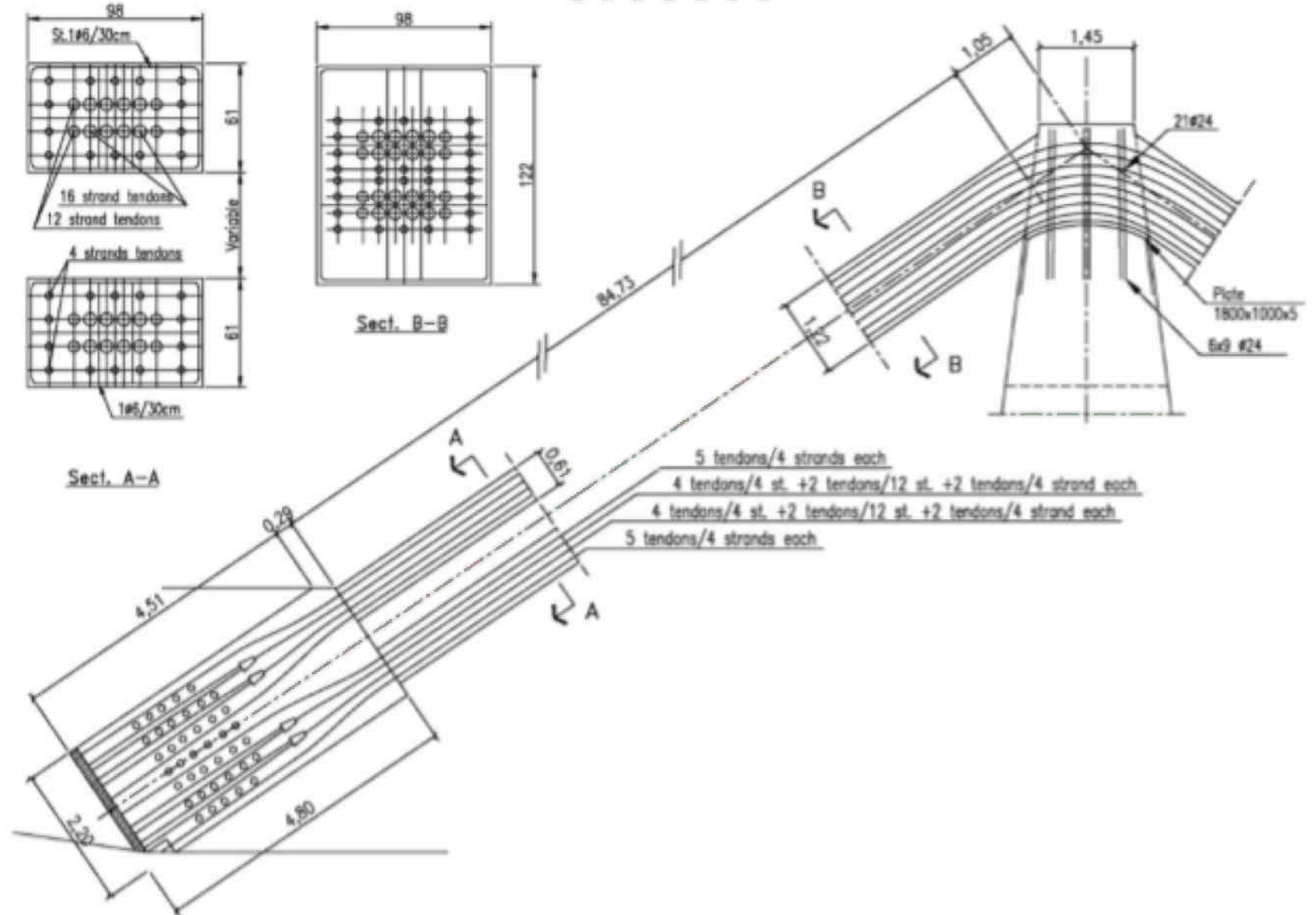


1. Installation des haubans partiellement mis en tension
2. Enlèvement des câbles provisoires, et achèvement de l'extrémité des fléaux – longueur 10 m sur équipage mobile
3. Achèvement de la précontrainte du tablier

CONCEPTION ET CONSTRUCTION

4)

- Chaque hauban comportait 28 câbles auxiliaires composés de 4 torons.
- L'ensemble des câbles principaux et auxiliaires, chacun mis en place dans des gaines ont été placés dans des coques en béton.
- Lors des phases de construction, les câbles principaux étaient ancrés aux abouts de l'entretoise d'extrémité et partiellement tendus, alors que les câbles auxiliaires étaient ancrés temporairement dans des niches au dessus du tablier et n'étaient pas encore tendus.



CONCEPTION ET CONSTRUCTION

5) Après que les coques en béton autour des câbles ont atteint une résistance suffisante, les câbles auxiliaires étaient tendus afin de comprimer les coques. Jusqu'à cette phase, les câbles étaient libres de leur mouvement car les gaines n'étaient pas encore injectées.

6) A l'aide de coupleurs, les câbles auxiliaires étaient rallongés et leurs extrémités ancrés dans l'entretoise d'extrémité. La partie basse des coques étaient complétée et ensuite précontrainte par retension des cables auxiliaires.

7) Injection finale des conduits.



CONCEPTION ET CONSTRUCTION

Objectif de ce phasage de construction :

- Créer des haubans qui se comportent de façon homogène avec des câbles travaillant en traction et une coque en béton travaillant en décompression (et pas en traction) sous l'effet des charges variables (travées isostatiques, trafic, vent, température...)

Avantages :

- Les effets de la fatigue dans les câbles étaient limités et les câbles étaient protégés de la corrosion.

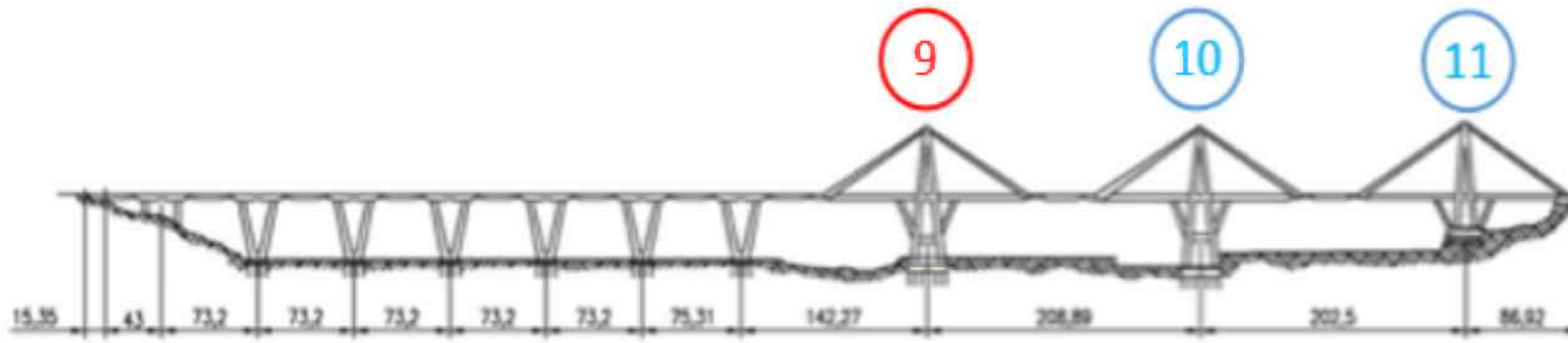


Vie en service : IABSE REPORT BY MORANDI, 1979

- Environnement agressif (embruns marins; fumées acides des cheminées des aciéries).
- Légères fissures (0.2 mm) dans les éléments secondaires transversaux (non précontraints)
- Rouille sur les âmes due à une insuffisance d'enrobage des aciers.
- Plaques d'appui en acier sous les poutres des travées isostatiques fortement corrodées (à remplacer par des plaques en acier inox).

“I think that sooner or later, may be in a few years, it will be necessary to resort to a treatment consisting of the removal of all traces of rust on the exposure of the reinforcements, to fill the patches, with epoxidictype resins and finally to cover everything up with elastomers of a very high chemical resistance”.

Vie en service



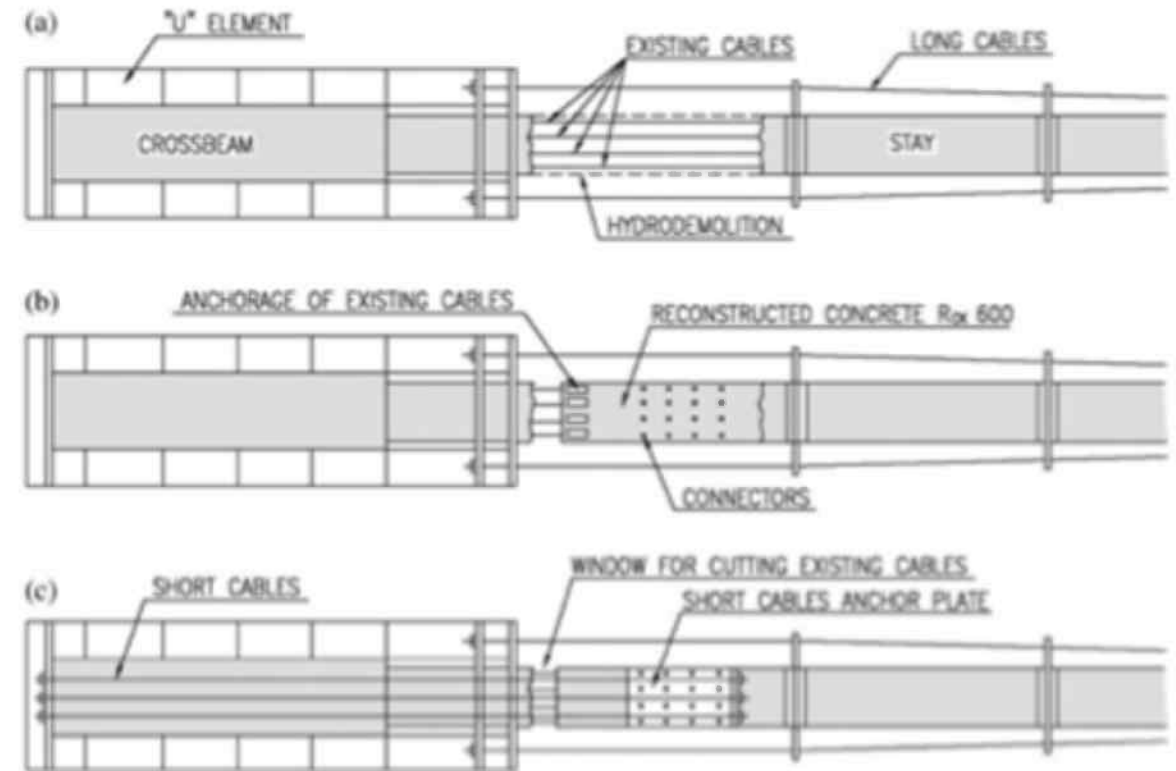
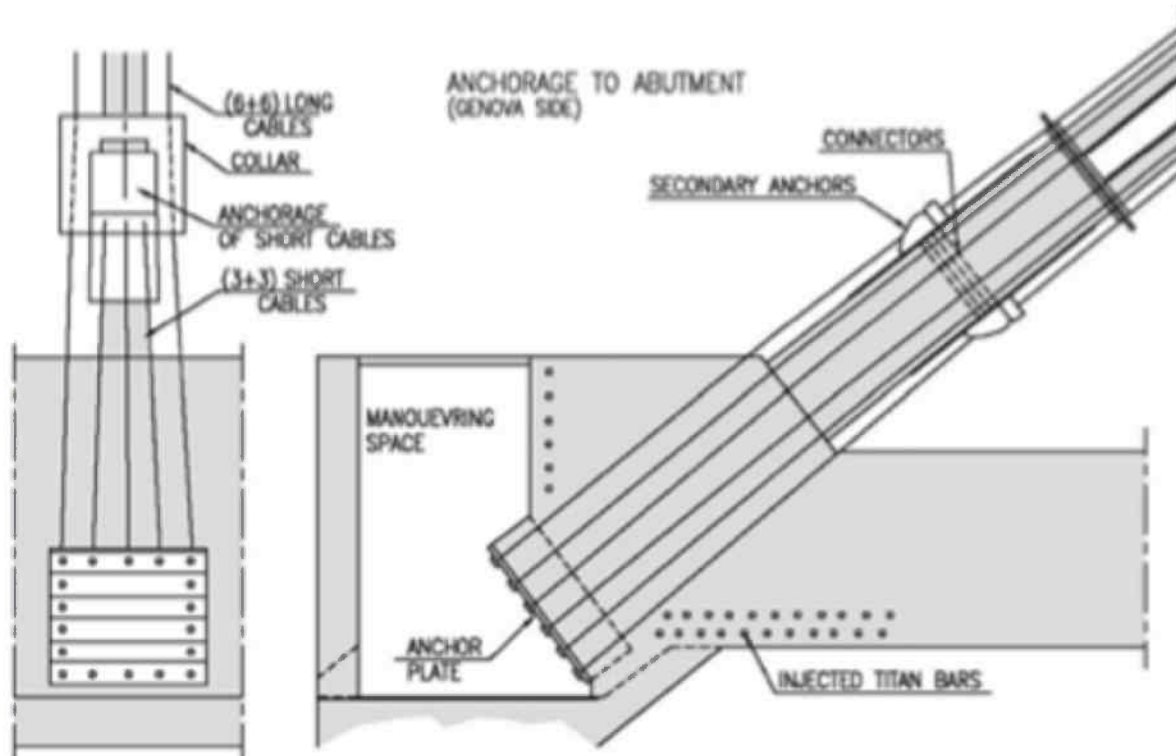
Réparation de quelques haubans en 1992 – 1994 :

- Tronçon 11 : corrosion manifeste de câbles (certains complètement).
- Tronçon 10 : désordres sur les câbles au sommet du pylône.
- Tronçon 9 : Rien n'est fait...

Vie en service

Réparation de quelques haubans en 1992 – 1994 :

Tronçon 11 : Un ensemble de 12 cables additionnels est ajouté sur chacun des 4 haubans .



(Malerba, 2014)

Vie en service

Tronçon 11 : Un ensemble de 12 cables additionnels est ajouté sur chacun des 4 haubans .



Vie en service

Tronçon 10 : Des plaques en acier sur les haubans en tête de pylône (photo 2017) .



Vie en service

Tronçons 9 et 10: Rapport de 2016 du Ministère Italien des Infrastructures sur les inspections et essais faits en 2011 et 2013

- Haubans : Conduits inspectés et fils de précontrainte corrodés Perte de précontrainte dans les fils Pas d'injection dans les conduits inspectés
- Poutre Conduits inspectés et fils de précontrainte corrodés Perte de précontrainte dans les fils Pas d'injection dans les conduits inspectés Quelques fils cassés
- Globalement : augmentation des dégradations par rapport au inspections de 2003 et 2008



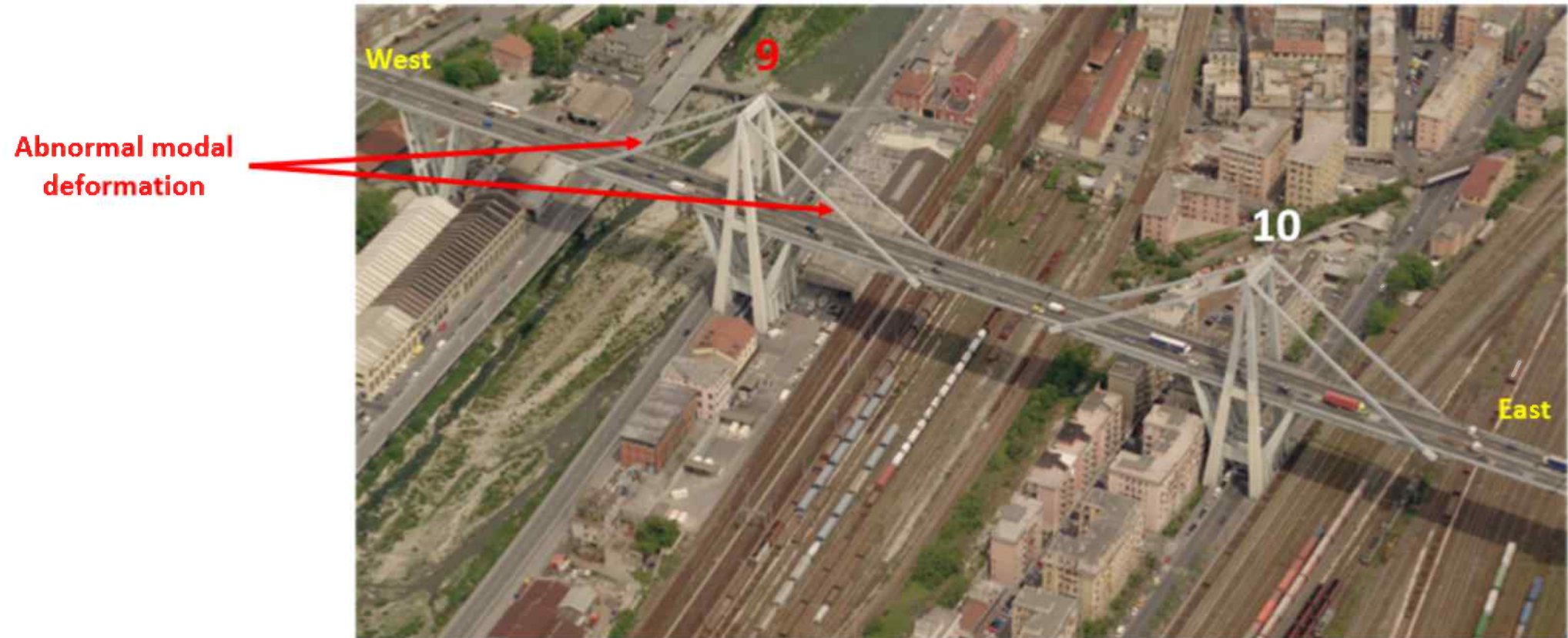
Hauban corrodé du tronçon 9



Câble d'une poutre

Vie en service

Essais Dynamiques sur les haubans des tronçons 9 et 10
(Politecnico di Milano, October 2017)

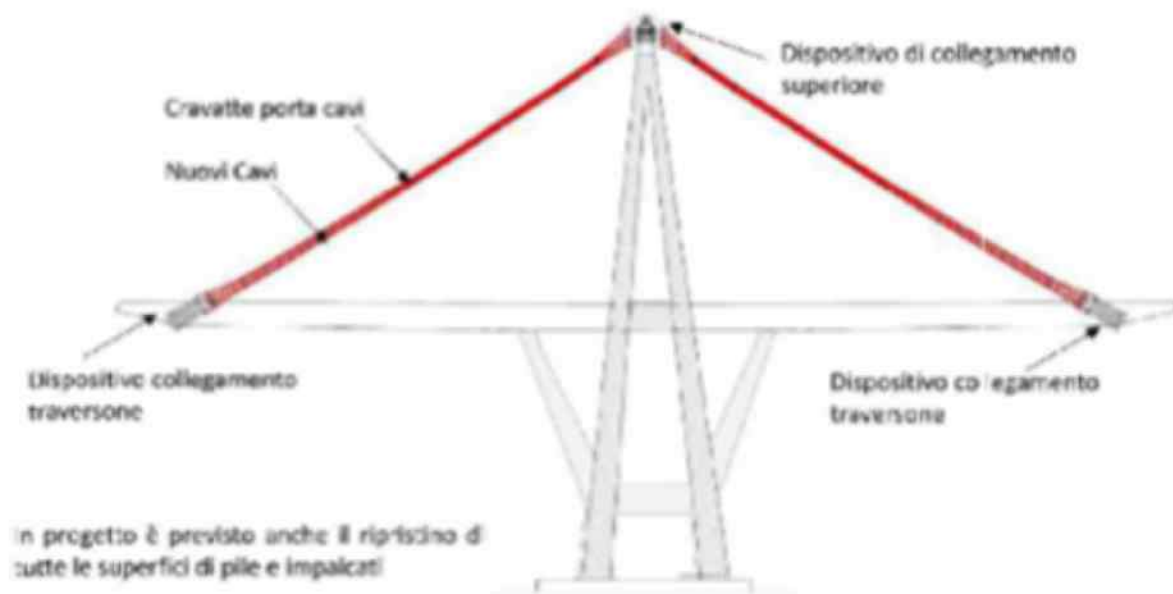


Vie en service

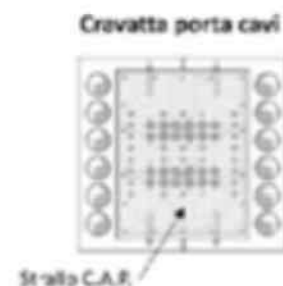
Appel d'offres en 2018 pour la réhabilitation des tronçons 9 et 10

(Coût : 20.159.344,69 € Durée: 784 jours

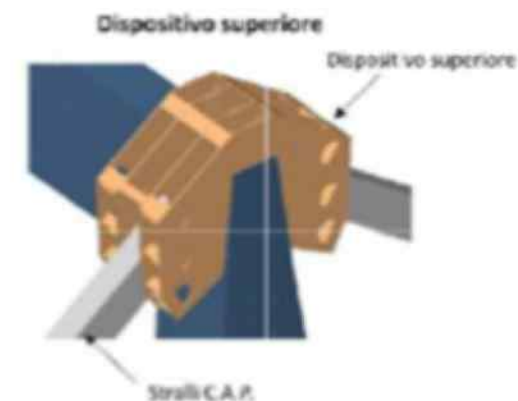
Date de remise des offres : 11 June 2018)



DETTAGLIO ELEMENTI



Dispositivo inferiore

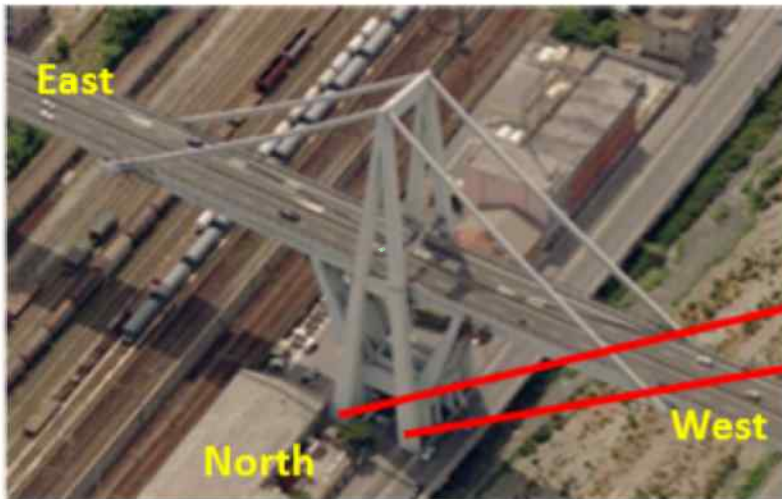


Disposizione cavi "unbundled"



L'effondrement

THE COLLAPSE



L'effondrement

THE COLLAPSE



L'effondrement



L'effondrement

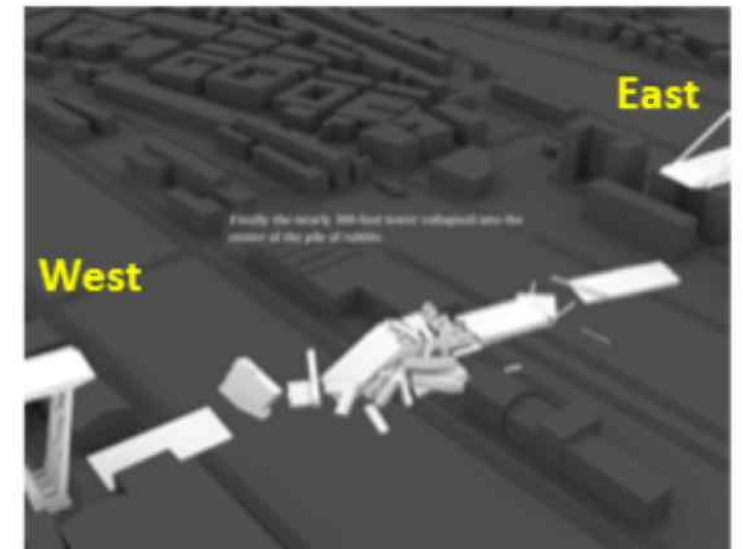
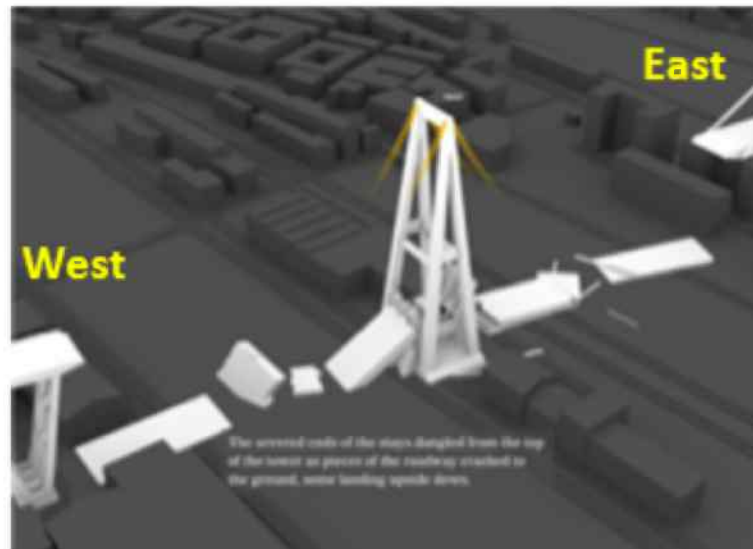
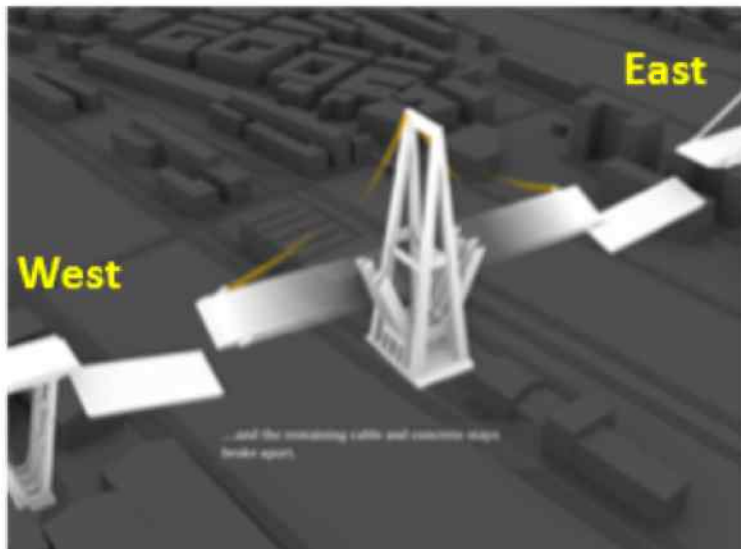
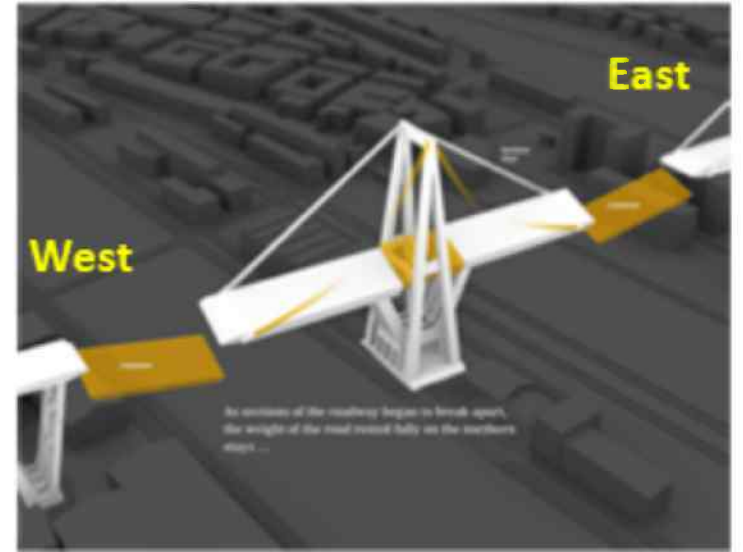
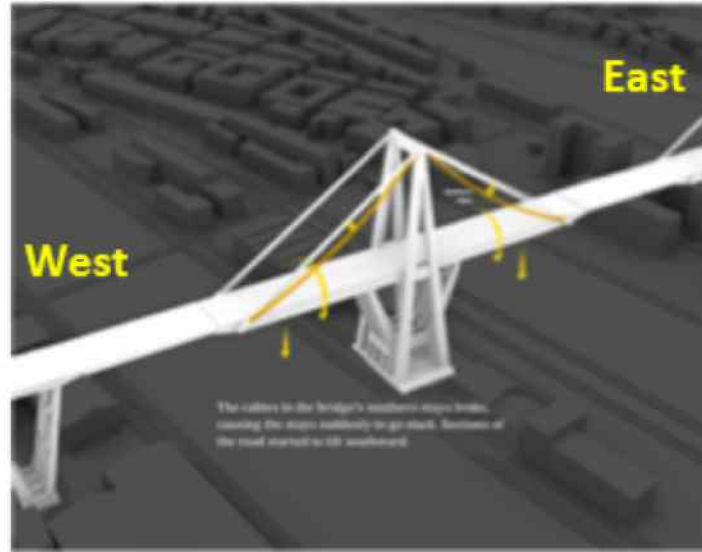
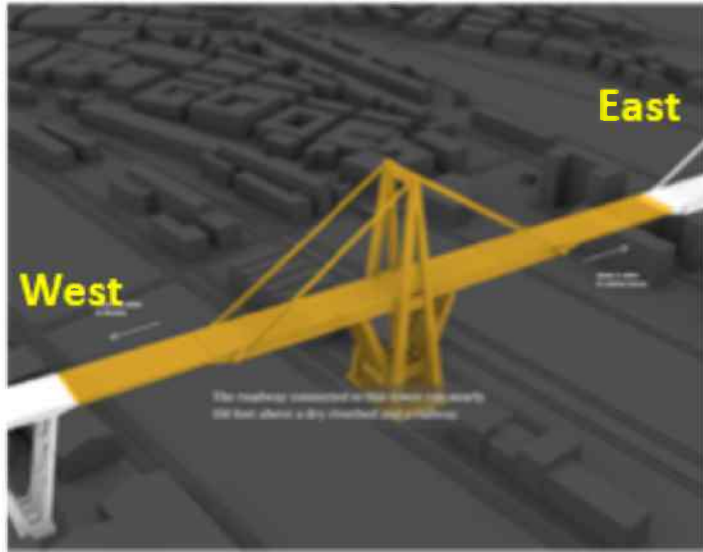


L'effondrement



L'effondrement

Simulation du New York Times :



CAUSES DE L'EFFONDREMENT

Rapport de la commission technique italienne

- Publication: 25 septembre 2018, 3 hypothèses
- 1) Défaillance d'un élément de la **partie sud-est du tablier**
 - Engin de chantier de 44 tonnes + crise structurelle de la travée isostatique
 - Puis effondrement de la travée Est, puis Ouest
- 2) Défaillance d'un élément du **milieu du sud-ouest** du tablier
 - Propagation de la dislocation sur toute la section transversale
 - Rupture du hauban sud ouest, puis torsion et effondrement
- 3) Rupture du hauban sud-ouest par corrosion (jugée *moins probable* !)

Rapport controversé, notamment par Autostrade....

CAUSES DE L'EFFONDREMENT

Source: *Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge*, SEI, 2018, Calvi et al.

Selon les modélisations de type élastique avec SAP2000 et de type non linéaire avec MCFT (introduction de rotules aux fissures), la rupture du hauban Sud-Ouest, en l'absence de trafic :

- Provoque la rupture du hauban SE en raison de la continuité sur pylône
- Ne provoque pas la rupture des haubans Nord qui reprenne la charge
- Ne provoque pas de rupture de la jambe opposé du pylône qui récupère toute la charge
- Ne provoque pas de rupture en flexion verticale du tablier
- Ne provoque pas de rupture en cisaillement du tablier
- Provoque un affaissement de l'extrémité du tablier de 1m côté Sud et 40 cm côté Nord, ce qui provoque l'échappement d'une travée isostatique... sans provoquer de rupture du pylône

CAUSES DE L'EFFONDREMENT

Source: Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge, SEI, 2018, Calvi et al.

- Provoque une torsion dans le tablier à laquelle celui-ci ne peut résister
- Provoque une flexion du tablier dans son plan (en raison de la dissymétrie de la réaction horizontale de haubanage) à laquelle le tablier ne peut pas résister

En résumé :

le tablier a de fortes capacités de résistance en flexion longitudinale et en effort tranchant (2 à 3 fois ce qui est nécessaire)

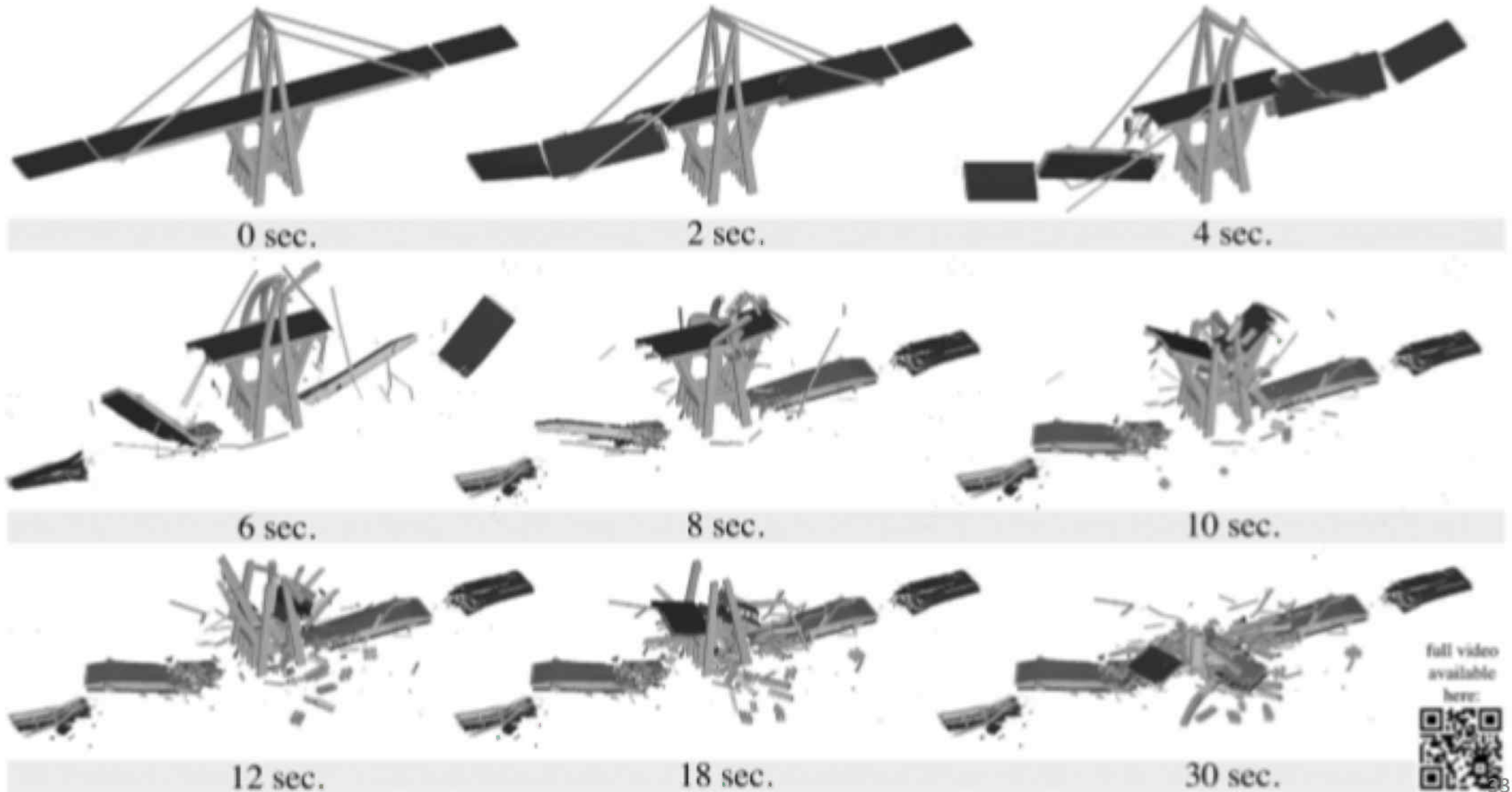
le tablier ne peut résister à la torsion et au moment de flexion transversal provoqué par la rupture d'un hauban

Les charges variables en constituent qu'une part faible des charges permanentes et ne peuvent pas être la cause première de la ruine

CONCLUSIONS

- Ancienne conception des ponts haubanés avec peu de haubans très espacés.
- Structure non robuste vis-à-vis de la perte d'un hauban (à la différence de toutes les structures haubanées actuelles)
- **La rupture d'un hauban par corrosion est l'hypothèse la plus probable**
- Cette rupture semble s'être produite à la jonction avec le pylône... (des témoignages le mentionnent...)
- Cette corrosion doit être significative pour amener à la rupture...
- La gestion de ce pont est en question, car si c'est bien la cause, le renforcement des haubans aurait dû être fait bien avant...

Schéma possible de l'effondrement





Merci pour votre attention