

3.0 DESCRIPTION DE L'EFFONDREMENT DES POUTRES

3.1 Vue d'ensemble

Les figures 3.1 et 3.2 montrent des vues d'ensemble du pont peu de temps après l'effondrement. On note que les poutres 1 à 4 des travées 2 et 3 sont tombées au sol, que les poutres 1 à 4 des travées 1 et 4 se sont déplacées vers le sud mais reposent toujours sur les piles et les culées et, finalement, que les poutres 5 à 8 sont demeurées en place.

Les figures 3.3 à 3.6 et 3.14 montrent que les poutres des travées 1 et 4 se sont déplacées vers le sud sur les appareils d'appui mais qu'elles ont été freinées par le mur de garde aux culées 1 et 5. Les figures 3.7 et 3.8 montrent que la poutre 1 des travées 2 et 3 est tombée au sud des piles qui la supportaient. La semelle inférieure des poutres 1 tombées au sol se retrouve du côté sud. Les figures 3.9 et 3.10 montrent que les poutres 2 à 4 des mêmes travées sont tombées entre les piles et leur semelle inférieure est située du côté nord. On remarque de plus que la poutre 1 est située sous la poutre 2 dans les deux travées.



Figure 3.1 Vue du pont vers l'ouest après l'effondrement (photo SQ-A16)



Figure 3.2 Vues du côté sud du pont après l'effondrement
(photos SQ-C12 et SQ-C13)



Figure 3.3 Vue des poutres 1 à 4 de la travée 4 (Photo SQ-B11)



Figure 3.4 Vue aérienne des poutres 1 à 4 à la pile 4 (photo 308.3.12)



Figure 3.5 Vue des poutres 1 à 4 de la travée 1 à la pile 2 (Photo SQ-B12)



Figure 3.6 Vue des poutres 1 à 4 de la travée 1 à la culée 1 (photo pom.26)



Figure 3.7 Vue vers le nord vis-à-vis de la pile 3 des poutres 1 et 2 des travées 2 et 3 (photo SQ-B7)



Figure 3.8 Vue vers l'ouest des poutres 1 et 2 des travées 2 et 3 (photo SQ-B6)



Figure 3.9 Vue vers le sud des poutres 2 à 4 de la travée 2 tombées sur la voie sud de l'autoroute 15 (photo SQ-B31)



Figure 3.10 Vue vers le sud des poutres 2 à 4 de la travée 3 tombées sur la voie nord de l'autoroute 15 (photo SQ-B37)

Pour des raisons de sécurité, on a provoqué l'effondrement des poutres 1 à 4 des travées 1 et 4 dans les heures qui ont suivi l'accident. Les murs de garde qui maintenaient ces poutres montraient des signes de faiblesse, particulièrement celui de la culée 5, ce qui a nécessité l'enlèvement des poutres. Cette opération a été effectuée en brisant l'extrémité des poutres à la culée 1 et le mur de garde à la culée 5. Les poutres 5 à 8 ont été enlevés quelques jours après l'accident.

3.2 Témoignages

Plusieurs automobilistes circulant sur les voies nord et sud de l'autoroute ont assisté à l'effondrement des poutres du pont.

Dans la voie nord, plusieurs ont vu des pièces de bois tomber avant les poutres. Un automobiliste, qui est passé juste avant que les poutres ne tombent, mentionne que sa voiture a frappé des madriers qui étaient déjà sur le sol (troisième voie) et qu'il a vu tomber une dizaine de feuilles de contreplaqué. Les pièces de bois que l'on voit sur la route au nord du pont sur la figure 3.11 pourraient avoir été heurtées par son véhicule. Un autre automobiliste raconte qu'une feuille de contreplaqué est tombée dans le pare-brise de son véhicule au moment où il passait sous le pont. Un troisième témoin dit que des pièces de bois sont aussi tombées sur son véhicule alors qu'il était sous le pont. Ce dernier a également vu les poutres tomber dans son rétroviseur.



Figure 3.11 Vue vers le sud-ouest du pont après l'effondrement (photo SQ-C14)

Il semble aussi que l'effondrement se soit produit graduellement, de l'est vers l'ouest sur la longueur du pont. Un témoin conduisant un véhicule sur la voie nord mentionne en effet que les poutres sont tombées en commençant de l'est. Le passager du même véhicule raconte que les pièces de bois, puis les éléments de béton, sont tombées comme un jeu de dominos, de la droite vers la gauche (est vers ouest). Une personne qui marchait sur le pont existant en direction «est» croit voir entre les barricades et le garde-fou la chute des poutres se propager d'est en ouest. Une automobiliste qui circulait dans la voie sud a remarqué que la chute des feuilles de contreplaqué se faisait de la gauche vers la droite (est vers ouest). Ce dernier témoin mentionne avoir noté que les poutres basculaient sur le côté avant de tomber au sol.

Il ne semble y avoir eu aucun signe annonciateur sauf dans le cas de deux ouvriers qui ont ressenti des vibrations le samedi 17 juin. Un menuisier perçoit en effet des vibrations sur la poutre 1 dans la travée 1, comme si des autos passaient sur le pont. Un soudeur, assis sur le pilier central, a ressenti une vibration à deux reprises.

3.3 Description des dommages subis par la structure

3.3.1 Éléments du tablier

En tombant, les poutres 1 à 4 des travées 2 et 3 se sont écrasées sur les glissières rigides en béton (figure 3.12). On note sur cette figure qu'au droit de la pile 4, les poutres de la travée 4 sont fortement inclinées et se sont déplacées vers le sud. La poutre 1 de cette travée est courbée, également vers le sud. Cette poutre 1 est retenue latéralement par le mur de garde de la culée 5 et les poutres 2 à 4 sont appuyées contre cette poutre, probablement via le coffrage des entretoises.

On peut penser que les poutres des travées 2 et 3 se sont déplacées de la même façon mais que leur chute n'a pu être freinée.



Figure 3.12 Vue de la pile 3 vers la culée 5 (photo pom.88)

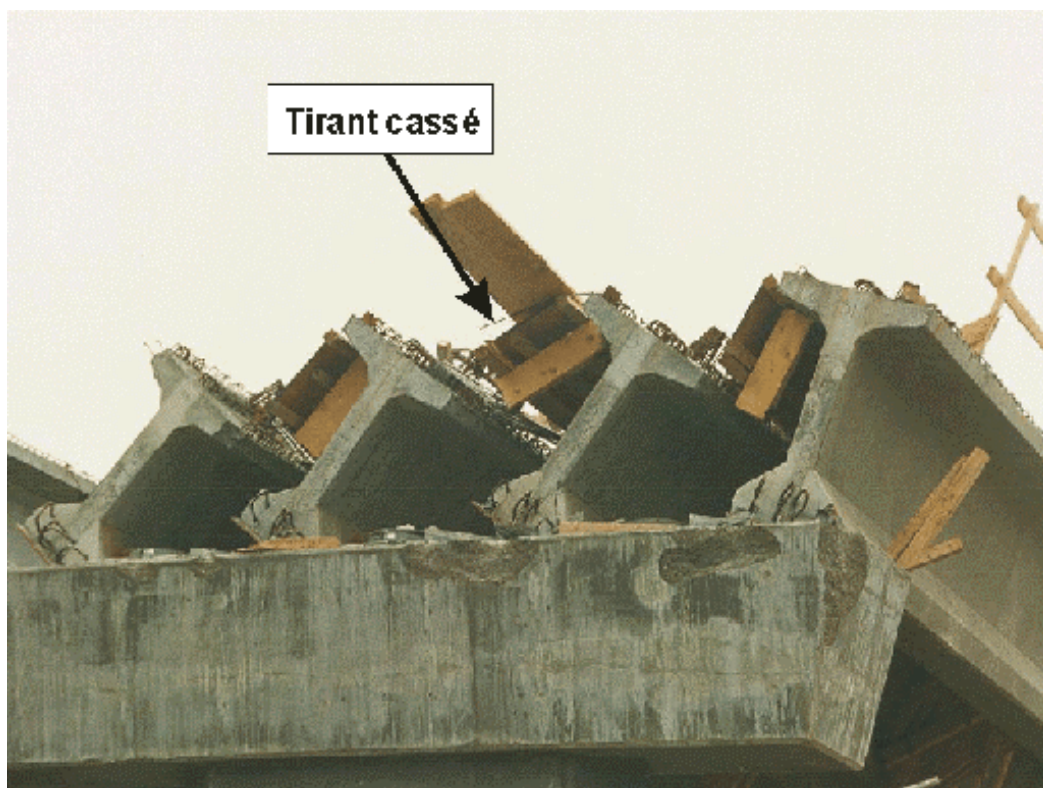


Figure 3.13 Vue rapprochée du bout des poutres 1 à 4 de la travée 4 (photo SQ-B20)



Figure 3.14 Vue rapprochée du bout des poutres de la travée 1 à la pile 2
(photo 308.2.20)

Sur la figure 3.13, on remarque que le tirant reliant les poutres 2 et 3 est cassé. On a aussi observé que des connecteurs de cisaillement où étaient attachés les tirants entre les poutres étaient fortement pliés. La figure 3.15 montre un tirant cassé entre les poutres 4 et 5 à la pile 3. Plusieurs tirants cassés ont été observés dans les débris des poutres 1 à 4 et le long du côté sud des poutres 5 des quatre travées.

Dans la partie supérieure de la figure 3.16, on voit à la semelle supérieure de la poutre 5 des supports métalliques utilisés pour le coffrage de la dalle. On remarque que les tiges verticales sont inclinées, due à la déformation des tiges horizontales et du jeu entre les tiges verticales et les collets.

Sur la figure 3.17, on note que les coffrages des entretoises intermédiaires entre les poutres 1 à 4 se sont déformés en cisaillement mais sont toujours en place entre les poutres. De par leur construction, ces coffrages se sont déformés comme un mécanisme sans pouvoir offrir de résistance significative au mouvement relatif des poutres.

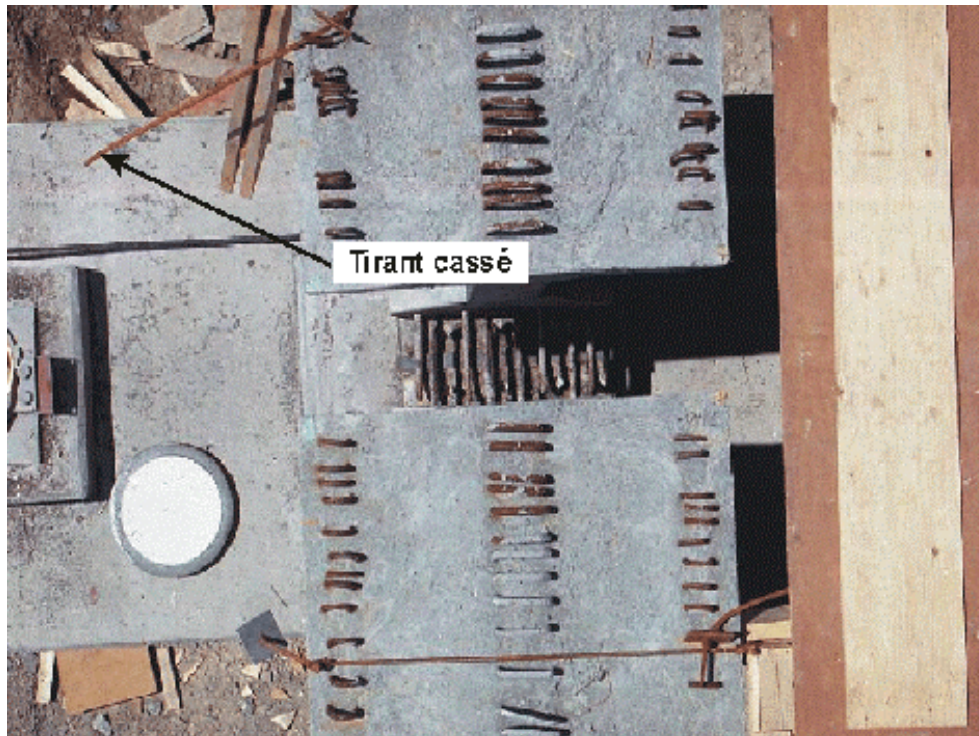


Figure 3.15 Vue en plan des poutres 5 à la pile 3 (photo 330.11)



Figure 3.16 Flexion des tiges métalliques qui supportaient le coffrage de la dalle (photo 330.2.12)



Figure 3.17 Déformation des coffrages des entretoises entre les poutres de la travée 4 (photo SQ.B22)

3.3.2 Appareils d'appui

La figure 3.18 montre la position relative des poutres, des plaques supérieures et pots des appareils d'appui à la pile 4. Les quatre plaques supérieures des appuis se sont déplacées latéralement vers le sud et se sont inclinées dans la même direction, pour finalement heurter le chevêtre. Les poutres, qui n'étaient pas soudées aux plaques supérieures, ont poursuivi le mouvement amorcé, en glissant le long des plaques supérieures des appuis.



Figure 3.18 Vue de l'extrémité des poutres 1 à 4 à la pile 4 (photo 308.3.13)



Figure 3.19 Extrémité sud de la pile 4 après enlèvement des poutres de la travée 4 (photo 330.8.08)

La figure 3.19 montre le chevêtre de la pile 4 après que l'on ait provoqué la chute des poutres de la travée 4. On voit, au sud de chaque appareil d'appui, les plaques supérieures qui ont glissé sur le disque de PTFE des pistons. Sur le côté nord des appareils d'appui, on voit que les trous oblongs des plaques de transport ont été déchirés vers le haut. Ceci est dû à la rotation des appareils d'appui vers le sud, rotation qui a causé le mouvement vers le haut des boulons qui reliaient les plaques de transport aux plaques supérieures. La tête de ces boulons a provoqué, lors du glissement des plaques supérieures, les deux rainures parallèles que l'on peut voir sur les disques de PTFE. Les plaques de transport du côté sud des appuis ont été pliées complètement par les plaques supérieures.

La figure 3.20 montre le côté sud de la poutre 5 à la pile 4. On voit que les boulons des plaques de transport ont été cisailés suite au mouvement vers le bas de la plaque supérieure. Ce mouvement a été causé par la rotation de l'appareil d'appui vers le sud.

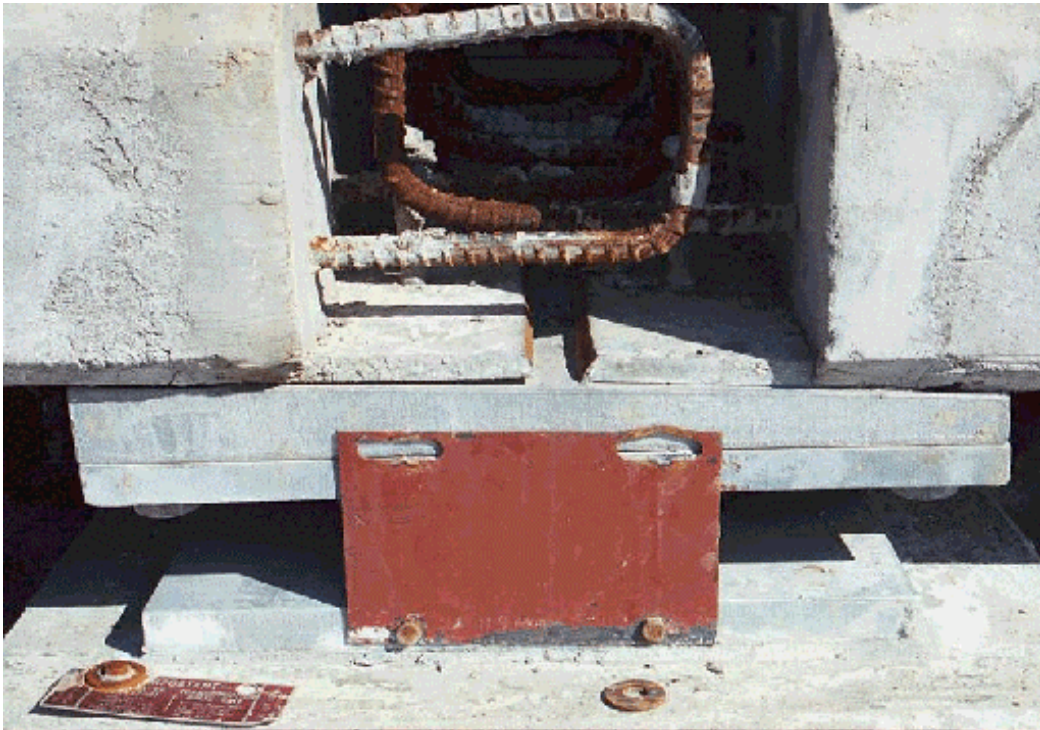


Figure 3.20 Poutre 5 à la pile 4 (photo 330.8.09)

La figure 3.21 montre les appareils d'appui des poutres 1 à 4 à la culée 5 après l'enlèvement des débris et le nettoyage des lieux. L'appareil d'appui de la poutre 4 a été démonté pour inspection. La disposition des plaques supérieures des poutres 1 à 3 indiquent un mouvement des poutres similaire à celui décrit pour la pile 4. Ce mouvement était moins prononcé car il a été circonscrit par le mur de garde.

Sur la figure 3.22, on remarque les mêmes caractéristiques qu'à la pile 4 : plaque de transport pliée du côté sud, trous oblongs déchirés dans la plaque de transport du côté nord, stries dans le disque de PTFE et marques sur le côté sud du piston.



Figure 3.21 Vue de la culée 5 après nettoyage et démontage de l'appareil d'appui de la poutre 4 (photo 280.3.11)



Figure 3.22 Composantes de l'appareil d'appui de la poutre 4 à la culée 5
(photo 280.5.07)

Les figures 3.23, 3.24 et 3.25 illustrent les chevêtres des piles 2 et 3 après inspection des appareils d'appui. Les appareils sur ces piles ont subi des dommages similaires à ceux observés à la pile 4. On note cependant deux différences. À l'exception de la poutre 2 à la pile 3, les plaques supérieures étaient soudées aux plaques d'assise des poutres et, par conséquent, sont tombées avec les poutres. L'autre différence est que les plaques de transport n'étaient probablement plus boulonnées aux plaques supérieures des appareils d'appui. On n'a pas observé de stries dans les disques de PTFE, comme à la pile 4 et à la culée 5. Des déchirures de l'acier en bordure des trous des plaques n'ont été observées qu'aux poutres 2 et 4 de la pile 2. Les autres trous étaient intacts, tel qu'illustré à la figure 3.25.

On a aussi observé des signes évidents du glissement à l'interface acier inoxydable et PTFE, tels que les marques laissées dans le lubrifiant de silicone utilisé dans les appareils d'appui fournis dans ce projet (figure 3.26).



Figure 3.23 Vue de l'extrémité sud de la pile 3 (photo 280.1.19)



Figure 3.24 Vue de l'extrémité sud de la pile 2
(photo 280.3.01, prise après enlèvement des poutres de la travée 1)



Figure 3.25 Détail de l'appareil d'appui de la poutre 1 à la pile 2 (photo 280.3.03)

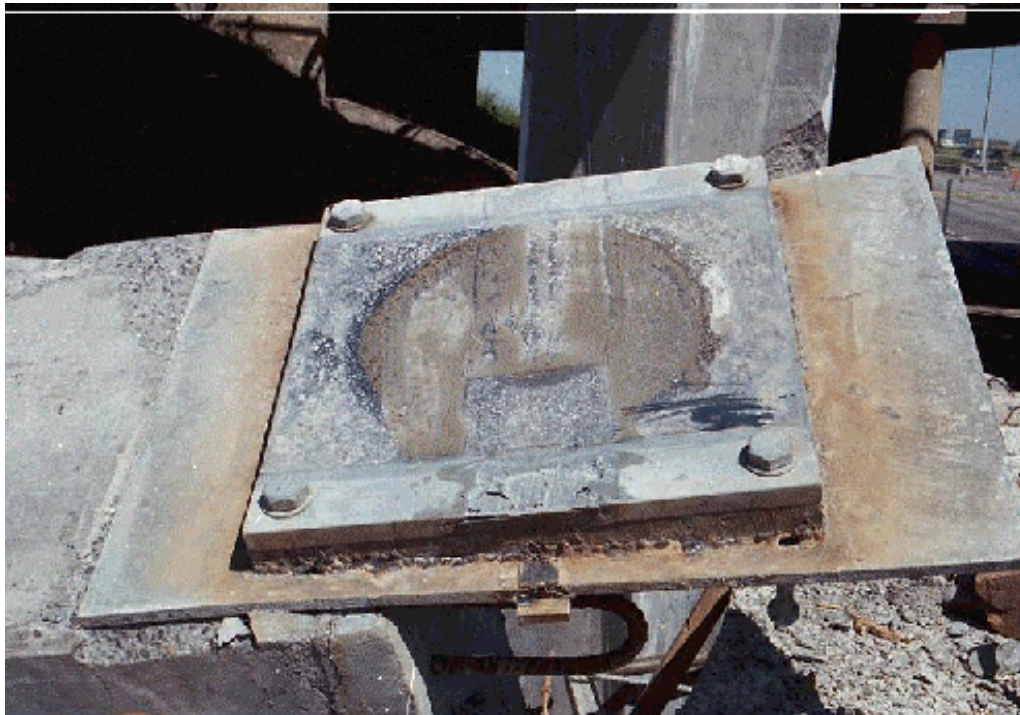


Figure 3.26 Dessous de la plaque de la poutre 1 à la pile 2 (photo 330.2.20)

À la culée 1 (figure 3.27), les coussins en élastomère des poutres 1 à 4 étaient tous en place sur les plaques biseautées en acier. Comme le montre la figure 3.6, ces poutres ont glissé vers le sud jusqu'à heurter la surface horizontale de la culée, à côté des socles de béton. Comme à la culée 5, la chute des poutres a été empêchée par la présence du mur de garde.



Figure 3.27 Vue vers le sud des appareils d'appui des poutres 1 à 4 à la culée 1 (photo 280.3.06)

3.3.3 Piles

Le choc des plaques supérieures et des poutres contre les structures des culées et des piles a causé des dommages à ces éléments structuraux. La figure 3.28 montre un relevé des éclats de béton sur les trois piles.

Les marques que l'on peut voir en bordure et au bout des chevêtres sur cette figure et sur les figures 3.7, 3.8, 3.18, 3.19, 3.23 et 3.24, de même que la position au sol des poutres 1 à 4 des travées 2 et 3, sont des indices qui permettent de recréer le mouvement des poutres lors de leur chute. Après que l'aile inférieure ait buté contre le chevêtre, les poutres auraient tourné complètement sur le côté. L'aile supérieure des poutres 2 à 4 a alors heurté les chevêtres tandis que les poutres de la rangée 1 ont basculé autour de l'extrémité sud des chevêtres.

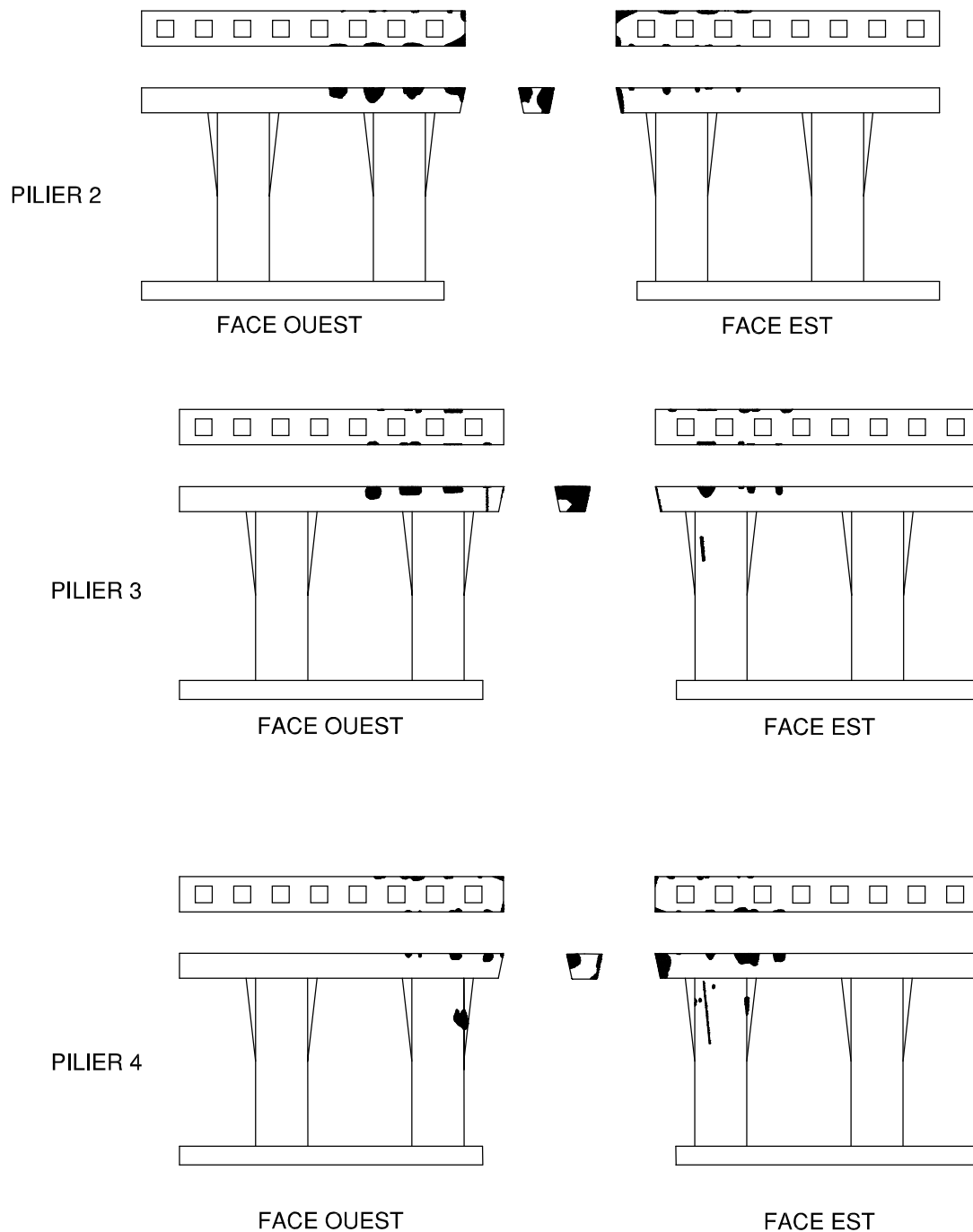


Figure 3.28 Vue des dommages aux piles

3.4 Mesure de la rotation des poutres 5 à 8

Des mesures géométriques ont été prises sur les poutres 5 à 8 avant leur démantèlement afin de déterminer la rotation subie par ces poutres autour de leur axe longitudinal (angle α sur la figure 2.8).

La figure 3.29 présente la rotation mesurée à chacune des extrémités des poutres à toutes les unités de fondation. Ainsi, deux mesures ont été effectuées aux piles 2 à 4. Une valeur positive indique une rotation vers le sud, c'est-à-dire que la semelle supérieure s'est déplacée vers le sud par rapport à la semelle inférieure. On peut observer la rotation vers le sud des poutres 5 à 8 sur la figure 3.30.

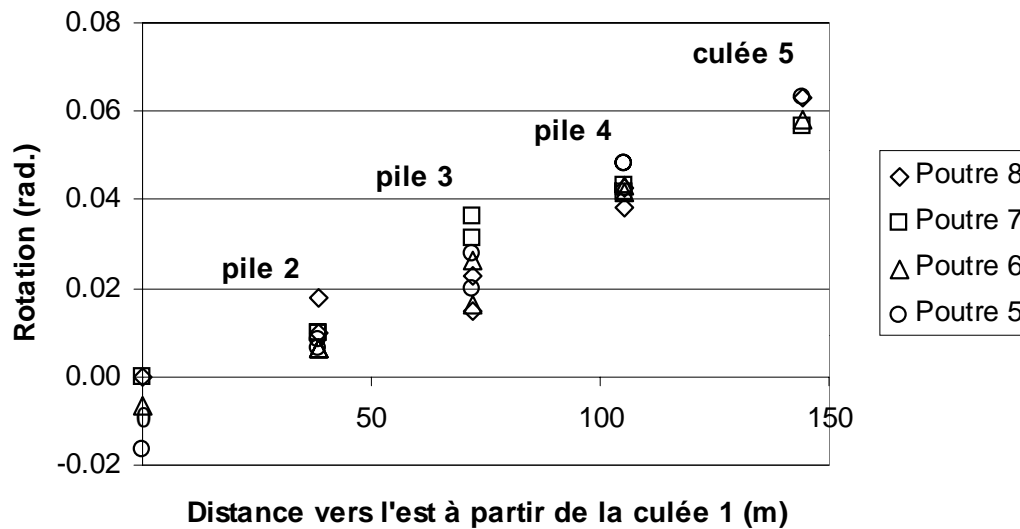


Figure 3.29 Rotation des poutres 5 à 8 mesurée aux appuis



Figure 3.30 Rotation vers le sud des poutres 5 à 8 à la pile 4
(photo 280.7.02, vue vers l'est après enlèvement des
poutres de la travée 3 et les poutres 1 à 4 de la travée 4)

On remarque sur le graphique qu'à chacune des trois piles, l'inclinaison est sensiblement la même d'une poutre à l'autre mais que l'inclinaison diminue graduellement de la culée 5 vers la culée 1. La valeur maximale d'inclinaison mesurée est de l'ordre de 0.06 radians à la culée 5.

La rotation diminue vers la culée 1 à cause de la présence des tiges d'ancrage verticales qui étaient insérées dans les poutres 5 à 8 à cet appui (figure 3.31). La faible tolérance entre le diamètre des tiges et celui des trous dans les poutres empêchait, à toutes fins utiles, la rotation des poutres à la culée 1.

La variation de la rotation sur la longueur du pont indique que les poutres étaient continues aux piles, du point de vue de leur comportement en torsion.



Figure 3.31 Tige d'ancrage des poutres 5 à 8 à la culée 1 (photo 280.9.18)

3.5 Reconstitution de la chute des poutres

Les observations faites sur le site et les témoignages indiquent que l'effondrement s'est vraisemblablement produit selon la séquence suivante :

- Les plaques supérieures des appareils d'appuis des poutres 1 à 4 se sont déplacées latéralement vers le sud, par glissement à l'interface acier inoxydable-PTFE, tout en s'inclinant dans la même direction pour finalement heurter le chevêtre.
- Suite à ce mouvement, les tirants de retenue latérale entre les poutres 4 et 5 se sont cassés. Les poutrelles supportant le coffrage de la dalle se sont séparées des supports métalliques qui les fixaient aux poutres. Les coffrages des entretoises intermédiaires ont perdu leur appui, de même que les planchers de sécurité situés au-dessus des voies de l'autoroute. Le tout est alors tombé directement au sol.
- La force horizontale induite par les poutres 1 à 4 a fait se pencher légèrement les poutres 5 à 8 vers le sud. Ces dernières sont cependant demeurées en place parce que leurs appareils d'appui ne permettaient pas le glissement dans la direction nord-sud. De plus, à la culée 1, la rotation des poutres 5 à 8 étaient bloquée par les tiges d'ancrage verticales posées à cet endroit. On remarque d'ailleurs que la rotation des poutres 5 à 8 augmente progressivement en s'éloignant de la culée 1 vers la culée 5.
- Aux culées 1 et 5, le mouvement des poutres a été interrompu par la présence du mur de garde localisé au sud des culées. Aux piles 2 à 4, les poutres des travées 2 et 3 ne bénéficiaient pas d'une telle retenue et ont poursuivi leur mouvement.
- Les poutres 2 à 4 des travées 2 et 3 ont pivoté par rapport au point de contact chevêtre semelle inférieure jusqu'à ce que le bord de leur semelle supérieure frappe le chevêtre. Ces poutres devaient alors supporter leur poids propre autour de leur axe faible, plus les forces d'impact, et elles se sont probablement brisées en flexion, puisque la précontrainte n'est pas efficace dans cet axe, pour ensuite tomber au sol entre les piles.
- La poutre 1 des travées 2 à 3 a aussi pivoté sur sa base mais a basculé dans le vide au bout sud du chevêtre. Comme rien n'entravait son mouvement, elle a atteint le sol avant la poutre 2, ce qui explique la position relative de ces deux poutres.

Une vue schématique de la façon dont les poutres sont probablement tombées est donnée aux figures 3.32 et 3.33.

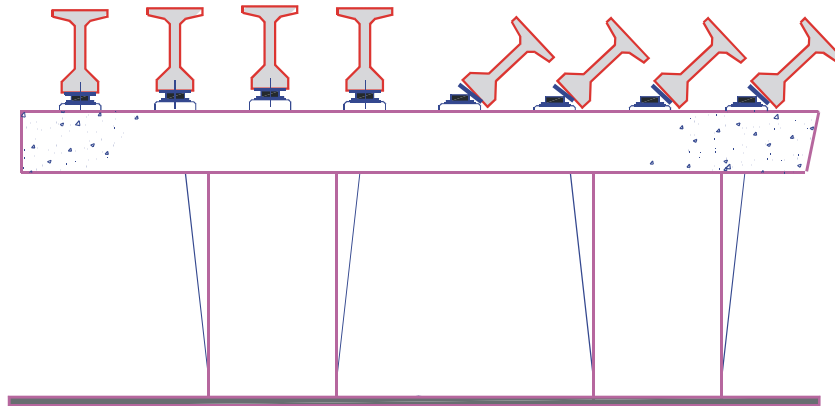
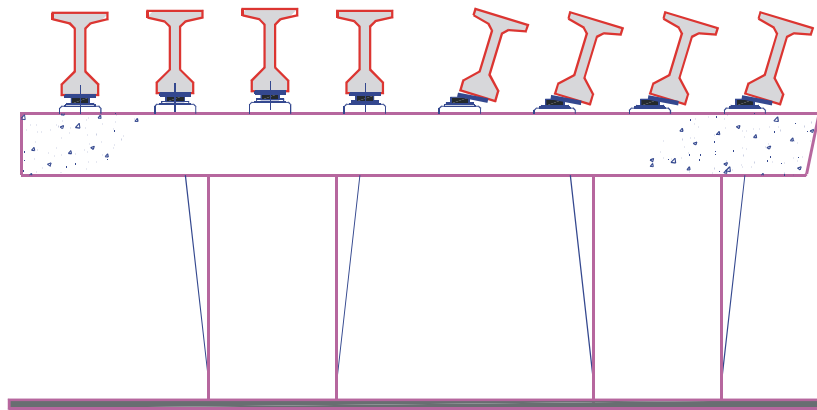
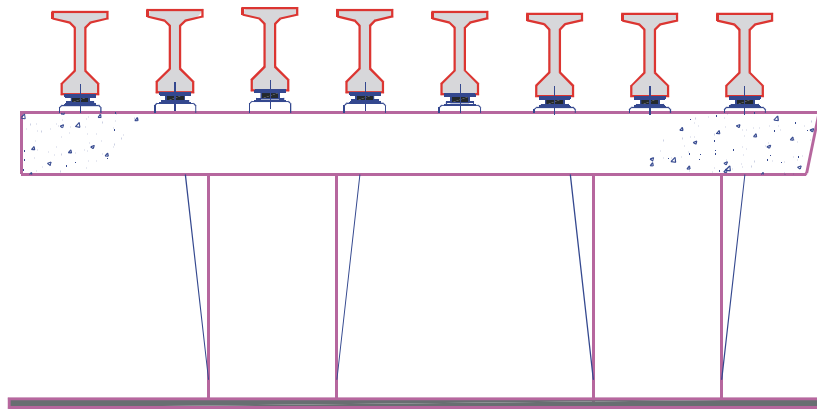


Figure 3.32 Séquences 1, 2 et 3 de la chute des poutres

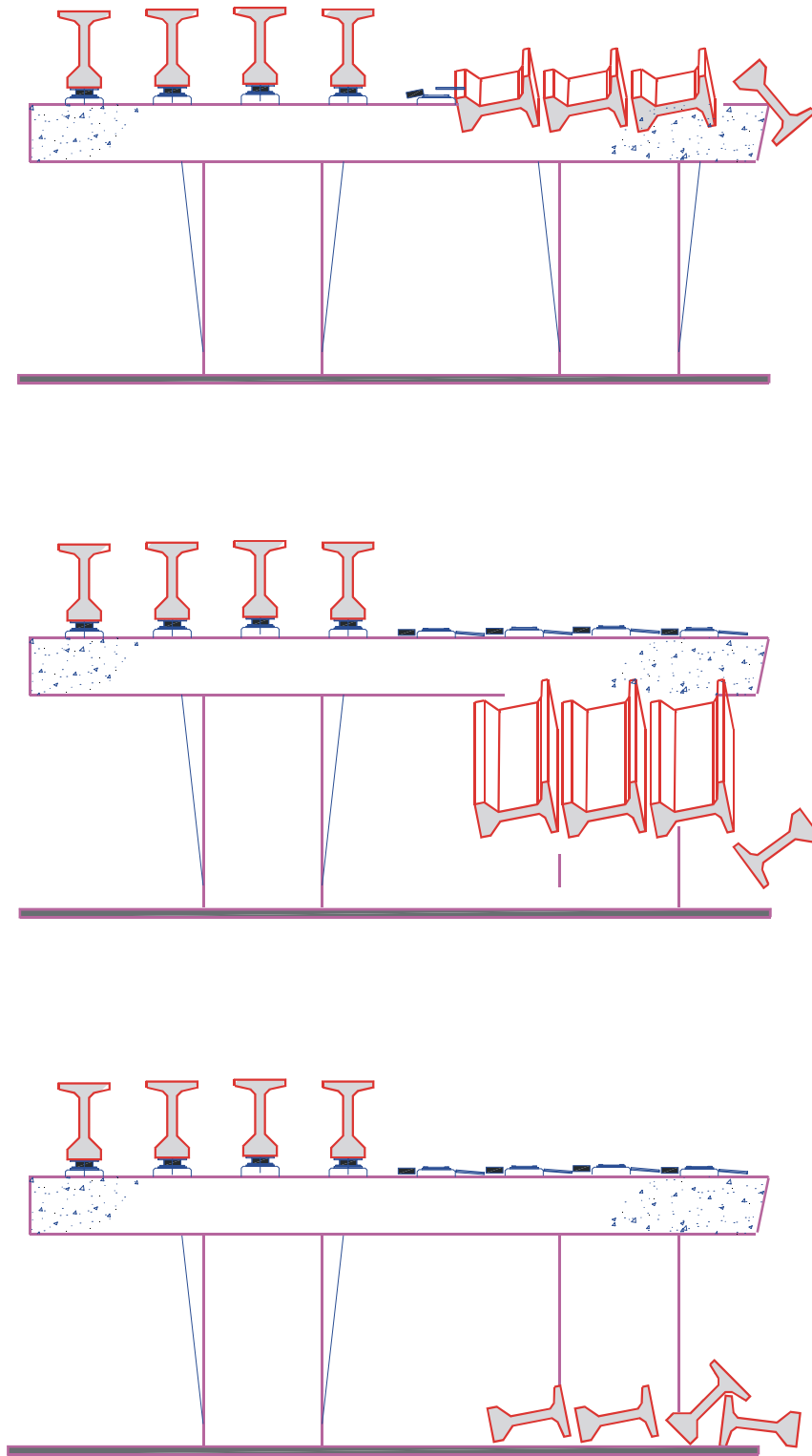


Figure 3.33 Séquences 4, 5 et 6 de la chute des poutres