

RÉPARATION ET RENFORCEMENT D'UN VIADUC APRÈS UN SÉISME MAJEUR

REPAIRING AND STRENGTHENING OF A VIADUCT AFTER A MAJOR EARTHQUAKE

François RAPINAT, Dominique DESCHAMPS, Benoît LECINQ
FREYSSINET

1. INTRODUCTION

En 1999, un séisme de magnitude supérieure à 7,5 sur l'échelle de Richter frappe le nord-ouest de la Turquie. Entre autres dommages, un viaduc dont le gros œuvre vient d'être terminé et qui n'a pas encore été équipé est sérieusement touché : la faille du séisme passe entre deux de ses piles. Le viaduc fait partie de l'autoroute Ankara-Istanbul, entre les villes de Düzce et Bolu. Dans le cadre de la dernière section de 30 km restant à construire, sa réparation est absolument indispensable.

Lors du séisme le viaduc a subi des dommages critiques. Selon les premières inspections, les deux tabliers sont considérés comme perdus. Astaldi, l'entreprise générale, demande une alternative à l'option de démolition et de reconstruction. La solution proposée comprend le levage et le recentrage des tabliers, suivis d'une amélioration de sa résistance à un éventuel séisme futur. C'est cette solution très audacieuse qui est choisie et Freyssinet se voit confier les travaux de réparation.

Le présent article traite des moyens et méthodes utilisés pour réparer et renforcer le viaduc.

1. INTRODUCTION

In 1999, a seism above 7.5 on the Richter scale hits the northwest part of Turkey. Among havocs, a viaduct that had just been cast, still without any equipment, is severely hit: the fault of the seism is passing through two of its piers. The viaduct is part of the Ankara-Istanbul motorway, between the towns of Düzce and Bolu. As part of the last 30km long section still to build, its repair is absolutely necessary.

After the seism, the viaduct was suffering from critical damages. According to the first inspections, decks were both considered lost. The main contractor for the viaduct erection, looked for an alternative to the demolition and reconstruction option. Proposed solution included lifting and re-centring of the deck followed by an improvement of its resistance to a future seism. This very challenging solution has been chosen.

This paper deals with the means and methods used to repair and strengthen the viaduct.

2. DESCRIPTION DU VIADUC APRÈS LE SÉISME ET OBJET DES TRAVAUX DE RÉPARATION

2.1 Présentation de la conception initiale



Fig 1. Vue d'ensemble du tablier double /
General view of the twin deck

Avant le séisme, la structure du viaduc était composée d'un tablier double, chaque tablier reposant sur ses propres piles, dont la hauteur pouvait dépasser 50 m. Les tabliers étaient tous deux constitués de poutres préfabriquées, d'une longueur par travée de 40 m. On comptait sept poutres par travée, pour une largeur de tablier de 17,5 m. La charge par travée était de 1400 tonnes au moment des travaux de réparation. La longueur totale du viaduc était d'environ 2,4 km et comptait environ 60 travées.

Une poutre transversale reliait les extrémités des poutres préfabriquées pour donner de la résistance transversale au tablier. Ces poutres étaient considérées comme le seul point d'appui possible pour les dispositifs de levage ; 4 points de soutien étaient requis par pile et devaient être placés en des points bien précis.

Les travées étaient reliées entre elles par des dalles de liaison. Ces dalles étaient coulées de manière à assurer la continuité d'ensembles longs de 10 travées appelés « segments ». Notons que ces dalles n'avaient théoriquement aucune résistance structurelle réelle du fait de leur très faible épaisseur (24 cm seulement pour une longueur d'environ 2,4 m). Des câbles étaient en outre placés entre les extrémités des segments et reliés aux têtes de piles afin d'empêcher tout mouvement de forte amplitude des segments lors d'un séisme. Les câbles étaient ancrés dans les extrémités de poutres et des bossages spéciaux dans les têtes de piles.

2. VIADUCT DESCRIPTION AFTER EARTHQUAKE AND PURPOSE OF THE REPAIR WORKS

2.1 Presentation of initial design



Fig 1. View from the ground at the highest piers
location

Vue depuis le sol au niveau des piles les plus hautes

Before the earthquake, the structure of the viaduct was composed of a twin deck, each resting on its own piers, whose height may be over 50m. Decks were both made of precast beams, for a span length of 40m. Seven beams per span were placed, leading to a deck width of 17.5m. Span load was 1,400 tons at the time of the repair works. Thus, the total length of the viaduct was approximately 2.4km, comprising approximately 60 spans.

A transversal beam links the ends of the precast beams, to give transverse resistance to the deck. These beams were considered the only possible bearing point for the lifting devices and requested 4 supporting points per pier to be placed at precise locations.

Spans were then linked together, by means of link slabs. These were cast in order to give continuity over 10 span long assemblies, named "segments". Note that these had theoretically no real structural resistance, due to their very low thickness: only 24cm (for a length of about 2.4m). In addition, cables were placed between segments ends and linked to pierheads, in order to prevent the segments from long-range movements during seism. They were anchored in beams ends and special support blocks in the pierheads.

2.2. Détériorations après séisme et travaux de réparation requis

2.2.1. Objet des travaux de réparation

Les travaux de réparation avaient pour objet de repositionner le tablier à un emplacement correct et de recréer des conditions d'appui capables de supporter les charges de circulation. Les tabliers ont également été renforcés afin d'accroître leur résistance aux séismes. Un des principaux problèmes des travaux de réparation était que la longueur totale du viaduc, entre culées, était réduite de 1 m. Ce problème était dû à la localisation de la faille du séisme, exactement au milieu de deux piles ! Plusieurs travées ont ainsi dû être raccourcies par coupage sur site des dalles de liaison.

Toutefois, avant d'entamer les travaux de réparation, la tâche principale a consisté à créer un nouvel alignement. En effet, les piles avaient bougé et l'alignement antérieur ne correspondait plus à leurs nouvelles positions. Seule une découpe des dalles de liaison permettait de résoudre ce problème, afin de créer de nouvelles courbes et un alignement vertical dans celles-ci. Au total, 8 dalles de liaison (sur les 105 existantes) ont été coupées.

2.2.2. Restauration de la structure existante

Les travaux de réparation pour la restauration du viaduc comprenaient plusieurs interventions sur les tabliers. Premièrement, les anciens appuis et dispositifs parasismiques, pour la plupart détruits (voir Fig. 2), ont été retirés.



Fig 2. Dispositifs parasismiques endommagés par le séisme / Anti-seismic devices ruined by the earthquake

Les poutres préfabriquées ont également dû être réparées. Ces travaux ont impliqué des injections dans les fissures, la réfection des âmes de poutres endommagées ou leur renforcement par de la fibre de carbone placée autour d'elles (voir Fig. 2).

Les culées ont également dû être entièrement reconstruites. Cette partie des travaux a consisté en la démolition de l'ancienne structure en béton et la reconstruction d'une structure adaptée permettant la mise en place des nouveaux appuis parasismiques.

2.2. Post-earthquake Disorders and Repair Works Required

2.2.1. Purpose of the Repair Works

Repair works were made in order to re-install the deck in a correct location and re-create support conditions able to support traffic loads. Decks were also reinforced, in order to increase the acceptable seism resistance. One of the main issue for the repair works was that the total length of the viaduct, between abutments, was reduced by one meter. This was due to the seism fault location: right in the middle of two piers! Several spans had thus to be shortened by in-situ cutting of the link slabs.

However, before starting the repair works, the main task was to create a new alignment. Indeed, piers moved and the former alignment was not consistent any more with the new positions of the piers. Only additional cutting of link slabs solved this, in order to create new curves and vertical alignment in these. A total of 8 link slabs (among the 105 existing) were cut.

2.2.2. Repair on the existing structure

Repairing works for the viaduct restoration included several operations on the decks. Firstly, the former bearings and anti-seismic devices, which, for a huge majority, were destroyed (see Fig. 2), were removed.



Fig 2. Severely damaged beam end
Extrémité de poutre gravement endommagée

Precast beams were also to be repaired. These works involved on cracks injections, renewal of the damaged beams webs or placing of carbon fiber around them (see Fig. 2).

The abutments were also to be completely rebuilt. This part consisted in the demolition of the former concrete structure and reconstruction of an adapted one, allowing positioning of the new anti-seismic bearings.

2.2.3. Remise en état de la structure

La première partie de ces travaux a été le levage et le poussage de l'ensemble du tablier à sa nouvelle position.

Les opérations ont été réalisées segment par segment. Les parties à déplacer pesaient 14000 tonnes pour une longueur totale de 400 m. Le principal problème à résoudre était que certaines poutres « pendaient » à l'extérieur des têtes de piles. Il n'était de ce fait pas possible de les soutenir verticalement.



Fig 3. Poutres « pendant » à l'extérieur des têtes de piles et posant un problème majeur pour la conception des dispositifs de levage

La deuxième partie de ces travaux a été la réparation et le renforcement structurels du viaduc. En raison des changements d'appuis, un nouvel alignement et l'amélioration de la résistance sismique du tablier étaient requis. Sa conception structurelle a dû être entièrement modifiée : la dalle de liaison a été remplacée par une entretoise transversale en pleine hauteur reliant les travées de part et d'autre des piles. La résistance de l'entretoise permet de transférer les charges à travers deux « appuis à pendule de frottement ».

3. OPÉRATIONS DE LEVAGE ET DE RECENTRAGE

3.1. Description de la solution

3.1.1. Dispositif de levage en extrémités de segments

Les dispositifs de levage utilisés pour les extrémités de segments (au niveau des joints de dilatation) étaient assez classiques, du fait que les extrémités de poutres correspondantes étaient situées largement au-dessus des têtes de piles. Ces dispositifs se composaient de colonnes, ancrées dans les poutres préfabriquées et appuyant sur la poutre transversale existante (voir Fig. 4).

2.2.3. Works on the repaired structure

The first part of these works was the lifting and sliding of the whole deck to its new position.

Operations were carried out segment by segment. The parts to be moved weighed 14,000 tons for a total length of 400m. The biggest issue to solve was that some beams were "hanging" out of the pierheads. Hence, it was not possible to support them vertically.

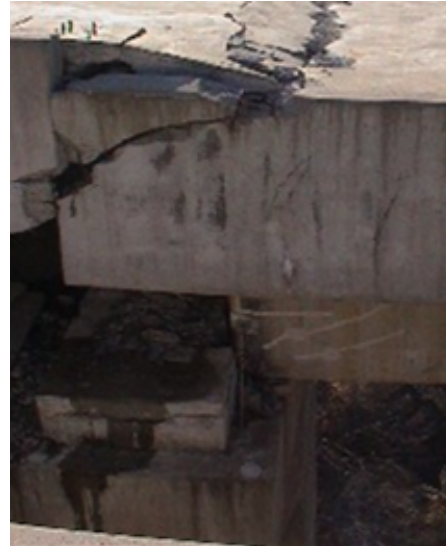


Fig 3. Beams, "hanging" out of the pier heads, creating a great challenge for the design of the lifting devices

The second part of these works was the structural repair and strengthening of the viaduct. Due to bearing changes, new alignment and seismic resistance improvement of the deck was required. its structural design was to be fully modified : the link slab was replaced by a full-height transverse diaphragm linking the spans on both sides of the piers. The diaphragm resistance allows to transfer loads through two "friction pendulum bearings".

3. LIFTING AND RE-CENTRING OPERATIONS

3.1. Description Of The Solution

3.1.1 Lifting Device n Segments Ends

The lifting devices for segments ends (at expansion joints) were rather classical, as the corresponding beam-ends were located well above the pierheads. These devices consisted in columns, anchored in the precast beams and resting on the existing transversal beam (see Fig. 4).

Soit un, soit deux vérins de levage étaient placés en pied de colonne pour les opérations de levage selon la localisation transversale du dispositif par rapport à la charge supportée.

One or two lifting jacks were placed at the bottom of the column, for lifting operations according to the transversal location of the device to supported load.



Fig 4. Opération de levage sur une pile en extrémité de segment
Lifting operation on an expansion joint pier

3.1.2. Dispositifs de levage utilisés sur les piles intermédiaires

La conception de ces dispositifs posait de nombreux problèmes. Les exigences étaient les suivantes :

- Maintenir à tout moment un déplacement possible du dispositif de levage de 300 mm dans toutes les directions avec un faible coefficient de frottement (5 % maximum). L'objet de cette exigence était de protéger le tablier contre les séismes pendant les travaux.
- Permettre le levage de toutes les poutres, quelle que soit leur position initiale. Cela signifiait que le dispositif devait pouvoir supporter les poutres préfabriquées sur des hauteurs variables (entre 1,5 m et 3,3 m) et des largeurs variables (entre 2,0 m et 2,8 m).
- Conserver dans toute la mesure du possible la dalle de liaison existante jusqu'à ce que les opérations de recentrage soient terminées. Il n'était pas possible de modifier le niveau relatif des poutres pendant les opérations de levage.
- Maintenir les charges au droit des têtes de piles à tout moment. Cette exigence était essentiellement due au souhait du chantier de n'avoir aucune plate-forme lourde autour des piles pour les poutres « pendantes ».
- Permettre une installation manuelle sur la pile. Cela signifiait que le dispositif devait être placé sur la pile chaque fois que possible en une opération seulement.

3.1.2. Lifting Device on Intermediate Piers

The design of this devices was creating many challenges. Requirements were as follows.

- At any time, keep a possible displacement of the lifting device of 300mm in all directions with low friction (maximum 5%). This was required in order to protect the deck from any seism during the works.
- Allow lifting of all beams, whatever their initial positions. This meant that the device had to be able to support the precast beams for varying heights (from 1.5m to 3.3m) and widths (from 2.0m to 2.8m).
- Keep as much as possible the existing link slab until recentring operations were over. It was thus not possible to change the relative level of the beams during the lifting operations.
- Drive the loads to the pierhead at all stage. This is mainly due to the site wish not to have any heavy platform around the piers for "hanging" beams.
- Allow a manual installation on the pier. That meant the device had to be placed on the pier whenever it was possible in one part only.

Malgré le grand nombre de cas et les dimensions diverses entre poutres sur les piles, le but était de réaliser les travaux en n'utilisant qu'un seul type de dispositif et ce selon un seul mode opératoire.

Le dispositif proposé était donc essentiellement constitué de deux « bras », chacun reposant sur une poutre transversale existante au droit de la pile (une par travée), reliés entre eux par une structure en acier supportant les vérins de levage. Cette structure de liaison était constituée de plusieurs tubes et butons supportant toutes les charges horizontales induites. Au contact avec la tête de pile, les dispositifs étaient équipés d'une surface de glissement constituée de patins en téflon disposés sur le sol, et d'une tôle d'acier inoxydable soudée sous la base du dispositif.

Au total, 4 dispositifs ont été utilisés par pile, soit 36 points de support « indépendants », sur une longueur totale couverte de 400 m. Chaque dispositif supportait environ 350 tonnes.



Fig 5. Dispositif de levage sur piles intermédiaires.
Lifting device on intermediate piers
Configuration la plus haute après 50 cm de levage
Highest configuration after 50cm lifting.

3.2. Procédure de base

La procédure pour le levage et le recentrage des segments de tablier se décomposait en 3 étapes. Toutes les opérations de levage et de recentrage étaient effectuées sur un segment avant de procéder aux opérations sur le segment suivant.

Toutes les opérations étaient effectuées sans l'aide de grues du fait du manque de place et d'accès. Ces tâches ont été réalisées avec les plus grandes précautions, compte tenu de l'état précaire du tablier autour des ouvriers (risque d'effondrement).

Première étape : Mise en charge des dispositifs

Cette étape consiste en un premier levage de l'ensemble du segment. Au cours de cette étape, les poutres du segment sont levées d'environ 5 cm. Cette valeur a été adaptée à chaque cas pour réaliser les objectifs suivants :

Despite the great number of cases and the various dimensions between beams on pierheads, the aim was to achieve works using only one kind of device following only one method statement.

The proposed device was thus basically made of two "arms", each bearing on one of the existing transverse beam of the span, linked together via a steel structure supporting the lifting jacks. This linking structure was made of several tubes and props, supporting all induced horizontal loads. At the contact with the pierhead, the devices were equipped with a sliding surface, made of PTFE pads laid on the ground and a stainless steel plate welded to the bottom footing of the device.

A total number of 4 units per pier were used; giving a total number of 36 "independent" supporting points, on a total covered length of 400m. Each device was supporting approximately 350 tons.



Fig 5. Lifting device on intermediate piers.
Dispositif de levage sur piles intermédiaires.
Shortest configuration after 50cm lifting.
Configuration la plus basse après 50 cm de levage

3.2. Basic Procedure

The procedure for lifting and re-centring the deck segments was shared in 3 steps. All lifting and re-centring operations were carried out on one segment before any operation starts on the next one.

See on fig. 8 (page 6) the schematic view of the lifting and re-centring procedure.

First Step: Loading Of The Devices

This step consists in the first lifting of the whole segment. During this step, the segment was lifted up by approximately 5cm. This value was adapted to each case to achieve the following objectives.

- *Free all beams for the re-centring operations. Indeed, former support blocks were sometimes still supporting the beams and thus, it was not possible to demolish them before lifting operations.*

- Libérer toutes les poutres pour les opérations de recentrage. En effet, les anciens blocs supports supportaient parfois encore les poutres et il était donc impossible de les démolir avant les opérations de levage.
- Éliminer les éventuelles anciennes parties des appuis à pot, des appuis glissants et/ou des dispositifs parasismiques endommagés se trouvant encore sous les poutres. Ce second objectif permettrait en outre de positionner des appuis provisoires sous les poutres pendant les opérations de levage.

Cette étape a été réalisée pile par pile, en contrôlant le déplacement de l'ensemble de l'élément. Les piles ayant en général subi une flexion (jusqu'à 80 cm entre les têtes de piles et les coiffes) ou une torsion, une attention particulière a été apportée afin de contrôler tout mouvement retour des piles. Le segment étant bloqué, ces mouvements ont été contrôlés en fonction des déplacements constatés sur les surfaces de glissement des dispositifs de levage. La moitié des mouvements a généralement été constatée au moment de la mise en charge, tandis que la moitié restante s'est produite au cours de la semaine suivant l'opération de levage. Une fois la hauteur correcte atteinte, les écrous de sécurité des vérins sont serrés et la pression relâchée.



Fig 6. Fin de la mise en charge du dispositif. À ce moment, l'espace de travail était si étroit qu'aucune lumière naturelle ne pouvait pénétrer sur la tête de pile, ce qui explique la couleur de cette vue
End of the loading of the device. At that time, working space was so narrow that no sunlight came on the pier head, explaining the colour of this view.

Les dispositifs de levage placés aux extrémités des éléments étaient alors mis hors charge et remplacés par des appuis glissant sous les poutres. En effet, ces dispositifs ne pouvant pas supporter les forces de recentrage, ils ont été maintenus hors charge pendant les opérations de recentrage.

- Remove any former part of the pot bearings, sliding bearings and/or ruined anti-seismic devices still under the beams. This second task allowed the further placing of temporary bearings under the beams during the lifting operations.

This step was carried out pier by pier, keeping the whole segment under controlled moves. As piers were usually bended (up to 80cm between pierheads and pile caps) or twisted, fears were concentrated on reverse moves of the piers. As the segment was blocked, these were checked according to the displacements seen on the sliding surfaces of the lifting devices. Half of moves were generally seen at the moment of the loading, while remaining half took place in the next week. Once the correct height was reached on intermediate piers, jacks were secured by means of safety nuts and hydraulic pressure was released.



Fig 6. End of the loading of the device. During the loading itself, a minimum of 2 people attended each lifting device.
 Fin de la mise en charge du dispositif
 Au cours de la mise en charge proprement dite, au moins deux personnes s'occupaient de chaque dispositif de levage.

Lifting devices on segments ends were then unloaded and replaced by sliding bearings under the beams. Indeed, as these devices were not able to support the re-centring forces, they were kept unloaded during the re-centring operations.

Deuxième étape : Recentrage de l'élément

Cette étape était la plus critique, du fait qu'elle impliquait des mouvements sur toutes les piles simultanément. Les opérations ont d'abord été réalisées dans le sens longitudinal, puis dans le sens transversal. Pour réaliser le recentrage longitudinal, 5 dispositifs pousseurs ont été placés sur le segment, à raison d'environ une toutes les deux piles. Chaque dispositif poussait uniquement sur la poutre préfabriquée centrale.

L'opération de recentrage longitudinal a été effectuée tout en agissant simultanément sur tous les vérins des dispositifs de recentrage. Sur chaque pile, un opérateur muni d'un dispositif de recentrage vérifiait que la pression des vérins pousseurs était la même sur toutes les piles. La valeur du déplacement était contrôlée sur chaque pile afin d'éviter une flexion supplémentaire des piles. Une fois à la position longitudinale correcte, les vérins horizontaux étaient verrouillés.



Fig 7. Dispositif de recentrage longitudinal
The longitudinal re-centring device

Lorsqu'ils sont utilisés comme dispositif de blocage, les vérins sont retirés et la poutre appuie directement contre la poutre préfabriquée.
When used as a blocking device, the jacks are removed and the beam bears directly on the precast beam.

Le recentrage transversal était alors réalisé, ici encore au moyen de dispositifs fabriqués spécialement. Les dispositifs de recentrage sont placés sur trois piles de l'élément, placés théoriquement au centre et à 3 travées de distance dans les deux directions. Quatre dispositifs ont été placés sur chacune des piles équipées, et poussaient sur la deuxième poutre préfabriquée de chaque côté de la travée.

Le recentrage transversal a de plus été « partagé » en deux mouvements : une translation suivie d'une rotation autour de l'extrémité de l'élément. Au cours de la translation, tous les dispositifs étaient utilisés, mais pas pendant la rotation, où seuls les dispositifs situés sur les deux piles extrêmes de l'axe de rotation étaient utilisés. Notons qu'avec l'expérience, ces deux mouvements ont été reconsidérés et que le recentrage transversal a été réalisé en une seule opération, impliquant un mouvement de translation et de rotation simultanées.

Second Step: Re-centring of the Segment

This step was the most critical, as it involved movements on all piers simultaneously. Operations were made longitudinally first and then transversally. To achieve the longitudinal re-centring, 5 pushing devices were placed on the segment, approximately one every other pier. Each device was pushing on the central precast beam only.

The longitudinal re-centring operation was conducted while inflating simultaneously all the jacks of the re-centring devices. One operator on each pier equipped with a re-centring device checked that the pushing jack pressure was the same on every pier. Displacement value was checked on each pier, in order to avoid any pier additional bending. Once at the correct longitudinal position, the horizontal jacks were locked.



The longitudinal re-centring device. The transversal re-centring device after action, with, in the foreground, the command panel for all operations.

The transversal re-centring was then carried out. It was also made using custom made devices. The re-centring devices were placed on three piers of the segment, theoretically placed in the centre and 3 spans away in both directions. On each of the equipped pier, 4 devices were placed, pushing on the second precast beam on each side of the span.

In addition, transversal re-centring was "shared" in two movements: one translation followed by one rotation, around one of the segment extremity. During the translation, all devices were used, whereas during the rotation, only the devices on the two further piers from the rotation axis were used. Note after learning curve, these two movements have been re-considered and the transversal re-centring was conducted in one operation only, mixing translation and rotation.

Une fois la position transversale correcte atteinte, le tablier a été immobilisé dans le sens transversal au moyen de cales et les vérins pousseurs ont été retirés.

Once the correct transversal position was reached, the deck was secured transversally by means of shims and pushing jacks were removed.

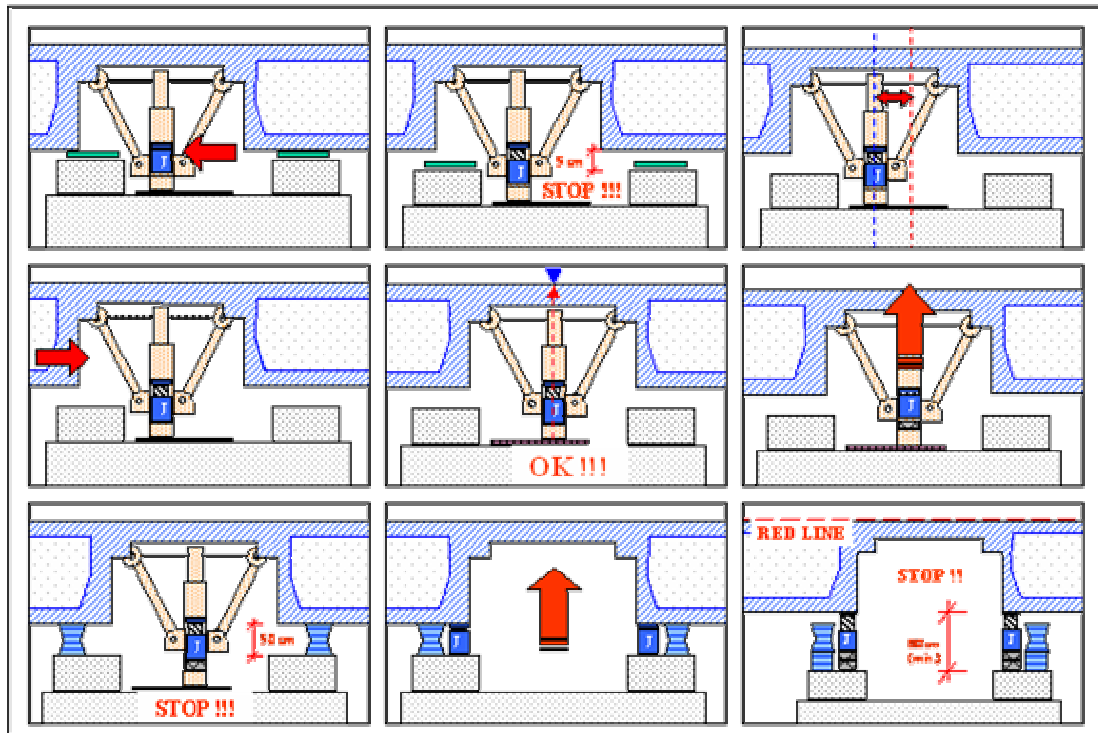


Fig 8. Vue schématique des opérations de levage et recentrage.

La lettre « J » sur fond bleu désigne les vérins. La première étape correspond aux 2 premiers dessins, la seconde aux 3 suivants (le recentrage transversal n'est pas représenté) et la troisième aux 4 derniers.

Schematic views of the lifting and re-centring operations.

The blue "J" shows the jacks. First step corresponds to the first 2 drawings, second one to the three following (transversal re-centring not shown) and the third step to the remaining 4 drawings.

Troisième étape : Opérations de levage du tablier

Cette opération a été réalisée pile par pile, selon les principes suivants :

- Les opérations de levage ont été effectuées par pas de hauteur de 10 cm.
- La différence de hauteur de levage entre piles adjacentes ne pouvait pas excéder 20 cm afin d'être sûr de ne pas endommager la dalle de liaison.
- Pendant le levage sur une pile, aucun travail ne pouvait être réalisé sur une pile adjacente. Cette décision s'explique par le fait que le tablier était supporté à une hauteur qui pouvait atteindre 2,0 m au-dessus de la tête de pile.

Deux configurations de levage différentes ont été rencontrées en fonction de la hauteur déjà levée sur la pile. Si la hauteur levée était inférieure à 50 cm, l'opération de levage était effectuée au moyen des dispositifs de levage.

Third Step: Lifting Operations Of The Deck

This operation was conducted pier by pier, according to the following principles:

- Lifting operations were made per 10cm height step.
- The difference of lifting height between adjacent piers could not be over 20cm in order to be sure not to damage the link slab.
- While lifting was carried out on one pier, no work could take place on any adjacent pier. This has been decided as the deck was supported at a height that could reach 2.0m from the pierhead

Two different configurations were encountered to achieve the lifting, according to the already lifted height on the pier. If the lifted height was less than 50cm, the lifting operation was conducted using the lifting devices.

Une fois une hauteur levée de 50 cm atteinte, les dispositifs de levage étaient retirés et des vérins placés sous les poutres préfabriquées pour terminer le levage jusqu'à la hauteur requise, laquelle pouvait atteindre 1,00 m.



Fig 9. Fin des opérations de levage avec le dispositif de levage
End of the lifting operations with the lifting device



Fig 10. Différence de niveau avant levage / après levage en extrémité d'élément
Difference of level between after lifting and before lifting at a segment end

À l'issue des opérations de levage, un appui glissant provisoire spécial a été placé sous 8 poutres par pile. Noter que pour éviter tout mouvement « non contrôlé » du tablier pendant la réalisation des entretoises, la pile centrale de l'élément était placée sur des appuis fixes et que les extrémités de l'élément étaient reliées aux éléments adjacents par des chaînes.

Résultats et remarques relatives à cette procédure

Les 12 opérations de levage et de recentrage ont toutes été réalisées avec succès. Les opérations ont confirmé que nos hypothèses relatives à l'état du béton affaibli des dalles de liaison, des poutres préfabriquées et plus généralement des tabliers étaient valides.

Cette méthode présentait des inconvénients, le principal étant l'importance des effectifs nécessaires.

Once the lifted height had reached 50cm, lifting devices were removed and jacks were placed under the precast beams to conclude the lifting up to the final required height, that could reach 1.00m.



Fig 9. Last shimming: the lifting operations are now over (sandbox is placed at the top of the shims for load transfer purpose after the concreting)
Calage final : les opérations de levage sont maintenant terminées (boîte à sable placée sur le dessus des cales pour permettre le transfert de charge après bétonnage de l'entretoise).



Fig. 10. After works situation, as seen from under the beams / Situation après les travaux, vue du dessous des poutres

At the end of the lifting operations, a special temporary sliding bearing was placed under 8 beams per pier. Note that, to prevent any "uncontrolled" movement of the deck during the diaphragm casting, the central pier of the segment was placed on non-sliding bearings and that the segment ends were linked to the adjacent segments by chains.

Results And Comments On This Procedure.

All 12 lifting and re-centring operations have been successfully conducted. Operations proved our assumptions about the status of the weakened concrete of the link slabs, the precast beams and more generally of the decks were true.

This method was presenting some drawbacks. The main one was to require a lot of manpower.

Les équipes étaient nombreuses, pour l'installation comme pour le levage. Jusqu'à 30 personnes étaient parfois présentes sur l'élément pour les opérations de levage et de recentrage.

Les avantages de cette méthode sont toutefois évidents et contrebalancent largement les inconvénients. Le premier avantage est que le tablier endommagé a été restauré, ce qui a permis d'importantes économies de matériaux et donc de coûts par rapport à une reconstruction complète du tablier.

L'ensemble des opérations de levage n'a duré que 18 mois, c'est-à-dire quelques mois de moins que nos estimations. Cette restauration pourrait considérablement accélérer l'ouverture du pont par rapport à l'option de sa reconstruction.

Teams were numerous, for installation and lifting purpose. Sometimes, up to 30 people were on the segment for lifting and re-centring operations.

However, advantages of this method are obvious and much more valuable than drawbacks. The first of them being that the damaged deck was restored, leading to great materials and thus cost savings, compared with the full reconstruction of the deck.

The whole lifting operations lasted only 18 months, i.e. a few months less than our estimations. This restoration could greatly accelerate the bridge opening relative to the reconstruction option.

4. RÉPARATIONS STRUCTURELLES ET RENFORCEMENT

La faiblesse de la conception originale était que les poutres pouvaient s'échapper des bossages d'appui en cas de déplacements sismiques importants, puis provoquer l'effondrement du pont. C'est pourquoi le renforcement a pour objet la réalisation d'un tablier continu en créant des entretoises au droit de chaque pile. Des dispositifs parasismiques ont en outre été mis en place. Le renforcement a été conçu parallèlement aux méthodes de réparation.

4. STRUCTURAL REPAIR AND STRENGTHENING

The shortcoming of the original design is that beams could escape outside pier caps in case of large seismic displacements and then induce the collapse of the bridge. Therefore the strengthening targets a continuous deck by creating diaphragms onto pier caps. In addition to this, seismic bearing devices are placed. The strengthening has been designed in parallel with the repair methods.

4.1. Réparation des piles

Les piles ont d'abord été réparées. Les bossages d'appui existants (pour les patins d'appui, les dispositifs parasismiques) ont été retirés partout où ils interféraient avec la structure (éléments anciens et nouveaux). Les fissures ont été injectées et le sommet des piles réparé par des patches (voir Fig. 11).

4.1. Piers repair

First, piers have been repaired. Existing concrete blocks (for bearing pads, anti seismic devices) have been removed wherever they interfere with the structure (old and new elements). Cracks have been grouted and top of the piers patch repaired. (see fig. 11)



Fig 11. Dessus de pile après retrait des anciens blocs afin de faciliter les travaux de réparation et de renforcement

Top of pier after clearing of old blocks in order to facilitate repair and strengthening works



Fig. 11. New bearing device for intermediate diaphragms

Nouveau dispositif d'appui pour entretoises intermédiaires

4.2. Nouveaux blocs d'appui en béton et dispositifs d'appui

Les entretoises sont supportées par une paire de dispositifs d'appui sur chaque pile. Elles sont implantées à proximité de la deuxième poutre en partant du bord du tablier dans l'axe transversal, et centrées par rapport à l'axe de la pile. Les bossages d'appui sont raccordés au chevêtre de la pile au moyen de barres scellées. Ils sont également renforcés afin de transférer les charges du tablier à la pile. Au niveau des culées et des extrémités des segments, des joints de dilatation sont mis en place pour limiter les déplacements en cas de séisme. Sur ces piles, deux paires d'appuis sont mises en place, une par entretoise : le tablier n'est dans ce cas pas continu. Les dispositifs d'appui consistent en des appuis à pendule de frottement EPS, qui présentent une capacité de mouvement horizontal de 700 mm.

4.3. Entretoises intermédiaires

La nouvelle conception du tablier a donné lieu à l'utilisation de deux types d'entretoises. Le premier est l'entretoise intermédiaire qui assure la continuité du tablier (poutres et dalle). Le second correspond aux entretoises des culées et des joints de dilatation. Pour les deux familles, les extrémités des 7 poutres longitudinales en U du tablier sont encastrées dans l'entretoise sur une longueur minimale de 60 cm. Les entretoises sont précontraintes et supportées par une paire d'appuis.

Les entretoises intermédiaires font environ 3,60 m de large (leur largeur varie en fait en fonction de l'alignement du tablier dans le plan et de l'espacement effectif entre les extrémités des poutres en U sur une pile). Elles sont coulées sous la dalle de liaison existante. La partie interne de l'entretoise fait environ 2,40 m de large sur 1,44 m de profondeur, avec une partie supérieure de 1,80 m de large sur 36 cm de profondeur (voir Fig. 12).

Des extensions de 60 cm de long minimum sont raccordées à la partie interne de l'entretoise au moyen d'armatures transversales en T (renforcées par plaques soudées à leurs extrémités) qui permettent un bon transfert des charges des poutres en U à l'entretoise (voir Fig. 13).

4.2. New concrete bearing blocks and bearing devices

Diaphragms are supported by a couple of bearing devices on each pier. Their location is close to the second beam from each edge of the deck transversally and centred with regards to pier axis. Concrete blocks are connected to pier cap by means of sealed bars. They are also reinforced in order to transfer the loads from the deck to the pier. On abutments and on segment ends, expansion joints are placed which limits deck displacements under seism. On such piers, two couples of bearings are placed, one per diaphragm : deck is not continuous in this case. Bearing devices consist of EPS friction pendulum bearings, with an horizontal movement capacity of 700 mm.

4.3. Intermediate Diaphragms

The new design of the bridge has induced two kinds of diaphragms. The first one is the intermediate diaphragm ensuring the continuity of the deck (beams and slab). The second one corresponds to diaphragms of abutments and expansion joints. For both families, the 7 longitudinal U beam ends of the deck are embedded within the diaphragm over a minimum length of 60 cm. Diaphragms are post tensioned and supported by a couple of bearings

Intermediate diaphragms are around 3,60 m wide (width is variable in fact depending on the deck alignment in plane and on the as built gap between ends of U beams over a pier). They are cast under the existing link slab. The inner part of the diaphragm is around 2,40 m wide and 1,44 m deep with a upper part of 1,80 m wide and 36 cm deep (see fig. 12).

Extensions over 60 cm long as a minimum are connected to the inner part of the diaphragm by means of transverse T bars (reinforcement with plates welded at their ends) which allow a good transfer of loads from U beams to the diaphragm (see fig. 13).

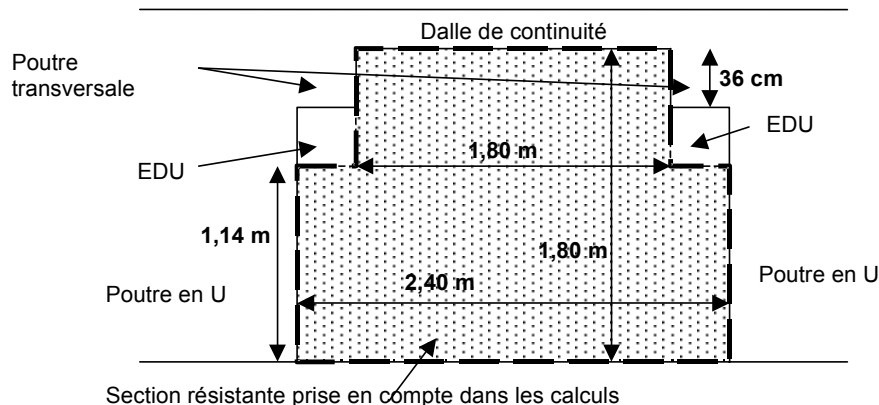


Fig 12. Géométrie des entretoises intermédiaires – Partie interne – Section /
Geometry of intermediate diaphragms – Inner part – Cross section

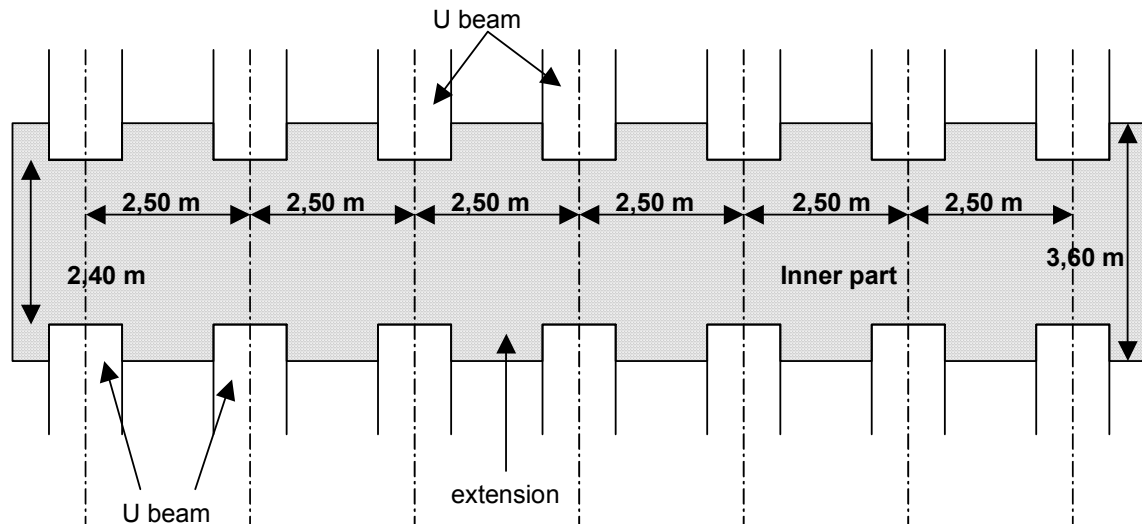


Fig 13. Géométrie des entretoises intermédiaires – Vue en plan
Geometry of intermediate diaphragms – Plan View

De plus, les extrémités des poutres qui ont été encastrées dans l'entretoise ont été bouchardées sur 60 cm de long sur leurs faces latérales et inférieure et sablées sur leur face d'extrémité. Des barres scellées ont également été mises en place. Cela permet également un bon transfert des charges des poutres en U à l'entretoise puis aux appuis (voir Fig. 14).

Le dispositif de précontrainte se compose de 4 câbles 19 T15 (toron : 139 mm² chacun). L'implantation des câbles a été déterminée en fonction de la flexion transversale de l'entretoise : 2 câbles implantés de la même manière en haut (nappe supérieure) et 2 autres armatures en bas (nappe inférieure) implantées de la même manière. La contrainte de traction sous toutes les charges est limitée à 1 MPa maximum (en valeur absolue).

In addition to this, the extremities of the beams over 60 cm long which have been embedded within the diaphragm, have been bush hammered on lateral and bottom faces and sand blasted on the end face. Some sealed bars have been placed too. This also allows the good transferring of loads from the U beams to the diaphragm and then to the bearings (see fig. 14).

Post-tensioning consists of 4 tendons 19 T15 (strand : 139 mm² each). Tendons layout was determined according to transverse bending of the diaphragm : 2 tendons with the same layout at the top (top layer) and 2 other tendons at the bottom (bottom layer) with a same layout. Tensile stress under all loads is limited to 1 MPa maximum (in absolute value).

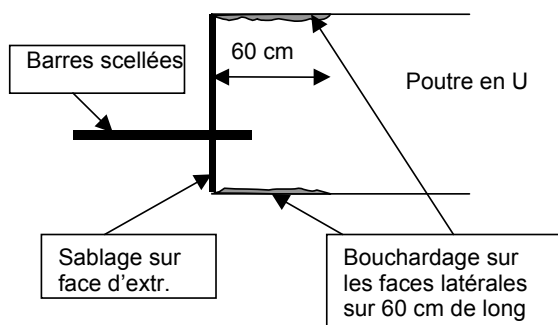


Fig 14. Détails de la préparation des poutres d'extrémité avant bétonnage des entretoises
Vue en plan

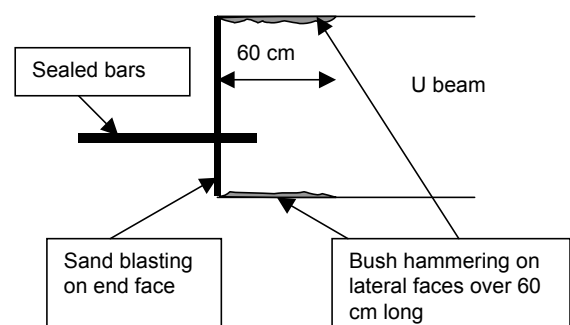


Fig 14. Detail of end beams preparation before casting diaphragms – plant view



Fig 15. Détails du ferrailage : barres scellées mises en place en premier (en haut à gauche) ; armatures inférieures mises en place, puis cadres principaux et armatures dans les extensions mis en place lors d'une deuxième étape (en haut à droite) ; troisième étape de la mise en place des armatures : étriers ou cadres secondaires (en bas à gauche) ; dernier contrôle des armatures avant bétonnage, les gaines de précontrainte (en bas à droite) ont été mises en place et liées au ferrailage.

Reinforcement details : sealed bars placed first (left and top) ; bottom reinforcement placed as well as main frames and reinforcement within extensions placed in a second step (right and Top) ; third step of reinforcement placing : secondary stirrups or frames (left and bottom) ; last checking of reinforcement before pouring, post tensioning ducts have been placed (right and bottom).

La résistance du béton est de 45 MPa (sur échantillon cubique). Les armatures sont en nuance 420 MPa. La forme et l'espacement des armatures ont été conçus pour faciliter la mise en place de barres d'armature et de gaines de précontrainte. La conception prend en compte la spécificité de la structure : similaire à un tunnel fermé en raison de la présence de la dalle de continuité en haut, des poutres en U sur les faces latérales et du chevêtre en bas. Les armatures ont été mises en place par un côté en commençant par les barres longitudinales inférieures et les cadres (ou étriers) avec d'autres barres longitudinales qui permettent un premier positionnement des barres.

Concrete strength is 45 MPa (on cubic sample). Reinforcement is grade 420 MPa. Reinforcement shape and spacing were designed in order to facilitate the placing of rebars and of post tensioning ducts. The design took into account the specificity of the structure : similar to a tight tunnel due to the presence of the continuity slab at the top, of the U beams at the lateral faces and of the pier cap at the bottom side. Reinforcement has been placed from one side by placing first the bottom longitudinal bars and the frames (or stirrups) with some other longitudinal bars that allow a first positioning of the bars.

Puis les gaines de précontrainte ont été insérées dans le ferrailage avec les barres restantes. Des barres scellées ont été d'abord placées dans les poutres en U avant toute autre armature. Les armatures sont très denses aux extrémités de l'entretoise en raison des effets d'éclatement de la précontrainte, et en fond, en raison de l'effet des appuis (répartition locale due à la réaction). La densité d'armature est d'environ 140 kg/m³ (voir Fig. 15).

Un mélange de béton auto-plaçant spécial a été sélectionné : l'entretoise étant comparable à un tunnel et coulée par en haut au moyen de trous d'homme réalisés dans la dalle de continuité, la meilleure manière d'assurer un contact parfait partout entre l'ancien et le nouveau béton était d'utiliser un béton auto-plaçant. Le choix du ciment, de la granulométrie et des adjuvants a été spécialement étudié pour les entretoises et testé. Un essai de bétonnage in situ a été réalisé sur une maquette à l'échelle 1 afin de valider le choix technique (voir Fig. 16). Des échantillons ont été carottés lors de l'essai pour vérifier non seulement la résistance du béton mais également le bon contact et l'absence de vides.

Then, post tensioning ducts were threaded into the reinforcement with the remaining bars. Sealed bars into the U beams had been placed first before all other reinforcement. Reinforcement is very dense at the ends of the diaphragms because of post tensioning bursting effects and at the bottom due to bearing effect (local distribution due to reaction). The amount of reinforcement respect to concrete volume is around 140 kg/m³ (see fig. 15).

A special self-compacting concrete mix was selected : as the diaphragm is like a tunnel and it is poured from the top by means of man holes within the continuity slab, the best way to be sure to get a perfect contact everywhere between old and new concrete was using a self compacting concrete. Choice of cement, granulometry and adjuvants have been especially studied for diaphragms and tested. An in situ pouring trial has been carried out on a scale 1 mock-up in order to validate the technical choice (see fig. 16). Samples have been cored from the trial in order to check not only the concrete strength but also the good contact without any void.



Fig 16. Bétonnage du béton sur la maquette (en haut à gauche). Bétonnage in situ (en haut à droite et en bas à gauche) : parement du béton après décoffrage (en bas à droite)

Concrete Pouring on the mock-up (left and top). In situ pouring (top right and bottom left): concrete facing once formworks removed (Right and bottom).

4.4. Autres entretoises

Les autres entretoises (sur les culées et sur les piles 20, 40 et 50 où les joints de dilatation ont été placés) seront plus petites en largeur (95 cm environ) mais de même profondeur. Elles sont également précontraintes : toutefois, la précontrainte est assurée par deux câbles pour la nappe supérieure composée de 10 T15 et deux câbles supplémentaires pour la nappe inférieure composée de 13 T15. Elles sont également dotées d'extensions de 60 cm de long minimum entre les poutres en U (voir Fig. 13) afin d'inclure les extrémités des poutres dans l'entretoise et de permettre la mise en place des dispositifs d'appui. Les extrémités des poutres ont également été bouchardées (voir Fig. 14) pour la même raison que les entretoises intermédiaires. Les armatures et le béton sont également identiques, néanmoins, la mise en place des armatures a été facilitée du fait qu'il n'y a pas de dalle de continuité au droit des entretoises. Toutefois, la même formule de béton (autocompaction) a été utilisée pour le bétonnage.

4.5. Réparation des poutres d'extrémité

Le type de réparation a été déterminé en fonction de la gravité des dommages. Après une inspection détaillée (conjointe par le maître d'œuvre et Freyssinet), les poutres d'extrémité ont été classées en familles en fonction de l'importance des dommages. La plupart des poutres ne présentaient des dommages que sur les derniers 60 cm qui étaient encastrés dans les différentes entretoises. Aucune réparation spécifique n'était donc requise dans ce cas. Le béton a été retiré partout où il était désagrégé ou éclaté. Les fissures ont été injectées. Les armatures ont été brossées.

Certaines poutres présentaient des dommages sur une longueur allant jusqu'à 2 m. Ces poutres ont été renforcées au moyen de fibre de carbone : produit TFC fabriqué par Freyssinet. Des bandes ont été posées sur la face inférieure (quatre couches) des poutres pour résister à la flexion et d'autres sur les faces latérales pour les effets de cisaillement. Les surfaces ont préalablement été sablées, puis une première couche de bandes longitudinales a été posée. Ensuite, des bandes transversales en U ont été posées pour finir par des couches de bandes longitudinales.

Les poutres restantes ont été gravement endommagées et il a été décidé de les reconstruire sur la totalité de la longueur d'extrémité endommagée.

4.6. Divers

Dans la conception d'origine, des joints de dilatation étaient présents sur les piles 10 et 30. L'armature de la dalle était donc faible du fait de l'absence de sollicitations importantes. Il a été décidé de rendre la structure continue sur ces deux piles.

4.4. Other Diaphragms

The other diaphragms (on abutments and over piers 20, 40 and 50 where expansion joints have been placed) will be smaller in width (around 95 cm) but identical in depth. They are also post tensioned : however post tensioning is made of two tendons as top layer composed of 10 T15 and two additional tendons as bottom layer composed of 13 T15. They also get extensions over 60 cm long minimum between U beams (see fig. 13) in order to include beams ends within the diaphragm and allow the placing of the bearing devices. Beam ends have also been bush hammered (see fig. 14) for the same reason as the intermediate diaphragms. Reinforcement and concrete are identical too. Nevertheless, the placing of reinforcement was easier since there is no continuity slab on those diaphragms. However, same formula of concrete (self compaction) has been used for pouring.

4.5. Repair of end beams

The type of repair has been determined depending on the degree of damages. After detailed inspection, end beams have been classified into families according to the importance of damages. Most of beams got damages only over the last 60 cm long that have been embedded into the different diaphragms. No specific repair was therefore required in such a case. Concrete was removed wherever it was desaggregated or bursted. Cracks have been grouted. Reinforcement has been brushed.

Some beams present damages over a length up to 2 m long. These beams have been strengthened by means of carbon fibre : TFC® product. Strips have been placed at bottom face (four layers) of the beams in order to withstand bending and others onto the lateral faces for shear effects. Firstly, surfaces have been sand blasted. In a second step, a first layer of longitudinal strips is placed. Then the shear strips in U have been placed and finally, the last layers of longitudinal strips.

The remaining beams were severely damaged and the decision was to rebuild them over the complete damaged end length.

4.6. Miscellaneous

In the original design, expansion joints were present over piers 10 and 30. Reinforcement in the slab was therefore not important since there were no important solicitations. It was decided to get the structure continuous over those two piers. Continuity obviously induces hogging moment over pier and therefore tensile stress in the slab. Of course, existing reinforcement was insufficient to withstand such a tension. That is why, the slab has been locally strengthened over piers 10 and 30.

La continuité induit évidemment un moment fléchissant négatif sur la pile et de ce fait une contrainte de traction dans la dalle. Les armatures existantes étaient bien sûr insuffisantes pour résister à une telle tension. C'est pourquoi la dalle a été localement renforcée au droit des piles 10 et 30. L'utilisation de fibre de carbone permet de renforcer la dalle sans la couper, sans l'épaissir (et donc sans ajouter de poids) et sans nécessiter la mise en place d'armatures à l'intérieur de la dalle.

5. CONCLUSION

Les opérations de réparation et de remise en état réalisées sur ce viaduc gravement endommagé ont toutes été couronnées de succès. Les travaux de chantier ont été terminés à la fin de l'été 2005. Les principales difficultés étaient les suivantes :

- La compréhension de l'ensemble des charges et des schémas de forces, qui ont nécessité une analyse précise.
- La conception d'une solution adéquate pour les travaux de réparation : des calculs et des modes opératoires précis ont permis de procéder aux travaux de réparation en toute sécurité et avec un succès complet.

Ces opérations ont prouvé qu'il est généralement possible d'effectuer des réparations même sur des structures en béton gravement endommagées. Même si la solution économique dépend toujours de l'état du béton déjà coulé – plus ou moins gravement endommagé – il faut noter que le viaduc, qui était promis à la destruction totale, est aujourd'hui prêt à résister à des séismes beaucoup plus forts.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions l'entreprise générale Astaldi et le concepteur de cette réparation, le professeur Calvi (Italie).

The use of carbon fibres allows to strengthen the slab without cutting it, thickening it (and so adding weight) nor placing additional reinforcement within it.

5. CONCLUSION

The repair and retrofitting operations made on this very heavily damaged viaduct were all successfully conducted. Site works ended late summer 2005. Main challenges were

- *The understanding of the whole loads and forces schemes, requiring precise analysis.*
- *The design of an adequate solution for repair works : precise calculations and method statements allowed to proceed to the repair works with full safety and success.*

This proved that it is generally possible to repair even on very damaged concrete structures. Even if the economical solution always depends on the status of the already cast concrete – damaged to a more or less general extent – note that, the Anatolian motorway viaduct that was up to full destruction is now ready to resist much stronger earthquakes.

6. CREDITS

We wish to express our sincere thanks to the main contractor : Astaldi and the designer of this repair Calvi (Italy).