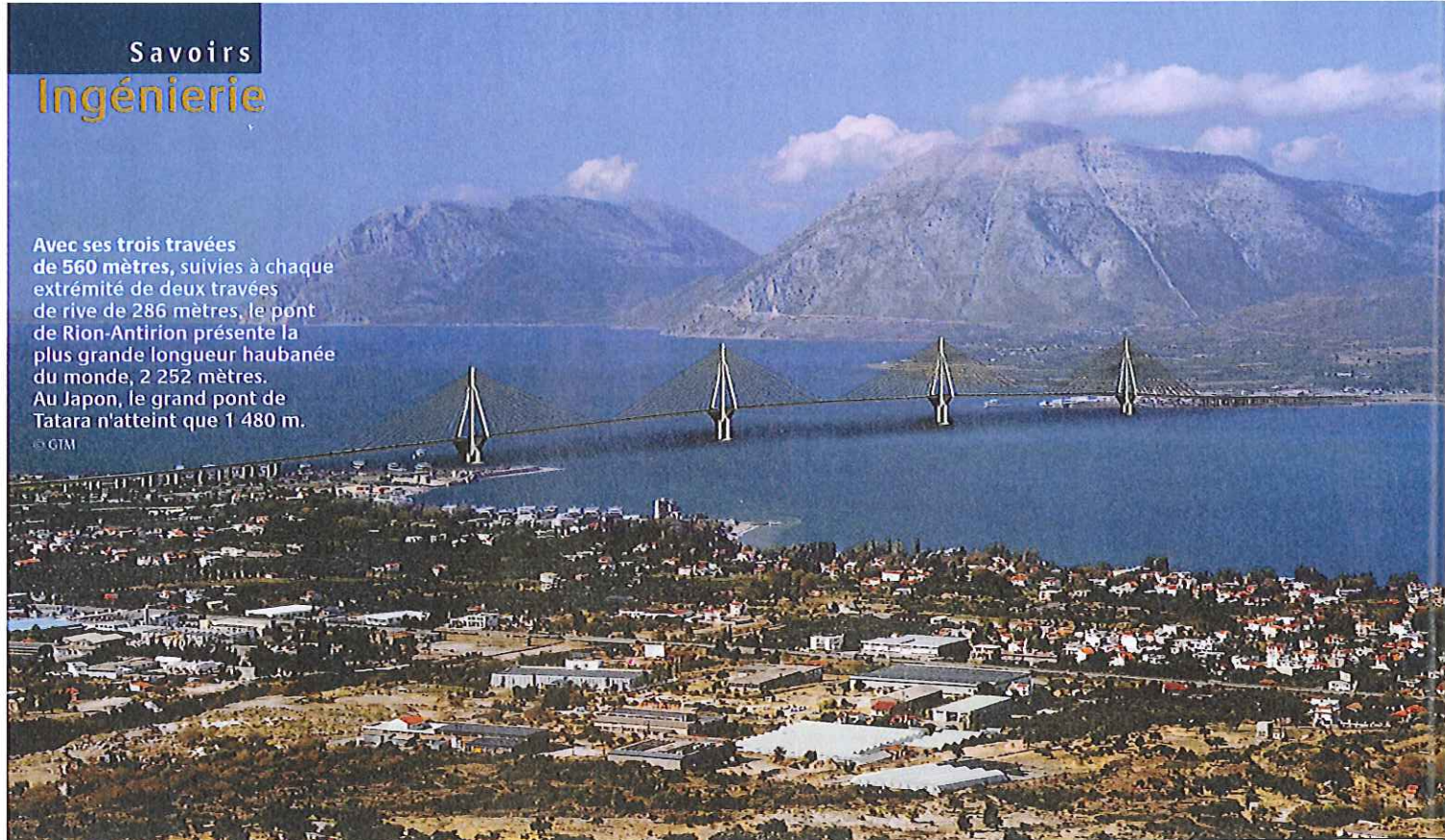


Avec ses trois travées de 560 mètres, suivies à chaque extrémité de deux travées de rive de 286 mètres, le pont de Rion-Antirion présente la plus grande longueur haubannée du monde, 2 252 mètres. Au Japon, le grand pont de Tataru n'atteint que 1 480 m.

© GTM



Rion-Antirion, le pont qui défie les séismes

Ses fondations reposent sur un sol armé par des tubes métalliques

Personne n'avait encore osé construire un pont pour relier le Péloponnèse au continent. Car cette région est l'une des plus sismiques d'Europe, et dans le golfe de Corinthe, la profondeur d'eau est exceptionnelle et le sol peu résistant. Pourtant, l'administration grecque a décidé d'en confier la réalisation à une entreprise française.

Jean-Paul Teyssandier

est directeur au groupe GTM. Il dirige la société GEFYRA, concessionnaire du pont de Rion-Antirion.

Jacques Combault

est directeur scientifique de l'entreprise Dumez-GTM.

Alain Pecker

est président-directeur général du bureau-conseil Géodynamique et structure.

Au sud de la Grèce, un long bras de mer appelé golfe de Corinthe sépare le Péloponnèse du continent. Pour aller de l'un à l'autre, l'automobiliste a le choix entre deux itinéraires : soit passer à l'est par l'isthme de Corinthe percé en 1893 par le canal du même nom, soit franchir à l'ouest le golfe en empruntant la ligne de bacs mise en place à cet effet près de Patras. Mais cette dernière desserte ne suffit plus aujourd'hui à écouler un trafic en forte croissance. Elle sera bientôt remplacée par le pont de Rion-Antirion, le plus long pont à haubans du monde, trois kilomètres !

L'idée de construire un ouvrage à cet endroit n'est pas nouvelle. Elle fut évoquée pour la première fois en 1889 par Harilaos Trikoupis, célèbre Premier ministre grec de l'époque. Cent ans plus tard, la construction de ce pont semblait toujours lancer un défi à l'impossible. Il y a un million d'années, le Péloponnèse faisait partie du continent. Depuis cette époque, les mouvements tectoniques qui affectent la région écartent régulièrement les deux zones de plusieurs millimètres par an⁽¹⁾.

Cette lente dérive a entraîné la formation du golfe de Corinthe. Il en résulte aussi une activité sismique importante (voir carte) : depuis 1965, neuf séismes d'une magnitude supérieure à 6 sur l'échelle de Richter se sont produits dans la région. La possibilité de tremblements de terre bien plus forts n'est pas à exclure.

Les séismes soumettent toutes les constructions à des mouvements vibratoires horizontaux et verticaux qui génèrent des forces croissant proportionnellement à la masse de la structure et aux accélérations qui lui sont imposées. Les forces horizontales se révèlent bien plus dangereuses, les constructions étant en général plus aptes à résister à des forces verticales, comme la pesanteur^{(2),(3)}.

A cette activité sismique intense de la zone viennent s'ajouter deux autres caractéristiques physiques défavorables : tout d'abord, la profondeur d'eau de 60 mètres, exceptionnelle pour les fondations* d'un pont – en général, elle ne dépasse guère les 20 mètres.

Il faut inventer une nouvelle technique pour renforcer le sol car aucune des méthodes connues ne répond aux contraintes du site

Ensuite la qualité très médiocre du sol : en un million d'années, la fosse marine créée par l'écartement entre le Péloponnèse et le continent s'est comblée de sédiments provenant de l'érosion des rives. Sur les cent premiers mètres au-dessous du fond marin (profondeur maximale réellement utilisable pour des fondations), les sondages ont mis en évidence un empilage de couches hétérogènes constituées de sables, de limon et d'argile. Le substratum rocheux se trouve quant à lui relégué à une profondeur telle (probablement plus de 500 mètres) qu'il est inaccessible pour servir d'assise à un ouvrage.

Chacune de ces contraintes physiques pose un problème qui pourrait être résolu par des solutions existantes. En revanche, leur combinaison rend la conception de l'ouvrage infiniment plus complexe, notamment pour les fondations. Un simple raisonnement le fait comprendre. La profondeur d'eau et la mauvaise qualité des sols nécessitent des fondations de grandes dimensions, aussi bien en largeur qu'en hauteur. Par ailleurs, tout solide immergé soumis à un séisme entraîne dans ses mouvements hori-

zontaux un certain volume d'eau qui vient encore augmenter sa masse propre. De telles fondations seront donc soumises lors d'un séisme à des forces horizontales considérables qui auront tendance à les faire basculer. Pour leur résister, il faudrait à nouveau augmenter la surface d'assise des fondations, donc leurs dimensions..., sans que l'on sache *a priori* où s'arrêterait cette spirale.

En dépit de telles contraintes, l'administration grecque lance un appel d'offres en 1992. Elle décide de faire réaliser l'ouvrage en concession, c'est-à-dire sur la base d'un financement privé remboursé par la perception de péages. Les spécifications contractuelles sont particulièrement sévères pour le pont qui doit :

— résister à un événement sismique majeur, mesuré par son « spectre de réponse », ce qui l'oblige notamment à supporter une accélération horizontale maximale égale à 120 % de la pesanteur (fig. 1) ;

— s'adapter à des mouvements tectoniques pouvant atteindre 2 mètres dans toutes les directions : chaque fondation doit pouvoir se déplacer latéralement ou s'enfoncer de 2 mètres par rapport à ses voisines.

Fort de son expérience dans le domaine des grands ponts, le groupe français GTM décide de se lancer dans l'aventure. Il constitue une première équipe pluridisciplinaire d'une quinzaine de personnes : ingénieurs de structure, de méthodes, géodynamiciens, sismologues, spécialistes de l'offshore... Début 1993, les études commencent.

Notre réflexion se porte d'emblée sur le problème le plus fondamental : la conception des fondations. En présence de sols médiocres, la solution classique consiste à recourir à des pieux pénétrant dans le sol, généralement jusqu'au niveau d'une couche résistante sur laquelle ils viennent s'appuyer. Mais dans notre cas cette solution se révèle rapidement inadaptée : la longueur et le nombre de pieux à réaliser seraient tels que le projet perdrait tout intérêt économique. En fait, une seule solution semble envisageable : poser les fondations directement sur le fond de la mer, sous réserve que l'on puisse suffisamment renforcer les vingt à trente premiers mètres de sol. Opération complexe...

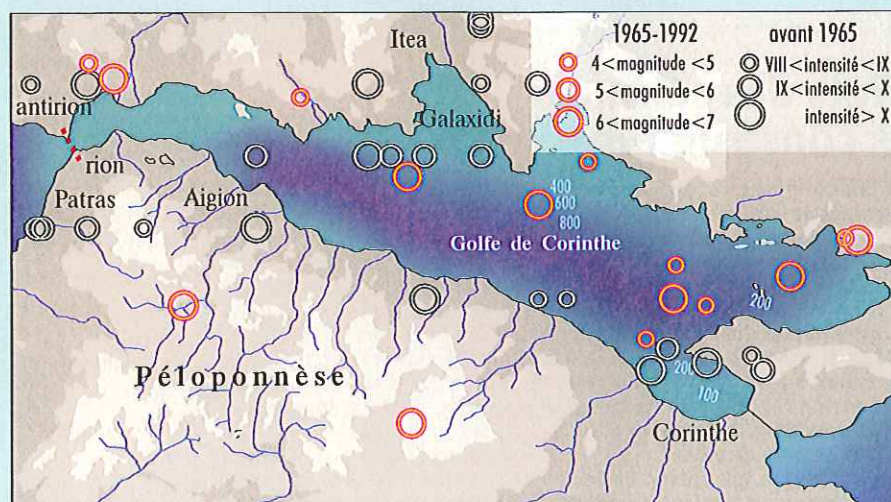
Certes, les techniques de renforcement ont fait de larges progrès au cours des dernières décennies. Mais ici, la nature du sol et la profondeur de l'eau compliquent sérieusement le problème. Aucune des méthodes connues ne peut s'appliquer telle quelle. Ainsi, le compactage dynamique — qui consiste à laisser tomber d'une grande hauteur une masse de plusieurs dizaines de tonnes sur le sol — aurait pu à la rigueur être appliqué par 60 mètres d'eau, mais il est inefficace sur les terrains limoneux et argileux. Autre méthode existante, le renforcement par colonnes de matériaux traités, qui consiste à incorporer de la chaux et du ciment dans le sol, afin d'améliorer ses caractéristiques générales. Mais le mélange résultant de cette opération serait impossible à contrôler à une telle profondeur d'eau

*Fondation partie immergée des piliers d'un pont.

(1) R. Armijo *et al.*, *Geophys. J. Int.*, 126, 11-53, 1996 ; P. Briole *et al.*, « Active deformation of the Gulf of Corinth, Greece: results from repeated GPS surveys between 1990 and 1995 », *J. Geophys. Res.*, submitted ; P.J. Clarke *et al.*, *Geophys. J. Int.* 135(1), 195-214.

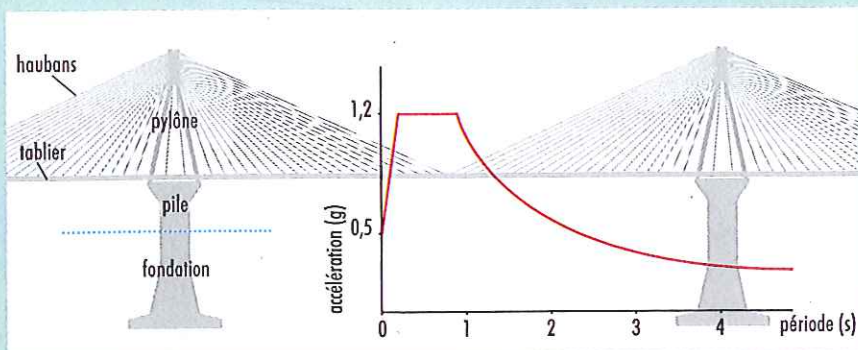
(2) V. Davidovici, « La construction en zone sismique », *Le Moniteur*, 1999.

(3) M. Zacek, « Construire parasismique », *Éditions Parenthèses*, 1996.



De 1965 à 1992 la région du golfe de Corinthe a connu huit séismes d'une magnitude supérieure à 6. Auparavant, les tremblements de terre étaient classés selon leur intensité — en fonction des dégâts provoqués. (D'après A. Rigo)

Figure 1. Pour définir l'événement sismique majeur auquel devra résister un ouvrage, on se sert de son spectre de réponse. Cette courbe donne, en fonction de la période de vibration d'une structure, l'accélération à laquelle celle-ci sera soumise. En multipliant cette accélération par la masse de la structure ($F = mg$), on obtient la force sismique s'appliquant à celle-ci. Le spectre donne pour une période égale à 0 (correspondant à une structure extrêmement rigide) l'accélération propre du sol sur le site (0,5 g dans notre cas, g étant l'accélération de la pesanteur). Lorsque la période augmente, c'est-à-dire lorsque la structure est plus souple, l'accélération qui lui est appliquée croît très vite (1,20 g dans notre cas pour des périodes de l'ordre d'une seconde). Puis elle diminue pour des périodes de plus en plus longues, c'est-à-dire pour des structures de plus en plus souples. On retrouve ici le principe du chêne et du roseau.



et, de toute façon, ne pourrait conférer au sol les qualités nécessaires à la stabilité des fondations. Il existe encore une autre méthode plus radicale, la substitution : enlever l'ensemble du sol impropre pour le remplacer par un nouveau matériau présentant la qualité requise. Une opération impraticable ici, faute notamment de lieux de stockage pour des volumes considérables de matériaux au voisinage du pont. Il nous reste donc à imaginer une solution de renforcement entièrement nouvelle, réalisable (et contrôlable !) par 60 mètres d'eau, et capable de conférer au sol les propriétés nécessaires. Sinon, nous devons abandonner le projet...

Le renforcement par colonnes de matériaux traités semble receler une autre piste. Ainsi, lors d'une séance de *brain storming*, une solution se profile, incertaine, néanmoins porteuse de promesses : réaliser des colonnes en tubes d'acier, matériau connu pour sa résistance. La mise en place de tubes métalliques dans les fonds marins n'est-elle pas devenue une opération classique pour les plates-formes pétrolières offshore, et ce par des profondeurs d'eau souvent bien supérieures à 60 mètres ? Reste une inconnue de taille : quel sera le comportement réel de notre sol ainsi renforcé – « armé » en quelque sorte – par l'incorporation d'un grand nombre de ces tubes métalliques ? Il constitue un matériau nouveau dont nous devons déterminer les propriétés mécaniques globales pour

pouvoir ensuite calculer les dimensions des fondations. Mais comment procéder ? L'idéal serait de faire des essais en grandeur réelle, mais une telle expérimentation serait d'une ampleur démesurée. Nous procédons alors à des simulations numériques destinées à représenter aussi fidèlement que possible le comportement respectif des tubes, du sol et de leur interaction et, en parallèle, à des essais sur modèle réduit en centrifugeuse (voir l'encadré p. 46). Heureusement, les deux méthodes nous donnent des résultats tout à fait comparables : l'approche physique valide ainsi la simulation qui peut dès lors être utilisée pour calculer les dimensions de l'ouvrage.

Ces études, théoriques et expérimentales, nous permettent de comprendre le comportement du sol ainsi renforcé lors d'un séisme. Une fondation soumise à une force horizontale et donc à un « moment de renversement »* peut induire deux types de ruptures :

- si la force horizontale domine, la fondation aura alors tendance à glisser sur le sol.
- si au contraire le moment de renversement est prépondérant, la fondation aura tendance à basculer et à s'enfoncer dans le sol en créant une rupture le long d'une surface de forme circulaire (fig. 2a).

A priori, les deux types de ruptures peuvent se produire. Mais celle par basculement est bien plus dangereuse que celle par glissement, car elle crée des inclinaisons permanentes dans les piles* qui peuvent mettre le pont hors d'usage. A l'inverse, un glissement modéré des fondations n'affecte pas la stabilité du pont. Or, notre renforcement de sol a précisément pour objectif principal de s'opposer à la rupture par basculement : les tubes agissent tels des clous qui, grâce à leur résistance au cisaillement, empêchent la fondation de basculer (fig. 2b). Mais nous décidons en plus d'empêcher tout glissement en liant le sommet des tubes et le bas de la fondation par une injection au ciment.

A ce stade, nous pensons avoir franchi l'étape la plus difficile du projet. Il nous reste bien sûr à déterminer la longueur et la structure des travées* qui joindront ces fondations, mais nous nous sentons là en terrain plus connu. L'avenir nous démentira... Déterminer la taille des travées relève essentiellement d'un calcul d'optimisation économique : plus

*Le moment de renversement est égal à la multiplication de la force horizontale par la distance entre le point d'application de la force et le bas d'une structure.

*Pile : partie émergente des piliers comprise entre les fondations et le tablier.

*Travée : partie du tablier comprise entre deux piliers.

*Tablier : partie horizontale du pont qui relie les rives opposées.

Les effets des séismes sur les constructions

Un séisme a pour origine une rupture dans la croûte terrestre à plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres sous la surface de la Terre. Sous l'effet de cette rupture, des ondes se propagent dans le sol et y engendrent des vibrations qui s'atténuent avec la distance. On les mesure à l'aide d'accélérographes qui enregistrent les accélérations du sol. La magnitude d'un séisme traduit l'énergie qu'il libère. Avec la distance à l'épicentre, elle ne suffit pas à caractériser les paramètres sismiques nécessaires au dimensionnement des ouvrages. Le séisme de Mexico (1985), par exemple, présentait une magnitude élevée (8,1), mais son épicentre se situait à plus de 400 kilomètres de la ville. En raison de son éloignement, son action sur Mexico aurait dû être modérée. Or il fut dévastateur car il créa des oscillations de large amplitude dans la cuvette alluvionnaire de la ville, avec une période de vibration de l'ordre de 2 secondes, proche de celle de nombreux bâtiments, qui entrèrent de ce fait en résonance avec les vibrations du sol. On comprend ainsi que les effets d'un séisme sur une construction dépendent aussi des caractéristiques du site (nature des sols en particulier) et des périodes de vibration propres à la structure.

Dans ce genre d'opération seul un réexamen à froid par des hommes nouveaux peut détecter les faiblesses de la première étude

elles sont longues, plus elles sont coûteuses, mais en contrepartie le nombre de fondations – et donc leur coût global – diminue. Dans notre cas, les dimensions exceptionnelles des fondations, les plus grosses jamais réalisées pour un pont, nous conduisent à choisir trois longues travées haubanées, de 560 mètres chacune. Elles sont encadrées par deux travées plus petites de 286 mètres prolongées par des viaducs d'accès reliant le pont à la terre. La longueur totale haubanée s'élève ainsi à 2 252 mètres, un record mondial. Les quatre fondations supportent chacune un pylône formé de quatre jambes en béton convergeant à leur sommet. Il s'élève à 220 mètres au-dessus du fond de la mer. Reste une contrainte que nous n'avons pas encore considérée : l'éventuel déplacement de 2 mètres des fondations par suite de mouvements tectoniques. Chacune des travées doit pouvoir ainsi s'allonger ou se distordre verticalement ou transversalement de

2 mètres ! Dans ce but, nous prévoyons de placer au centre de chaque portée haubanée une petite travée de 50 mètres, articulée à ses deux extrémités, qui pourra à elle seule prendre les déformations que les fondations feront subir au tablier* (fig. 3).

Sur ces bases, nos calculs mettent rapidement en évidence des forces considérables à la fois dans les pylônes et dans les travées en cas de séisme : ils montrent notamment que les sommets des pylônes et les extrémités du tablier à la jonction avec les petites travées de 50 mètres sont soumis à des accélérations trop fortes pour la structure. Comment résoudre ce problème ? Nous décidons alors d'isoler l'ensemble constitué par le tablier et les pylônes en le faisant reposer au sommet des piles sur des appuis glissants constitués d'une plaque d'acier inoxydable posée sur une plaque de Téflon (fig. 4a). Une technique couramment employée dans les ponts traditionnels pour que les

tabliers puissent glisser sur les piles, et s'adapter aux déformations de la structure provoquées par exemple par les écarts de température. Mais ici les masses à isoler sont considérables. Ce qui conduit à des appuis de dimensions inusitées. Par ailleurs, les pylônes risquent de glisser en dehors des piles et de basculer. On doit limiter leurs déplacements par un système d'amortisseurs hydrauliques les reliant au sommet des piles.

La première étude technique est terminée. C'est ce projet qui est remis dans notre réponse à l'appel d'offres en décembre 1993. GTM est retenu : le contrat de concession est signé en janvier 1996 après de longues négociations avec l'administration grecque. En 1997, alors que sont menées les discussions avec les banques pour le financement, une nouvelle équipe d'une quarantaine de personnes reprend les études techniques. Dans ce genre d'opération complexe où les choix à faire sont nombreux et les analyses multiformes, seul un réexamen « à froid », par des hommes nouveaux n'ayant pas participé au projet initial, peut en détecter les faiblesses, les incohérences et les risques.

Il apparaît alors que le renforcement du sol n'est pas pleinement satisfaisant : la liaison entre le sommet des tubes et le bas des fondations se révèle impossible à réaliser de façon satisfaisante et son intérêt est limité. D'où la décision de recourir à une autre technique : placer au-dessus du sol renforcé une couche de gra-

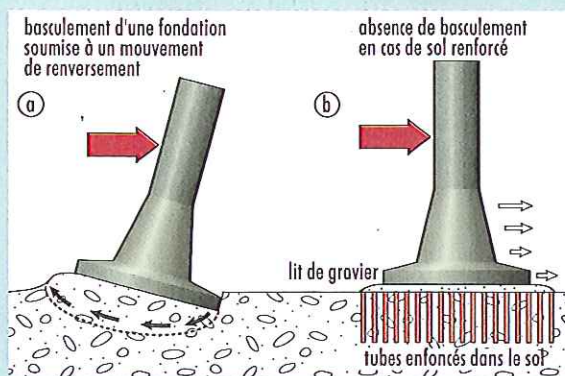


Figure 2a. Le moment de renversement peut faire basculer la fondation, qui s'enfonce alors dans le sol en créant une rupture de forme circulaire.

Figure 2b. Le renforcement du sol par des tubes métalliques s'oppose à la rupture par basculement. Les tubes agissent comme des clous qui résistent au cisaillement.

Figure 3. Au départ une petite travée de 50 mètres était prévue au centre de chaque travée haubanée pour que le tablier s'adapte aux mouvements tectoniques mais elle aurait subi des déformations trop importantes.

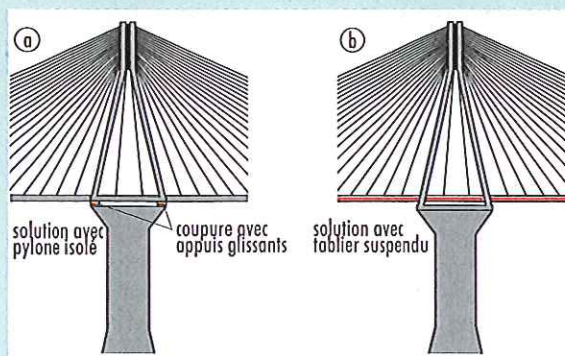
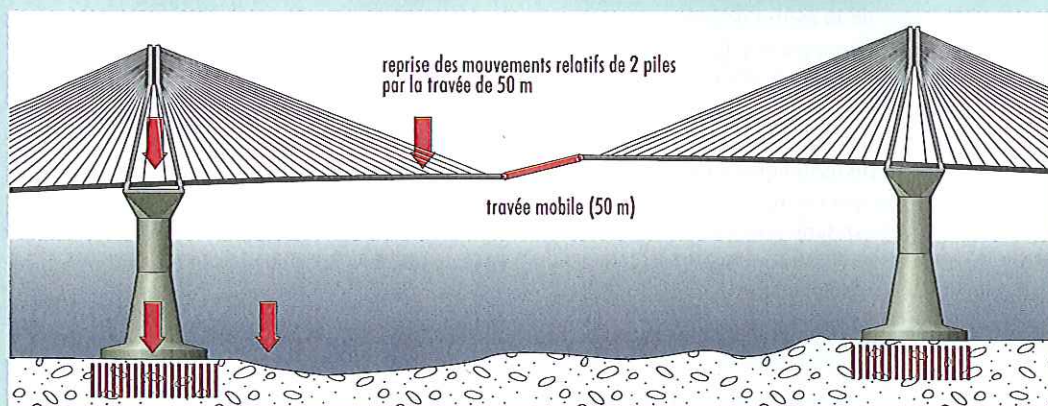


Figure 4a. Pour limiter les accélérations dans les pylônes et le tablier, l'idée consistait d'abord à les isoler en introduisant une coupure au sommet des piles et en les faisant reposer sur des appuis glissants. Mais alors la masse très importante ainsi isolée obligeait à prévoir des appuis et des amortisseurs de taille exceptionnelle, impossibles à tester.

Figure 4b. Finalement, il est décidé de rendre le tablier continu et entièrement suspendu aux haubans : ainsi isolé, il peut se déformer sur toute sa longueur, et il subit des forces sismiques réduites.



La construction de l'ouvrage doit combiner les méthodes utilisées pour les ponts à haubans à celle des plates-formes off-shore en béton

vier soigneusement nivelée qui servira d'assise aux fondations. Celles-ci seront ainsi libres de se soulever partiellement et de glisser. Les calculs montrent, que lors du séisme majeur spécifié dans le contrat, les fondations glisseront au maximum de 40 centimètres et qu'au final, subsistera un déplacement n'excédant pas 20 centimètres. Ce qui paraît tout à fait acceptable pour une structure conçue pour s'adapter à des mouvements tectoniques de 2 mètres. Si un séisme plus violent encore se produisait, les déplacements de la structure augmenteraient mais l'interface gravier-fondation, jouant ainsi le rôle de fusible, limiterait les forces sismiques transmises par

le sol à la structure.

Enfin, le réexamen du projet montre également que les dispositions des travées sont à revoir, sur deux points essentiels :

- Le système d'isolation des pylônes présente un risque technologique important sans pour autant garantir un comportement satisfaisant de la structure sous séisme. En effet les amortisseurs nécessaires dépassent par leur taille (plus de 10 mètres de long et 1 mètre de diamètre) tout ce qui a pu être fait jusqu'alors, et aucune installation au monde ne pourrait les tester pour en déterminer le comportement exact.
- Le système des petites travées de 50 mètres apparaît peu satisfaisant : les mouvements tectoniques y créent des déformations importantes (par exemple un dénivelé de 2 mètres sur 50 mètres), sans possibilité de réglage ultérieur. Par ailleurs, le séisme continue à les solliciter très durement malgré l'isolation des pylônes, et l'amplitude des vibrations à leurs extrémités atteint plus de 3 mètres !

Des essais en centrifugeuse pour tester le sol renforcé

Pour être valides, les simulations expérimentales sur modèles réduits doivent respecter un certain nombre de lois dites de similitude. Dans le cas des sols, cela impose d'utiliser le matériau réel du site et de le soumettre à un champ de pesanteur artificiel inversement proportionnel à l'échelle de réduction du modèle : ainsi, pour un modèle au 1/100^e, on applique un champ de pesanteur égal à cent fois celui de la pesanteur terrestre. On le réalise dans une centrifugeuse de grande dimension. Pour notre projet, deux centrifugeuses ont été utilisées : celle du CEA/CESTA à Bordeaux et celle du Laboratoire central des ponts et chaussées à Nantes. Ces centrifugeuses sont capables d'embarquer une masse de 2 tonnes et de la faire tourner à près de 300 km/h pour la soumettre à l'accélération de 100 g requise. Le modèle réduit comporte le sol renforcé (avec ses tubes à la même échelle) surmonté d'une fondation. Pendant l'essai, on applique à celle-ci des forces et des moments de renversement jusqu'à la rupture du sol renforcé, pour déterminer sa résistance et ses lois de déformation.

Construction de deux fondations en cale sèche.

Les fondations (90 mètres de diamètre) ne sont pas construites au fond de l'eau. Elles sont au contraire entièrement préfabriquées en plusieurs étapes. Tout d'abord, leur base est construite à sec dans une cale sèche (photo) jusqu'à atteindre 13 mètres de hauteur. La cale sèche est alors mise en eau, les bases flottent et sont remorquées vers un site plus profond. Leur construction se poursuit en flottaison, jusqu'à dépasser 60 mètres de hauteur. Les fondations sont ensuite remorquées vers leur emplacement définitif et immergées. © GTM

Deux choix fondamentaux de la structure sont donc remis en cause. Mais que faire pour s'adapter autrement aux mouvements tectoniques et diminuer les effets sismiques dans les travées et les pylônes ? Peu à peu, nous nous orientons vers une solution radicalement différente : supprimer les petites travées de 50 mètres et donner plus de souplesse aux travées haubanées. Nous décidons de rendre le tablier continu sur toute sa longueur et de le suspendre entièrement aux haubans, sans plus aucun contact direct avec les pylônes (fig. 4b). Il forme ainsi une gigantesque balançoire de 2 252 mètres de long, simplement accrochée au sommet des quatre pylônes. Une telle disposition constitue une réponse bien plus adaptée aux deux problèmes posés :

- en cas de mouvement tectonique, le tablier peut se déformer sur toute sa longueur entre deux piles avec une courbure régulière, supprimant ainsi les cassures qui se produisaient aux extrémités des travées de 50 mètres ;
 - le tablier étant isolé du reste de la structure, les forces sismiques qu'il subit sont largement réduites.
- Un système d'amortisseurs entre les travées et les piles reste toujours nécessaire pour éviter que le tablier ne vienne heurter les pylônes lors d'un séisme. Mais il ne présente plus l'ampleur exceptionnelle du précédent, car la masse d'une travée est largement inférieure à celle d'un pylône.

Les études techniques du pont s'achèvent actuellement.

Au cours de ce long processus d'élaboration, la configuration du projet a gagné en simplicité et en pertinence, grâce à un gros travail d'analyse et d'innovation. Il ne comporte plus de disposition hasardeuse ou mal adaptée. La construction de l'ouvrage s'annonce, elle aussi, exceptionnelle. Car elle doit combiner deux types de techniques qui n'ont guère eu jusqu'alors d'occasions de se rencontrer : la méthode de construction des plates-formes off-shore en béton comme en mer du Nord et la technique des grandes travées haubanées, dont le pont de Normandie constitue un bel exemple. La préparation des sols des fondations, c'est-à-dire le nivellement du fond de la mer, le battage des 700 tubes métalliques avec un gros marteau sous-marin et la mise en place de la couche de gravier, constitueront à l'évidence une opération délicate par 60 mètres de fond. Elle ne pourra être réalisée que par un matériel maritime spécialement conçu à cet effet. Le coût total du projet est de 4 milliards de francs — 2,5 fois celui du pont de Normandie. La construction vient de démarrer. Rendez-vous en 2004 pour l'inauguration du pont... et la fin d'une belle aventure technique.

J.P.T., J.C. et A.P. ■