

Ouvrages d'art



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat
Prévention des risques

Développement durable
Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir

Page laissée blanche intentionnellement

SOMMAIRE

Bulletin du Centre
des Techniques d'Ouvrages d'Art

OUVRAGES MARQUANTS

Pont du Larivot en Guyane

Karim Ben Amer, DDE 973
Mathieu Le François, CETE Normandie-
Centre
Jean-Michel Lacombe, Sétra

☛ P. 2

RÈGLEMENTATION, CALCULS

Nouveau guide de conception durable des ponts mixtes acier-béton

Daniel de Matteis, Sétra
Renaud Légise, CETE Nord-Picardie

☛ P. 11

ÉQUIPEMENTS, ENTRETIEN

Prise en compte des dispositifs antisismiques dans les calculs ouvrages d'art sous séisme

Aurélie Vivier, Denis Davi

☛ P. 19

INFORMATIONS BRÈVES

Éditions de pièces écrites de réparation par le logiciel PETRA

☛ P.45

LE KIOSQUE DU SÉTRA

Les dernières publications Ouvrages d'art

☛ P. 47

Directeur de la publication : Philippe Redoulez.

Comité de rédaction : Emmanuel BOUCHON (Sétra/CTOA/DGOI) - Jean-Christophe CARLES (CETE Méditerranée/DISTOA/DOA) - Bruno Godard (LCPC/DFDOA) - Thierry KRETZ (Sétra/CTOA) - Gilles LACOSTE (Sétra/CTOA/DGP) - Angels Luis MILLAN, (Sétra/CTOA/DCSL) - Pierre PAILLUSSEAU (CETE du SUD-OUEST/DOA) - Benoît PORTIER (DRE PACA/SMO).

Rédacteur en chef : Benjamin Blasco (Sétra/CTOA/DCSL).

Conception graphique et réalisation : Sétra - Pascale Giraud

ISSN : 1266-166X

Pont du Larivot en Guyane

Réparation de la pile n°13

Karim BEN AMER (DDE 973)

Mathieu LE FRANÇOIS (CETE Normandie-Centre)

Jean-Michel LACOMBE (Sétra)

Après la découverte le 20 novembre 2009 d'un affaissement de 21 cm de sa pile 13, le pont du Larivot en Guyane a été fermé à la circulation le 25 novembre 2009.

La réparation de la pile 13 a permis de sauver cet ouvrage vital pour la Guyane d'un effondrement probable.

Grâce à la grande mobilisation de tous les intervenants, DDE de la Guyane, Réseau Scientifique et technique du ministère (RST) et entreprises, c'est dans un délai particulièrement court, en moins de quatre mois, que cette opération délicate a été menée à bien, en privilégiant à chaque instant la sécurité des usagers et des ouvriers.

Cette opération exceptionnelle, dont le succès a été salué par le Ministre d'État M. Jean-Louis Borloo, a été coordonnée conjointement par la DDE de la Guyane et par un comité d'experts du RST présidé par M. Thierry Kretz (Chef du Centre des techniques d'ouvrages d'art au Sétra).

Cet article ne porte que sur la réparation de la pile 13, sans aborder les nombreux autres travaux menés en parallèle (inspections, auscultations, instrumentations, renforcement en urgence du pont des Cascades, etc.).

Description de l'ouvrage

Contexte

Le pont du Larivot est situé en Guyane française. C'est un ouvrage particulièrement stratégique qui permet le franchissement de la rivière de Cayenne par la Route Nationale 1. C'est la seule



Figure 1 : Vue aérienne du pont du Larivot – source : Sétra

liaison autorisée aux poids lourds entre Cayenne et l'ouest du département, notamment la ville de Kourou qui accueille le centre spatial guyanais.

Cet ouvrage, qui a remplacé le bac du Larivot, appartient à un ensemble d'infrastructures de liaison mises en place en Guyane dans les années 70 et destinées à assurer son développement économique. Depuis sa mise en service, le trafic qu'il supporte est en constante augmentation du fait de l'urbanisation au-delà de la rivière de Cayenne. Il atteint aujourd'hui environ 13 000 véhicules par jour.

Conception d'origine



Figure 2 : Piles en cours de construction en 1975
source : CETE Normandie-Centre

L'ouvrage présente une longueur totale de 1225 m. Le profil fonctionnel est constitué d'une chaussée de 7 m et de deux trottoirs de 1 m. Le tablier comporte 35 travées de 35 m de type VIPP (portées de 33,80 m). Ses trois poutres en béton précontraint supportent un hourdis en béton armé, constitué de pré-dalles participantes surmontées d'une partie coulée en place. Les travées sont attelées par groupes de cinq par l'intermédiaire de dalles de continuité en béton armé.

Les piles sont majoritairement fondées sur six pieux inclinés à $\frac{1}{4}$ en tube A52 de 660 mm de diamètre et 9 mm d'épaisseur battus fermés remplis de béton. Ces pieux sont armés en partie supérieure jusqu'à 2 mètres sous les plus basses

eaux. Le couronnement est constitué d'un chevêtre bétonné dans un coffrage perdu. Le contexte géotechnique est très hétérogène d'un appui à l'autre. Les épaisseurs de terrains inconsistants sont importantes sur les rives et la longueur des pieux y atteint 40 m. En revanche, dans l'axe de la rivière, il n'existe pas de transition entre les vases et le substratum rocheux. Celui-ci affleure même au niveau de la pile n°12. Ainsi, les piles n°10 à 14 sont ancrées au rocher par l'intermédiaire de racines constituées de barres de 100 mm de diamètre scellées au coulis de ciment dans le rocher et noyées dans le béton de pieu.

Les Désordres de la pile n°13



Figure 3 : Vue du garde corps déformé
source : DDE 973

Le 20 novembre 2009, une déformation anormale du garde corps au droit de la pile 13 est constatée. Un levé topographique met en évidence un affaissement de 21 cm côté amont. Après avoir pris une première mesure de sauvegarde, en basculant la circulation côté aval, le DDE de la Guyane diligente une inspection subaquatique.

Les plongeurs constatent que le pieu amont est rompu et que les pieux adjacents ont subi des déformations importantes.

Le schéma ci-contre représente la rupture constatée sur le pieu 5. Le pieu s'est rompu à environ 70 cm du sol, dans une zone où le béton de remplissage n'est pas armé. Les parties en regard se sont déplacées mais sont restées partiellement en contact.

Après investigations et auscultations, l'origine de cette rupture a été attribuée à une corrosion importante de la chemise métallique associée à un défaut local de bétonnage de la gaine.

Le Sétra et le CETE Normandie Centre, mobilisés depuis la constatation du désordre, mènent alors un recalcul de l'appui et concluent alors : *« La rupture complète de ce pieu peut intervenir à tout moment et engendrera l'effondrement de l'ouvrage. Cette rupture sera brutale et les signes annonciateurs très faibles. »* Le mercredi 25 novembre au soir, M. Le Préfet de la Guyane signe l'arrêt de fermeture à la circulation.

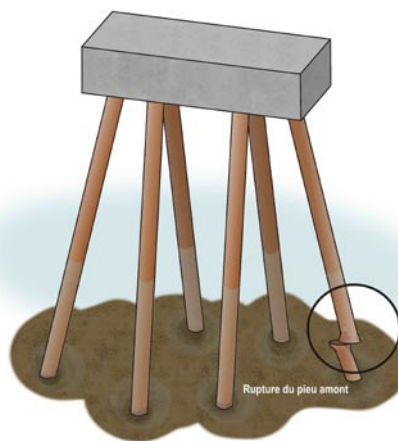


Figure 4 : Rupture du pieu

La réparation

Le projet de réparation Sétra-CETE NC

Les principes de la réparation de la pile n°13 ont été développés dans les deux jours suivant la fermeture de l'ouvrage. Deux journées supplémentaires ont ensuite été nécessaires pour confirmer la faisabilité du projet.

Deux objectifs étaient poursuivis :

- assurer la sécurité de tous les intervenants,
- permettre une réouverture à la circulation le plus rapidement possible.

Une intervention en deux étapes a été étudiée :

1^{ère} étape : mise en sécurité de l'appui

Un recalcul de la fondation à l'aide du logiciel ST1 a montré que la rupture du pieu endommagé pouvait entraîner l'effondrement immédiat de la pile. Le mécanisme de ruine identifié étant un basculement vers l'amont, afin de s'y opposer, une structure de maintien appelée « quadripode » a été dimensionnée. Cette structure constituée de quatre pieds contreventés, ancrés dans le substratum par des racines, est liée au chevêtre et supporte un contrepoids capable de s'opposer à son soulèvement éventuel. Le risque de basculement étant vers l'amont, cette première structure est réalisée à l'aval afin de garantir la sécurité des ouvriers.

Une remise en circulation aux véhicules légers après cette mise en sécurité paraissait envisageable.

2^e étape : reprise des charges en sous-œuvre

La seconde étape consiste à reprendre les charges en sous-œuvre par une charpente métallique, s'appuyant à l'aval du tablier sur les pieux amont du premier quadripode et à l'amont sur une autre file de pieux. La mise en sécurité assurée par le quadripode aval déjà réalisé permet un travail à l'amont dans

des conditions de sécurité acceptables. Une fois la charpente achevée, les charges sont transférées des pieux existants vers la nouvelle structure par un vérinage réalisé en tête des nouveaux pieux. Pour éviter de mettre en traction les anciens pieux, seulement 50% des charges permanentes sont reprises en sous-œuvre lors du vérinage. Toutefois, la structure est bien sur dimensionnée pour reprendre 100% des charges, ainsi en cas de rupture des autres pieux, la circulation peut-être maintenue sans problème. Enfin, la flèche de 21 cm à l'amont est conservée. En effet, pour reprendre cette flèche, un vérinage entre le chevêtre et le tablier aurait dû être réalisé. Cette opération délicate aurait retardé la remise en circulation.

Ce projet a été présenté au ministère (MEEDDM) et aux majors du BTP le mercredi 1^{er} décembre. Le marché de réparation a finalement été signé le 16 décembre avec le groupement d'entreprises Sogea Guyane, EMCC, Berthold (+ACCMA), ETPO, Balineau et Freyssinet.

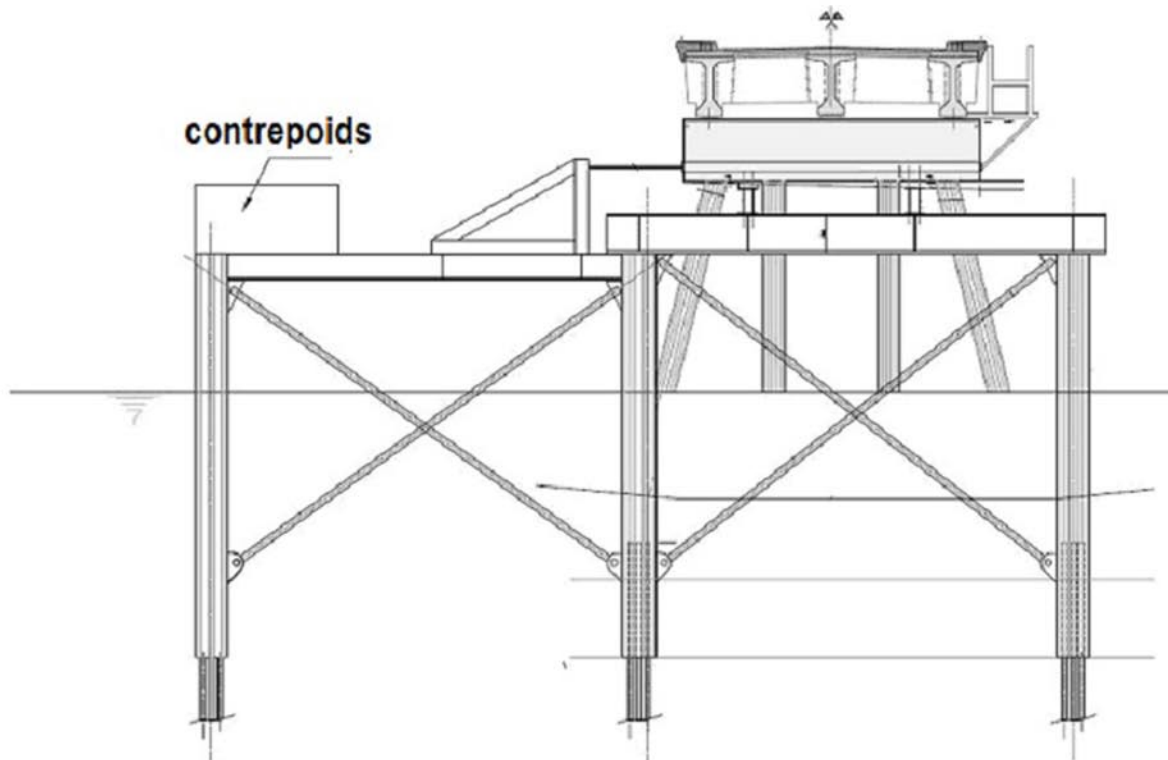


Figure 5 : Projet initial de réparation

Cette opération a été l'occasion d'une remarquable mobilisation de l'ensemble du réseau scientifique et technique de l'équipement (RST). En effet, Sétra, LCPC, CETMEF, CNPS et l'ensemble des 5 CETE (Centre d'Études Techniques de l'Équipement) ont participé à l'expertise ou à la réparation.

Le déroulement du chantier

La réparation finalement réalisée est proche du projet initial. Elle s'en distingue principalement par :

- la réalisation d'un second quadripode à l'amont, pour servir de guide lors de la réalisation des pieux, les gaines métalliques étant posées directement sur le rocher avec un fort courant ;
- la suppression du contrepoids nécessaire lors de la mise en sécurité, les racines en base des pieux s'avérant suffisantes pour résister aux efforts d'arrachement dans les pieux arrière du quadripode en cas de rupture brutale du pieu amont de P13 ;

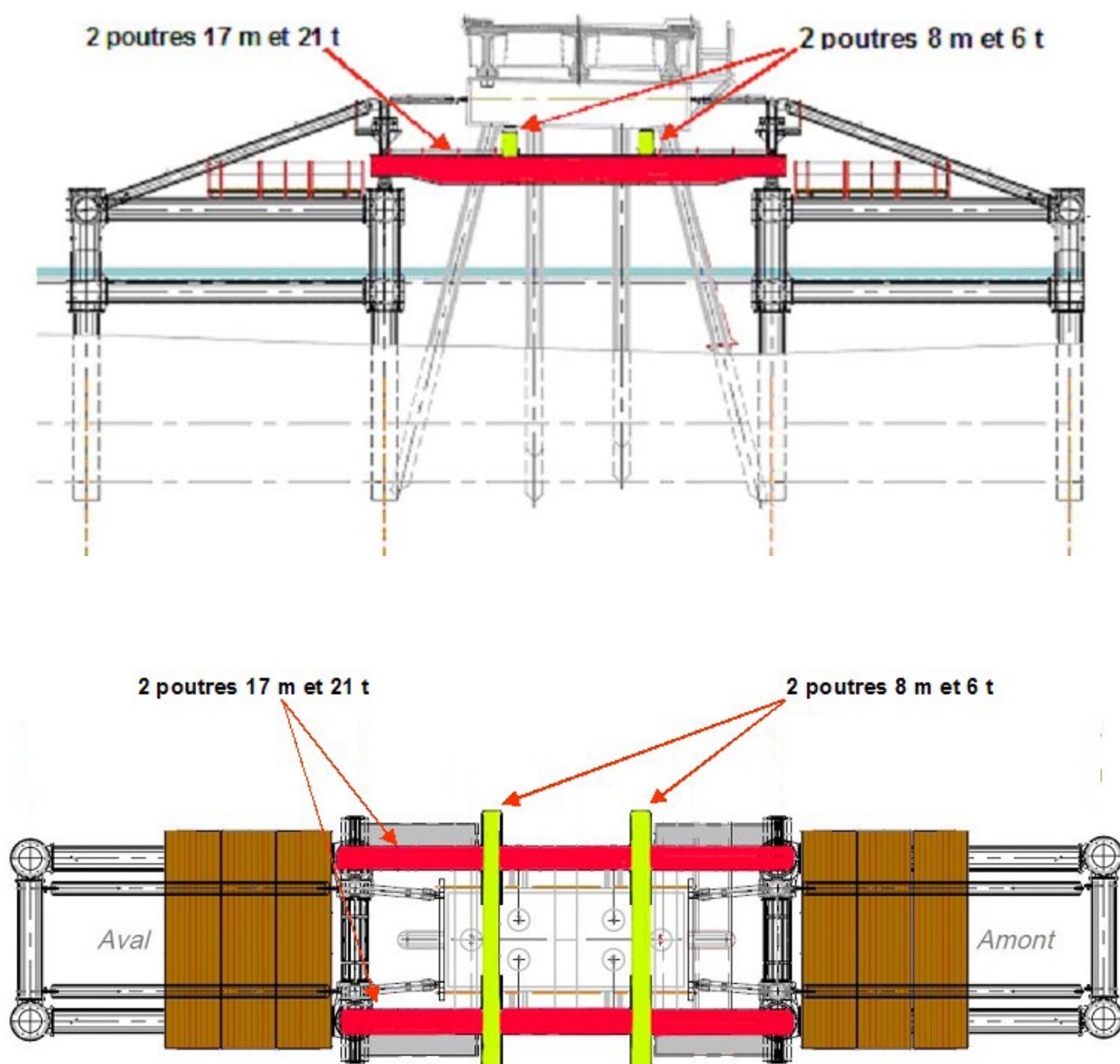


Figure 6 : Solution réalisée

- la conception tubulaire en deux niveaux des quadripodes qui permet un acheminement par flottaison et la suppression de contreventements.

Le premier quadripode a été réalisé dans les ateliers d'ACCMA à Autun, spécialement restés ouverts entre Noël et le Jour de l'An pour ces travaux. Compte tenu de l'urgence, les éléments ont ensuite été acheminés en Guyane par avion cargo Antonov. Le bureau d'études d'EMCC a conçu une structure tubulaire boulonnée afin de faciliter son transport et son montage et de pouvoir l'amener par flottaison à son emplacement définitif.



Figure 7: Transport aérien du premier quadripode
source : Sétra

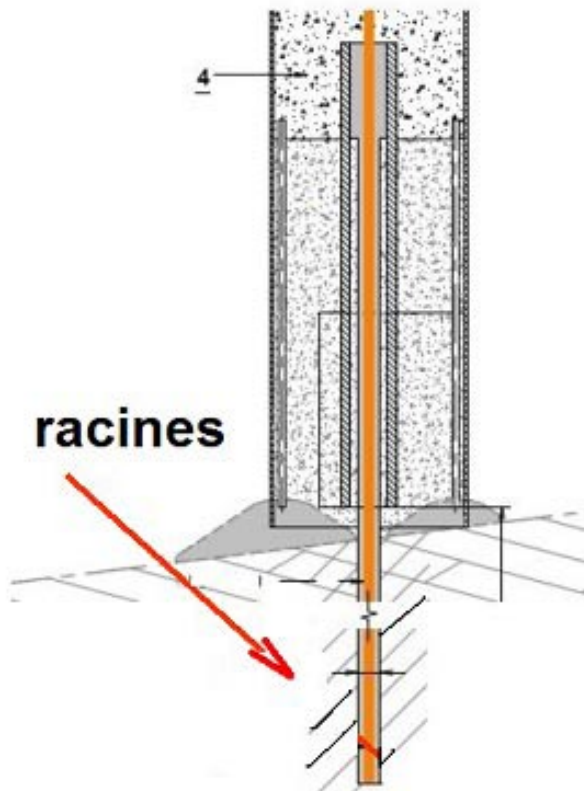


Figure 8 : « Racine » en base de pieu

Le quadripode était attaché à la barge et de ce fait il était possible de régler précisément sa position avec l'aide d'un géomètre installé sur l'ouvrage. Malgré des conditions d'exécution difficiles du fait du courant, l'entreprise a ainsi réussi à positionner les quadripodes avec une erreur d'implantation inférieure à 10 cm. Une fois la barge stabilisée par des corps morts, les tubes verticaux du quadripode, appelés fontaines, ont servi de guide pour la mise en place des quatre pieux de 1016 mm de diamètre. Les pieux ont ensuite été curés et étanchés, avant le forage des racines (barres de 50 mm de diamètre scellées dans un forage exécuté au carottier double de 116 mm de diamètre).

Enfin, ils ont été bétonnés et liés au quadripode par injection au coulis de ciment du vide annulaire fontaine-pieu.



Figure 9 : Déplacement du premier quadripode
source : DDE 973



Figure 10 : Mise en œuvre des pieux
source : CETE Normandie-Centre



Figure 11 : Centrale de commande des vérins
source : Sétra

La mise en sécurité a été effectuée mi-février 2010. La remise en circulation aux véhicules légers dès la réalisation de cette phase, initialement envisagée, n'a finalement pas été retenue. En effet, l'aggravation de l'état des autres pieux de la pile n° 13 constatée par les plongeurs entre fin novembre et fin janvier et le fait que le dispositif de mise en sécurité ne permettait pas de palier la rupture de deux pieux ont conduit le comité d'experts à émettre un avis défavorable à cette réouverture partielle.

En temps masqué, pendant la mise en œuvre du premier quadripode et de ses fondations, le second quadripode a été fabriqué et acheminé en Guyane par voie maritime. Le chantier s'est alors déplacé à l'amont de la pile 13, tandis que l'entreprise Berthold fabriquait les caissons de la charpente de reprise en sous-œuvre. Les poutres principales ont d'abord été mises en place (caissons de 17 m de longueur, de 900 mm de largeur et de 1200 mm de hauteur pour un poids d'environ 21 t) et les poutres transversales (caissons de 8 m de longueur, de 600 mm de largeur et de 800 mm de hauteur, pour un poids d'environ 6 t) ont ensuite été ripées sous le chevêtre. La charpente a enfin été placée sur vérins pour la mise en place d'appareils d'appui néoprène matés sous le chevêtre.

Le transfert des efforts vers la nouvelle charpente métallique a été effectué par vérinage le dimanche 14 mars, par l'entreprise Freyssinet pour reprendre 50 % des charges permanentes. Chacun des 4 pieux porteur a été équipé d'un groupe de quatre vérins hydrauliques couplés, chacun des groupes étant piloté indépendamment. Plusieurs scénarios avaient été étudiés par anticipation. Les déplacements observés (rotation du chevêtre et soulèvement de 7 mm) ont été proches de l'hypothèse selon laquelle plus aucun effort ne passait dans le pieu rompu. A l'issue de cette phase, la charpente a été placée sur des appareils d'appui néoprène.

A noter que l'ensemble du chantier s'est déroulé sous surveillance, avec, en particulier, un système d'alarme sonore couplé à l'instrumentation par inclinomètres mise en place par le LRPC de Bordeaux.

La remise en circulation

La pile n°13 et ses travées adjacentes ont été testées à l'aide de cinq camions de 26 tonnes dès la fin du vérinage. Les résultats de ces épreuves ont été satisfaisants, aucune fissure inquiétante n'ayant été observée. Enfin, une inspection a été réalisée autour de l'appui n°13 grâce à une nacelle négative. Aucun désordre significatif n'a été observé.

Compte tenu de ces éléments, le comité d'experts a émis, dès le 15 mars au soir, un avis favorable à la réouverture. Le pont a donc été réouvert à la circulation le 16 mars 2010 à 6h30 avec 19 jours d'avance sur le calendrier initial.



Figure 12 : Vue générale après vérinage – source : DDE 973

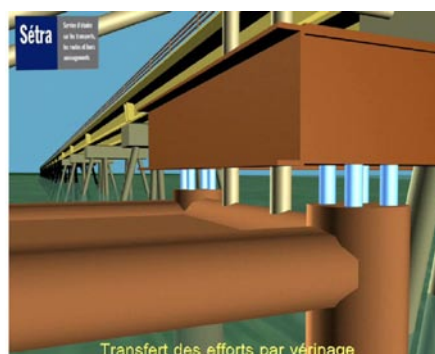


Figure 13 : Cinématique des avaux - Images de synthèses : Gérard Homann, Sétra



Le nouveau guide de conception durable des ponts mixtes acier-béton

Présentation générale du guide

Daniel de Matteis (Sétra), Renaud Léglise (Cete Nord-Picardie)

Avant propos

Le présent article est consacré au nouveau guide de conception durable des ponts routiers mixtes acier-béton édité par le Sétra, dont il résume le contenu et donne les points forts. Il sera complété, dans le prochain numéro de cette revue, par un article écrit par Daniel Lefaucheur justifiant les formules de pré-dimensionnement des bipoutres aux eurocodes proposées dans le guide.

Portée du guide

Ce nouveau document remplace l'ancien guide de conception édité par le Sétra en 1985 et qui a largement contribué au succès des ponts mixtes, tels que nous les construisons aujourd'hui. Son contenu est toutefois assez différent puisqu'il traite non seulement des bipoutres mais aussi des caissons. Il couvre également en détail des sujets peu ou pas couverts par l'ancien guide comme la mise en place de la charpente, la construction de la dalle ou encore les précautions à prendre vis-à-vis de la durabilité. Son chapitre 4, consacré au montage de la charpente, étant par ailleurs très complet, le guide remplace aussi le Bulletin technique n° 08 «Montage des ponts métalliques» édité par le Sétra en 1973.

Structure du guide

Le guide a une structure très proche de celle adoptée pour le guide traitant des ponts à caisson en béton construits par encorbellements successifs. Après un chapitre Introduction, il comporte quatre chapitres consacrés successivement à la conception générale, à la conception détaillée, au montage de la charpente et à l'exécution de la dalle, puis deux chapitres traitant de la maintenance des ouvrages mixtes et de la préparation des DCE.

Analyse du patrimoine récent

Dans le cadre de l'élaboration du guide, un recensement des ouvrages mixtes routiers construits en France de 1995 à 2004 a été entrepris.

Dans le domaine des structures, l'analyse des résultats de ce recensement met en évidence :

- qu'il s'est construit pendant cette période en moyenne une trentaine de ponts mixtes routiers par an, dont seulement deux ou trois en caisson,
- que 70% des ouvrages à poutres sont à entretoises, les 30% restants étant à pièces de pont à consoles, que les ouvrages à pièces de pont sans console ne sont pratiquement plus construits, de même que les ouvrages à dalle précontrainte transversalement.

Dans le domaine des méthodes de construction, l'analyse menée montre que la charpente est mise en place le plus souvent par lançage, sauf pour les ouvrages de taille modeste pour lesquels elle est le plus souvent posée avec des grues mobiles. De même, la dalle est le plus souvent exécutée avec des équipages mobiles sauf lorsque la charpente est complexe (cas des bipoutres à pièces de pont à consoles) ou lorsqu'il faut aller très vite (cas du franchissement d'une voie circulée). Dans ces derniers cas, on privilégie plutôt l'utilisation d'éléments préfabriqués (éléments de largeur totale, de largeur partielle, pré-dalles collaborantes).

Domaine d'emploi

Les progrès effectués par les sidérurgistes et les charpentiers métalliques ainsi que l'absence de pathologies importantes ont permis aux ouvrages mixtes d'étendre fortement leur domaine d'emploi économique. Ils sont désormais très compétitifs pour des portées courantes comprises entre 40 et 110 m, pour des largeurs comprises entre 9 et 25 m, et pour des longueurs totales allant d'une centaine de mètres à plus d'un kilomètre.

Le tableau 1, qui présente quelques ouvrages aux caractéristiques exceptionnelles, illustre d'une autre manière le formidable développement qu'ont connu les ponts mixtes ces vingt-cinq dernières années.

Nom	Dep ^t	Structure	Longueur totale	Largeur totale	Portée maxi
Viaduc sur la Risle (A28)	27	Un bipoutre	1 320 m		
Viaduc sur la Dordogne (A20)	46	Un bipoutre	1 070 m		
Viaduc sur la Vézère (A89)	19	Deux bipoutres	1 002 m		
Viaduc de Verrières (A75)	12	Un caisson			144 m
Pont de Jassans (RD131)	01	Un bipoutre			130 m
Viaduc du Centron aval (RN90)	74	Un bipoutre			125 m
Pont de Triel (RD1/RD154)	78	Deux bipoutres			124 m
Pont Charles de Gaulle à Paris	75	Un caisson		34,90 m en un tablier	
Viaduc sur le canal Saint-Denis (A86)	93	Deux quadripoutres		45 m maxi en 2 tabliers	

Tableau 1 : Quelques ouvrages mixtes remarquables



Le viaduc de Verrières



Le viaduc sur la Vézère pour A89

Conception générale

Le chapitre 2 du nouveau guide présente les principales morphologies longitudinales et transversales envisageables aussi bien pour un bipoutre que pour un caisson, en précisant dans quel contexte ces morphologies peuvent être pertinentes.

Il faut noter que les domaines d'emploi des différentes structures sont de plus en plus vastes soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons esthétiques. Ainsi :

- des bipoutres à entretoises sont de plus en plus souvent utilisés pour des tabliers de 15 m de largeur totale, domaine autrefois réservé aux ouvrages à pièces de pont,
- des pièces de pont sont de plus en plus souvent utilisées sur des tabliers à 2 voies pour des raisons uniquement esthétiques.

Formules de prédimensionnement des bipoutres

Comme son prédécesseur, le nouveau guide donne de nombreuses indications permettant de pré-dimensionner un ouvrage mixte, désormais aux eurocodes.

Pour les ouvrages de type caisson, assez peu nombreux, les formules de l'ancien guide ont été reconduites.

Pour les ouvrages de type bipoutre, de très loin les plus nombreux, le guide propose de nouvelles formules de prédimensionnement des éléments de charpente dont les principales sont regroupées dans le tableau 2 (L_t est la largeur totale du tablier, X sa portée déterminante) :

<p>Hauteur des poutres H pour un bipoutre à entretoises</p>	$\text{Max} \left(\frac{X}{28} \left(\frac{LT}{12} \right)^{0,45}, 0,40 + \frac{X}{35} \right)$ <p>pour un ouvrage de hauteur constante X/24 sur pile et X/36 à mi-travée pour un ouvrage de hauteur variable avec plus de deux travées.</p>
<p>Hauteur des poutres H pour un bipoutres à pièces de pont</p>	$\text{Max} \left(\frac{X}{28} \left(\frac{LT}{12} \right)^{0,333}, 0,40 + \frac{X}{35} \right)$ <p>pour un ouvrage de hauteur constante X/24 sur pile et X/36 à mi-travée pour un ouvrage de hauteur variable avec plus de deux travées.</p>
<p>Largeur des semelles inf. Binf pour un bipoutre à entretoises</p>	$\left(0,25 + \frac{LT}{40} + \frac{X}{125} \right) \left(0,92 + \frac{LT}{150} \right)$
<p>Largeur des semelles inf. Binf pour un bipoutre à pièces de pont</p>	$0,25 + \frac{LT}{40} + \frac{X}{125}$
<p>Largeur des semelles sup. Bsup</p>	<p>Binf - 0,100 pour un tablier à deux voies Binf - 0,200 pour un tablier à quatre voies</p>
<p>Tonnage de charpente pour un bipoutre à entretoises</p>	$63 + 0,9 X^{1,2} \left(1,34 - \frac{LT}{40} \right) + 0,25 X \text{ en kg/m}^2 \text{ de tablier}$
<p>Tonnage de charpente pour un bipoutre à pièces de pont</p>	$65 + 0,9 X^{1,2} \left(1,43 - \frac{LT}{30} \right) + 2 LT + 0,22 X \text{ en kg/m}^2$

Tableau 2 : Formules de prédimensionnement des bipoutres mixtes

Conception détaillée

Le chapitre 3 du guide donne toutes les précisions nécessaires à l'élaboration d'un projet détaillé de tablier mixte. Pour ce faire, il rapproche des informations issues de documents très divers tels que des guides Sétra (sur la fatigue, sur la maîtrise de la fissuration, sur l'exécution des charpentes) ou des articles de revues spécialisées. Ces précisions sont dans l'ensemble bien connues des ingénieurs en ouvrages d'art. Parmi les dispositions nouvelles, car issues des eurocodes, on notera toutefois :

- sur certains ouvrages, la nécessité de renforcer ou de rapprocher les entretoises des bipoutres à entretoises, près des piles, voire de renforcer les pièces de pont des bipoutres à pièces de pont, pour respecter les sévères conditions de non- déversement des semelles inférieures des poutres principales,
- dans les dalles préfabriquées, les enjeux liés au clavage qui peuvent imposer d'utiliser des barres de diamètre limité à 16 mm.

Montage de la charpente

Le chapitre 4 du nouveau guide traite spécifiquement du transport et du montage de la charpente métallique, depuis son départ de l'usine jusqu'à sa mise sur appuis définitifs.

Il aborde tout d'abord le thème du transport de la charpente sous l'angle des possibilités qui sont offertes par le transport routier, le transport ferroviaire ou la voie d'eau et des performances et contraintes inhérentes à chacun de ces modes.

Il détaille ensuite les différentes méthodes de montage de la charpente, au premier rang desquelles le lançage, mais également le montage à la grue ou à la bigue ou encore d'autres techniques de mise en place plus rares d'emploi, comme le ripage, le hissage, etc...

Pour chacun des procédés de montage abordés, le guide s'attache à préciser son domaine d'emploi privilégié, ses contraintes propres, la technologie nécessaire (chaises à galets, patins de glissement, guidage latéral, avant-becs, etc.), les précautions à prendre et le traitement de certains cas particuliers (en fonction des spécificités géométriques, de la nature des voies franchies, etc...). Ainsi, dans le cas du lançage, on trouvera des conseils notamment sur les configurations d'ouvrages courbes ou biais, de hauteur variable, de largeur variable, etc.

Exécution de la dalle

Le chapitre 5 du nouveau guide est entièrement consacré aux différentes techniques de construction de la dalle.

Il comporte une première grande partie consacrée au coulage en place à l'aide d'équipages mobiles qui détaille la conception de ces outils, leurs modalités d'avancement et les techniques de mise en place du ferrailage et, ce, pour tous les types de charpente. Pour les ouvrages de type bipoutres à entretoises, de loin les plus nombreux, on retiendra notamment :

- que la dalle est construite le plus souvent avec deux équipages mobiles, ce qui permet de travailler dans l'équipage B pendant que le béton durcit dans l'équipage A,
- que le ferrailage n'est quasiment plus exécuté dans l'embarras des équipages mobiles mais préfabriqué au sol puis posé sur la charpente,
- que la longueur des plots et des équipages varie entre 8 et 20 m, alors que la longueur des plots de ferrailage est comprise entre 11 et 12 m.



Construction de la dalle avec des équipages mobiles



Construction de la dalle par éléments préfabriqués



Le chapitre 5 présente ensuite des méthodes de construction un peu moins courantes comme la préfabrication de la dalle (par éléments complets ou partiels), la construction avec utilisation de pré-dalles, collaborantes ou non, la construction par plots sur une charpente provisoire boulonnée à l'arrière de la charpente définitive suivie d'un poussage...

Compte tenu des difficultés spécifiques à la réalisation des dalles préfabriquées, le guide recommande de privilégier la construction par équipages mobiles. La préfabrication présente toutefois des avantages indiscutables lorsque la dalle doit être exécutée très rapidement (ouvrages franchissant des voies très circulées) ou lorsque la charpente est complexe (ouvrages à pièces de pont avec consoles). Dans ces conditions, le projet de base doit prévoir toutes les dispositions garantissant la constructibilité et la durabilité de l'ouvrage, aussi bien sur les plans que dans le CCTP.

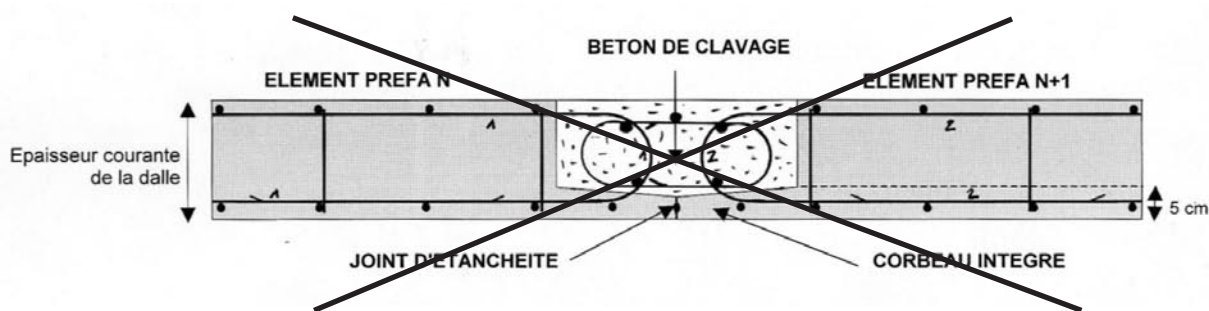


Figure 1 : Disposition déconseillée dans le cas de dalles préfabriquées de pleine largeur

Cette technique impose en effet une reprise de bétonnage parallèle aux aciers longitudinaux et très proche d'eux, ainsi qu'un manque d'enrobage des aciers longitudinaux inférieurs au droit des joints d'étanchéité.

Dispositions favorisant la maintenance et la durabilité

Le chapitre 6 du guide est entièrement consacré aux dispositions à prendre pour permettre la surveillance et la maintenance de l'ouvrage.

En ce qui concerne les ouvrages mixtes, outre les précautions habituelles, le guide rappelle les différentes classes d'environnement (ou catégories de corrosivité) et recommande d'opter pour une classe de peinture supérieure d'un point à celle de la classe d'environnement constatée.

Le guide donne ensuite de nombreuses indications pour faciliter la circulation dans un caisson et choisir le système de protection anticorrosion à mettre en oeuvre sur ses faces intérieures. Pour ces structures, le guide recommande de peindre les surfaces métalliques internes du caisson, même si un déshumidificateur est utilisé pour assécher l'air et limiter le risque de corrosion. En effet, un primaire de couleur claire favorise la détection des éventuelles fissures et évite un sablage général des tôles en cas d'abandon définitif du déshumidificateur.

Enfin, le guide signale de nombreux cas de décollements de la couche de finition sur la face inférieure de la membrure inférieure. Bien qu'aucune enquête approfondie n'ait eu lieu, ces décollements semblent dus soit à un délai de recouvrement trop important entre cette couche et la couche de peinture précédente, soit à un taux d'humidité trop élevé au moment de l'exécution de la couche de finition. Il est donc rappelé la nécessité de mettre en oeuvre le système de protection en respectant toutes les recommandations du chapitre 3 du fascicule 56 du CCTG et notamment celles concernant, d'une part, le délai maximal entre deux couches et, d'autre part, le degré maximal d'hygrométrie.

Prise en compte des dispositifs antisismiques dans les calculs ouvrages d'art sous séisme

Aurélie Vivier⁽¹⁾, Denis Davi⁽²⁾

1. - Introduction

L'Eurocode 8 relatif au calcul des structures pour leur résistance aux séismes exige que les structures répondent aux exigences de non-effondrement, de fonctionnalité d'urgence et de réparabilité sous l'effet d'un séisme de référence. Pour répondre à ces exigences, l'Eurocode 8-2 spécifique aux ponts propose trois types de conception des ouvrages d'art : la conception élastique, la conception ductile ou la conception basée sur les principes d'isolation sismique et d'amortissement. Avant de présenter en détail le troisième type de conception qui fait l'objet de cet article, ce chapitre introductif rappelle sommairement les avantages et inconvénients des différentes conceptions parasismiques.

La conception élastique consiste à dimensionner la structure de façon à ce que les matériaux constitutifs restent dans leur domaine de comportement élastique. Aucune réparation post-sismique n'est en principe à prévoir. Avantageuse dans les zones peu sismiques, cette conception s'avère généralement techniquement impossible ou d'un coût prohibitif dans les régions où le risque sismique est plus élevé. La notion de ductilité limitée élargit cette conception au delà du comportement idéalement élastique en autorisant des incursions limitées dans le domaine plastique des matériaux (typiquement, on observe que ces incursions limitées correspondent à peu près aux limites conventionnelles ELU au sens du BAEL, soit 3,5% pour le béton et 10% pour l'acier).

La conception ductile consiste au contraire à autoriser de larges incursions répétées et alternées (phénomène cyclique) dans le domaine plastique des matériaux dans certaines parties de l'ouvrage afin de dissiper de l'énergie et diminuer les niveaux d'efforts transmis au reste de la structure. Cela conduit à mettre en œuvre des dispositions constructives contraignantes dans les zones de dissipation d'énergie. Il convient de noter qu'un certain niveau d'endommagement est ici admis, car il optimise la réponse dynamique de la structure (par assouplissement et mécanisme dissipatif par hystérésis), mais peut conduire à des travaux de réparation suite à un tremblement de terre majeur.

Enfin, le troisième type de conception est basé sur le principe d'isolation sismique et l'utilisation de dispositifs antisismiques dissipateurs d'énergie. La quasi-totalité de l'énergie du tremblement de terre est filtrée par les isolateurs ou absorbée dans des dispositifs dissipateurs tandis que les

¹ Sétra/CTOA/DGO

² CETE Méditerranée/DCEDI/DOA



éléments structuraux de l'ouvrage ne subissent en théorie aucun dégât, les matériaux constitutifs restant dans leur domaine élastique de comportement. En cas de séisme majeur, les dispositifs sont facilement inspectés et remplacés si nécessaire. En contrepartie, les calculs de dimensionnement sont complexes. Enfin, le coût et l'entretien des dispositifs antisismiques et la difficulté des calculs associés réservent généralement leur utilisation aux zones où l'aléa sismique est important et/ou aux ouvrages à caractère exceptionnel en termes de dimensions ou d'enjeu socio-économiques.

Dans cet article, nous présenterons les différents types de dispositifs antisismiques ainsi que les méthodes d'analyse correspondantes, issues de l'EC8-2 ou extraites de la littérature scientifique spécialisée. Nous insisterons notamment sur les méthodes de calcul simplifiées et de prédimensionnement et nous effectuerons une comparaison avec des méthodes plus sophistiquées. Enfin nous donnerons quelques recommandations pour la mise en œuvre pratique des dispositifs antisismiques sur les ouvrages. Cet article ne présente que les méthodes relatives au dimensionnement des dispositifs. Pour l'analyse globale des ouvrages, il conviendra de se référer aux guides Sétra à paraître «Ponts en zone sismique – Guide de conception» pour les ouvrages neufs et «Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants» pour les ouvrages existants ou encore au guide Sétra/AFPS, également à paraître, « Dispositifs antisismiques pour les ponts ».

2. - Dispositifs courants

Les dispositifs antisismiques ont pour but d'absorber une partie de l'énergie transmise par le séisme à la structure. Ainsi, la part transmise aux éléments structurels et dissipée sous forme d'endommagement s'en trouve réduite, les matériaux restant dans leur domaine élastique de comportement. Il existe différents types de dispositifs antisismiques utilisables en ouvrages d'art, que ce soit pour la conception des ouvrages neufs ou le renforcement des ouvrages existants. Ces dispositifs peuvent avoir des comportements bien distincts, mais leur objectif est généralement similaire, et consiste d'une part à filtrer la transmission des efforts horizontaux entre le tablier et les appuis (isolation sismique), et d'autre part à amortir les vibrations et déplacements sismiques engendrés. Les principaux types de dispositifs antisismiques sont décrits dans ce chapitre.

Nous rappelons que pour assurer le bon fonctionnement dans le temps de ces dispositifs, il convient de procéder à des opérations d'inspection et de maintenance périodiquement. Leurs caractéristiques mécaniques sont définies et garanties par des essais en laboratoire, selon les recommandations de la norme EN15129 «Dispositifs antisismiques». Quant aux éléments de dimensionnement, ils sont fournis à la fois dans l'Eurocode 8-2 et dans la norme EN15129.

2.1. - Dispositifs et lois de comportement

Un dispositif dissipateur est caractérisé dans le cas le plus général par la loi de comportement suivante :

$$F = F_0 + K.X + C.V^\alpha$$

avec :

F_0 : force seuil de déclenchement (effet fusible)

$K.X$: fonction ressort pur : aucune dissipation d'énergie

$C.V^\alpha$: fonction amortisseur pur : dissipation d'énergie sans rigidité

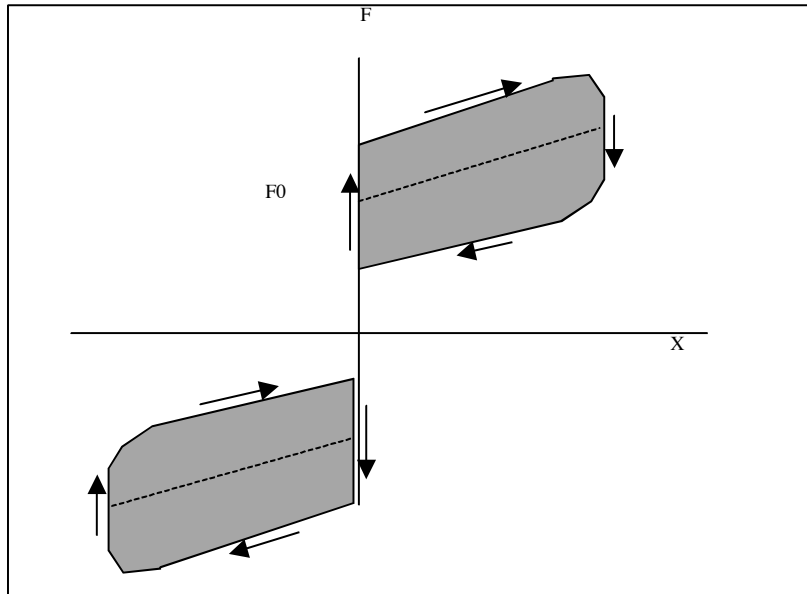
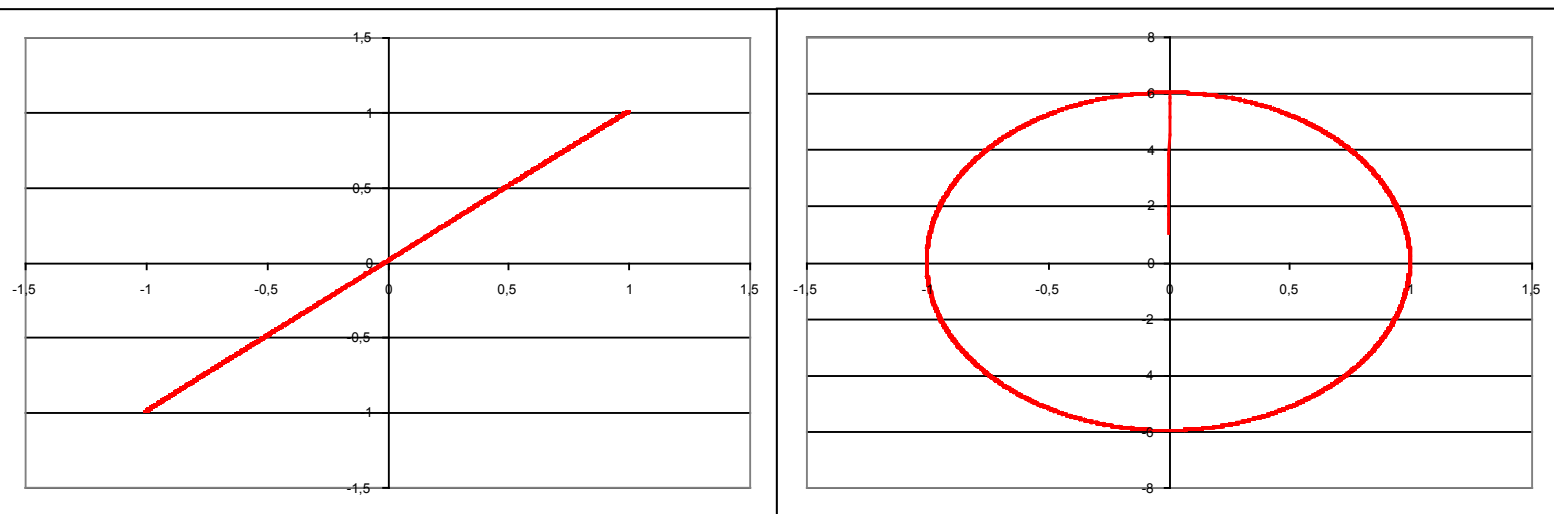


Figure 1 : Principe de fonctionnement des dispositifs sous sollicitations harmoniques



Effet de K seul : rigidité mais pas de dissipation d'énergie

Effet de C seul : dissipation d'énergie sans rigidité

Figure 2 : Loi de comportement des dispositifs sous sollicitations harmoniques

2.1.1. - Les appareils d'appui en élastomère

Les appareils d'appui en élastomère fretté sont composés de couches d'élastomère, renforcé par des frettes en acier. Il existe deux familles d'appareils d'appui en élastomère :

- les appareils d'appui à faible amortissement ($\xi \leq 0,06$), pour lesquels on ne tient compte que de leur raideur et non de leur fonction amortissement (appareils d'appui classiquement utilisés en situation non sismique).
- les appareils d'appui à fort amortissement ($\xi = 0,10$ à $0,20$), qui possèdent quant-à-eux un fort pouvoir amortissant.



Figure 3 : Exemple d'appareil d'appui en élastomère

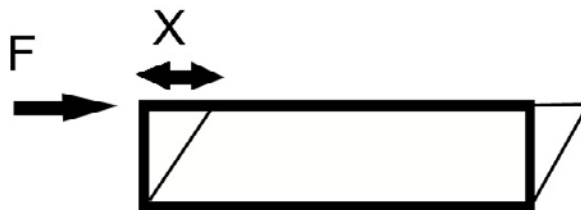
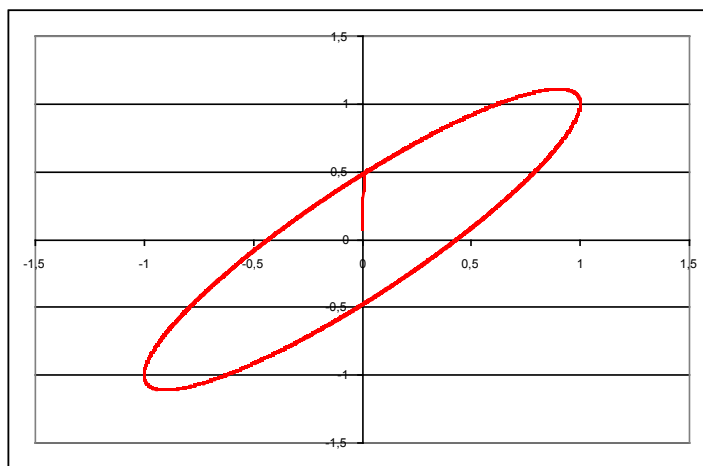


Figure 4 : Principe de fonctionnement des dispositifs



$$F = K \cdot x + C \cdot V$$

Figure 5 : Loi de comportement des appareils d'appui en élastomère sous sollicitations harmoniques

2.1.2. - Les dispositifs élastoplastiques

Ces dispositifs dissipateurs comportent une ou plusieurs pièces métalliques dont le rôle est d'absorber les efforts sismiques horizontaux et de dissiper l'énergie par plastification alternée du matériau. Ces éléments peuvent être combinés avec un appareil d'appui classique destiné à transmettre uniquement les charges verticales. Les appareils d'appui en élastomère fretté avec noyau de plomb entrent également dans cette catégorie.

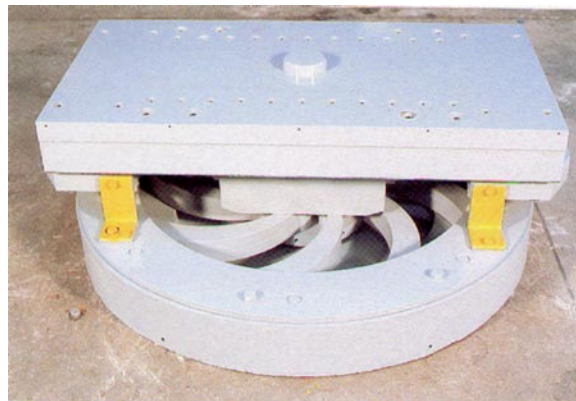
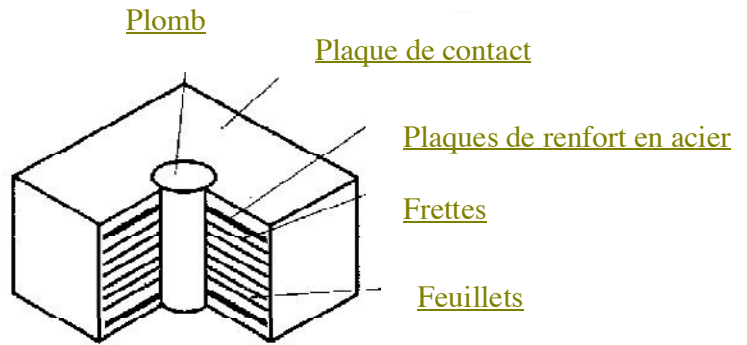
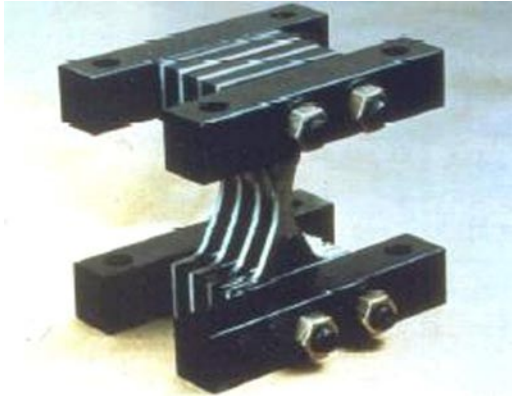
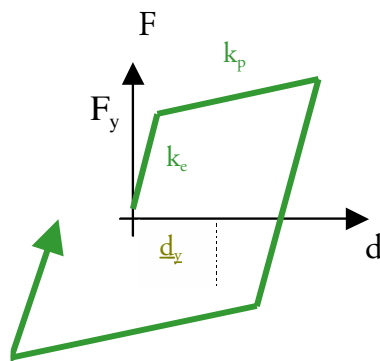


Figure 6 : Exemples de dispositifs élastoplastiques



$$F = -\text{signe}(V) Kx$$

avec $K = k_s$ si $F < F_y$
 $K = k_p$ si $F > F_y$

Figure 8 : Loi de comportement des dispositifs élastoplastiques
 Sources : Bechtel Corporation, FIP Industriale, Priestley et al.



Figure 9 : Exemple de dispositif à frottement

2.1.3. - Les dispositifs à frottement

Les dispositifs à frottement comportent deux surfaces de frottement en vis-à-vis soumises à un effort normal. Ils sont généralement combinés à un appareil d'appui disposant d'une raideur horizontale de façon à assurer le rôle de point fixe et un effet de recentrement. Les appareils d'appui glissants téflon-inox, largement utilisés dans le domaine des ponts pour libérer les déplacements de longue durée du tablier, sont des dispositifs isolateurs peu frottants.

Compte tenu du comportement non linéaire du système d'une part et de l'incertitude sur la valeur du coefficient de frottement en situation dynamique associée à des vibrations verticales d'autre part, la résistance horizontale des appareils glissants classiques est souvent négligée dans l'analyse. En revanche, certains dispositifs à coefficients de frottement volontairement élevés peuvent être utilisés en conception parasismique. La surface de contact peut en outre être incurvée de façon à augmenter la rigidité latérale et assurer la fonction de recentrement. Le glissement intervient lorsque la force sismique dépasse la résistance maximale développée par le frottement, ainsi une partie de l'énergie du séisme est dissipée sous forme de chaleur par phénomène de friction.

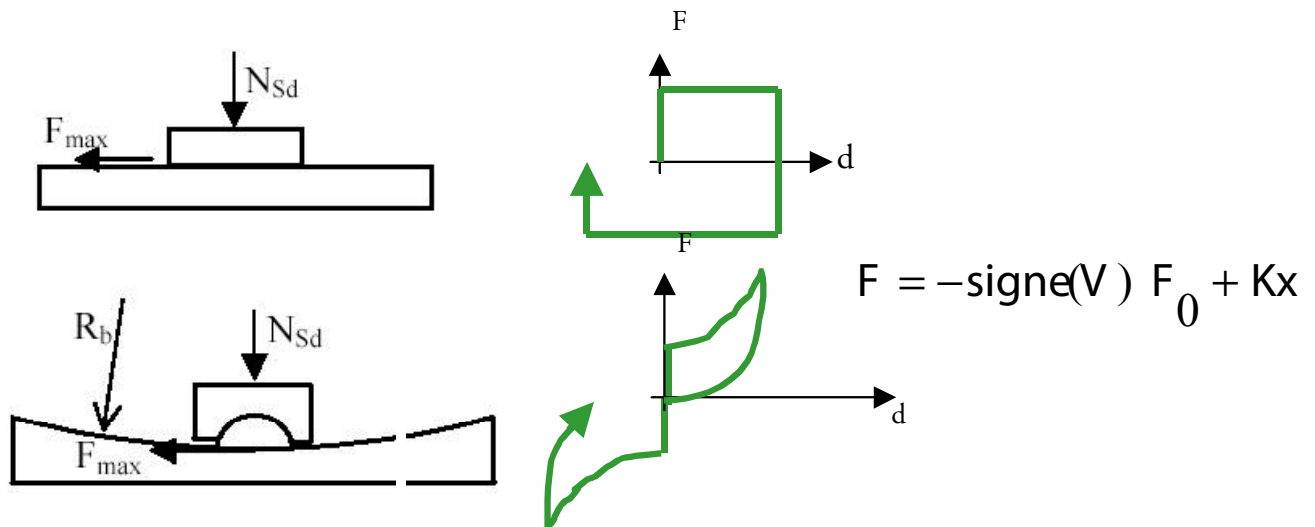


Figure 10 : Principe de fonctionnement des dispositifs

2.1.4. - Les amortisseurs visqueux

Ces dispositifs sont assimilables à des vérins «hydrauliques» à double effet et à forte capacité de dissipation d'énergie. Ils comportent couramment deux chambres remplies d'un fluide (huile hydraulique ou pâte silicone). Celles-ci sont reliées l'une à l'autre par des «soupapes» calibrées de façon à permettre des déplacements lents et une dissipation d'énergie générée par frottement visqueux du fluide sous l'effet du mouvement sismique (rapide).



Figure 12 : Exemples de dispositifs amortisseurs
Source : Jarret

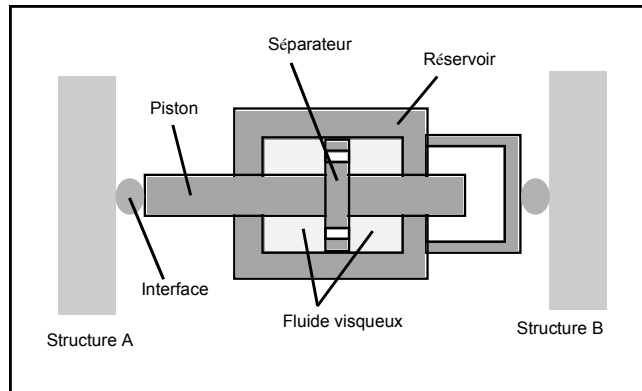


Figure 13 : Principe de fonctionnement des dispositifs
Source : Jarret

Réaction Amortisseur / Déplacement relatif du tablier

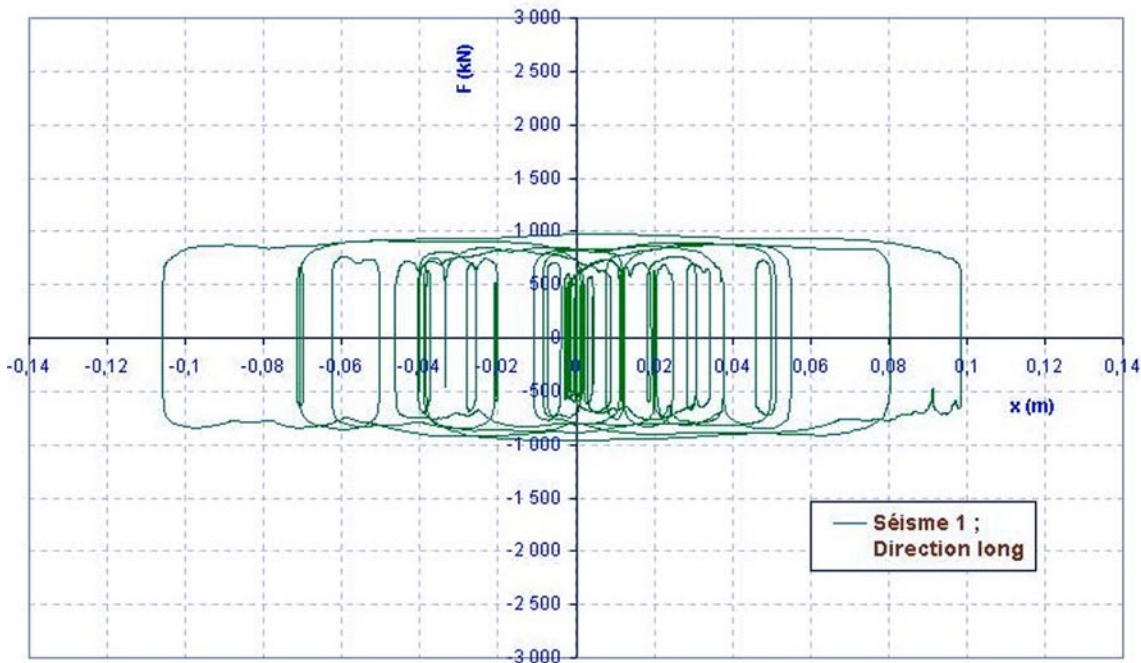


Figure 14 : Loi de comportement des amortisseurs visqueux



La relation entre la force d'amortissement F et la vitesse relative V peut s'écrire $F = CV^\alpha$, où C et α sont des paramètres qui dépendent de la loi de comportement du fluide.

La figure 15 montre les courbes des lois de comportement de ces amortisseurs soumis à une excitation sinusoïdale. La courbe elliptique correspond à celle de l'amortissement visqueux linéaire ($\alpha = 1$) et le rectangle à celle de l'amortissement non linéaire rectangulaire ($\alpha = 0$). Pour des valeurs de α intermédiaires (comprises entre 0 et 1, les courbes, en réalité légèrement déformées, se trouvent dans la zone comprise entre l'ellipse et le rectangle.

L'énergie dissipée par cycle correspond à l'aire du diagramme «Force-Déplacement». Par conséquent, plus la valeur de α est petite, plus l'énergie dissipée, pour une même valeur de force maximale d'amortissement, est élevée.

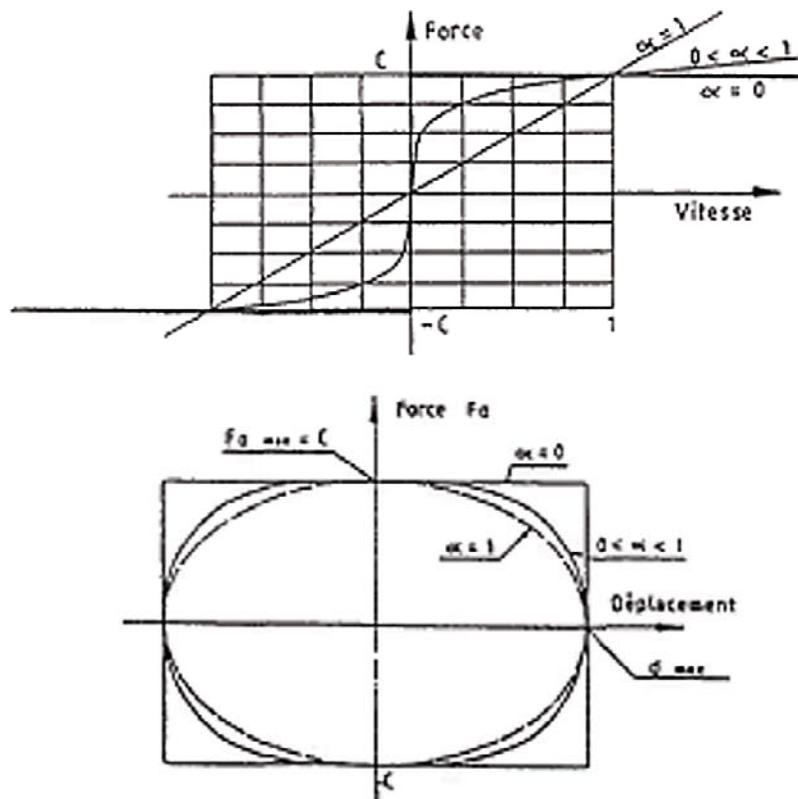


Figure 15 : Énergie dissipée par cycle sous sollicitation harmonique

2.1.5. - Les amortisseurs à ressort précontraint



Figure 16 : Exemples de dispositifs amortisseurs à ressort précontraint

Ces amortisseurs sont composés d'un ressort et d'un amortisseur pur de type visqueux. Le ressort est précontraint, c'est à dire qu'il ne se déclenche que pour une valeur seuil de l'effort appliqué. Les dispositifs de ce type présentent deux avantages majeurs :

- ils bloquent les mouvements en service (point fixe sous dilatations thermiques ou reprise des efforts de vent ou de freinage par exemple) et ne se déclenchent que sous sollicitations sismiques, lorsqu'elles atteignent le seuil de déclenchement (ou seuil fusible) ;
- ils repositionnent l'ouvrage dans sa position "d'origine" après un séisme.

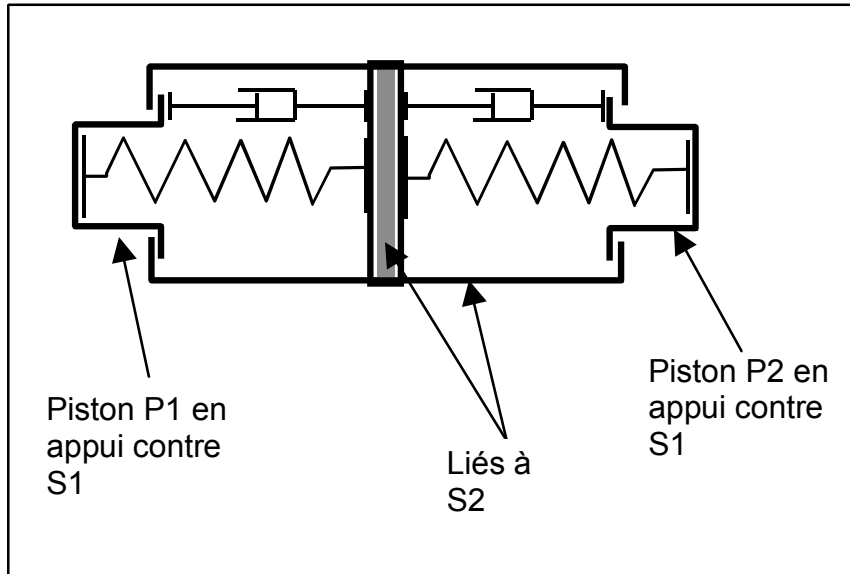


Figure 17 : Principe de fonctionnement des dispositifs - Source : Jarret

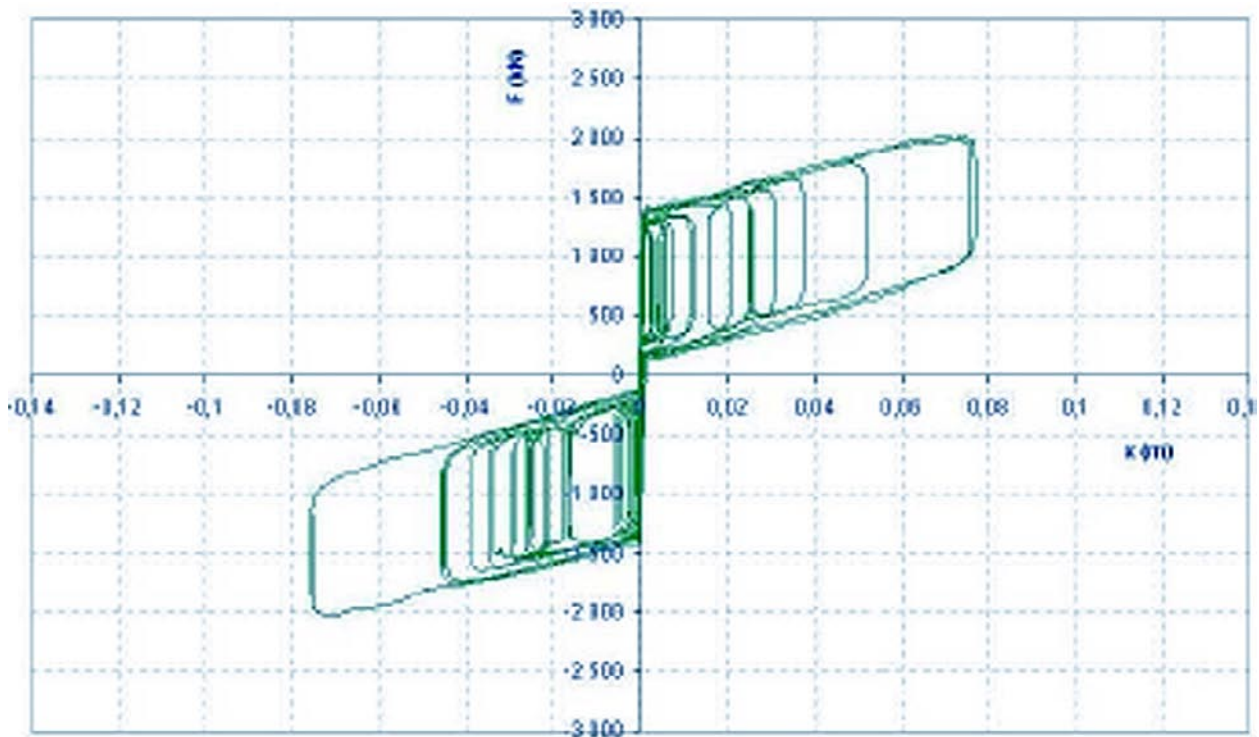


Figure 18 : Loi de comportement des amortisseurs à ressort précontraint

3. - Méthodes d'analyse et domaine d'emploi

Comme le montrent les courbes de comportement du paragraphe précédent, le fonctionnement des dispositifs antisismiques peut s'avérer relativement complexe à modéliser. Leur comportement est non-linéaire et peut varier en fonction des vitesses de sollicitation, comme dans le cas des amortisseurs visqueux. Du fait de cette dépendance, seul un calcul temporel non-linéaire permet de modéliser de façon exacte leur comportement sous séisme. Néanmoins, des méthodes simplifiées existent et permettent leur prédimensionnement.

Les dispositifs amortisseurs étant les plus employés, nous avons retenu cet exemple dans ce chapitre.

3.1. - Calcul monomodal équivalent

3.1.1. - Analyse spectrale par le mode fondamental (Eurocode 8-2 §7.5.4)

L'Eurocode 8-2 (§7.5.4) propose une méthode de calcul simplifiée basée sur les caractéristiques linéaires équivalentes des dispositifs, et sur une approche spectrale monomodale. En général, cette méthode est utilisée en prédimensionnement, pour le choix des gammes de dispositifs ou pour fixer les ordres de grandeur des efforts et déplacements obtenus.

Elle peut être décrite de la façon suivante :

a- La raideur équivalente du dispositif est évaluée comme le rapport $K_{\text{eff}} = F_{\text{max}} / d_{\text{bd}}$, obtenu en divisant la force maximale F_{max} associée au déplacement de calcul d_{cd} du système complet (structure complète équipée d'amortisseurs), par le déplacement d_{bd} obtenu dans l'amortisseur correspondant à ce même déplacement d_{cd} du système complet (figure 19) :

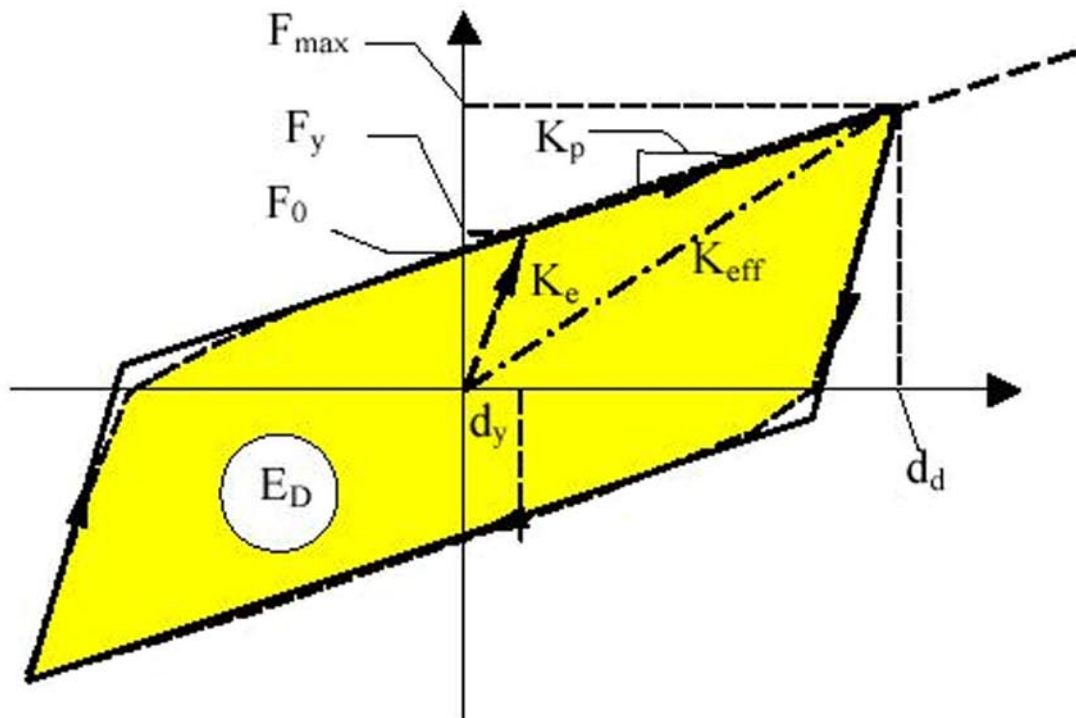


Figure 19 : Caractéristiques équivalentes des dispositifs amortisseurs (EC8-2)

b- La raideur équivalente globale du système est donnée par la somme des raideurs équivalentes des éléments participant à la reprise de l'effort sismique dans la direction considérée : $K_{\text{eff}} = \sum K_{\text{eff},i}$; où $K_{\text{eff},i}$ représente la raideur équivalente (en série) de l'amortisseur i et de l'appui (pile) qui le supporte.

c- Le coefficient d'amortissement global équivalent ξ_{eff} est évalué à partir de la somme des énergies $E_{D,i}$ dissipées par tous les amortisseurs i dans un cycle complet de déformation au déplacement de calcul d_{cd} :

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{D,i}}{K_{\text{eff}} \cdot d_{\text{cd}}^2} \right]$$
 où $E_{D,i}$ représente la surface balayée par la courbe de comportement du dispositif au cours d'un cycle (surface jaune sur la figure 19).

Ceci revient à modéliser l'amortissement local comme une augmentation de l'amortissement global.

d- À partir des caractéristiques équivalentes K_{eff} et ξ_{eff} , on peut alors calculer la période équivalente et le coefficient de modification spectrale lié à l'amortissement, permettant de réaliser le calcul spectral monomodal :

$$T_{\text{eff}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{\text{tab}}}{K_{\text{eff}}}} \quad \text{et} \quad \eta_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{0,10}{0,05 + \xi_{\text{eff}}}}$$

e- À partir des caractéristiques équivalentes T_{eff} et η_{eff} , on peut alors déterminer la valeur de l'accélération spectrale et du déplacement de calcul sur les spectres élastiques en accélération et en déplacement intégrant le cas échéant le coefficient d'amplification topographique τ et caractérisés à partir des équations suivantes :

T_{eff}	s_e	d_{cd}
$T_C \leq T_{\text{eff}} < T_D$	$2,5 \frac{T_C}{T_{\text{eff}}} \eta_{\text{eff}} a_g s$	$\frac{T_{\text{eff}}}{T_C} d_c$
$T_D \leq T_{\text{eff}} \leq 4s$	$2,5 \frac{T_C T_D}{T_{\text{eff}}} s \eta_{\text{eff}} a_g$	$\frac{T_D}{T_C} d_c$

avec :

a_g , l'accélération de calcul, fonction du coefficient d'importance γ_I de l'ouvrage et de l'accélération au rocher de référence, $a_{g,R}$:

$$a_g = \gamma_I a_{g,R}$$

S , le coefficient de sol

T_C , et T_D , les périodes caractérisant le spectre de calcul dépendant du type de sol

d_c , le déplacement à la période T_C :

$$d_c = \frac{0.625}{\pi^2} a_g S \eta_{\text{eff}} T_C^2$$

En pratique, cette méthode nécessite quelques itérations sur la valeur du déplacement de calcul d_{cd} .

Généralement, dans le cas d'une conception parasismique basée sur l'utilisation de dispositifs amortisseurs, un coefficient d'amortissement global ξ_{eff} de l'ordre de 20 à 30% peut être visé, ce qui conduit à une réduction globale des efforts et des déplacements d'environ 50%.

3.1.2. - Méthode de prédimensionnement pour les amortisseurs en cv^α , développée par Michel Kahan

Cette méthode est explicitée dans le guide AFPS "Dispositifs antisismiques pour les ponts" à paraître.

Dans le cas d'un tablier rigide, les mouvements de la structure se réduisent à ceux d'un oscillateur simple. A partir de la période de la structure non amortie, on en déduit le déplacement élastique, que l'on réduit par un coefficient de réduction pour obtenir le déplacement cible. On calcule alors l'amortissement équivalent total, puis l'amortissement structurel provenant des amortisseurs seuls. Cela permet de déterminer le paramètre c de l'amortisseur ainsi que la force maximale F qu'il reprend.

M : Masse de la structure

K : Raideur de la structure

T : Période de la structure $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$

a_g : Accélération de calcul

$S_e(T)$: Spectre élastique de calcul pour un amortissement de 5% (ou amplification spectrale élastique à la période T)

$d_{élastique}$: Déplacement élastique $d_{élastique} = a_g \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_e(T)$

ρ : Coefficient de réduction des déplacements $\xi_{eq} = \frac{0.1}{\rho^2} - 0.05$

ξ_{eq} : Taux d'amortissement global équivalent

ξ : Taux d'amortissement des amortisseurs uniquement $\xi = \xi_{eq} - 0.05$

α : Exposant dans la relation $F = cv^\alpha$

c : Paramètre de l'amortisseur $c = m \frac{4\pi}{T} \xi \frac{1}{h(\alpha)} \left[a_g \rho \frac{T}{2\pi} S_e(T) \right]^{1-\alpha}$ avec $h(\alpha)$ donné par le tableau suivant.

α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$h(\alpha)$	1,273	1,236	1,201	1,170	1,140	1,113	1,087	1,063	1,041	1,020	1,000

F_{max} : Force maximum dans l'amortisseur $F_{max} \approx c \left[\frac{T}{2\pi} \rho a_g S_e(T) \right]^\alpha$

3.1.3. - Méthode basée sur l'énergie dissipée par les amortisseurs

Cette méthode est basée sur le calcul de l'énergie dissipée par les amortisseurs. En définissant les caractéristiques du système ainsi que le déplacement correspondant à un amortissement modal de 30%, on calcule l'énergie dissipée. On en déduit le paramètre c ainsi que le déplacement maximum, d_{\max} , qui permet de calculer la force maximum dans l'amortisseur, F_{\max} .

m : masse

f : fréquence

ω : pulsation propre

k : raideur : $k = \omega^2 \cdot m$

d_{\max} = déplacement cible

T : période propre $T = 1/f$

ξ : amortissement

α : paramètre de l'amortisseur

V_{\max} : vitesse maximum : $V = d_{\max} \cdot \omega$

F_{\max} : force maximale dans l'amortisseur : $F_{\max} = \frac{\pi \cdot k \cdot d_{\max} \cdot \xi}{2}$

E : énergie dissipée : $E = 4 \cdot F_{\max} \cdot d_{\max}$

$d(t)$: déplacement en fonction du temps : $d(t) = d_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$

$v(t)$: vitesse en fonction du temps : $V(t) = V_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$

$F(v)$: force maximale dans l'amortisseur en fonction de la vitesse :

$$F(v) = F_{\max} \left(\left| \frac{v}{V_{\max}} \right| \right)^{\alpha} \frac{v}{|v|}$$

$Ft(t)$: force maximale dans l'amortisseur en fonction du temps : $Ft(t) = F(V(t))$

E_{reel} : énergie réellement dissipée : $E_{\text{reel}} = \int_0^T Ft(t) \mathcal{V}(t) dt$ que l'on compare à l'énergie dissipée calculée précédemment.

$\mathcal{V}(t)$ c : constante de l'amortisseur : $c = F_{\max} / V_{\max}^{\alpha}$

$$\xi_{\text{reel}} : \text{amortissement réel} : \xi_{\text{reel}} = \frac{E_{\text{reel}}}{\omega \cdot m \cdot V_{\max}^2 \cdot T}$$

3.2. - Analyse dynamique temporelle

Dans le cas des dispositifs antisismiques, l'analyse temporelle est assez simple à réaliser puisque la structure doit rester élastique, et que toutes les non-linéarités sont concentrées dans les dispositifs. Il faut néanmoins faire appel à des logiciels capables de modéliser ces dispositifs, avec suffisamment de souplesse pour pouvoir intégrer n'importe quelle loi de comportement, y compris lorsque la force dépend du signe du déplacement (un tel comportement peut créer des problèmes de convergence numérique).

La seconde difficulté est de bien choisir le pas de temps, qui doit être suffisamment faible pour que l'analyse soit valable, sans pour autant augmenter inutilement les temps de calculs. Le pas de temps maximal dépend du type de schéma d'intégration utilisé, du maillage de la structure, mais aussi du comportement non-linéaire proprement dit, et de la façon dont il s'écarte du comportement linéaire.

A défaut de logiciel adapté, une programmation « à la main » peut être utilisée lorsque le nombre de degrés de liberté est faible, ce qui est souvent le cas lorsqu'on utilise ce type de dispositifs qui permettent découplage quasi parfait entre la réponse du tablier (qui se comporte alors comme un bloc rigide) et celle des appuis. Dans le cas particulier à un seul degré de liberté, l'équation de la dynamique peut se discrétiser, par exemple, par l'expression de Newmark :

$$m \left(\frac{x(t + \Delta t) - 2x(t) + x(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \right) = -kx(t) + F \left[x(t), \left(\frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} \right) \right] + m\ddot{u}(t)$$

avec :

$F(x(t), \dot{x}(t))$ représente la force exercée par l'amortisseur, qui dépend du déplacement et de la vitesse relative, et $\ddot{u}(t)$ l'accélération du sol (connue par l'accélérogramme).

m est la masse du tablier, associée à la demi-masse des piles encastrées, le cas échéant

k est la raideur du système d'appui (piles et appareils d'appui)

Cette expression permet, connaissant le déplacement aux instants t et $t - \Delta t$, de le déterminer à l'instant $t + \Delta t$.

Il faut noter que d'autres algorithmes que le schéma de Newmark sont disponibles dans la littérature pour résoudre l'équation de la dynamique.

Cette programmation «à la main» peut être généralisée à un système à plusieurs degrés de liberté à condition d'écrire correctement le système mécanique.

4. - Comparaison des méthodes

4.1. - Comparaison des méthodes de prédimensionnement

Afin d'évaluer la pertinence des méthodes exposées précédemment, il semble pertinent de les comparer sur un exemple simple.

Hypothèses de calcul :

Ouvrage 3 travées (10m-16m-10m)

2 piles, chacune composée de 2 fûts de section 2,50x0,80m, hauteur 5,50m

Appareils d'appui glissants sur culées, 2 néoprènes 400x400x5(10+3) par fût, soit 8 appareils d'appui au total

Masse tablier : $M_{\text{tab}} = 850 \text{ t}$

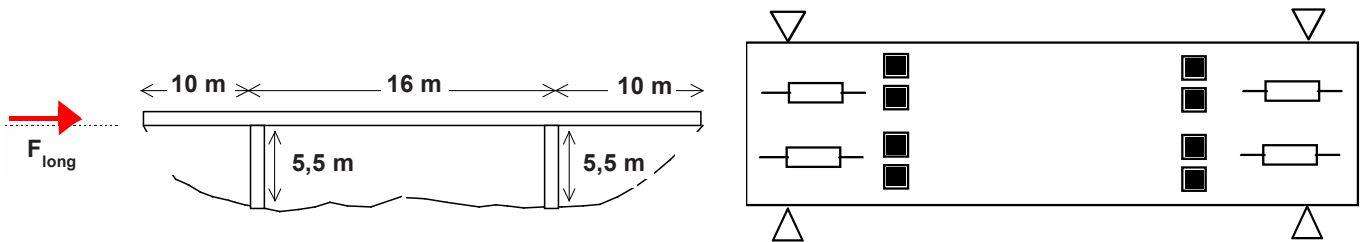
Raideur du système d'appui : $K_{\text{appuis}} = 23400 \text{ kN/m}$

Béton : $f_{\text{ck}} = 35 \text{ MPa}$; $E_c = 36\,000 \text{ MPa}$; $\rho = 2,5 \text{ t/m}^3$

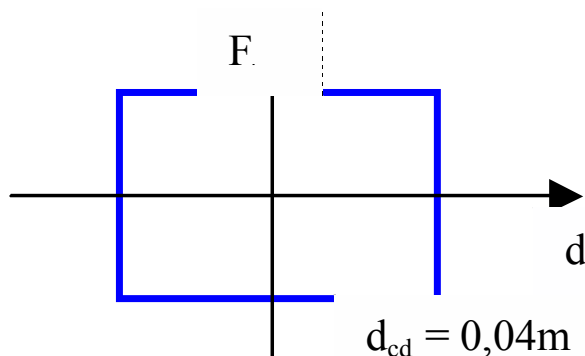
Néoprène : $G = 1 \text{ Mpa}$

Données sismiques : zone Z4 (Métropole sismicité moyenne), catégorie d'importance III, sol de catégorie C

=> $A_{\text{Ed}} = 2,24 \text{ m/s}^2$, $S=1,5$, $T_B=0,06$, $T_C=0,40 \text{ s}$ et $T_D=2 \text{ s}$



On dispose longitudinalement 2 amortisseurs visqueux $F=C.V^{0,10}$ sur chacune des culées. L'objectif étant de limiter les déplacements sous séisme longitudinal à 4 cm.



Méthode de l'Eurocode 8	Méthode M. Kahan	Méthode sur l'énergie dissipée
<p>On retient un amortissement de 30% : $\xi_{\text{eff}} = 0.30$</p> <p>Soit un coefficient de modification spectral de :</p> $\eta_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{0.1}{0.05 + \xi_{\text{eff}}}} = 0.53$ <p>on en déduit donc le déplacement d_c, à la période T_c :</p> $d_c = \frac{0.625}{\pi^2} a_g S \eta_{\text{eff}} T_c^2 = 0.2 \text{ m}$ <p>puis la période efficace cible :</p> $T_{\text{eff}} = \frac{T_c d_{dc}}{d_c} = 0.88 \text{ s}$ <p>et la raideur efficace cible :</p> $K_{\text{eff}} = \frac{4\pi^2 M_{\text{tot}}}{T_{\text{eff}}^2} = 43406 \text{ kN/m}$ <p>Connaissant la raideur des appuis, nous en déduisons la raideur apportée par les amortisseurs :</p> $K_{\text{amort}} = \frac{K_{\text{eff}} - K_{\text{appuis}}}{n} = 5001 \text{ kN/m}$ <p>et ensuite la force dans l'amortisseur :</p> $F_{\text{amort}} = K_{\text{amort}} * d_{\text{cd}} = 200 \text{ kN}$ <p>L'énergie dissipée vaut alors :</p> $E = 4 * F_{\text{max}} * d_{\text{max}} = 128.0 \text{ kNm}$	<p>Connaissant la masse et la raideur de l'ouvrage, on calcule la période :</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 1.20 \text{ s}$ <p>On en déduit la valeur du spectre de calcul :</p> $S_e(T) = \frac{2.5ST_c}{T} = 1.25$ <p>On calcule alors le déplacement élastique</p> $d_{\text{élastique}} = a_g \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_e(T) = 0.10 \text{ m}$ <p>Sachant, que le déplacement cible est de 0.04m, on en déduit que le coefficient de réduction des déplacements, ρ, qui vaut 0.39 ($d_{\text{cd}}/d_{\text{élastique}}$)</p> <p>On calcule alors le taux d'amortissement équivalent :</p> $\xi_{\text{eq}} = \frac{0.1}{\rho} - 0.05 = 0.61$ <p>Et le taux d'amortissement structurel :</p> $\xi = \xi_{\text{eq}} - 0.05 = 0.56$ <p>Le paramètre de l'amortisseur, c, vaut alors :</p> $c = m \frac{4\pi}{T} \xi \frac{1}{h(\alpha)} \left[a_g \rho \frac{T}{2\pi} S_e(T) \right]^{1-\alpha} = 981 \text{ kN/m}^2$ <p>Et la force dans les amortisseurs :</p> $F_{\text{max}} \approx c \left[\frac{T}{2\pi} \rho a_g S_e(T) \right]^\alpha = 839 \text{ kN}$ <p>Soit 209 kN par amortisseurs</p> <p>L'énergie dissipée vaut alors :</p> $E = 4 * F_{\text{max}} * d_{\text{max}} = 134.2 \text{ kNm}$	<p>Connaissant la masse et la raideur de l'ouvrage, on calcule la période :</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 1.20 \text{ s}$ <p>on en déduit la pulsation propre : $\omega = 2\pi/T = 5.25 \text{ s}^{-1}$</p> <p>On retient un amortissement de 61% : $\xi = 0.61$, correspondant à la réduction des déplacements de 0.10m à 0.04m.</p> <p>On calcule alors la vitesse maximum $V = d_{\text{max}} * \omega = 0.20 \text{ m/s}$</p> <p>On en déduit la force maximale dans les amortisseurs :</p> $F_{\text{max}} = \frac{\pi * k * d_{\text{max}} * \xi}{2} = 896 \text{ kN}$ <p>Soit 209 kN par amortisseurs</p> <p>La constante d'amortissement vaut donc : $c = F_{\text{max}} / V_{\text{max}} = 1048 \text{ kN/m}^2$</p> <p>Vérification :</p> <p>On calcule l'énergie dissipée :</p> $E = 4 * F_{\text{max}} * d_{\text{max}} = 143.1 \text{ kNm}$ <p>Connaissant le déplacement en fonction du temps :</p> $d(t) = d_{\text{max}} * \cos(\omega * t)$ <p>La vitesse en fonction du temps :</p> $V(t) = V_{\text{max}} * \sin(\omega * t)$ <p>et la force maximale dans l'amortisseur en fonction de la vitesse :</p> $F(v) = F_{\text{max}} \left(\frac{v}{V_{\text{max}}} \right)^\alpha \frac{v}{ v }$ <p>On en déduit la force maximale dans l'amortisseur en fonction du temps :</p> $F(t) = F(v(t))$ <p>On calcule alors l'énergie réellement dissipée :</p> $E_{\text{reel}} = \int_0^T F(t) V(t) dt = 138.9 \text{ kNm}$ <p>que l'on compare à l'énergie dissipée calculée précédemment, soit 143.1 kNm. On note une bonne corrélation, on a donc convergé.</p> <p>On calcule alors l'amortissement réel :</p> $\xi_{\text{reel}} = \frac{E_{\text{reel}}}{\omega * m * V_{\text{max}}^2 * T} = 0.592$ <p>qui correspond bien à l'hypothèse de départ d'un amortissement de 0.61.</p>

Nous constatons donc que les trois méthodes simplifiées convergent vers le même résultat, soit quatre amortisseurs avec une force de 200kN et une constante d'amortissement d'environ 1000kN/m/s².

En revanche, une certaine divergence apparaît entre les différentes méthodes en ce qui concerne la valeur du pourcentage d'amortissement critique ξ . Il convient de noter que l'Eurocode 8-2 limite réglementairement cette valeur à 30% dans le cadre d'une approche par une analyse modale équivalente. En effet, au delà de cette limite, la pseudo-période du système s'écarte sensiblement de sa période réelle. Par conséquent, la justification des structures pour lesquelles le pourcentage d'amortissement critique ξ dépasse 30% nécessite le recours à des approches plus sophistiquées, en analyse dynamique temporelle.

4.2. - Comparaison des méthodes simplifiées avec l'analyse dynamique temporelle

Pour réaliser l'analyse dynamique temporelle, nous avons réalisé un programme sous Visual Basic, basé sur la résolution des équations de la dynamique à l'aide d'un schéma de Newmark. L'exemple du chapitre précédent a été repris, l'ouvrage a donc été modélisé comme un système masse-ressort-amortisseur à un degré de liberté, la masse correspondant à la masse du tablier, le ressort à la raideur du système d'appui et l'amortisseur aux dispositifs amortisseurs dont les caractéristiques ont été déterminées par le prédimensionnement.

L'analyse étant temporelle, nous avons également généré un accélérogramme artificiel, correspondant au spectre élastique, à l'aide des fonctions suivantes :

- la fonction amplification : elle dépend de la fréquence excitatrice, $f_{\text{excitatrice}}$, (gamme de fréquence du spectre allant de f_0 à f_1), de la fréquence propre f_p (fréquence $f_p(i)$ associée à chaque itération i de calcul) et de l'amortissement ξ :

$$A(f_{\text{excitatrice}}, f_p, \xi) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{(i * f_{\text{excitatrice}})^2}{f_p(i)^2} + 4\xi \left(\frac{i * f_{\text{excitatrice}}}{f_p(i)} \right)^2 \right]}}$$

- la fonction SRSS

elle dépend de la fréquence propre, f_p , de la gamme de fréquence du spectre allant de f_0 à f_1 du pas de discrétisation choisi, nbre_freq :

$$\text{SRSS}(f_p, f_0, f_1, \text{nbre_freq}) = \sqrt{\sum_{\text{fréquence}} A(i * (f_1 - f_0), f_p(i), \xi)^2}$$

- la fonction sinusoïdale

Elle dépend du temps, t , et de l'intervalle de temps, $temps_total$:

$$E(t, temps_total) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{temps_total} \right) \right)$$

L'accélérogramme est donc construit comme une succession de sinusoïdes en itérant sur le temps t et sur la fréquence pour chaque pas de temps :

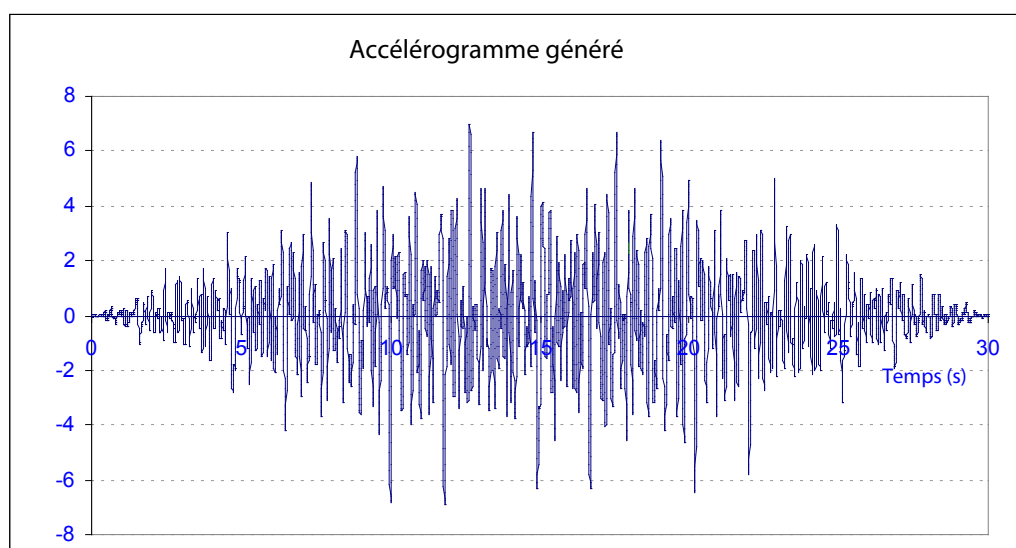
$$sp(f) = \frac{valeur_spectre(f, site)}{SRSS(f, f0, f1, nombre_freq)}$$

$$phase(f) = 2\pi * fonction_aléatoire$$

$$acc(f) = \sum_t sp(f) * \sin(2\pi f * temps + phase(f))$$

$$acc(t) = acc(f) * E(t, temps_total)$$

Nous avons donc obtenu l'accélérogramme suivant, qui correspond bien au spectre élastique réglementaire (figure 20). D'autres méthodes sont disponibles dans la littérature pour générer des accélérogrammes artificiels.



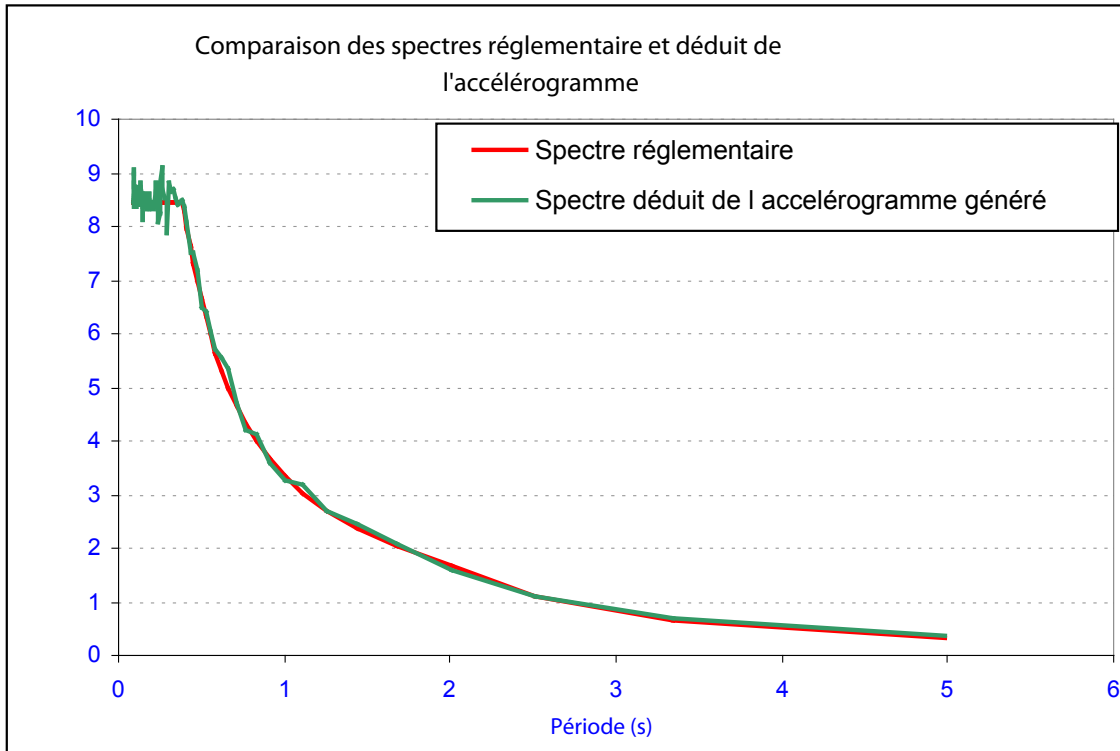
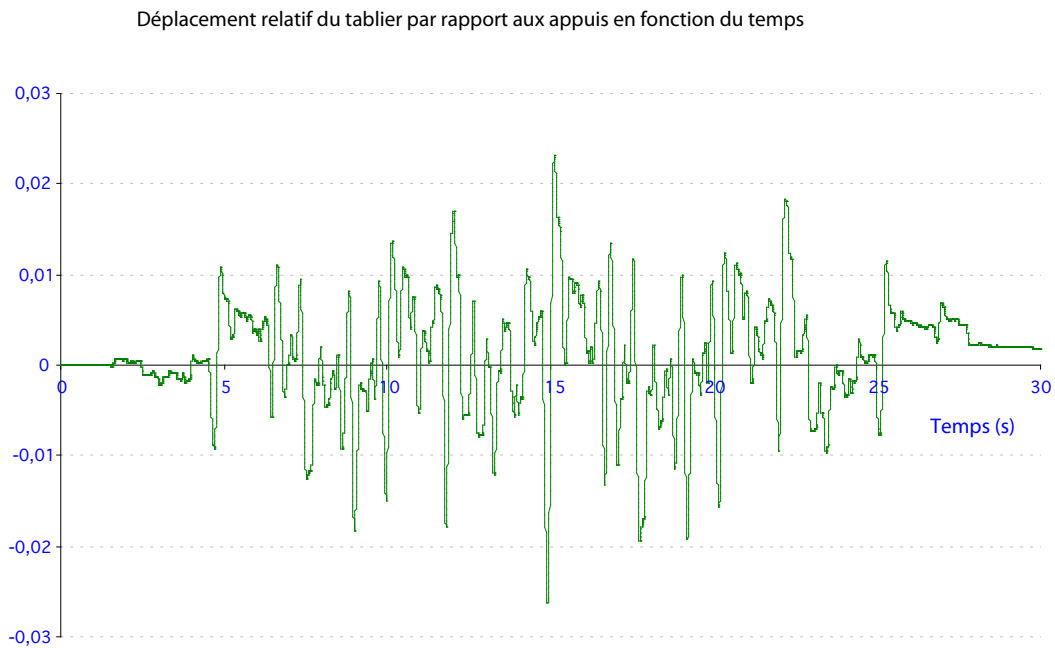


Figure 20 : Accélérogramme artificiel

Comme le montrent les figures suivantes, nous obtenons un déplacement de 0.027m, et une force de 227kN par amortisseur :



Réaction Amortisseur / Déplacement relatif du tablier

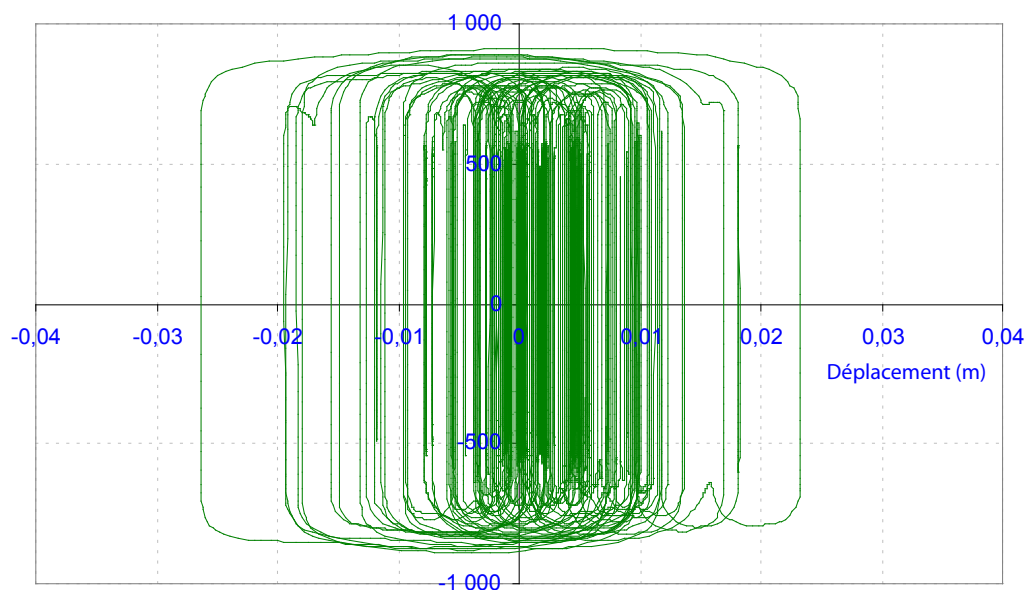


Figure 21 : Réponse de la structure à l'analyse dynamique temporelle

Les méthodes simplifiées sont donc pertinentes car elles sont tout à fait cohérentes avec l'analyse dynamique temporelle : on obtient un déplacement de 2.7cm pour 4.0cm dans le cas de l'analyse simplifiée et une force de 227kN pour 200kN dans le cas de l'analyse simplifiée.

Il convient de garder à l'esprit que l'ouvrage de l'exemple est régulier et simple, la corrélation est donc logique. Dans des cas plus complexes, les méthodes simplifiées peuvent aboutir à des résultats sensiblement plus éloignés du comportement réel de la structure (en particulier lorsque $\xi > 30\%$) et ne sont alors utilisables qu'en prédimensionnement, en vue d'un processus de dimensionnement itératif par l'analyse dynamique temporelle.

5. - Conception

5.1. - Quelques recommandations préalables

Avant d'envisager la mise en place de dispositifs antisismiques, il convient de vérifier que le souffle disponible est suffisant pour assurer leur fonctionnement, ce qui nécessite généralement une visite in-situ dans le cas d'un renforcement d'ouvrage existant.

De même, il doit être vérifié que les déplacements engendrés par le séisme de calcul, ou un dépassement de celui-ci, n'engendrent pas de risque d'échappement d'appui ou de chocs risquant d'endommager des parties sensibles (chocs de poutres précontraintes de tablier sur culées au niveau des ancrages par exemple). Si tel est le cas, des butées de sécurité doivent être envisagées.

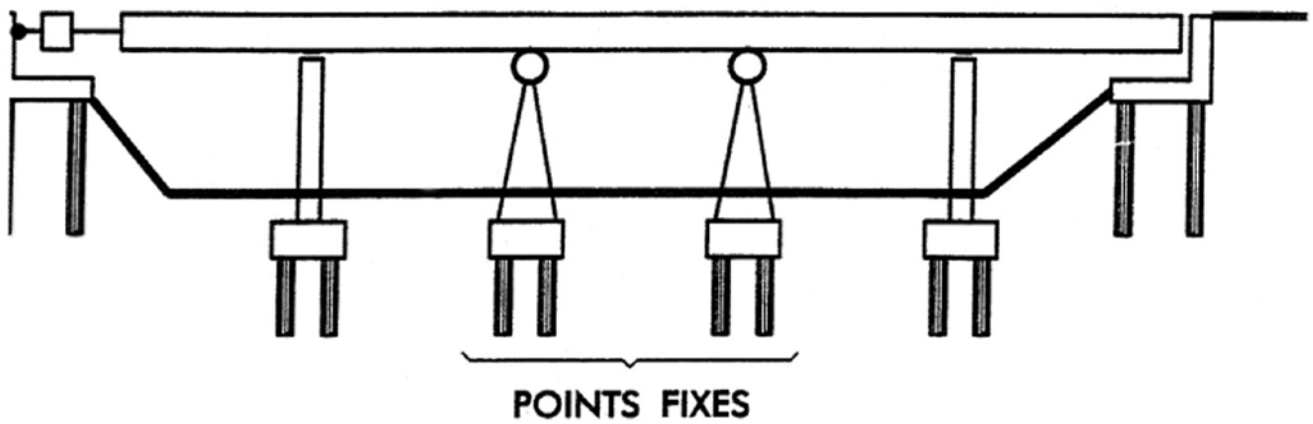
De même, l'utilisation de dispositifs antisismiques peut dans certains cas modifier le schéma statique de l'ouvrage. Il convient donc de vérifier que les déformations de température, retrait, fluage sont toujours possibles et que les points fixes sont bien conservés ou recréés.

5.2. - Exemples de conception

Dans ce chapitre, nous fournissons deux exemples de dispositions de dispositifs amortisseurs visqueux (ceux-ci étant les dispositifs les plus couramment employés).

5.2.1. Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en parallèles

Cette disposition, représentée par la figure 22 ci-dessous, est utilisée principalement dans la direction longitudinale (amortisseurs en parallèle sur culée sur l'exemple).



- ⊕ Appui à pot multi-directionnel
- Appui élastomère
- ▭ Amortisseur dissipatif
- Point fixe

Figure 22 : Schéma de principe d'amortisseurs disposés en parallèle

Le tablier est lié à une ou plusieurs piles (points fixes, généralement prévu pour les dilatations thermiques), un ou des amortisseurs relient le tablier à la culée ou à des piles situées de part et d'autre du point fixe. En cas de séisme, les mouvements du sol sont transmis au tablier par les piles bloquées.

En l'absence d'amortisseurs, l'énergie accumulée par la structure se retrouve sous forme d'énergie de déformation structurelle (éventuellement élasto-plastique) des piles. Si des amortisseurs sont prévus, une partie de l'énergie est dissipée dans ceux-ci, l'énergie de déformation de la structure sera par conséquent diminuée, de même que les efforts dans les piles.

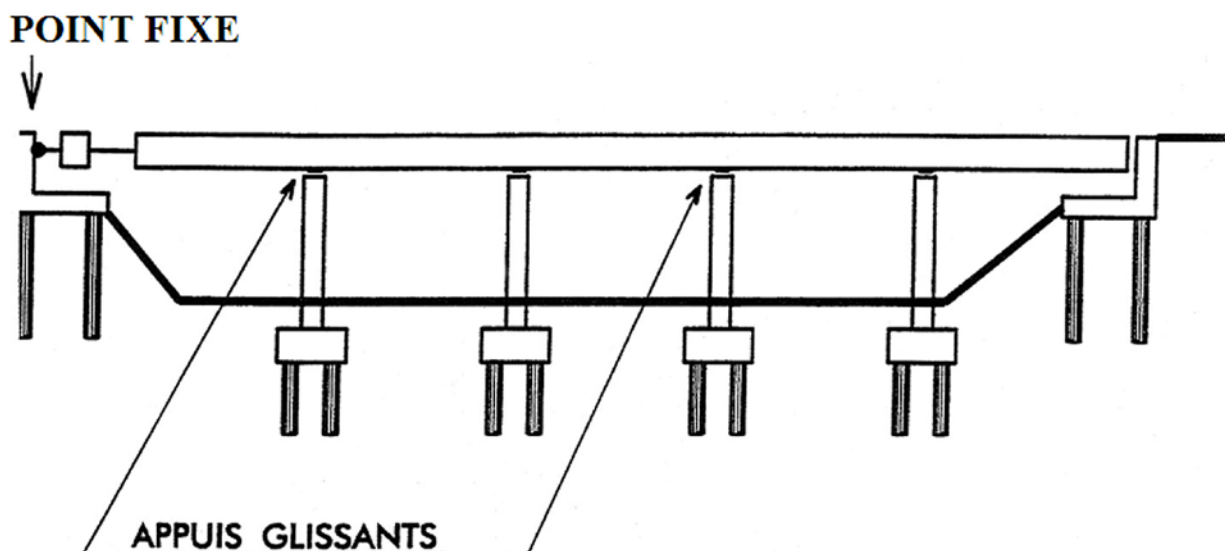
L'intérêt principal de cette solution est de permettre une protection parasismique efficace sans plastification des piles. De plus, les points fixes et la raideur horizontale apportée par les appuis sont conservés. Le tablier revient donc théoriquement à sa position initiale après séisme. Il est à noter que les amortisseurs ne modifient pas le fonctionnement en service de la structure, leur caractère visco-élastique les rendant infiniment souples sous les déformations lentes, telles que les dilatations thermiques. Néanmoins, pour être pleinement efficaces les amortisseurs doivent être disposés sur des appuis suffisamment rigides. Dans le cas contraire ce sont les appuis qui se déforment mais pas les amortisseurs.

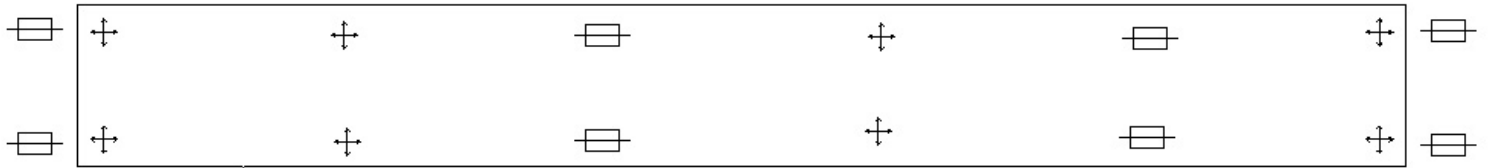
Dans le cas d'une telle conception, la méthode de calcul devra être un calcul temporel à base d'accélérogrammes ou selon une des méthodes simplifiées dans le cas de structures simples, la structure étant supposée élastique.


Le domaine idéal d'application de cette conception est donc le cas où les piles point fixes sont plutôt souples, avec une installation des amortisseurs sur la culée pour les ouvrages courts, ou sur des piles voisines du point fixe suffisamment raides pour les ouvrages longs.

5.2.2. - Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en série

Cette disposition, décrite par la figure 23 ci-dessous, peut être utilisée dans les deux directions principales (amortisseurs en série entre les différents appuis).





 Appui à pot multi-directionnel

 Amortisseur dissipatif

Le tablier est disposé sur appuis glissants et relié par des amortisseurs sur certains appuis.

Les amortisseurs fonctionnent comme des ressorts dont la raideur en service peut varier en fonction du système utilisé, et comme des amortisseurs en cas de séisme. Il s'agit donc :

- soit de dispositifs élastoplastiques,
- soit d'amortisseurs hydrauliques équipés d'un fusible,
- soit d'amortisseurs hydrauliques ayant une fonction ressort.

En cas de séisme, les mouvements du sol sont transmis au tablier directement par les amortisseurs. Ceux-ci ont à la fois pour rôle de limiter les déplacements du tablier par rapport aux piles et éviter ainsi le risque d'échappement d'appui ; et de réduire et répartir les efforts sur les appuis les plus résistants. La fonction ressort ou fusible permet par ailleurs de créer un point fixe en service et garantit une certaine raideur horizontale. Les fonctionnements en service et sous séisme sont donc totalement dissociés. Cette solution permet généralement une réduction efficace des efforts sismiques.

5.2.3. - Exemples d'implantation dans les ouvrages

Viaduc d'Aiton (Autoroute A43)

Type d'ouvrage : bi-poutre mixte acier-béton - 2 tabliers courbes (R=950 m)

Année de réalisation : 1994

Maîtrise d'œuvre : Scetauroute

Longueur totale : 300 mètres

Nombre de travées : 6

Masse totale de l'ouvrage : 4000 tonnes

Type appareils d'appui :

- sur piles : élastomères frettés (800x800)
- sur culées : appareils d'appui à pot multidirectionnels 4000 kN

Séisme : site S2, accélération nominale : 2 m/s²

Protection parasismique :

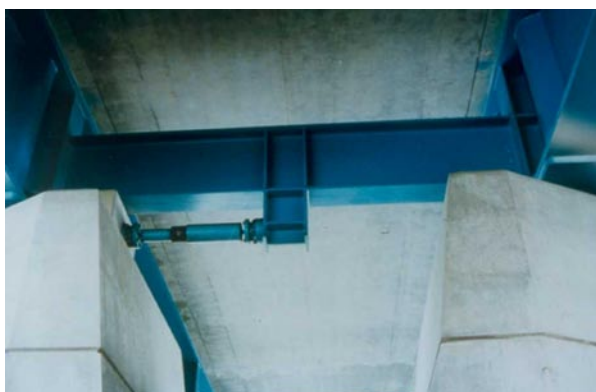
Longitudinale : 2 amortisseurs dissipatifs biais sur chaque culée (amortisseurs en parallèle sur chaque culée et en série en considérant les deux culées).

Transversale : 4 amortisseurs dissipatifs répartis sur les 2x2 piles de rives de chaque tablier (en parallèle).

Figure 2 : Viaduc d'Aiton – schéma statique - sources Jarret



Piles et sous face du tablier



Amortisseur transversal sur pile



Amortisseur longitudinal sur culée

Viaduc de Saint-André (Autoroute A43)

Type d'ouvrage : caisson en béton précontraint construit par encorbellements successifs

Année de réalisation : 1998-99

Maîtrise d'œuvre : Setec

Longueur totale : 900 mètres

Nombre de travées : 11

Masse totale de l'ouvrage : 35 000 tonnes

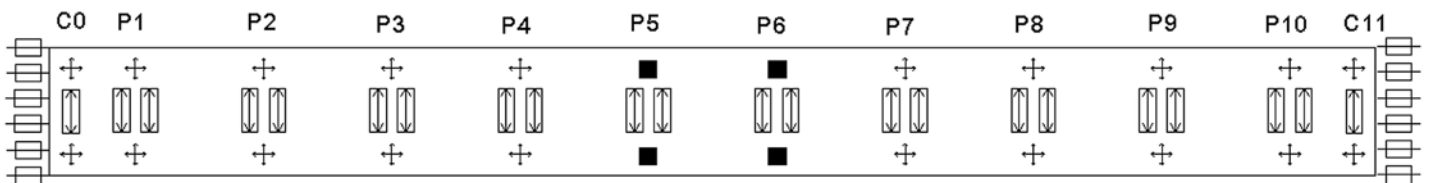
Type appareils d'appui : appareils d'appui à pot multidirectionnels et en élastomère fretté

Séisme : site S2, accélération nominale : 1,5 m/s²

Protection parasismique :

Longitudinale : 2x3 amortisseurs dissipatifs sur chaque culée (amortisseurs en parallèle sur chaque culée et en série en considérant les deux culées)

Transversale : 2 ressorts amortisseur précontraints (RAP) sur toutes les piles et 1 sur culées (amortisseurs en parallèle sur chaque appui et entre appui)



- ⊕ Appui à pot multi-directionnel
- Appui élastomère 800 x 800
- ▭ Amortisseur dissipatif
- ▭ Ressort amortisseur précontraint (RAP)



Dispositifs amortisseurs précontraints disposés transversalement sur piles - sources Jarret

6. - Conclusion

Cet article présente les différents dispositifs antisismiques qui peuvent être employés dans le cadre d'un projet neuf, mais également dans le cadre d'un renforcement au séisme d'un ouvrage existant. Les méthodes d'analyse associées, simplifiées ou sophistiquées, sont également présentées et illustrées sur un exemple simple. La comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes simplifiées montre une bonne corrélation entre elles en vue de la pré-évaluation de la gamme des dispositifs à utiliser. La comparaison avec les résultats de l'analyse dynamique temporelle confirme quant à elle leur pertinence pour le dimensionnement des dispositifs sur des ouvrages simples et leur validité dans le cas d'un prédimensionnement pour des ouvrages plus complexes.



Édition de Pièces écrites types de réparation par le logiciel PETRA

V1 du 24 juin 2010

Contexte

Le Sétra participe depuis quelques années au développement d'un corpus technique relatif à la conception et à la réalisation des réparations des ouvrages existants, pour faire face à une forte attente des maîtres ouvrages vis-à-vis de leur patrimoine vieillissant. Dans ce contexte, des pièces écrites types actualisées (CCTP, BPU) pour réparations ont été mises au point ; elles ont fait l'objet d'une information brève intitulée « Pièces écrites de réparation » publiée dans le Bulletin Ouvrages d'Art n°59 de novembre 2008 [1].

Pour faciliter l'utilisation de ces documents, la plupart d'entre eux ont été intégrés dans le logiciel PETRA d'aide à la rédaction des pièces écrites techniques de marchés, déjà utilisé pour celles de construction d'ouvrages neufs. Une bible pour les réparations d'ouvrages a donc été créée ; elle est indépendante de la bible pour les ouvrages neufs.

Le mode de fonctionnement reste cependant le même : la fonction principale du logiciel PETRA est, par le biais d'un questionnement sur un projet de réparation déterminé, de sélectionner parmi l'ensemble des clauses de réparation que contient la bible, celles qui seront utiles à la réparation particulière. Le logiciel PETRA permet l'édition :

- du Cahier des Clauses Techniques Particulières,
- du cadre du Bordereau des Prix,
- du cadre du Détail Estimatif.

Particularités de la bible «réparations»

Les documents types déjà disponibles sur le site Piles du Sétra présentent l'avantage de posséder une aide particulièrement riche. Cette aide a été intégrée, dans la mesure du possible, dans la bible «Réparation». Une notice spécifique pour accéder à ces informations sera fournie lors de la diffusion de la bible.

Réparations traitées

Toutes les réparations n'ont pour l'instant pas été intégrées à PETRA. Celles disponibles sont les suivantes :

- réparation des maçonneries :
 - rejointoiements et reconstitutions locales ;
 - protection des parements par béton projeté ;
 - injections ;
 - épingleages, tirants d'ancrage et d'enserrement.
- réparation des ouvrages en béton armé ou précontraint :
 - régénérations superficielles ;
 - revêtements des parements ;
 - calfeutrement et injection des fissures ;
 - reconstitution par béton projeté avec ou sans adjonction d'armatures passives.

Elles s'appuient sur les dernières normes en vigueur (normalisation d'origine européenne) et notamment sur les normes de la série NF EN 1504 qui concernent les produits pour la protection et la réparation des structures en béton..

Disponibilité de la bible « réparation » :

Dans la même logique que la bible Ouvrages neufs, la bible « Réparation » est gratuite et disponible sur le site Piles du Sétra : <http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr>

Seul le logiciel PETRA est payant.

Thierry Saez

[1] Pièces écrites types de réparation – Bulletin Ouvrages d'Art du Sétra n°59 de novembre 2008.

Publications

• Ponts mixtes acier-béton - Guide de conception durable

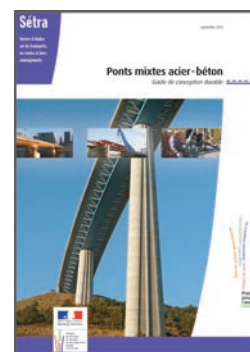
Guide technique

Référence : 1021 - Septembre 2010 - 196 pages - Prix de vente : 22 euros

Le présent guide décrit de manière très détaillée la conception et l'exécution des ponts routiers à ossature mixte acier-béton, bipoutres ou caissons.

Il comporte sept chapitres abondamment illustrés qui traitent chacun d'une des étapes de l'élaboration d'un ouvrage de ce type : conception générale, conception détaillée, mise en place de la charpente, exécution de la dalle, maintenance et préparation de l'appel d'offres.

Le présent guide intéressera toute personne associée à l'élaboration d'un pont mixte (responsables d'opération, ingénieurs ou techniciens de bureau d'études, maîtres d'œuvre, contrôleurs de travaux, architectes) ainsi que les enseignants spécialisés dans le domaine du génie civil.





Ce bulletin est un périodique d'information à l'intention des spécialistes d'ouvrages d'art. Il est destiné à décrire la construction d'ouvrages marquants et à faire connaître des techniques particulières ou innovantes.

Ce bulletin est consultable et téléchargeable :

- sur internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
- sur i2 (réseau du Ministère) : <http://intra.setra.i2>



46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55
Référence : **BOA 65**

*Couverture - crédit photos : Sétra
Mise en page : Pascale Giraud (Sétra)
ISSN : 1266-166X*

**Service d'études
sur les transports,
les routes et leurs
aménagement**

46 avenue Aristide Briand
BP 100 - 92225 Bagneux
Cedex - France
tél : 33 (0)1 46 11 31 31
fax : 33 (0)1 46 11 31 69

**Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique du MEDDTL**

