

Guide technique

Appareils d'appui en élastomère fretté

Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ministère de l'Écologie
du Développement
et de l'Aménagement
durables

Guide technique

Appareils d'appui en élastomère fretté

Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires



collection les outils



Document édité par le Sétra dans la collection "les outils".
Cette collection regroupe les guides, logiciels, supports
pédagogiques, catalogues, données documentaires et annuaires.

Ce guide a été rédigé par un groupe de travail composé de :

- Jean-François Derais, Sétra/CTOA
- Michel Fragnet, Sétra/CTOA
- Gilles Lacoste, Sétra/CTOA
- Yvon Meuric, Sétra/CTOA
- Ludovic Picard, DREIF
- Yves Picard, Consultant
- Denis Davi, Sétra/CTOA

Ont apportés leurs conseils et fait part de leurs observations :

- M. Dauvilliers (DREIF/LROP)
- H. Guérard (EGIS-SCETAURROUTE)
- P. Kirschner (SECOA)
- C. Néant (ETIC)
- G. Wattiaux (ETIC)
- P. Xercavins (PX-DAM Consultants)

Les dessins ont été préparés par Jean-Pierre Gilcart (Sétra) et le CETE de Lyon.



Le présent guide annule et remplace le guide technique
"Appareils d'appui en caoutchouc frêtté – Utilisation sur les ponts viaduc et structures similaires"
de septembre 2000 (référence : F0032)

Sommaire

Avant-propos	5
Chapitre 1 - Introduction	7
1.1 - Pourquoi le remplacement du guide 2000 ?	7
1.2 - Objet et contenu du présent guide	7
1.3 - Application de la norme NF EN 1337-3 au contexte national français	8
1.4 - Domaine d'emploi	8
1.5 - Notations et symboles	8
Chapitre 2 - Constitution et description	9
2.1 - Principes généraux sur la constitution	9
2.2 - Parties constitutives	10
2.3 - les gammes de fabrication	14
Chapitre 3 - Comportement et dimensionnement	15
3.1 - Introduction	15
3.2 - Caractéristiques des appareils d'appui	17
3.3 - Dimensionnement de l'appareil d'appui	19
3.4 - Vérifications du dimensionnement	23
3.5 - Dispositions sur appui	29
Chapitre 4 - Principes de calcul d'un ouvrage comportant des appareils d'appui	31
4.1 - Généralités - Contexte réglementaire	31
4.2 - Dimensionnement	33
4.3 - Calcul des efforts horizontaux en tête des appuis d'un ouvrage comportant des appareils d'appui classiques	42
4.4 - Calcul des efforts horizontaux dans un ouvrage comportant des appareils d'appui glissants	45
Chapitre 5 - Les contrôles	53
5.1 - Principes généraux	53
5.2 - Les contrôles de fabrication conduisant au marquage CE	53
5.3 - Les contrôles à la réception	57
5.4 - Les contrôles à la mise en œuvre	57
5.5 - Les contrôles du comportement en service	58

Chapitre 6 - Programme de pré-dimensionnement et de vérification	59
Annexe 1 - Calcul des appareils d'appui en élastomère fretté pour une utilisation en zone sismique	60
<i>A1-1 - Cadre réglementaire</i>	60
<i>A1-2 - Combinaisons de calcul et cumul des directions</i>	61
<i>A1-3 - Modèle de calcul dynamique</i>	62
<i>A1-4 - Emploi d'un coefficient de comportement</i>	64
<i>A1-5 - Prescriptions</i>	64
<i>A1-6 - Dispositions constructives complémentaires</i>	65
Annexe 2 - Durabilité des appareils d'appui en élastomère fretté avec plan de glissement	69
<i>A2-1 - Grandeur caractéristique du fonctionnement d'un appareil d'appui glissant</i>	69
<i>A2-2 - Dispositions à prendre au stade de la conception</i>	69
<i>A2-3 - Dispositions à prendre au stade de la fabrication</i>	70
<i>A2-4 - Dispositions à prendre dans le cadre de la surveillance</i>	70
<i>A2-5 - Conclusion</i>	70
Annexe 3 - Tableau de dimensions en plan courantes	71
Annexe 4 - Aide à la rédaction des CCTP	72
<i>A4.1 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "qualité des matériaux"</i>	72
<i>A4.2 - exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "principe de calcul"</i>	73
<i>A4.3 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "mise en œuvre"</i>	74
Bibliographie	75

Avant-propos

Les **appareils d'appui sont des éléments importants de la structure** et non des équipements pour lesquels il existe une notion d'usure et de durabilité inférieure à celle de l'ouvrage et que l'on considère alors comme de la matière consommable. A ce titre, on devra donc apporter tout le soin nécessaire à leur choix, leur qualité, leur conception et leur mise en œuvre. D'autant que le coût du produit lui-même est sans commune mesure avec celui des opérations d'interventions pour soulever la structure et réparer les bossages : un rapport de 1 à 50 est considéré comme un minimum.

Une étude menée par le Sétra sur les causes d'intervention sur les ouvrages pour la remise en état des appareils d'appui (tous types d'appareils d'appui confondus) a montré que l'on pouvait distinguer trois origines parfaitement égales :

- des défauts consécutifs à une qualité des produits défectueuse (corrosion, désadhésion, ...). De ce point de vue, la publication de la norme NF EN 1337 (après les normes françaises) sur les spécifications des produits et le marquage CE pour les appareils d'appui en élastomère fretté sont des éléments allant dans le sens d'une amélioration ;
- des défauts de pose. Le respect des spécifications du guide "Environnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté" (cf. Bibliographie) est une condition sine qua non pour aller dans le sens d'une amélioration de ce point de vue.

Le présent guide ne traite pas de la mise en œuvre qui est traitée dans le guide "Environnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté". Nous tenons cependant à insister sur l'importance de bien reprendre dans les CCTP et dans les PAQ, les spécifications présentées dans ce document et de les appliquer ;

- des désordres consécutifs à un dimensionnement erroné (plaque de glissement trop courte, insuffisance de feuillets d'élastomère, dimensions en plan insuffisantes, ...).

C'est ce dernier volet que ce guide se propose de traiter, pour les appareils d'appui en élastomère fretté.

Nous attirons aussi l'attention sur l'importance de calculer le tablier, les appareils d'appui et les appuis comme un ensemble **INDISSOCIABLE**. C'est dans cette optique que ce guide a été rédigé.

Les appareils d'appui en élastomère fretté (AAEF) et les appareils d'appui à pot (AAP) représentent plus de 90 % des appareils d'appui utilisés sur les ponts en France. Si, aux extrêmes du domaine d'emploi, les raisons conduisant au choix de l'un ou de l'autre type d'appareil sont assez évidentes, la question est plus délicate à la frontière.

Le choix du type d'appareil d'appui dépend de nombreux facteurs : descente de charge, rotation maximale, déplacements horizontaux, durabilité, coût, le type d'ouvrage, son environnement et ses dispositions constructives. C'est pourquoi il est délicat de pouvoir préciser le domaine d'emploi respectif d'une technique par rapport à une autre.

Pour des réactions d'appui limitées à 12 MN (calculées à l'ELU), l'appareil d'appui en élastomère fretté convient parfaitement. Cette valeur correspond à des dimensions en plan de l'ordre de 700 x 700 mm. Au-delà de 20 MN, les appareils d'appui à pot sont préférables car ils limitent l'encombrement du dispositif. Entre ces deux valeurs il est possible de conserver des AAEF, soit en augmentant les dimensions jusqu'à 900 x 900 mm pour les grands ouvrages, soit en accolant deux appareils d'appui plus petits. Cette dernière solution n'est facile à mettre en œuvre que pour les ponts en caisson et les ponts à dalle en béton pour des raisons d'encombrement de l'appareil d'appui. Elle est difficilement envisageable pour les ponts à poutres (mixtes ou en béton précontraint).

Par contre, en cas de rotations sur appui importantes, l'AAEF peut convenir, mais il faut souvent augmenter exagérément l'épaisseur d'élastomère, ce qui pose d'autres problèmes. Au niveau des déplacements horizontaux, les systèmes de glissement des AAP offrent une meilleure qualité et donc une meilleure durabilité : c'est donc le critère du déplacement qui va influencer sur le choix.

De toute façon, les contraintes de fabrications (dimensions des presses principalement) font que les plus grandes dimensions des AAEF sont limitées, à l'heure actuelle, à environ 1000 x 1000 x 300 mm pour les fabrications françaises (à l'étranger on peut atteindre 1200 x 1200 x 300 mm).

Le coût des AAEF est plus faible que celui des AAP. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que le coût des appareils d'appui représente un faible pourcentage de celui de l'ouvrage.

En zone sismique, même pour de fortes descentes de charges, il est préférable de prévoir des AAEF. En effet, en l'absence de point fixe, et compte tenu de la souplesse qu'apportent les AAEF, le comportement global de l'ouvrage sous séisme d'amplitude modéré est meilleur. Sous fort séisme, les AAEF se déchireront, et leur remplacement sera moins coûteux que s'il s'agit d'AAP.

Chapitre 1

Introduction

1.1 - Pourquoi le remplacement du guide 2000 ?

Le guide publié en septembre 2000 s'appuyait sur des projets de normes européennes ou en cours d'élaboration et, de toutes façons, difficiles à obtenir directement auprès de l'AFNOR. Ceci expliquait l'ambiguïté du document qui s'appuyait sur des normes futures en gestation, des documents de dimensionnement des structures eux aussi non finalisés et des normes françaises sur la vérification des caractéristiques des appareils d'appui.

Cette situation est maintenant clarifiée par la publication de toutes les parties de la norme NF EN 1337 (à l'exception de la partie 8 - Appareils d'appui guidés et appareils d'appui bloqués) et des normes de dimensionnement (tout au moins les Eurocodes utilisés dans le présent guide). Par ailleurs, la publication des parties de la norme NF EN 1337 conduira à terme, à la fin de la période de coexistence (c'est-à-dire le 31.12.2006), à la suppression des normes françaises traitant du même sujet, notamment la norme XP T 47.815.

De ce fait, il nous a paru nécessaire de réviser le guide 2000 pour que les projeteurs disposent d'un document de conseils tenant compte des dernières publications.

1.2 - Objet et contenu du présent guide

Ce guide a pour objet d'explicitier les textes normatifs en vigueur au moment de la présente rédaction (*cf.* Bibliographie). Il donne les éléments d'appréciation par rapport à ces textes, notamment en précisant certaines spécifications importantes en cas d'utilisation pour un pont.

Ce guide comprend les éléments suivants :

- une description sommaire de ce type de produit et des éventuels équipements particuliers qui lui sont liés ;
- les principaux textes réglementaires ou normatifs de base ;
- les critères de dimensionnement que l'on trouve dans les textes normatifs préparés par le CEN¹ ;
- le principe des contrôles sur la base de la certification par la marque CE ;
- une méthodologie de calcul dans un projet de pont avec des exemples d'application ;
- les informations sur l'existence du programme NEOP du Sétra permettant un pré-dimensionnement de ce type d'appareil d'appui.

Enfin, il est complété par une série d'annexes avec, notamment :

- l'annexe 1 qui présente des éléments pour le dimensionnement de ce type d'appareils d'appui dans les zones sismiques, sur la base des normes parasismiques les plus récentes ;
- l'annexe 2 qui attire l'attention sur la durabilité des appareils d'appui en élastomère fretté complétés par un plan de glissement ;
- et l'annexe 4 donnant des exemples de rédactions d'articles à introduire dans les CCTP.

¹ CEN : Comité Européen de Normalisation

1.3 – Application de la norme nf en 1337-3 au contexte national français

Les normes EN ne fixent pas toutes les caractéristiques et laissent à chaque pays membre le soin de les préciser, pour leur utilisation sur des ouvrages, par des textes nationaux. Ce texte fait l'objet d'une note d'information technique du Sétra² (dont le contenu a été, en partie, préparé par la Commission de normalisation T47A). Le contenu de ce document n'est pas repris ici et le lecteur est invité à le consulter et à le lire parallèlement à la norme.

1.4 - Domaine d'emploi

Les règles énoncées dans ce guide technique concernent l'emploi des

appareils d'appui constitués de plaques d'élastomère.

Ces règles ne sont applicables qu'aux

**appareils d'appui constitués au moins de deux feuillets d'élastomère
adhésés par vulcanisation à des frettes métalliques**

(alors que la norme autorise l'emploi d'un appareil d'appui constitué d'un seul feuillet entre deux frettes enrobées) (type B de la NF EN 1337-3)
et, éventuellement,

complétés par des éléments de glissement³

(type D ou E de la NF EN 1337-3)

d'anti-cheminement ou d'anti-soulèvement⁴

(type C de la NF EN 1337-3).

1.5 - Notations et symboles

Les notations utilisées dans le présent document sont celles de la NF EN 1337-3 pour ce qui concerne le calcul des appareils d'appui en élastomère fretté. Nous renvoyons le lecteur à ce document et, plus particulièrement, au chapitre 3. Nous n'avons pas recopié ces notations et symboles pour éviter toute erreur de copie et parce que nous pensons que le lecteur ne peut pas utiliser ce guide sans disposer de la norme.

Les notations et symboles se rapportant au calcul de séisme sont donnés dans l'annexe 1.

Les notations et symboles propres aux combinaisons d'actions sont ceux définis dans les Eurocodes et sont repris dans le chapitre 4.

² disponible en téléchargement sur les sites du Sétra

³ cf. annexe 2

⁴ cf. chapitre 2

Chapitre 2

Constitution et description

Le lecteur intéressé par l'histoire de ces produits, les technologies de fabrication, les principes de base du dimensionnement, la durabilité et les contrôles de qualité peut utilement consulter le document "Appareils d'appui en caoutchouc" (juillet 1994 édité par l'AFPC en collaboration avec le Sétra, cf. Bibliographie).

2.1 - Principes généraux sur la constitution

Un appareil d'appui en élastomère fretté est un "bloc d'élastomère vulcanisé (...) renforcé intérieurement par une ou plusieurs frettes en acier, collées chimiquement (adhésivation) pendant la vulcanisation. (...). L'élastomère est un matériau macromoléculaire qui reprend approximativement sa forme et ses dimensions initiales après avoir subi une importante déformation sous l'effet d'une faible variation de contrainte"⁵.

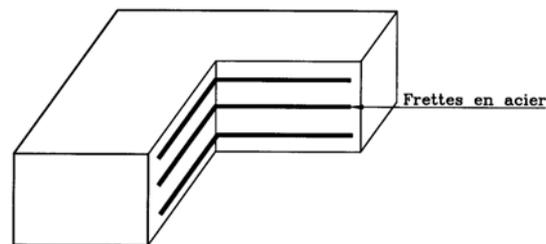


Figure 2.1 : constitution type d'un appareil d'appui en élastomère fretté

Le matériau de base est obtenu en faisant subir une série de transformations au matériau brut malaxé avec différentes charges, inertes ou renforçantes. Après traitement, le produit se présente sous forme de feuilles de quelques millimètres d'épaisseur. Celles-ci sont empilées avec des frettes métalliques, préalablement sablées et traitées, dans des moules dont les dimensions correspondent à celles du produit que l'on veut obtenir. L'ensemble est alors comprimé et vulcanisé (par chauffage).



Figure 2.2 : vue d'une presse au démoulage (photo SNAC)

En fonction des degrés de liberté qu'il autorise, un **appareil d'appui en élastomère fretté** est, pour le bloc élémentaire, un **appareil d'appui mobile** : outre les rotations sur appui, les déplacements sont permis dans deux directions. On peut soit

⁵ NF EN 1337-3, § 3.1

augmenter les possibilités de déplacement par l'ajout d'un plan de glissement, soit empêcher les distorsions par des platines métalliques constituant ainsi un appareil d'appui "fixe".

Le domaine d'application de la norme (NF EN 1337-3, § 1) précise que seuls les appareils d'appui de dimensions en plan inférieures à (1200 x 1200 mm) sont concernés.

2.2 - Parties constitutives

2.2.1 - Constitution

Les différentes parties constitutives d'un appareil d'appui en élastomère fretté sont définies sur la figure 2.3.

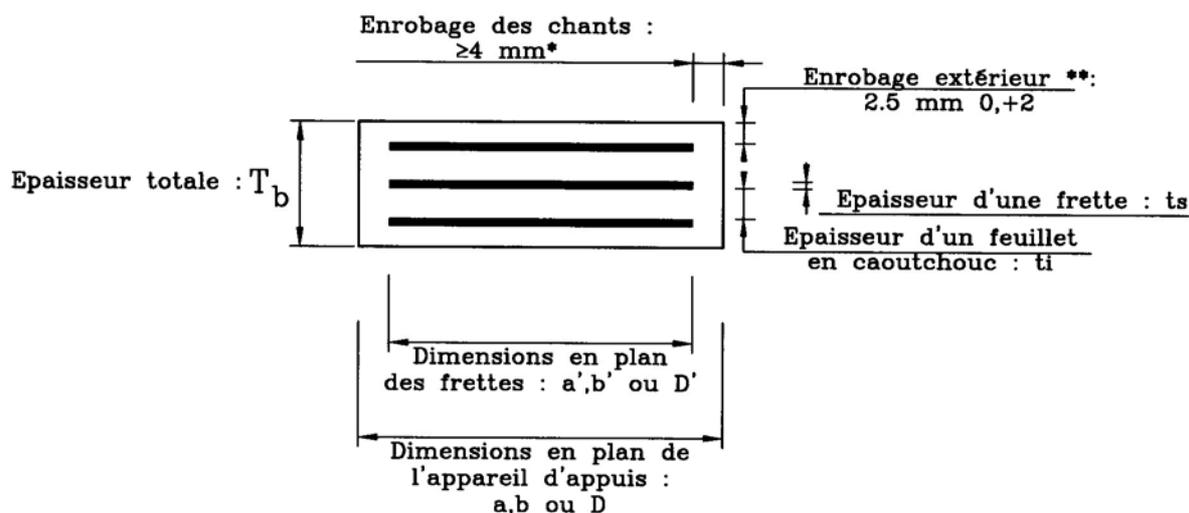


Figure 2.3 : constitution type d'un appareil d'appui de type B selon la norme NF EN 1337-3 (fig. 2)

2.2.2 - Le matériau élastomère

Le caoutchouc entrant dans la composition des appareils d'appui peut être soit naturel et d'origine végétale, le latex, et c'est alors un polymère de l'isoprène (polyisoprène ou NR pour "Natural Rubber" dans la norme), soit synthétique et, dans ce cas, le composé est le plus souvent un polymère du chloroprène (polychloroprène ou CR pour "Chloroprène Rubber" dans la norme). Il existe plusieurs formules qui, sur le marché, portent des noms de marques : Néoprène[®] (Du Pont de Nemours), Butachlor[®] (Ugine), etc.

Quels sont les critères qui feront choisir l'une des origines par rapport à l'autre ?

Le caoutchouc naturel présente (avec une formulation appropriée) une bonne résistance à la traction, un excellent allongement à rupture, un bon comportement aux sollicitations dynamiques et au froid avec, cependant, une tendance à la cristallisation. En revanche, sa perméabilité aux gaz est importante, sa tenue aux huiles et aux solvants très médiocre et sa sensibilité au vieillissement doit être compensée par l'emploi d'antioxygène et anti-ozone⁶. La France, comme de nombreux autres pays européens, a choisi le polychloroprène qui présente, parmi d'autres qualités, une excellente résistance au vieillissement, un très faible taux de fluage sous charge et une bonne résistance au déchirement. Ceci le rend parfaitement bien adapté aux sollicitations des appareils d'appui. Le domaine d'emploi de la norme (§ 1) précise que seuls les caoutchoucs visés au § 4.4.1 de la norme sont couverts.

Certaines considérations économiques à court terme peuvent conduire à s'orienter vers du caoutchouc naturel ; c'est prendre un risque à terme sur le comportement de l'appareil d'appui non justifié par la différence de prix par rapport au coût d'un changement sur un ouvrage en service.

⁶ cf. "Appareil d'appui en caoutchouc". § 3.3.1. Voir Bibliographie.

Ceci explique que le texte d'application nationale de la norme NF EN 1337-3, ne retient, pour une utilisation en France, que le polychloroprène (ou CR).

Sur la tenue à l'ozone, le texte d'application nationale à la norme NF EN 1337-3 (§ 4.3.6) n'a retenu que le seul niveau prévu pour le CR qui est bien adapté aux conditions de service sur un pont. Pour notre part, nous proposons de ne pas définir le matériau mais, **pour les appareils d'appui destinés à être employés sur les ponts et les ouvrages similaires, de fixer une spécification de tenue à l'ozone correspondant au maximum (c'est-à-dire la valeur de 50 ppm).**

L'épaisseur minimale d'un feuillet ne pourra, en aucun cas et conformément à NF EN 1337-3 (§ 5.3.2), être inférieure à 5 mm, ni supérieure à 25 mm.

2.2.3 - Les frettes en acier

Elles sont systématiquement en acier S 235⁷ ou d'un acier présentant un allongement minimal à la rupture équivalent (cf. complément au § 3.2.3).

L'épaisseur des frettes ne pourra, en aucun cas, être inférieure à 2 mm (NF EN 1337-3, § 4.4.3.1).

2.2.4 - Les éventuels éléments de glissement

2.2.4.1 - Constitution

La disposition la plus couramment utilisée en France actuellement est décrite ci-après, mais il existe d'autres systèmes.

Ces éléments de glissement comportent une plaque de PTFE⁸ alvéolée collée sur le dessus de l'appareil d'appui en élastomère, soit sur l'enrobage extérieur en élastomère (appareil de type D selon NF EN 1337-3), soit sur une tôle extérieure en acier (appareil de type E selon NF EN 1337-3). Une tôle en acier inoxydable poli (qualité définie dans NF EN 1337-2, § 5.4.1) liée à une platine supérieure en acier S235 glisse sur la plaque de PTFE (NF EN 1337-3, § 3.1.7).

La tôle de glissement est une seule pièce en acier austénitique. Dans le cas d'une mince plaque d'acier austénitique, deux procédés sont employés pour fixer la tôle en acier inoxydable sur la platine support en acier doux. Dans le premier procédé, la tôle en acier inoxydable est collée à froid, au moyen d'un film de résine (époxydique ou autre) ; il est conseillé de demander la fixation par un vissage ou un soudage périphérique selon le schéma de la figure 2.4. Dans le second procédé, la tôle en acier inoxydable et la platine support sont liaisonnées par interposition d'une feuille mince d'élastomère spécial, à dureté élevée. L'adhésion du complexe est alors obtenue par vulcanisation.

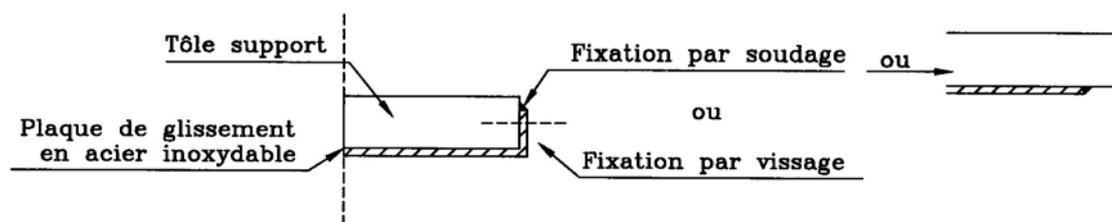


Figure 2.4 : types de fixation complémentaire latérale des plaques de glissement en acier inoxydable

La partie supérieure (ou platine de glissement) peut être fixée à la partie de la structure au contact de l'appareil d'appui.

Pour suivre les déplacements et en permettre le relevé lors des inspections des ouvrages d'art, ces platines de glissement portent un régle de mesure. Il est impératif de prévoir le régle du côté où se trouvera, fort probablement, le visiteur. D'autre part, il est aussi hautement recommandé de caler les régles de façon homogène sur un même ouvrage pour faciliter l'exploitation. (cf. figure 2.5).

Pour protéger contre les souillures lors de la mise en œuvre et en service, ces appareils d'appui doivent être équipés d'un dispositif **protégeant** le plan de glissement (en toutes circonstances normales en service). Ce dispositif doit être facilement amovible pour permettre la visite et la surveillance de l'appareil d'appui.

⁷ NF EN 10025. La norme ne précise pas la partie concernée mais il s'agit des parties 1 et 2.

⁸ PolyTetraFluoro Ethylène ou Téflon[®].

Tous ces éléments sont définis dans la norme NF EN 1337-2 harmonisée au travers de la partie 3.



Figure 2.5 : exemple d'un réglet de suivi de déplacement (appareil d'appui vertical en butée antisismique) (photo Sétra)

2.2.4.2 - Efforts horizontaux

Les appareils d'appui munis d'éléments de glissement sont conçus pour permettre de grands déplacements horizontaux. Les efforts horizontaux sont compris entre 3 et 8 % (pour respectivement une pression moyenne de 30 et 5 MPa) des efforts verticaux. L'appareil peut toujours se déformer par compression et rotation. Ce type d'appareil d'appui est très intéressant pour le lancement d'ouvrage.

La norme (NF EN 1337-3, § 4.4.4) limite l'emploi des appareils d'appui glissants de type D (cf. figure 3.1) au cas des mouvements irréversibles (fluage, retrait, etc.). Cette limitation ne concerne pas le type E. Le texte d'application nationale portant sur la partie 3 autorise une utilisation plus large qu'en phase provisoire mais il convient d'être très prudent sur la question de la durabilité de ce type de dispositif et pour une utilisation en service ; l'annexe 2 donne des éléments d'information sur la durabilité de ces dispositifs et des conseils sur leur emploi.

2.2.4.3 - Dimension des plaques de glissement

Il ne faut pas hésiter à sur-dimensionner les longueurs des plaques de glissement bien que leur dimensionnement soit à l'ELU. Ceci permettra de pallier aux nombreuses imprécisions consécutives aux pré réglages en usine, aux hypothèses de calcul, à la date réelle de pose et donc de la température à la pose. Le texte de la norme (cf. NF EN 1337-1, § 5.4) manque singulièrement de clarté aussi on se référera au texte d'application nationale qui précise qu'il doit s'interpréter comme suit : "Les déplacements doivent être augmentés dans les deux directions de ± 20 mm. Par ailleurs, le déplacement minimum à prendre en compte est de ± 50 mm dans la direction principale des déplacements résultant de l'ouvrage".

2.2.5 - Les dispositifs anti-cheminement ou anti-soulèvement

Lorsque le cheminement d'un appareil d'appui en élastomère fretté (cf. NF EN 1337-3, § 5.3.3.6, condition de non-glissement) est à craindre, il est possible de l'équiper de butées. Ces dispositifs doivent interdire uniquement le cheminement, sans empêcher ni gêner les déformations : compression, distorsion et rotation. Notamment, les butées doivent venir en contact avec une plaque (ou frette extérieure) dont l'épaisseur sera au moins égale à la hauteur de la butée (appareils d'appui de type C de la norme NF EN 1337-3). **En aucun cas, la butée ne doit se faire sur le feuillet en élastomère** (cf. figure 2.6).

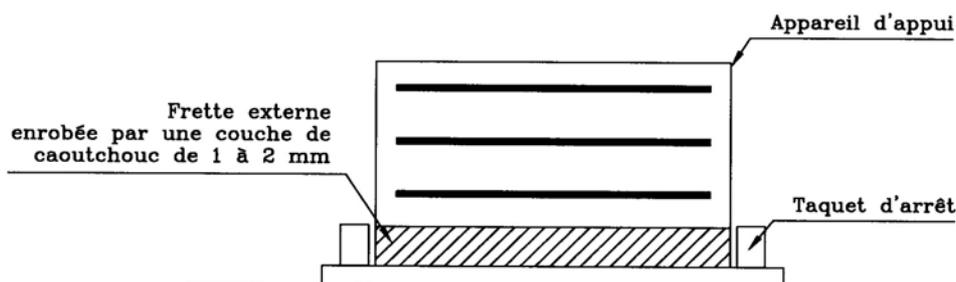


Figure 2.6 : principe d'un dispositif anti-cheminement

Appareils d'appui anti-cheminement

- à taquets (avec appareil d'appui de type C).

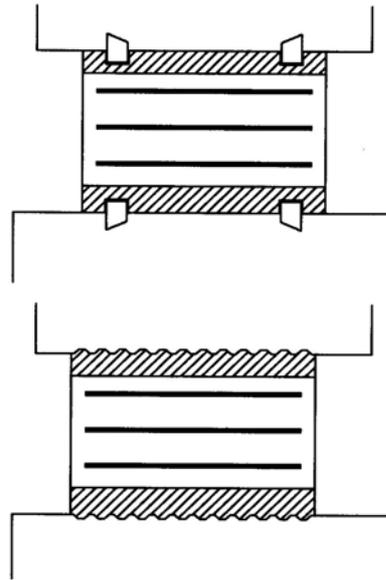
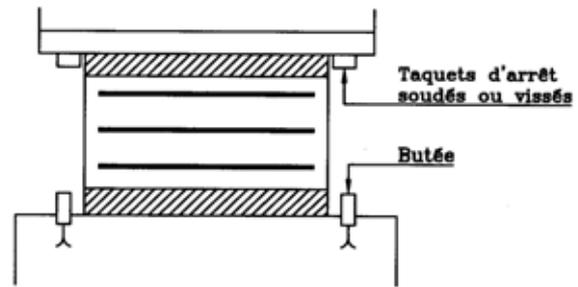
NB : sauf cas particulier, les taquets ne sont nécessaires que sur une face.

Voir aussi le dispositif de la figure 2.6.

- par collage (pas de dessin) pour des efforts tangentiels faibles (avec appareil d'appui de type C).

- avec ancrages.

- par tôles striées (pour des efforts tangentiels faibles).



Appareils d'appui à distorsion limitée ou bloquée

Appareil d'appui à système anti-soulèvement

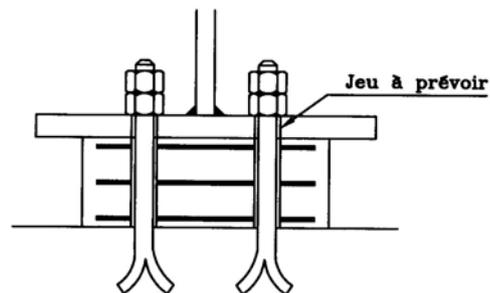


Figure 2.7 : dessins de principe d'appareils d'appui "fixes"

Le dessin de l'appareil d'appui à système anti-soulèvement, copié de la norme, suscite les remarques suivantes : les tiges de traction doivent permettre les rotations et il est souhaitable de les positionner dans l'axe de cette rotation et le dispositif ne doit pas entraver le déplacement s'il existe. Il n'est donc pas à reprendre tel quel.

Il peut être nécessaire d'éviter la distorsion des appareils d'appui. C'est le cas, notamment lorsque l'on désire réaliser une ligne d'appuis "fixes". Les appareils d'appui en élastomère fretté sont alors équipés d'une structure métallique rigide empêchant les translations horizontales du tablier tout en permettant la compression et la rotation de l'appareil d'appui. La figure 2.7 donne quelques exemples de dispositifs susceptibles d'être adoptés. Il s'agit toutefois de dispositifs peu fréquents et à éviter, une solution avec un appareil d'appui de type C étant préférable.



Figure 2.8 : exemple d'un appareil d'appui à distorsion limitée ou bloquée (photo Sétra)

2.3 - Les gammes de fabrication

Pour fabriquer un appareil d'appui à frettes complètement enrobées, celui-ci doit être mis dans un moule et on ne peut fabriquer qu'une dimension par moule. Il y a donc autant de moules que de dimensions d'appareil d'appui. Pour limiter le nombre de ces moules et rationaliser la fabrication, on aurait donc intérêt à choisir les dimensions de l'appareil d'appui à l'intérieur d'une gamme dont un exemple est donné dans la norme NF EN 1337-3, tableau n 3 et qui présente l'avantage, pour le projeteur, de disposer de dimensions standards qui peuvent faciliter une étude de pré-dimensionnement.

Par contre, cette présentation d'une gamme sous forme de tableau n'est pas conforme à l'esprit de la norme dont la démarche consiste à justifier chaque appareil d'appui en fonction des sollicitations qu'il subit.

Cette démarche est donc clairement défavorable à une standardisation des dimensions comme cela était la pratique jusqu'à maintenant. Par contre, l'absence d'une gamme courante peut poser quelques problèmes au projeteur qui doit travailler "en aveugle" dans sa démarche itérative de recherche d'un appareil d'appui satisfaisant aux critères qu'il a définis. En effet, comme on le verra dans le chapitre 4, il doit définir un appareil d'appui susceptible de convenir et procéder par itération jusqu'à trouver la bonne dimension. Il lui faut donc connaître les principales dimensions fabriquées. C'est pourquoi, à titre d'information, on trouvera, en sus du tableau de la norme, un tableau des dimensions en plan les plus couramment utilisées en France (cf. annexe 3). A charge, pour le projeteur, de vérifier que le produit répond bien aux exigences de la norme.

Par ailleurs, les grandes dimensions (supérieures à 700 x 700 mm) doivent être utilisées avec précautions : en effet, pour de tels appareils d'appui, une répartition uniforme des contraintes nécessite un soin particulier sur la réalisation des bossages.

Pour les tabliers présentant des rotations importantes, il sera choisi des dimensions telles que le rapport b/a soit compris entre 1,5 et 2. Pour les tabliers ayant des déplacements importants, il sera préférable d'employer des formes se rapprochant du carré ($a = b$). Pour les ouvrages présentant des rotations significatives dans les deux directions, la meilleure forme est le disque, cependant la confection de ce type d'appareil d'appui est plus onéreuse et délicate.

Chapitre 3

Comportement et dimensionnement

3.1 - Introduction

Ce chapitre rappelle les caractéristiques géométriques et mécaniques des appareils d'appui en élastomère fretté et donne leurs règles de dimensionnement et de vérification.

Le comportement des appareils d'appui tel qu'il est décrit dans les paragraphes suivants ne suffit pas pour effectuer une vérification complète. En effet, dans un ouvrage, le tablier, les appareils d'appui, les piles et les culées forment un système dont les différentes parties interagissent. Un équilibre d'ensemble doit être trouvé, sous l'action combinée des charges horizontales et des déformations dues à la température, au retrait, au fluage...

Les interactions entre la structure et l'appareil d'appui sont traitées au chapitre 4 de ce document. Le présent chapitre n'aborde que le comportement et le dimensionnement de l'appareil d'appui lui-même, ainsi que des zones de contact avec la structure.

La norme NF EN 1337-3 (§ 5.3.2)⁹ s'applique à six types d'appareils d'appui tels que définis dans le tableau de la figure 3.1 :

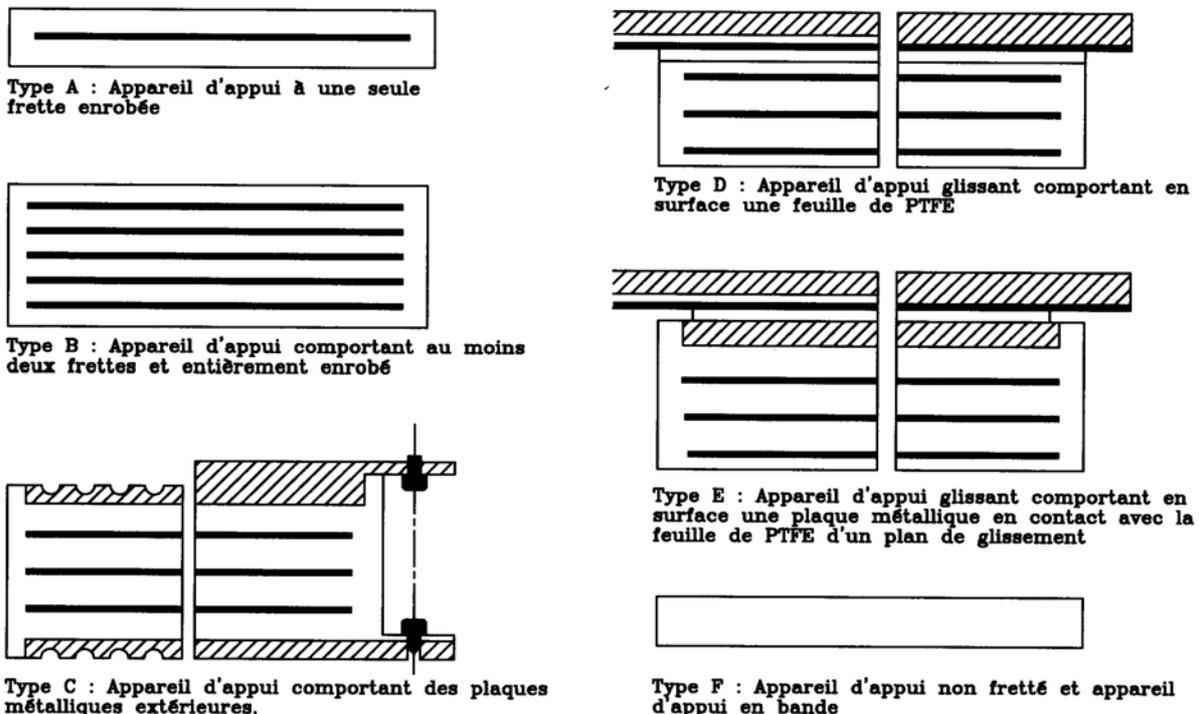


Figure 3.1 : tableau présentant les différents types d'appareils d'appui en élastomère fretté selon la norme NF EN 1337-3

⁹ Dans la suite de ce chapitre, la référence du paragraphe concerné de la norme NF EN 1337-3 sera précisée entre parenthèses en italique gras.

Il est rappelé que le présent guide ne traite que des appareils de type B à E. Les appareils de type A (monofrette) ou de type F (non frettés ou en bande) ne concernent pas le domaine des ouvrages d'art.

La norme NF EN 1337-3 définit des caractéristiques géométriques des appareils d'appui couramment utilisés. En plan, les appareils d'appui sont de forme carrée, rectangulaire, ou circulaire, mais des formes elliptiques et octogonales sont également tolérées. Les règles données dans ce document sont relatives aux appareils rectangulaires. Pour les autres formes, on se reportera à la norme.

Parmi les appareils d'appuis de type B (multi-frettes enrobés sur toutes les faces, cf. figure 3.1), on peut distinguer, conformément à la norme NF EN 1337 :

a) **les appareils d'appui de type B définis au tableau 3 de la norme NF EN 1337-3.** Ils comportent $n+1$ frettes métalliques et n feuillettes d'élastomère d'épaisseur constante. Ils sont enrobés sur leur périphérie d'une épaisseur d'élastomère d'au moins 4 millimètres et sur les faces supérieure et inférieure d'une épaisseur d'élastomère nominale de 2,5 mm (avec une tolérance de $-0, +2$ mm).

b) **d'autres appareils d'appui de type B qui comprennent des demi-feuillettes extérieurs "actifs"** (cf. tableau en annexe 3 de ce guide). Ces derniers se distinguent par le fait que les enrobages supérieur et inférieur d'élastomère sont plus importants. Il ne s'agit plus d'un simple enrobage de protection, mais d'un demi-feuillet dont l'épaisseur est prise en compte dans les calculs dans les conditions définies à l'article 5.3.3.1 de la norme NF EN 1337-3. Il est proposé de les dénommer avec le nombre de feuillettes intermédiaires en mentionnant les deux demi-feuillettes extérieurs ou les enrobages extérieurs. Ceci donne l'exemple de dénomination d'un appareil d'appui suivant :

$$a \times b ; n(t_i + t_s) ; 2 e$$

ex : 200 x 300 ; 2 (10 + 3) ; 2 x 5,

400 x 500 ; 4 (12 + 4) ; 2 x 6,

Ø 700 ; 5 (16 + 5) ; 2 x 8 pour un appareil circulaire.

La figure 3.2 résume les caractéristiques de ces appareils d'appui définis dans la norme NF EN 1337-3.

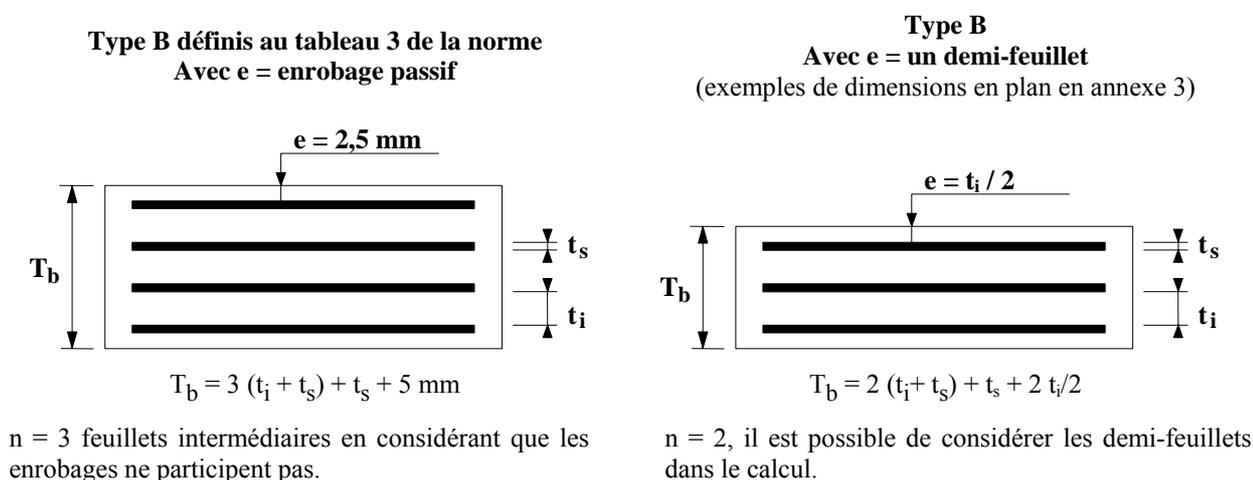


Figure 3.2 : caractéristiques des appareils d'appui visés par le présent chapitre

3.2 - Caractéristiques des appareils d'appui

3.2.1 - Définition géométrique

La définition géométrique de l'appareil d'appui de type B de la norme NF EN 1337-3 (§ 5.3.2) est donnée sur la figure 3.3 dans laquelle a, b, a', b' sont les dimensions des appareils de forme rectangulaire, D et D' sont les diamètres des appareils d'appui de forme circulaire. a et a' désignent toujours les plus petites dimensions en plan de l'appareil d'appui s'il est rectangulaire.

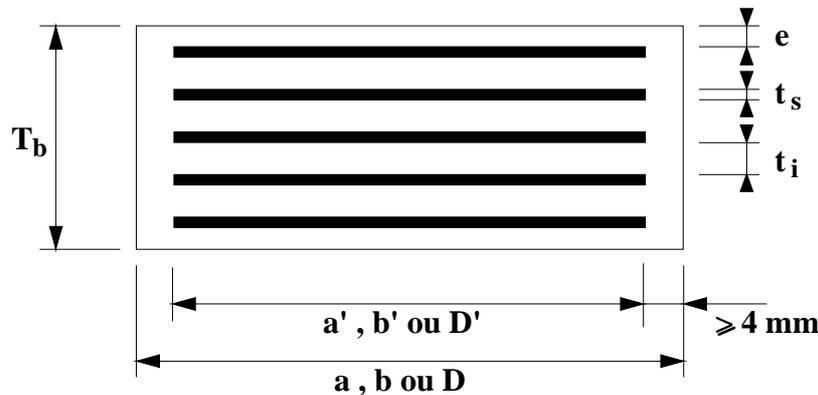


Figure 3.3 : définition géométrique d'un appareil d'appui

En fonction du nombre n de feuillets intermédiaires, on définit trois épaisseurs nécessaires au dimensionnement :

épaisseur nominale totale de l'appareil d'appui : $T_b = n (t_i + t_s) + t_s + 2 e$

épaisseur nominale totale d'élastomère : $T_e = n t_i + 2 e$

épaisseur initiale totale moyenne d'élastomère en cisaillement, y compris les enrobages supérieur et inférieur. $T_q = n t_i + 2 e$ si $e > 2,5$ mm

$T_q = n t_i$ si $e \leq 2,5$ mm

En effet, si l'épaisseur nominale de l'enrobage est supérieure à 2,5 mm, elle doit être prise en compte dans le calcul, en deçà elle est négligée (EN § 5.3.3).*

* L'intérêt d'un feuillet d'enrobage compris entre 0,5 et 0,7 fois le feuillet intermédiaire est d'assurer les mêmes fonctions que les feuillets intermédiaires et de mieux s'adapter aux défauts de surface des supports, sans déformer les frettes de proximité. Un feuillet d'enrobage mince ne peut absorber de translation et pratiquement aucune rotation et un défaut de planéité du support peut se traduire par un décollement localisé.

3.2.2 - Caractéristiques de l'élastomère

(EN § 4.4.2)

Le principal paramètre physique de l'élastomère qui intervient dans le dimensionnement de l'appareil d'appui est son module de cisaillement conventionnel G.

Sauf spécification contraire, la **valeur nominale G du module de cisaillement conventionnel est de 0,9 MPa**. C'est cette valeur qui doit être introduite dans les calculs (cf. § 1.3).

Sous les effets dynamiques, la norme conseille d'augmenter la valeur de calcul du module de l'élastomère (**EN § 5.3.3 – note 2**). Sous l'effet horizontal des charges d'exploitation¹⁰, nous proposons un module Gdyn pris égal à 1,8 MPa dans les calculs. Pour les séismes, on se reportera à l'annexe 1 du présent document.

Il existe un module G à basses températures. Compte tenu des conditions climatiques résidant en France Métropolitaine, il n'apparaît pas nécessaire de le prendre en considération comme le Texte d'Application Nationale le précise. Ceci ne serait valable qu'à partir d'une température ambiante inférieure à – 25°C à partir de laquelle le Polychloroprène commence à cristalliser. Certains pays nordiques, notamment la Finlande, intègrent un module G basse température dans les calculs mais uniquement dans les régions à température inférieure à – 30°C.

3.2.3 - Caractéristiques des frettes internes

(EN § 4.4.3.1)

L'épaisseur des frettes doit être supérieure ou égale à 2 mm. L'acier utilisé est de nuance S235 ou à allongement de rupture équivalent (il est recommandé, dans ce cas, de demander qu'il soit fourni un certificat du producteur attestant un allongement au moins égal à celui d'un acier S235). La limite élastique à utiliser dans les calculs est donc de 235 MPa (épaisseur inférieure à 16 mm dans la norme NF EN 10025).

3.2.4 - Caractéristiques des frettes extérieures

(EN § 4.4.3.2)

Pour les appareils d'appui de type C, l'épaisseur des frettes extérieures est de 15 mm pour des feuillets d'élastomère d'épaisseur inférieure ou égale à 8 mm et de 18 mm au-delà. L'acier utilisé est également de nuance S235 ou équivalent.

3.2.5 - Caractéristiques des plaques de glissement

(EN § 4.4.4)

Les caractéristiques des plans de glissement sont données par la norme NF EN 1337-2.

Les systèmes de glissement se composent généralement d'une plaque en acier inoxydable reposant sur une face de l'appareil d'appui sur laquelle est adhésivée une feuille de polytétrafluoroéthylène (PTFE) (cf. le § 2.2.4 de ce guide). Il s'agit des appareils d'appui de types D et E.

L'épaisseur minimum de la plaque support est donnée par la formule (**EN § 6.9.3**) :

$$t_b = \text{Max} \left(10 \text{ mm} ; 0,04 \sqrt{a_b^2 + b_b^2} \right)$$

Avec a_b et b_b : largeur et longueur de la plaque support en mm.

Le coefficient de frottement μ_d acier-PTFE alvéolé est donné dans le tableau 11 de la norme NF EN 1337-2.

Ce tableau est défini à partir de la formule suivante (**EN 1337 - 2 - Annexe B**) :

$$\mu_{\text{max}} = \frac{1,2 k}{10 + \sigma_p}$$

avec $k = 1$ pour l'acier austénitique (acier inoxydable)

σ_p pression de contact sur le PTFE en MPa

Ces valeurs varient de 3 à 8 % suivant les pressions usuelles de contact. En outre, la pression moyenne sur le bloc (surface A) est limitée à 30 MPa (pour un module G de 0,9 MPa et $k = 1$, cf. § 5.6 de la norme NF EN 1337-3).

Il est précisé que les valeurs données sont fonction de σ_p . Pour une descente de charge donnée, le coefficient de frottement est calculé à partir de la contrainte à l'ELU.

¹⁰ Pour les effets dynamiques verticaux des charges d'exploitation, on utilisera le module G.

Nous attirons l'attention sur la variation notable du coefficient de frottement en fonction de la contrainte de compression sur le PTFE.

Pour simplifier, on ne tiendra pas compte du facteur correctif de 2/3, sauf justification particulière et pour les applications dans les DOM-TOM où la température effective d'appui ne descend pas en dessous de - 5°C.

La vérification de la déformation des plaques de glissement (*NF EN 1337-2 § 6.9.2*), ne s'avère justifiée que pour des applications délicates ou particulières (par ex. pour les appareils d'appui de type E). Dans les autres cas, on pourra se contenter de ne vérifier que les ordres de grandeur.

3.3 - Dimensionnement de l'appareil d'appui

3.3.1 - Principes

Le principe de dimensionnement défini dans la norme NF EN 1337-3 consiste à justifier chaque appareil d'appui en fonction des sollicitations et, en conséquence, les tableaux de dimensions (tableau 3 de la norme ou tableau de l'annexe 3 du présent guide) ne sont que des bases de départ du calcul des dimensions de l'appareil d'appui. Ils ne sont donc donnés qu'à titre informatif.

Les règles de dimensionnement et de vérification des appareils d'appui visent à limiter leur distorsion horizontale totale, aux Etats Limites Ultimes, sous l'action des sollicitations verticales et horizontales et des déformations horizontales ou angulaires imposées à l'appareil d'appui.

Pour les appareils de type B, la norme NF EN 1337-3 distingue :

- les appareils d'appui de tailles recommandées, définis dans le tableau 3 de la norme NF EN 1337-3 ;
- les autres appareils d'appui, notamment ceux comportant deux demi-feuillets extérieurs.

Conformément à la NF EN 1337-3, quatre types de vérification aux Etats Limites Ultimes doivent être faits pour les appareils d'appui en élastomère fretté quel que soit leur type :

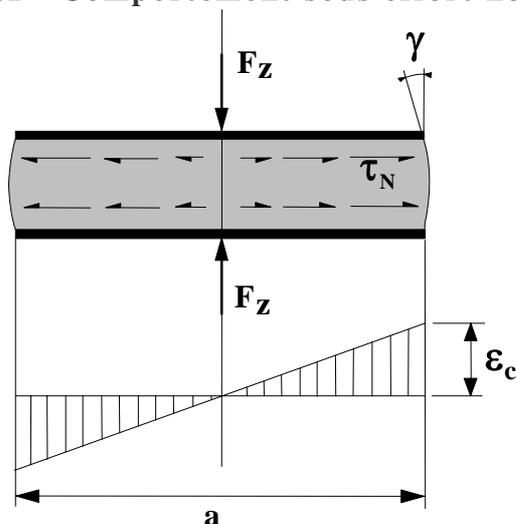
- la distorsion totale maximale en tout point de l'appareil d'appui est limitée ;
- l'épaisseur des frettes doit être suffisante pour résister à la traction qu'elles subissent ;
- la stabilité de l'appareil d'appui doit être assurée à la rotation, au flambement et au glissement ;
- les actions exercées par l'appareil d'appui sur le reste de la structure doivent être vérifiées (effet direct de l'appareil d'appui sur la structure et effet indirect dû aux déformations de l'appui).

3.3.2 - Comportement des appareils d'appui

Rappel : la norme NF EN 1337-3 prend en compte dans le calcul le feuillet externe lorsque son épaisseur est strictement supérieure à 2,5 mm.

En pratique, pour la France, l'épaisseur des couches externes est souvent la moitié de celle des feuillets internes. La distorsion sera donc maximum pour ces feuillets internes.

3.3.2.1 - Comportement sous effort normal



Sous un effort normal centré F_Z , on constate une répartition linéaire de la distorsion ϵ_c liée au cisaillement τ_N dans une couche d'élastomère. La distorsion est maximum au milieu du grand côté b de l'appareil d'appui.

Elle est donnée par la formule (EN § 5.3.3.2) :

$$\epsilon_c = \frac{\tau_N}{G} = \frac{1,5 F_Z}{G A_r S}$$

Dans cette formule :

G désigne le module conventionnel de l'élastomère (§ 3.2.2) avec $G = 0,9 \text{ MPa}$ et A_r est la surface en plan effective.

Figure 3.4 : distorsion de l'appareil d'appui sous effort normal.

Pour calculer A_r , on doit retirer l'enrobage latéral nominal pour obtenir A_1 (égale à la surface des frettes A' diminuée des trous si elles en comportent) et tenir compte des déformations horizontales v_x et v_y provoquées par les efforts horizontaux concomitants de l'effort vertical F_Z .

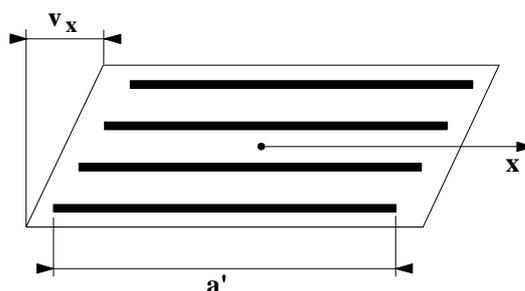


Figure 3.5 : surface réduite sous l'effet des déformations horizontales.

On a alors : $A_r = A' \left(1 - \frac{v_x}{a'} - \frac{v_y}{b'} \right)$ avec $A' = a' \times b'$ (si les frettes ne comportent pas de trous)

Le calcul des déformations v_x et v_y est relativement complexe. En première approche, on pourra souvent négliger l'effet de v_y et utiliser la valeur maximum de v_x .

- S est le coefficient de forme de la couche i considérée :

Pour un appareil d'appui rectangulaire, on a :

$$S = \frac{A'}{l_p t_c} \quad \text{avec } l_p = 2(a' + b')$$

et $\begin{cases} t_c = t_i & \text{pour les feuillettes des couches internes} \\ t_c = 1,4 t_i & \text{pour les feuillettes des couches externes} \end{cases}$

La norme donne également le moyen d'estimer la déformation totale $\sum v_z$ due à un effort vertical F_z (EN § 5.3.3.7) :

$$v_z = \sum \frac{F_z t_i}{A'} \left(\frac{1}{5 G_d S_i^2} + \frac{1}{E_b} \right)$$

Avec $E_b = 2000$ MPa

S_i : coefficient de forme du feuillet le plus épais

$A' = a' \times b'$: surface des frettes

Cette formule se simplifie sous la forme suivante : $v_c = F_z T_0 / A' [1 / (5 G S_1^2) + 1 / E_b]$

Cependant elle n'est pas logique dans la mesure où, en présence de feuillets externes, il est proposé d'appliquer S_i au lieu du S de ces feuillets externes dans le calcul de leur tassement. La formule suivante serait plus rationnelle :

$$v_z = \sum \frac{F_z t_i}{A'} \left(\frac{1}{5 G_d S_i^2} + \frac{1}{E_b} \right) \text{ avec } E_b = 2000 \text{ MPa}$$

Rappelons que, dans cette formule, S désigne le coefficient de forme du feuillet "i" et que, dans le cas d'un demi-feuillet, la valeur de S vaut 2/1,4 fois celle du feuillet intermédiaire.

Les valeurs obtenues avec cette formule sont légèrement inférieures à celles de la norme ce qui sécurise sur la vérification de la stabilité en rotation (Cf. § 3.4.1.3 ci-après) et limite les éventuelles pertes de contact avec le support sous l'effet des rotations.

D'une manière générale, les tassements obtenus avec ces formules sont beaucoup trop importants par rapport au comportement réel de l'appareil d'appui si l'on néglige les mouvements d'adaptation entre 0 et 3 MPa.

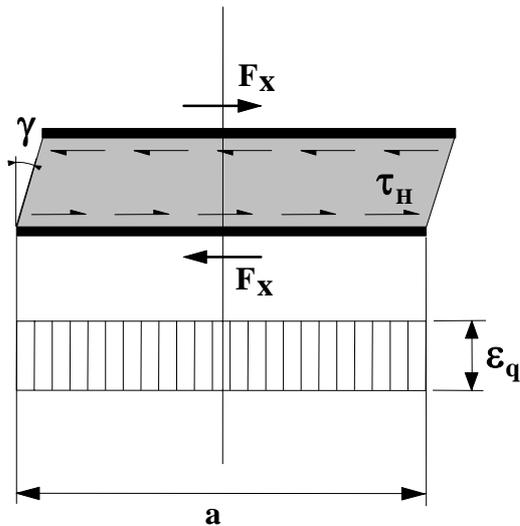
A titre d'exemples, lors d'essais, des variations de pression entre 5 et 15 MPa ont donné les tassements suivants :

Dimensions	Tassements		
	lors des essais	suivant la formule de la norme	suivant la formule modifiée ci-dessus
200 x 300 ; 2 (8 + 2) ; 2 x 4	0,5 mm	1,16 mm	0,98 mm
300 x 400 ; 3 (10 + 3) ; 2 x 5	0,6 mm	1,49 mm	1,32 mm
400 x 500 ; 4 (12 + 3) ; 2 x 6	0,75 mm	1,93 mm	1,76 mm

La norme précise que la déformation verticale n'est à peu près proportionnelle à la charge qu'après un premier tassement que l'on peut estimer à 2 mm. Cette valeur semble trop forte, notamment en cas d'assise sur des platines métalliques. Par ailleurs, l'examen de nombreux essais de tassement indique une très grande dispersion des résultats et cette dispersion est difficilement explicable. De fait, la valeur calculée du tassement selon la norme indique la valeur maximale que l'on puisse obtenir sur un appareil conforme. On observe sur certains essais des valeurs de tassement 2 fois plus petites que celle du calcul normatif vers 8 MPa et au-delà de 15 MPa le raccourcissement peut être 3 fois moindre que la valeur calculée. En conséquence, compte tenu de cette incertitude (et de la note 2 du § 5.3.3.7 de la norme NF EN 1337-3), **pour que la mise en charge des appareils d'appui sur une même ligne soit uniforme, il est fortement recommandé de prévoir une pose par "conjugaison"** (cf. § 3.4.1.3, encadré).

Dans le cas de structures très hyperstatiques et de grande rigidité, il est conseillé de faire des essais pour estimer les déformations réelles des appareils d'appui.

3.3.2.2 - Comportement sous effort horizontal



Sous un effort horizontal, on constate une répartition uniforme de la distorsion ε_q liée au cisaillement τ_H dans l'élastomère.

Sous un déplacement v_x ou sous un effort horizontal F_x , la distorsion est donnée par la formule (EN § 5.3.3.3) :

$$\varepsilon_q = \frac{v_x}{T_q} = \frac{F_x}{G a b}$$

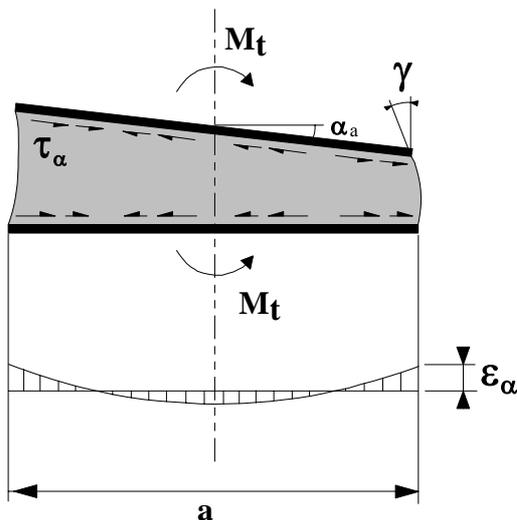
$$\varepsilon_q = t g \gamma$$

Figure 3.6 : distorsion de l'appareil d'appui sous un effort horizontal

Dans ces formules, le module G sera pris égal à 0,9 MPa pour les chargements statiques et à 1,8 MPa sous les actions dynamiques (cf. 3.2.2). Par simplification, pour les ouvrages non exceptionnels, les déplacements sous l'action du vent sont considérés uniquement à état statique.

D'autre part, le projeteur devra composer vectoriellement les efforts longitudinaux et transversaux suivant les combinaisons d'actions du chapitre 4 du présent document (pour obtenir un effort F_{xy}) lorsque le cas se présentera.

3.3.2.3 - Comportement sous une rotation d'axe horizontal



La valeur de la distorsion ε_{α} , sous l'effet de rotations α_a et α_b d'axes perpendiculaires aux côtés a et b de l'appareil d'appui, est donnée par (EN § 5.3.3.4) :

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{(a^2 \alpha_a + b^2 \alpha_b) t_i}{2 \sum t_i^3}$$

La répartition des distorsions est donnée dans la figure 3.7.

Figure 3.7 : distorsion de l'appareil d'appui sous un moment d'axe horizontal

Le moment de rappel M_t s'obtient en fonction de la rotation α par (EN § 5.3.3.7) :

$$M_t = \frac{G \alpha a^5 b'}{n t_i^3 K_s}$$

Dans cette formule, α est la rotation d'axe parallèle au côté b de l'appareil d'appui et n représente le nombre de feuillets internes.

K_s est donné dans le tableau suivant (cf. NF EN 1337-3, tableau 4) :

b/a	0,5	0,75	1	1,2	1,25	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,5	10	∞
K_s	137	100,0	86,2	80,4	79,3	78,4	76,7	75,3	74,1	73,1	72,2	71,5	70,8	68,3	61,9	60

Figure 3.8 : valeurs de K_s pour un appareil d'appui rectangulaire

On peut également utiliser la formule approchée :

$$K_s = 26,2 e^{-1,2785 \ln\left(\frac{b}{a}\right)} + 60$$

3.4 - Vérifications du dimensionnement

3.4.1 - Vérification de base

3.4.1.1 - Limitation de la distorsion

La distorsion totale en tout point de l'appareil d'appui est limitée à l'Etat Limite Ultime (EN § 5.3.3) :

$$\varepsilon_\tau = K_L (\varepsilon_c + \varepsilon_q + \varepsilon_\alpha) < 7$$

Dans cette formule :

- K_L est un coefficient égal à 1,00 dans le cas général. Ce coefficient peut être porté à 1,5 dans le cas des ouvrages ferroviaires uniquement sous charges roulantes ;
- ε_c , ε_q et ε_α sont les distorsions calculées respectivement sous l'effort vertical, les efforts ou déplacements horizontaux et les rotations du tablier.

De plus, la norme (EN § 5.3.3.3) limite la distorsion sous les efforts ou déplacements horizontaux à 1: $\varepsilon_q < 1$.

Cette prescription concerne les efforts et déplacements de courte et longue durée. D'autre part, les cas de chargement à considérer comportent des efforts et des déplacements concomitants dans deux directions perpendiculaires qu'il convient de composer vectoriellement pour cette vérification.

A noter qu'il n'existe pas de limitation pour ε_c seul ou F_z (autre que celle relative au flambement).

3.4.1.2 - Traction dans les frettes

Les frettes doivent avoir au moins 2 mm d'épaisseur. La norme demande aussi de vérifier l'épaisseur minimale des frettes métalliques à l'Etat Limite Ultime. Pour des appareils d'appui sans alvéoles (non percés), dont les feuilletts sont d'épaisseur constante t_i , l'épaisseur minimale t_s des frettes est définie par (EN § 5.3.3.5 en simplifiant la formule pour ce cas de figure) :

$$t_s = \gamma_m \frac{2,6 F_z t_i}{A_r f_y}$$

avec :

- F_z Effort vertical maximum appliqué ;
- f_y limite élastique de l'acier qui compose les frettes (soit 235 MPa pour l'acier S235) ;
- γ_m Coefficient partiel de sécurité dont la valeur est de 1 dans le texte d'application nationale (cf. § 1.3).

Pour les appareils d'appui dont les épaisseurs de couches d'élastomère varient ou dont les frettes comportent des trous, cette formule n'est plus valable et on se reportera à la norme (EN § 5.3.3.5, formule générale).

Nota : dans le cas d'appareils d'appui fortement sollicités en rotation ou proche de la limite de flambement, il est conseillé, pour les rapports $b/a' < 1,24$, d'augmenter l'épaisseur t_s de 5 à 10 %.

3.4.1.3 - Condition limite en rotation

La stabilité en rotation de l'appareil d'appui se vérifie à l'Etat Limite Ultime. On doit vérifier (EN § 5.3.3.6) :

$$\sum v_z \geq \frac{(a' \alpha_a + b' \alpha_b)}{K_r}$$

avec :

- α_a et α_b rotations d'axes perpendiculaires aux côtés a et b de l'appareil d'appui ;
- K_r coefficient égal à 3 ;
- $\sum v_z$ somme des déformations verticales calculées comme dans le paragraphe 3.3.2.1 de ce guide.

Rappelons que les rotations α_a et α_b doivent inclure les défauts de pose. Celles-ci dépendent beaucoup du soin apporté à la mise en œuvre, de la précision des calculs de déformation pendant la pose, mais également du degré d'homogénéité interne de l'appareil d'appui. Dans la mesure du possible, il sera recherché une méthode de pose conjuguant les surfaces par exemple avec un bain de mortier, un matage ou le béton du tablier coulé en place.

La norme NF EN 1337-3 (§ 7.1.4) n'est pas claire sur les valeurs à adopter pour les défauts de pose, ni sur la façon de les prendre en compte. Les valeurs forfaitaires suivantes sont donc proposées :

- 0,003 radian dans le cas des méthodes de pose dites conjuguées ;
- 0,010 radian pour les structures posées directement sur les appareils d'appui.

Ce défaut de pose sera ajouté à la plus grande des rotations α_a ou α_b .

3.4.1.4 - Stabilité au flambement

La stabilité au flambement doit être vérifiée à l'Etat Limite Ultime dans les conditions suivantes (EN § 5.3.3.6) :

$$\frac{F_z}{A_r} < \frac{2 G a' S_1}{3 T_e}$$

On appliquera cette formule avec la réaction maximale de la combinaison fondamentale ayant le plus fort rapport F_z/A_r , et avec un module égal à 0,9 MPa.

3.4.1.5 - Condition de non-glissement

La vérification du non-glissement est assurée, en l'absence de dispositif anti-cheminement, si (**EN § 5.3.3.6**) :

$$F_{xy} \leq \mu_e F_z \quad \text{et} \quad \frac{F_{z,Gmin}}{A_r} \geq 3 \text{ MPa}$$

avec :

$F_{z,Gmin}$ Réaction minimale sous charges permanentes ;

F_z et F_{xy} Réaction verticale et effort horizontal concomitant les plus défavorables ;

μ_e Coefficient de frottement entre l'appareil d'appui et la structure.

Remarque : sauf dans le cas où l'appareil d'appui ne reviendrait jamais en position de déplacement nul ($v_{xy} = 0$), la surface A_r doit être prise égale à A' pour vérifier la condition $\sigma_m \geq 3 \text{ MPa}$.

Pour le calcul de F_{xy} , on compose vectoriellement les efforts horizontaux provenant de toutes les actions concomitantes résultant des combinaisons d'actions présentées au chapitre 4 du présent document. F_{xy} est donc composé d'efforts permanents ou variables appliqués directement au tablier (effet du vent et du freinage) et d'efforts permanents ou variables provenant de déformations ou distorsions imposées (température, retrait, fluage, dénivellations d'appui, ...).

Le coefficient μ_e est imposé par la norme dans la plupart des cas :

$$\mu_e = 0,1 + \frac{1,5 K_f}{\sigma_m} \quad \text{avec} \quad \sigma_m = \frac{F_z}{A_r} \quad (\text{en MPa})$$

$K_f = 0,60$ pour le béton

$K_f = 0,20$ pour les autres surfaces y compris mortier en résine

Nota : l'attention est attirée sur le fait que la plupart des mortiers spéciaux ne sont pas à considérer comme "mortier de résine".

Ce coefficient peut toutefois prendre des valeurs inférieures à celles données ci-dessus ; c'est par exemple le cas d'appareils d'appui posés sur des tôles métalliques peintes, ou sur certaines résines.

3.4.1.6 - Pression sur les plans de contact

Si la norme prévoit une vérification de la pression de contact entre l'appareil d'appui et la structure, elle n'en donne que le principe, en signalant que cette pression peut ne pas être uniforme (**EN § 5.3.3.7**), cf. tableau 4.4 dans le chapitre 4.

Pour un pré-dimensionnement, on pourra reprendre la valeur usuelle d'une contrainte moyenne sur la surface de frottement d'environ 20 à 25 MPa à l'ELU (moins pour les petits blocs, un peu plus pour les grandes dimensions), étant entendu que la contrainte moyenne finale découlera de la formule globale du § 5.3.3 de la norme NF EN 1337-3. S'il existe un risque de soulèvement, la contrainte finale devra être recalculée. Pour les appareils d'appui de grandes dimensions, des pressions supérieures sont possibles, comme pour les autres types d'appareils d'appui à pressions élevées (appareils d'appui à pot par exemple) ; il est impératif de bien prendre en compte dans la conception des supports, la possibilité de diffusion de la descente de charge sur sa surface réduite.

Pour les appareils d'appui reposant sur des bossages en béton, on pourra vérifier les bossages et le chevêtre de la pile aux Etats Limites Ultimes selon les règles de l'article 6.7 de l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1). La contrainte sur le béton pourra être calculée en considérant une surface réduite chargée uniformément et en tenant compte non seulement de la distorsion en translation, mais aussi de la rotation et du durcissement éventuel de l'élastomère en fonction de la pression moyenne. Un exemple de calcul est donné au § 3.4.2 avec la méthode de recherche d'un éventuel soulèvement au niveau des supports.

En conclusion, les vérifications à effectuer à l'ELU, sous combinaisons fondamentales, sont récapitulées dans le tableau de la figure 3.9.

Vérification	ELU Combinaisons fondamentales
Limitation de la distorsion ε	$\varepsilon = K_L (\varepsilon_c + \varepsilon_q + \varepsilon_\alpha) < 7$ et $\varepsilon_q < 1$
Traction dans les frettes	$t_s = \frac{2,6 F_z t_i}{A_r f_y}$
Limite en rotation	$\sum v_z \geq \frac{(a' \alpha_a + b' \alpha_b)}{K_r}$
Stabilité au flambement	$\frac{F_z}{A_r} < \frac{2 G a' S_1}{3 T_e}$
Non-glissement	$F_{xy} \leq \mu_e F_z$ et $\frac{F_{z,Gmin}}{A} \geq 3 \text{ MPa}$

Figure 3.9 : synthèse des vérifications à effectuer

3.4.2 – Evaluation des surfaces réelles de contact et des pressions à répartir dans les supports

3.4.2.1 - Résultats expérimentaux

Toutes les prescriptions données par la norme NF EN 1337-3 sont basées sur un module de cisaillement déduit d'essais de cisaillement pur. Or le comportement d'un appareil d'appui en compression simple est plus complexe. Le module varie en différents points de l'élastomère et n'est pas constant en fonction de la contrainte appliquée. La rotation vient encore compliquer la distribution des cisaillements.

Ce phénomène pourrait être la cause de nombreux soulèvements que l'on a constaté sur des appareils d'appui en place, sous l'effet des rotations imposées par le tablier. En effet, même avec un appareil d'appui correctement dimensionné, les rotations extrêmes peuvent provoquer, sur un bord de l'appareil d'appui, une décompression supérieure à l'effet de la charge verticale centrée. Cette décompression est susceptible de détériorer les appareils d'appui.

Les études expérimentales¹¹ ont permis d'établir les courbes limites de soulèvement en fonction de la rotation α et de la compression $\sigma = F_z / A'$. Ces courbes sont présentées sur la figure 3.10, à titre d'illustration du phénomène observé par rapport au calcul théorique. Elles justifient l'utilisation d'un coefficient d'adaptation K_a qui représente le rapport entre la distorsion due à la compression ε_c et la distorsion due à la rotation ε_α , lorsque le soulèvement se produit. En théorie ce coefficient est de 1,00, mais l'expérience montre qu'il peut varier entre deux valeurs $K_{a \text{ min}}$ et $K_{a \text{ max}}$ (la valeur **maximale** $K_{a \text{ max}}$ varie de 2 à 2,75 respectivement pour une pression moyenne F_z/A_r de 10 à 50 MPa).

Comme expliqué au § 3.3.2.1 (ainsi que dans la note 2 du § 5.3.3.7 de la norme NF EN 1337-3), la grande dispersion des résultats d'essais ne permet qu'une évaluation approximative de la surface **minimale** de contact par le calcul.

¹¹ Notamment les essais effectués au LROP dans le cadre de recherches.

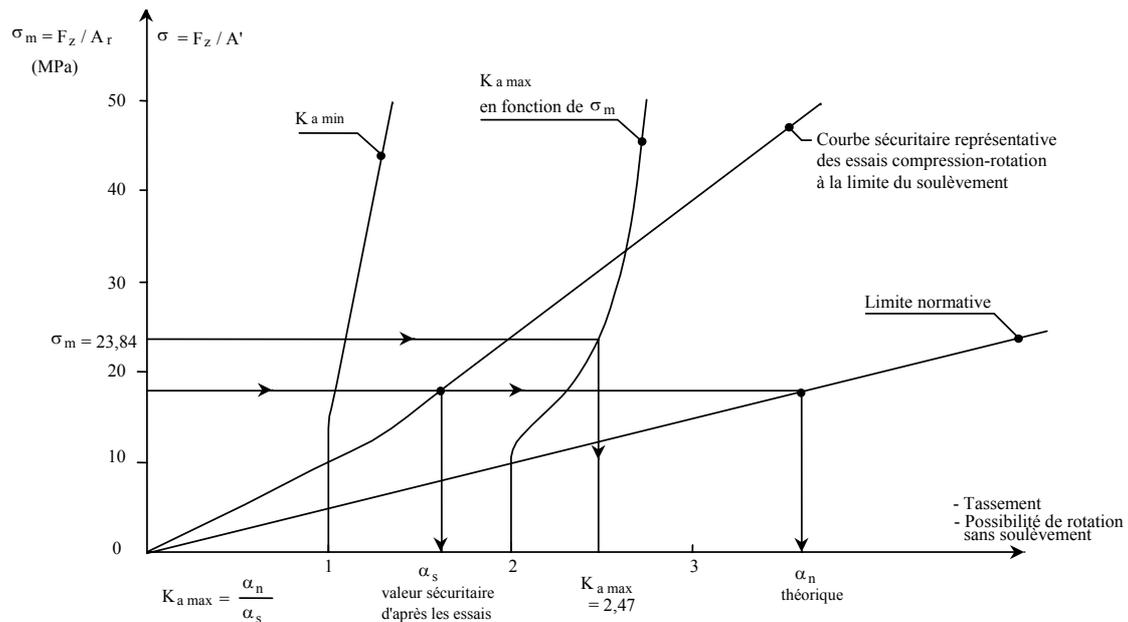


Figure 3.10 : comportement compression-rotation avant soulèvement.
Détermination du coefficient correcteur $K_{a \max}$.

3.4.2.2 - Méthode d'évaluation proposée

3.4.2.2.1 - Présentation

La norme prescrit de vérifier que la contrainte **moyenne** en surface réduite est compatible avec la résistance des matériaux d'assise. Cette justification est suffisante pour les matériaux autres que le béton ou les mortiers.

Les règlements concernant le béton (Eurocodes, BAEL, ...) considèrent une vérification plus complexe, consistant à diffuser une **force répartie uniformément sur une surface réduite** de contact. Il y a donc lieu, suivant ces règlements, de vérifier la pression uniforme de contact, la possibilité de diffusion dans la masse de cette force, et de concevoir l'épaisseur et la densité des aciers de fretage.

Nous proposons d'effectuer une évaluation complémentaire plus précise des surfaces de contact entre l'appareil d'appui et son support. Cette méthode est un calcul sécuritaire de la surface minimale de contact à l'aide d'un coefficient $K_{a \max}$ donné par la figure 3.10. Elle tient compte des interactions entre le coefficient de forme, la distorsion, le tassement et le moment de rappel de la norme. Toutes ces relations ayant été simplifiées par rapport au modèle exact de calcul¹², il n'y a donc pas une cohérence parfaite entre toutes ces relations et l'on ne peut donc prétendre à un calcul très rigoureux. Il a surtout été recherché une méthode simple (pas d'itérations) pour obtenir l'ordre de grandeur de la pression à répartir sur les supports et pour déterminer la présence éventuelle d'une perte de contact du bloc d'élastomère pour le cas d'une fabrication présentant une raideur en tassement maximale. Le calcul de la détermination des surfaces soumis à une pression **uniforme** est conduit selon l'annexe informative A de la norme NF EN 1337-2. Les diagrammes simplifiés de pression sont représentés dans le tableau 4.4 du chapitre 4.

3.4.2.2.2 - Principe de calcul pour déterminer la pression uniforme et un éventuel risque de soulèvement

(Nota : par simplification, il n'est envisagé ici qu'une seule rotation α_a d'axe parallèle au côté b).

- Calcul selon la norme du respect des critères de distorsion,
- Calcul selon la norme de la pression σ_m sur la surface A_r ,
- Détermination de $K_{a \max}$ en fonction de σ_m (cf. figure 3.10),
- Calcul du moment de rappel en tenant compte de la raideur maximale de l'élastomère :

$$M_t = \frac{G \alpha a'^5 b'}{n' t_i^3 K_s} \times K_{a \max}$$

- si les 2 feuillets d'enrobage sont actifs, prendre $n' = n + 2 (e/t_i)^3$, sinon prendre $n' = n$ nombre de feuillets internes,

¹² cf. théories de F. Conversy et M. Topaloff et commentaires de J. Rajade

– si la pose est conjuguée, prendre $\alpha = \alpha_a - 0,003$. La valeur 0,003 rad correspond à la précision "interne" d'une pose conjuguée, phénomène présent dans les observations faites lors des essais de décollement. Dans le cas contraire, prendre pour α la valeur théorique ELU des calculs, augmentée de la précision de pose (à multipliée par 1,35 pour obtenir une valeur ELU).

• Calcul de l'excentrement de la résultante des forces : $exc_{max} = Mt/Fz$.

a) Si la valeur exc_{max} est inférieure à : $a'/6$, il n'y a pas de risque de soulèvement, il peut cependant exister une perte de contact sans un véritable décollement en cas de distorsion provenant du déplacement v_x .

Dans ce cas en simplifiant, la pression uniforme a pour valeur, sur le support le plus sollicité :

$$\sigma_{unif} = Fz / A_{unif}$$

soit, sur une surface de pression uniforme, $A_{unif} = (a' - 2 exc_{max} - v_x) b'$

La surface ainsi définie est celle à prendre en compte pour la diffusion de la force dans les supports (cf. tableau 4.4 du chapitre 4).

b) Si la valeur exc_{max} est supérieure à : $a'/6$, il y a un risque de soulèvement.

Dans ce cas, on calcule forfaitairement un coefficient K_{rs} de réduction de surface de contact par rotation à l'aide des valeurs de distorsions en compression et en rotation avec la formule :

$$K_{rs} = \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_c / K_{a\max}}{\varepsilon_\alpha}} \quad (\text{valeur toujours } < 1)$$

ε_α représente la distorsion de rotation sous un angle α .

Le coefficient $K_{a\max}$ est donné dans le tableau suivant (ainsi que dans la *figure 3.10*) :

σ_m (MPa)	0 - 10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
$K_{a\max}$	2,00	2,05	2,17	2,29	2,38	2,44	2,50	2,55	2,58
σ_m (MPa)	32,5	35	37,5	40	42,5	45	47,5	50	
$K_{a\max}$	2,62	2,64	2,67	2,69	2,71	2,72	2,74	2,75	

Figure 3.11 : tableau donnant les valeurs du coefficient d'adaptation $K_{a\max}$ en fonction de la contrainte moyenne $\sigma_m = F_z/A_r$.

La nouvelle surface réduite a pour valeur : $K_{rs} (a' - v_x) b'$, d'où $\sigma_m' = F_z/K_{rs} (a' - v_x) b'$ et la surface minimale de répartition uniforme vaut les 2/3 de la précédente, soit une pression uniforme de :

$$\sigma_{unif} = 3 F_z / 2 K_{rs} (a' - v_x) b' = 1,5 \sigma_m$$

La surface : $2/3 K_{rs} (a' - v_x) b'$ est celle à prendre en compte pour la diffusion de la force dans les supports (cf. tableau 4.4 du chapitre 4).

De fait, nous déconseillons l'utilisation des appareils d'appui en position partielle de décollement sous charges maximales ; cependant, il pourrait être toléré pour les appareils de petites et moyennes dimensions une perte de contact d'environ 10 % en service sous combinaisons fondamentales. Sous charges minimales ou en phase provisoire, un décollement un peu plus important peut être envisagé. Bien entendu la possibilité de diffusion des charges dans les supports sera vérifiée.

Il est toujours préférable d'ajouter un feuillet si la condition de non-flambement reste respectée.

Nota : dans le cas d'une rotation dans les 2 directions de l'appareil, on calcule la surface réduite en 2 fois en employant la même démarche.

3.5 - Dispositions sur appui

3.5.1 - Sur une même ligne d'appuis, les appareils d'appui doivent être de même nature (susceptibles notamment de présenter un même tassement), étant toutefois précisé que leurs possibilités de translation ne sont pas nécessairement les mêmes (figure 3.12 & 3.13).

3.5.2 - Il est déconseillé de juxtaposer dans le sens longitudinal plusieurs appareils d'appui destinés à ne former qu'un seul point de report de charge (figure 3.12 moitié supérieure). Cette restriction ne s'applique pas au cas des appareils d'appui dédoublés, dont la distance entre axes est en général de l'ordre de 2 m ou plus.

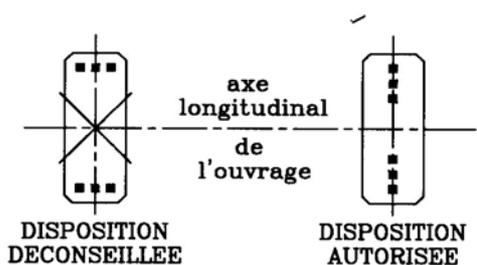
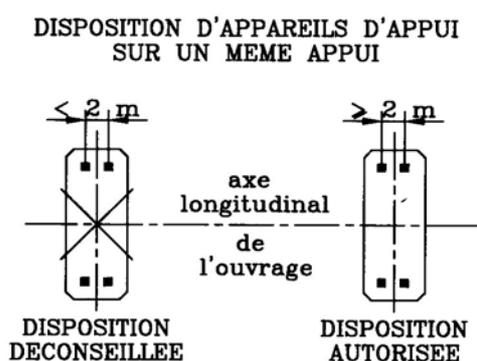


Figure 3.12 : exemples de dispositions admises et fortement déconseillées dans le sens longitudinal.

Nota : dans le cas du haut cette disposition rend les rotations difficiles ce qui doit être pris en considération dans le calcul.

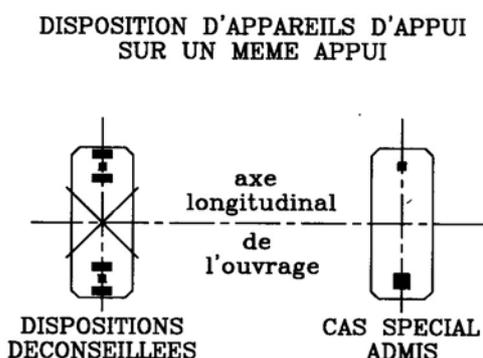


Figure 3.13 : exemple de dispositions admises et fortement déconseillées dans le sens transversal.

3.5.3 - Dans le sens transversal, il est possible de juxtaposer plusieurs appareils d'appui (figure 3.12 moitié inférieure) destinés à ne former qu'un seul point d'appui. Ces appareils d'appui doivent être obligatoirement identiques dans leur composition et leurs dimensions. Il convient de rappeler que de telles dispositions doivent être justifiées en tenant compte en particulier des rotations dues aux défauts de pose susceptibles d'exister dans le sens transversal.

Il est en général déconseillé de placer au droit d'un même point d'appui, des appareils ne présentant pas les mêmes dimensions, en raison de leur différence de rigidité (figure 3.12). Dans le cas d'un pont biais, à poutres multiples, il est le plus souvent préférable de disposer sur une même ligne des appareils d'appui identiques dont le dimensionnement sera celui de l'appareil le plus sollicité, mais en portant son attention sur les contraintes minimales sur l'appareil d'appui le moins sollicité pour éviter un cheminement.

3.5.4 - Lorsque les appareils d'appui exercent des contraintes de compression importantes sur les appuis des précautions particulières doivent être prises.

Lorsque les appuis sont en béton armé, il convient de ménager une revanche de 10 à 15 cm minimum en vue d'assurer la répartition correcte des contraintes, la mise en place des frettes et leur ancrage (figure. 3.14). En tout état de cause, il conviendra de suivre les prescriptions relatives aux constructions en béton armé.

3.5.5 - On veillera à placer, dans toute la mesure du possible, la face inférieure des appareils d'appui au-dessus du niveau des plus hautes eaux connues ou des crues centennales.

3.5.6 - Repérage sur les appuis

La position sur l'ouvrage, la grandeur et la direction d'un éventuel prééréglage, ainsi que le sens de pose doivent être indiqués clairement sur les appuis.

3.5.7 - Remplacement d'appareils d'appui

Dans le cas de changement d'appareils d'appui sur un pont en service, comme pour toute réparation, quand on dimensionne un appareil d'appui en remplacement, ce dimensionnement sera un compromis entre les règles de calcul du présent document et les possibilités sur l'ouvrage existant (hauteur disponible, dimensions en plan, ...). Pour apprécier les adaptations aux présentes règles, prendre contact avec les bureaux d'études du réseau technique.

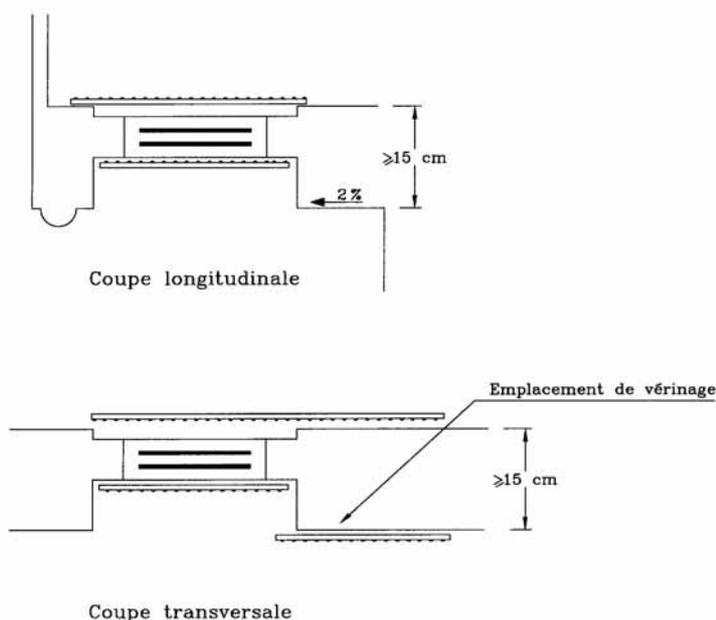


Figure 3.14 : exemple de dispositions constructives rappelant la nécessité du frettage au droit des emplacements de vérinage.

Chapitre 4

Principes de calcul d'un ouvrage comportant des appareils d'appui

4.1 - Généralités - Contexte réglementaire

Les principes de calcul des appareils d'appui en élastomère fretté ont été décrits dans le chapitre précédent. Cependant, un certain nombre de grandeurs, les déformations et les efforts longitudinaux en particulier, procèdent d'une interaction entre les appareils d'appui et la structure en raison de la souplesse des appuis.

Le dimensionnement exact d'un appareil d'appui nécessite donc de prédéterminer ses dimensions avant d'introduire ses caractéristiques de souplesse (verticale, horizontale et de rotation) dans l'ensemble de la structure (tablier et piles) pour en obtenir les efforts et déplacements horizontaux permettant de vérifier que le dimensionnement respecte bien les limites décrites dans le chapitre ci-avant. Dans le cas contraire, il convient alors de réaliser une itération.

Dans la norme NF EN 1337-3, le calcul des appareils d'appui se fait uniquement à l'Etat Limite Ultime. Les combinaisons à utiliser sont donc des combinaisons fondamentales dans lesquelles interviennent, outre les actions permanentes, les actions dues aux charges routières, aux effets de la température (uniforme et gradient thermique) ainsi qu'au vent.

Ces vérifications doivent être complétées par des combinaisons accidentelles si les piles de l'ouvrage sont susceptibles de recevoir des chocs de bateaux ou de poids lourds et des combinaisons sous actions sismiques si l'ouvrage y est soumis. Enfin dans quelques cas particuliers, d'autres vérifications sont à effectuer comme, par exemple, pour un fléau reposant en construction sur ses appareils d'appui définitifs.

Pour les calculs qui vont suivre, on a utilisé les combinaisons fournies par les textes suivants :

- NF EN 1991-1-5 : cette norme précise les valeurs à utiliser pour les actions de température uniforme ΔT_N et de gradient thermique ΔT_M . Elle précise également la façon de combiner ces deux actions pour tenir compte de leur simultanéité et obtenir l'effet global caractéristique T_k ;
- Annexe A2 de NF EN 1990 : cette annexe définit les combinaisons à utiliser en particulier pour le calcul des appuis et appareils d'appui.

En première approche, on peut retenir les combinaisons fondamentales données dans le tableau 4.1 :

		N°	
$1,35 G_{k,sup} + G_{k,inf} + P + S + C$	}	$+ 1,35 \{UDL_k + TS_k + q_{fk,comb}\} + 1,5 \min\{FW^* ; 0,6 FW_k\}$	1
		$+ 1,35 \{UDL_k + TS_k + q_{fk,comb}\} + 1,5 \{0, 6 T_k\}$	2
		+ 1,35 gr1b	3
		+ 1,35 gr2	4 ⁽¹⁾
		$+ 1,35 \{gr3 \text{ ou } gr4\} + 1,5 \{0,6 T_k\}$	5
		+ 1,35 gr5	6
		+ 1,5 F_{wk}	7
		$+ 1,5 T_k + 1,35 \{0,4 UDL_k + 0,75 TS_k + 0,4 q_{fk,comb}\}$	8

Tableau 4.1 : liste des combinaisons fondamentales

(1) incluant le freinage

Dans l'exemple de calcul, pour simplifier, on ne considérera que les charges UDL, TS_k et q_{fk} , ainsi que les charges de freinage, d'où le tableau 4.2.

		N°
$1,35 G_{k,sup} + G_{k,inf} + P + S + C$	$+ 1,35 \{UDLk + TS_k + q_{fk,comb}\} + 1,5 \{0,6 Tk\}$	2
	$+ 1,35 gr2$	4
	$+ 1,5 Tk + 1,35 \{0,4 UDLk + 0,75 TS_k + 0,4 q_{fk,comb}\}$	8

Tableau 4.2 : les combinaisons retenues dans l'exemple

Les efforts horizontaux qui interviennent dans les combinaisons précédentes sont à calculer selon les modalités suivantes :

- pour le freinage :

La norme NF EN 1991-2 définit l'effort de freinage à appliquer au tablier comme une fraction de la charge maximum que l'on peut disposer sur la voie la plus chargée dans le modèle de charge 1 (NF EN 1991-2 § 4.4.1). Ces fractions sont respectivement de 10 % pour la charge répartie UDL et de 60 % pour les charges concentrées TS.

Si on considère un ouvrage de classe 2 dont la voie principale mesure 3 mètres de largeur, l'effort total de freinage, en valeur caractéristique, pour un tablier de longueur L est donné par :

$$H_k = 324 + 1,89 \times L \text{ avec } L \text{ en mètres et } H_k \text{ en kN.}$$

L'effort de freinage varie de 340 à 400 kN environ pour des ouvrages modestes de 10 à 50 mètres de longueur et atteint la valeur maximum de 900 kN pour les ouvrages de 305 mètres de longueur entre joints de chaussée. Cette valeur est nettement supérieure à celles habituellement utilisées dans les anciens règlements (300 kN pour le freinage du camion Bc par exemple). Pour les ouvrages sur élastomère fretté, les efforts de freinage se répartissent sur l'ensemble des appareils d'appui du tablier, ce qui ne devrait pas poser de problème pour le ferrailage des piles. Par contre, pour les grands ouvrages comportant des appuis fixes reprenant la quasi totalité des efforts horizontaux, le dimensionnement des piles peut être délicat avec des valeurs aussi élevées du freinage. Si l'ouvrage comporte des piles hautes et souples, il est conseillé de disposer plusieurs appuis fixes. Dans le cas contraire, l'appui fixe devrait être disposé sur une pile courte, voire sur culée, ce qui peut conduire à des difficultés pour le dimensionnement du joint de chaussée (et des plaques de glissement) sur la culée située à l'autre extrémité de l'ouvrage.

Cet effort maximum de freinage sera certainement diminué dans l'annexe nationale puisque la norme NF EN 1991-2 le permet. L'effort de freinage maximum pourrait alors être ramené à 500 kN, sauf si l'ouvrage porte des charges militaires conformes aux accords de normalisation STANAG (Char Mc 120).

- pour les effets thermiques :

Les effets de la température sont définis dans la section 4 de la norme NF EN 1991-1-5. Les écarts de température $T_{e,max}$ et $T_{e,min}$ en valeurs caractéristiques sont à calculer en fonction du matériau qui constitue le tablier et de la région où est construit l'ouvrage. Ces températures doivent être déterminées à partir de cartes qui seront fournies dans l'annexe nationale¹³ de la norme NF EN 1991-1-5. Dans l'attente, on pourra utiliser les valeurs suivantes que l'on retrouvera dans l'annexe nationale :

Matériau du tablier	$T_{e,min}$			$T_{e,max}$		
	Béton	Mixte	Acier	Béton	Mixte	Acier
Bretagne – Provence Côte d'Azur	-10 °C	-10 °C	-20 °C	40 °C	45 °C	55 °C
Centre – Nord	-15 °C	-15 °C	-25 °C			
Sud-ouest						
Est - Alpes	-20 °C	-20 °C	-30 °C			

¹³ A la date de rédaction de ce texte, l'Annexe Nationale est en cours de mise au point en vue de sa publication prochaine.

Les variations de températures issues de ces températures maximales et minimales sont à calculer en fonction d'une température T_0 qui est prise égale à $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en l'absence de spécification du projet particulier.

Pour le calcul du calage des appareils d'appui à la pose, ou de ses plaques de glissement, la norme NF EN 1991-1-5 prescrit un supplément à ajouter à l'étendue de ces variations de température. Ce supplément est de $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou de $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ si la température de pose est spécifiée. L'interprétation que nous donnons à cette prescription est que si l'appareil d'appui est mis en charge à une température proche de $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (température d'équilibre), le supplément sera de $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les coefficients de dilatation prévu dans l'Eurocode sont de $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ pour les tabliers en béton et $1,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ pour les ponts métalliques (NF EN 1991-1-5 – Annexe C). Pour les tabliers des ouvrages mixtes, la norme NF EN 1994-2 précise au paragraphe 5.4.2.5 (3) que ce coefficient doit être pris égal à $1,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ pour le calcul de la dilatation, et à $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ pour le calcul des gradients thermiques.

Précisons également que, même si les Eurocodes ne l'indiquent pas explicitement, le calcul de répartition des efforts dans les différents appuis, et donc des efforts dans les piles, doit être fait en utilisant le module instantané du béton.

4.2 - Dimensionnement

4.2.1 - Présentation

La meilleure manière de comprendre le déroulement des calculs de dimensionnement d'appareils d'appui est de s'appuyer sur un exemple (qui n'est pas un cas réel et n'a pour seul but que d'illustrer la démarche).

On considère le dimensionnement des appareils d'appui en élastomère fretté d'un ouvrage en béton précontraint coulé en place (PSI-DP).

L'ouvrage considéré comporte 3 travées et a une longueur totale de 62 m. La largeur de la dalle est de 12,30 m pour une épaisseur de 0,90 m.

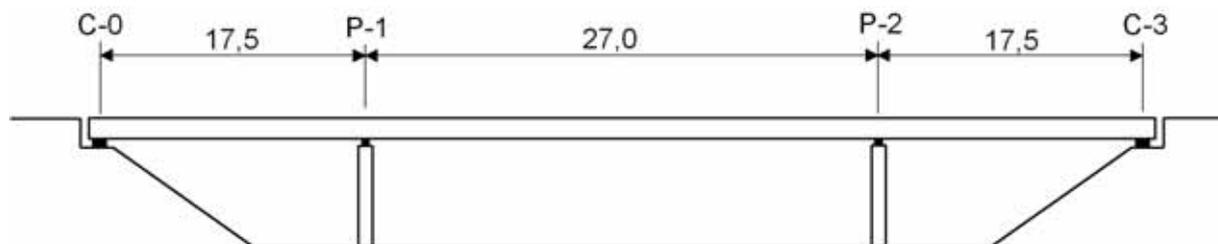


Figure 4.1 : coupe longitudinale de l'ouvrage

Chaque ligne d'appui comporte deux appareils d'appui. Les efforts et déformations imposées sont récapitulés dans le tableau 4.3 (efforts pour un seul appareil d'appui à l'ELU fondamental pour la culée C0). Ces efforts résultent d'un calcul de dimensionnement général de la structure (calcul informatique complété par des notes manuelles supposant une répartition égale des efforts sur chaque appareil d'appui d'une même ligne).

		V (MN)	α (10^{-3} rad)	Vx* (m)	Hx (MN)	Comb N°
1,35 G _{sup} + G _{min} + S + C + 1,35 LM _{cara} + 1,5 (0,6T)	Maxi	4,50	5,7	0,070	-	2
	Mini	0,71	3,3	0,068	-	2 bis
1,35 G _{sup} + G _{min} + S + C + 1,35 gr2 + 1,5 (0,0T)	Maxi	3,75	4,9	0,061	0,055	4
	Mini	0,79	1,8	0,059	0,055	4 bis
1,35 G _{sup} + G _{min} + S + C + 1,5 T + 1,35 LM _{freq}	Maxi	3,82	6,7	0,080	-	8
	Mini	0,75	3,3	0,078	-	8 bis
G _{min} (mise en service des appareils d'appui)		0,89				9

*Nota : S correspond au retrait, C au fluage, P à la précontrainte.
Vx* correspond au déplacement sans l'effet de l'effort de freinage (Hx).*

Tableau 4.3 : efforts et déformations calculés

Les calculs qui suivent correspondent à la démarche conseillée pour dimensionner un appareil d'appui.

4.2.2 - Aire de l'appareil d'appui

Sauf prescriptions particulières (par exemple : appareils d'appui provisoires de pont poussé), et sous réserve de justifications complémentaires, la contrainte de compression moyenne doit être comprise entre 20 et 25 MPa sur la surface A' suivant la dimension de l'appareil d'appui.

Dans notre exemple, nous partons sur la valeur haute de la fourchette soit : 25 MPa.

On obtient donc, pour la réaction verticale maximale (combinaison n° 2 du tableau 4.3) :

$$A' > \frac{4,50}{25} = 0,1800 \text{ m}^2 \text{ soit } 1800 \text{ cm}^2$$

4.2.3 - Hauteur nette d'élastomère

La condition habituellement prépondérante est celle de ϵ_q liée au déplacement horizontal maximal. Celui-ci est dû, essentiellement, au déplacement imposé par la température uniforme sur la structure plus éventuellement le déplacement dû à la force de freinage. Nous avons donc les combinaisons n° 4 et 8 du tableau 3 à vérifier :

$$\epsilon_q = \frac{v_x}{T_q} \leq 1 \quad \text{avec} \quad v_x = v_1 + v_2$$

- Combinaison n° 4 du tableau 4.3 :

v_1 = déplacement horizontal maximal dû à la température et au retrait.

v_2 = déplacement horizontal maximal dû au freinage.

$$v_x = v_1 + v_2 = v_1 + \frac{H_x \times T_q}{2 G a b} = 0,061 + \frac{0,055 \times T_q}{2 \times 0,9 \times 0,1800} = 0,061 + 0,170 T_q$$

$$\text{d'où } T_q \geq 0,073 \text{ m}$$

- Combinaison n° 8 du tableau 4.3 :

v_1 = déplacement horizontal maximal dû à la température et au retrait.

$$v_2 = 0$$

$$v_x = v_1 = 0,080 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T_q \geq 0,080 \text{ m}$$

Pour information, la combinaison n° 2 du tableau 4.3 nous donne : $T_q \geq 0,070 \text{ m}$

On peut choisir 6 feuillets intermédiaires de 12 mm et 2 enrobages de 6 mm, soit $T_e = 84 \text{ mm}$.

4.2.4 - Dimensions en plan

On peut donc choisir un appareil parmi la gamme des produits disponibles, en respectant la surface minimale donnée en 4.2.2 mais en conservant une pression moyenne minimale de 3 MPa sous charge permanente minimale (combinaison n° 9 du tableau 3).

On détermine donc une surface maximale : $A' \leq \frac{0,89}{3} = 0,2967 \text{ m}^2$ soit 2967 cm^2

Les dimensions sont donc :

350 x 400	$A' = 0,1326 \text{ m}^2$	(non retenu car insuffisant : $A' < 0,18$)
400 x 500	$A' = 0,1911 \text{ m}^2$	(non retenu pour cet exemple)
400 x 600	$A' = 0,2301 \text{ m}^2$	retenu
450 x 600	$A' = 0,2596 \text{ m}^2$	
500 x 600	$A' = 0,2891 \text{ m}^2$	

Nota : la surface A' est calculée en prenant en compte un enrobage total de $2 \times 5 = 10 \text{ mm}$.

On choisit habituellement un appareil d'appui rectangulaire dont le côté a , parallèle à l'axe longitudinal de l'ouvrage, est plus petit de manière à admettre le maximum de rotation ($a < b$).

Ceci conduit à choisir un appareil d'appui de 400 x 600.

Soit les valeurs $a' = 390 \text{ mm}$ $b' = 590 \text{ mm}$ et $A' = 2301 \text{ cm}^2$.

Nouveau calcul du déplacement total pour la combinaison n° 4 (avec A' réelle) :

$$v_1 = 0,061 \text{ m} \qquad v_2 = \frac{0,055 \times 0,084}{2 \times 0,9 \times 0,2301} = 0,011 \text{ m}$$

$$v_x = v_1 + v_2 = 0,061 + 0,011 = 0,072 \text{ m}$$

On retiendra donc $v_x = \max(0,070 ; 0,072 ; 0,080) = 0,080 \text{ m}$ (combinaison n° 8)

$$A_r = (0,2301) \left(1 - \frac{0,080}{0,39} \right) = 0,1829 \text{ m}^2 > 0,1800 \text{ m}^2$$

L'appareil d'appui convient.

Pour information, les combinaisons n° 2, 4 et 8 du tableau 4.3 nous donnent :

$$A_r (\text{comb } 2) = 0,1888 \text{ m}^2$$

$$A_r (\text{comb } 4) = 0,1875 \text{ m}^2$$

$$A_r (\text{comb } 8) = 0,1829 \text{ m}^2 \text{ (voir l'exemple ci-dessus)}$$

4.2.5 - Stabilité au flambement

Ayant déterminé les dimensions en plan et la hauteur d'élastomère, il est important de vérifier la stabilité de l'appareil d'appui au flambement.

Le coefficient de forme, pour le feuillet le plus épais, vaut :

$$S_1 = S = \frac{a' b'}{2 t (a' + b')} = \frac{0,39 \times 0,59}{2 \times 0,012 (0,39 + 0,59)} = 9,783$$

La valeur de l'effort vertical est : $V_{\max} = 4,50$ MN correspondant à la combinaison n° 2 du tableau 4.3. (attention : la combinaison de charge verticale maximale n'est pas toujours prépondérante).

$$\text{pression moyenne de } \sigma_m = \frac{V_{\max}}{A_r} = \frac{4,50}{A_r} = 23,835 \text{ MPa avec } A_r = 0,1888 \text{ m}^2$$

L'épaisseur totale d'élastomère est de $T_e = 7 \times 0,012 = 0,084$ m (T_e a été donnée dans le chapitre 3).

$$\text{pression limite } \sigma_{\text{lim}} = \frac{2 a' G S_1}{3 T_e} = \frac{2 \times 0,39 \times 0,9 \times 9,783}{3 \times 0,084} = 27,253 \text{ MPa}$$

$$\text{d'où } \sigma_{\text{lim}} = 27,253 \text{ MPa} > \sigma_m = 23,835 \text{ MPa} \quad \text{condition vérifiée}$$

Si cette condition n'était pas vérifiée, en particulier en raison d'une hauteur importante d'élastomère nécessaire à la reprise des déplacements longitudinaux, il faudrait passer à des appareils d'appui glissants ou à des appareils d'appui de surface plus importante.

Pour information, les combinaisons n° 4 et 8 du tableau 4.3 nous donnent respectivement :

$A_r = 0,1875 \text{ m}^2$	$\sigma_m = 19,997 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{lim}} = 27,253 \text{ MPa}$
$A_r = 0,1829 \text{ m}^2$	$\sigma_m = 20,886 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{lim}} = 27,253 \text{ MPa}$

La condition précédente reste vérifiée pour ces deux combinaisons.

4.2.6 - Respect de la limite de déformation

On contrôle alors que l'on respecte la limite de déformation totale d'élastomère pour les différents cas de charge :

$$\boxed{\varepsilon_{\text{cd}} + \varepsilon_{\text{qd}} + \varepsilon_{\text{td}} < 7}$$

Cas n° 1 Effort vertical maximum avec déplacement dû à l'effet thermique (combinaison n° 2 du tableau 4.3).

$$\varepsilon_{\text{cd}} = \frac{1,5 F_z}{G A_r S} = \frac{1,5 \times 4,50}{0,9 \times 0,1888 \times 9,783} = 4,061$$

Avec $S = S_1$ car la vérification est faite sur le feuillet interne le plus épais.

$$v_x = 0,070 \quad \varepsilon_{\text{qd}} = \frac{0,070}{0,084} = 0,833$$

$$\varepsilon_{\alpha d} = \frac{0,39^2 \times 0,0087 \times 0,012}{2 \times (6 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3)} = 0,735 \quad (\alpha = 0,0087 = 0,0057 + 0,0030 \text{ de défaut de pose})$$

$$\text{d'où} \quad \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{\alpha d} = 4,061 + 0,833 + 0,735 = 5,629 < 7 \quad \text{condition vérifiée}$$

Cas n° 2 Effort vertical avec déplacement dû à l'effet thermique et freinage (combinaison n° 4 du tableau 4.3).

$$\varepsilon_{cd} = \frac{1,5 F_z}{G A_r S} = \frac{1,5 \times 3,75}{0,9 \times 0,1875 \times 9,783} = 3,407$$

$$v_x = 0,072 \quad \varepsilon_{qd} = \frac{0,072}{0,084} = 0,857$$

$$\varepsilon_{\alpha d} = \frac{0,39^2 \times 0,0079 \times 0,012}{2 \times (6 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3)} = 0,668 \quad (\alpha = 0,0079 = 0,0049 + 0,0030 \text{ de défaut de pose})$$

$$\text{d'où} \quad \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{\alpha d} = 3,407 + 0,857 + 0,668 = 4,932 < 7 \quad \text{condition vérifiée}$$

Cas n° 3 Effort vertical avec rotation maxi (combinaison n° 8 du tableau 4.3).

$$\varepsilon_{cd} = \frac{1,5 F_z}{G A_r S} = \frac{1,5 \times 3,82}{0,9 \times 0,1829 \times 9,783} = 3,558$$

$$v_x = 0,080 \quad \varepsilon_{qd} = \frac{0,080}{0,084} = 0,952$$

$$\varepsilon_{\alpha d} = \frac{0,39^2 \times 0,0097 \times 0,012}{2 \times (6 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3)} = 0,820 \quad (\alpha = 0,0097 = 0,0067 + 0,0030 \text{ de défaut de pose})$$

$$\text{d'où} \quad \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{\alpha d} = 3,558 + 0,952 + 0,820 = 5,330 < 7 \quad \text{condition vérifiée}$$

4.2.7 - Stabilité en rotation

Ensuite on s'assure que la stabilité en rotation est vérifiée pour l'appareil d'appui.

Le cas de charge déterminant est généralement celui qui donne la rotation maximum. Dans notre cas, c'est la combinaison n° 8 du tableau 4.3.

$$\alpha_{\max} = 6,7 \times 10^{-3} \text{ soit, avec le défaut de rotation initial de } 3 \times 10^{-3}, \text{ une valeur de } \alpha_a = 9,7 \times 10^{-3}$$

pour $V_{\max} = 3,82 \text{ MN}$, on calcule le tassement pour les 7 feuillets de 12 mm.

Tassement théorique : (avec le coefficient de forme pour le feuillet de 12 mm, $S_1 = 9,783$)

$$v_z = \sum \frac{F_z t_i}{A'} \left(\frac{1}{5GS_1^2} + \frac{1}{E_b} \right) = \frac{3,82 \times 7 \times 0,012}{0,2301} \left(\frac{1}{5 \times 0,9 \times 9,783^2} + \frac{1}{2000} \right) = 0,00393 \text{ m, soit } \mathbf{3,93 \text{ mm}}$$

Valeur de stabilité en rotation :

$$\frac{a' \alpha_a + b' \alpha_b}{K_r} = \frac{0,390 \times 0,0097 + 0,590 \times 0,0}{3} = 0,00126 \text{ m, soit } \mathbf{1,26 \text{ mm}}$$

$$v_c = \sum \frac{F_i t_i}{A'} \left(\frac{1}{5 G S_1^2} + \frac{1}{E_b} \right) \geq \frac{a' \alpha_a + b' \alpha_b}{K_r} \quad \text{condition vérifiée}$$

Pour information, les combinaisons n° 2 et 4 du tableau 4.3 nous donnent respectivement :

$$V_z = 4,63 \text{ mm} \quad \frac{a' \alpha_a + b' \alpha_b}{K_r} = 1,13 \text{ mm}$$

$$V_z = 3,86 \text{ mm} \quad \frac{a' \alpha_a + b' \alpha_b}{K_r} = 1,03 \text{ mm}$$

La condition précédente reste vérifiée.

4.2.8 - Vérification de la condition de non-glissement

On vérifie également la condition de non-glissement, ce qui ne présente généralement pas de difficulté.

C'est donc le cas de charge de freinage associé à la température uniforme qui est *a priori* déterminant sous V_{\min} . Pour notre cas, c'est la combinaison n° 4 bis du tableau 4.3.

$$A_r = (0,2301) \left(1 - \frac{0,059}{0,39} \right) = 0,19529 \text{ m}^2$$

NB : la valeur de 0,07 est obtenue en sommant V_1 (0,059 du tableau 4.3) et V_2 (0,011) calculé pour la combinaison 4 du § 4.2.4.

$$\sigma_{\min} = \frac{V_{\min}}{A_r} = \frac{0,79}{0,1887} = 4,187 \text{ MPa}$$

$$\mu_e = 0,1 + \frac{1,5 K_f}{\sigma_m} = 0,1 + \frac{1,5 \times 0,6}{4,187} = 0,315 \quad (K_f = 0,6 \text{ pour le béton})$$

$$F_x = \left(\frac{0,059}{0,084} \times 0,9 \times 0,39 \times 0,59 \right) + 0,055 = \mathbf{0,200} < \mu_e F_d = 0,315 \times 0,79 = \mathbf{0,249 \text{ MN}}$$

Condition vérifiée

Pour information, les combinaisons n° 2 bis et 8 bis du tableau 4.3 nous donnent respectivement :

$$A_r = 0,1900 \text{ m}^2 \quad \sigma_{\min} = 3,737 \text{ Mpa} \quad \mu_e = 0,341 \quad F_x = 0,168 \text{ MN} \quad \mu_e F_d = 0,242 \text{ MN}$$

$$A_r = 0,1841 \text{ m}^2 \quad \sigma_{\min} = 4,074 \text{ Mpa} \quad \mu_e = 0,321 \quad F_x = 0,192 \text{ MN} \quad \mu_e F_d = 0,241 \text{ MN}$$

La condition précédente reste vérifiée.

4.2.9 - Dimensionnement des frettes

La condition à vérifier pour les frettes est $t_s \geq \frac{2,6 F_z t_i}{A_r f_y}$ où $2,6 t_i = K_p (t_1 + t_2)$ (Cf. norme NF EN 1337-3 pour des frettes en acier S235 dont la limite élastique est $f_y = 235$ MPa). On aboutit alors à la valeur de l'épaisseur minimale en règle générale sous effort vertical maximum :

$$t_s = \frac{2,6 \times 4,50 \times 0,012}{0,1888 \times 235} = 0,00316 \text{ m}$$

Pour un appareil d'appui de 400 x 600, **on prendra des frettes de 4 mm d'épaisseur.**

4.2.10 - Détermination des pressions sur les supports

Avertissement : pour faire ressortir les différentes pressions, la rotation a été artificiellement majorée.

4.2.10.1 - Appui entièrement comprimé

Vérification d'un bloc élastomère : 400 x 600 ; 6 (12 + 4) ; 2 x 6 $\Rightarrow S = 9,783 \Rightarrow A' = 0,2301 \text{ m}^2$

Combinaison à vérifier : $F_z = 4,500 \text{ MN}$ $v_x = 0,070 \text{ m}$ $\alpha_a = 0,015 \text{ rad}$ $H_{xy} = 0$ $v_y = 0$ $\alpha_b = 0$

Résultats des vérifications de l'appareil : $A_r = 0,1888 \text{ m}^2$
 $\sigma_m = 23,84 \text{ MPa}$

Distorsions : $\epsilon_c = 4,061$
 $\epsilon_q = 0,833 < 1$
 $\epsilon_\alpha = 1,268$
 $\epsilon_t = 6,162 < 7$

Frettage $t_s = 3,16 < 4 \text{ mm}$

Stabilité en rotation $v_z = 4,64 > 1,95 \text{ mm}$

Stabilité au flambement $\sigma_m = 23,84 < 27,25 \text{ MPa} \Rightarrow K_{a \text{ max}} = 2,47$

$\alpha = \alpha_a - 0,003$ puisque les faces sont supposées conjuguées

$$n' = n + 2 (6/2)^3 = 6 + 0,25 = 6,25$$

$$M_t = 2,47 [0,9 \times (0,015 - 0,003) \times 390^5 \times 590] / (6,25 \times 12^3 \times 75,3) = 174,6 \text{ MN.mm}$$

$$\text{exc}_{\text{max}} = M_t / F_z = 174,6 / 4,500 = 38,8 \text{ mm} \Rightarrow 6 \text{ exc}_{\text{max}} = 232,8 < a' = 390 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{OK. Pas de risque de soulèvement}$$

La surface de pression **uniforme** est un rectangle : $a'' = 390 - (38,8 \times 2) - 70 = 242 \text{ mm}$
 $b' = 590 \text{ mm}$, d'où $A_{\text{unif}} = 143013 \text{ mm}^2$

La pression σ_{unif} a pour intensité : $4500000/143013 = 31,47 \text{ Mpa}$

La nouvelle pression moyenne se répartie selon un diagramme triangulaire sur une largeur a'' :

$$a'' = 242 \times 1,5 = 363 \text{ mm, soit une surface : } 363 \times 590$$

et une pression moyenne : $4500000/363 \times 590 = 20,98 \text{ MPa} < 27,253 \text{ MPa}$ (condition de non-flambement).

4.2.10.2 - Cas d'un décollement partiel

En reprenant les mêmes hypothèses, mais avec une rotation $\alpha_a = 0,024$ rad (soit $\alpha = 0,021$) :

Résultats des vérifications de l'appareil : $A_r = 188800 \text{ mm}^2$
 $\sigma_m = 23,84 \text{ MPa}$

Distorsions $\epsilon_c = 4,061$
 $\epsilon_q = 0,833 < 1$
 $\epsilon_\alpha = 2,028 \Rightarrow \epsilon_\alpha = 1,775$ pour $\alpha = 0,021$
 $\epsilon_t = 6,922 < 7$

Frettage $t_s = 3,16 < 4 \text{ mm}$

Stabilité en rotation $v_z = 4,64 > 3,12 \text{ mm}$

Stabilité au flambement $\sigma_m = 23,84 < 27,253 \text{ MPa} \Rightarrow K_{a \max} = 2,47$

$$M_t = 2,47 [0,9 \times (0,024 - 0,003) \times 390^5 \times 590] / (6,25 \times 12^3 \times 75,3) = 305,6 \text{ MN.mm}$$

$$\text{exc}_{\max} = M_t / F_z = 305,6 / 4,500 = 67,9 \text{ mm} \Rightarrow 6 \text{ exc}_{\max} = 407,4 < a' = 390 \text{ mm} \quad \text{NON}$$

$$K_{rs} = (\epsilon_c / K_{a \max} : \epsilon_\alpha)^{1/3} = (4,0601 / 2,47 : 1,775)^{1/3} = 0,975$$

(Risque de soulèvement sur environ 2,5 % de la surface sans tenir compte des déplacements horizontaux)

La surface de pression **uniforme** est un rectangle : $a'' = 2/3 \times K_{rs} (a' - v_x) = 2/3 \times 0,975 (390 - 70) = 208 \text{ mm}$
 $b' = 590 \text{ mm}$, d'où $A_{\text{unif}} = 122705 \text{ mm}^2$

La pression σ_{unif} a pour intensité : $4500000/122705 = 36,67 \text{ MPa}$

La nouvelle pression moyenne se répartie selon un diagramme triangulaire sur une largeur a'' :

$$a'' = 208 \times 1,5 = 312 \text{ mm, soit une surface : } 312 \times 590$$

$$\text{et une pression : } 4500000/312 \times 590 = 24,45 \text{ MPa} < 27,25 \text{ MPa}$$

La stabilité au flambement est donc vérifiée pour la face la plus critique de l'appareil d'appui. Si elle ne l'était pas, il serait nécessaire de re-vérifier cette condition en faisant la moyenne des contraintes moyennes sur les 2 interfaces.

L'une des interfaces ne subit aucune décompression, l'autre peut atteindre un soulèvement sur la largeur a' , de $(390 - 312) = 78 \text{ mm}$, soit 23,6 % de la surface de l'interface.

En ajoutant un feuillet, il ne subsiste qu'une perte de contact principalement due aux mouvements horizontaux comme l'a montré l'étude du cas précédent.

En ajoutant 2 feuillets, la stabilité au flambement n'est pas respectée.

Un appareil 450×600 ; $5 (16 + 4)$; 2×8 répond aux sollicitations de ce cas sans risque de soulèvement et avec des pressions moindres sur les interfaces.

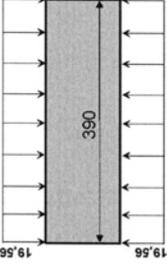
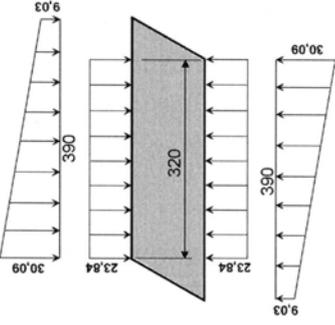
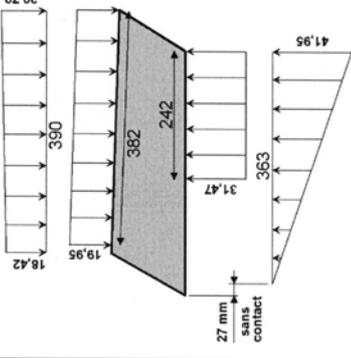
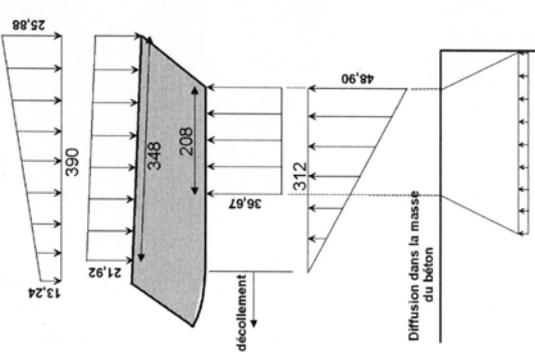
	CAS 1		CAS 2	
F_z (MN)	4,5	4,5	4,5	4,5
V_x (mm)	0	70	70	70
α_a (rad)	0	0	0,024 ($\alpha = 0,021$)	0,024 ($\alpha = 0,021$)
σ_m (MPa)	19,56	23,84	23,84	23,84
$\sigma_{unif\ max}$	19,56	31,47	36,67	36,67
				 <p>Diffusion dans la masse du béton</p>

Tableau 4.4: décomposition des diagrammes de pression selon le type de sollicitation

4.3 - Calcul des efforts horizontaux en tête des appuis d'un ouvrage comportant des appareils d'appui classiques

4.3.1 - Généralités

Comme il a été dit plus haut, les efforts horizontaux exercés sur le tablier (freinage, vent, ...) dépendent des caractéristiques des appuis eux-mêmes. En particulier, s'il y a dissymétrie, ces efforts ne sont pas répartis de manière identique, ce qui peut amener à dimensionner des appareils d'appui différents. Il en va de même des efforts développés par le tablier en fonction des déplacements imposés par les déformations de la structure (retrait, fluage, température).

Les efforts se répartissent en fonction de la rigidité de chaque appui. La rigidité R d'un appui sera, par définition :

$$R = \frac{1}{\Delta}, \Delta \text{ étant le déplacement de la tête d'appui sous l'action d'une force horizontale unité.}$$

Ce déplacement $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ procède de la distorsion de l'appareil d'appui, de la déformation du corps de l'appui et enfin de la déformation de la fondation (figure 4.2).

Il est à noter que les rigidités R_1 et R_2 d'un appui sont à calculer pour les deux cas signalés ci-dessus : déformations lentes et efforts dynamiques. L'Eurocode prescrit d'utiliser le module instantané du béton pour la pile. Par contre, pour l'élastomère, on utilisera son module instantané pour les efforts dynamiques (cf. § 3.3.2.2, $G_{dyn} = 2 \times 0,9 = 1,8$ MPa) et son module de référence (0,9 MPa) pour les déformations lentes (retrait, fluage et température).

4.3.2 - Détermination des efforts en tête des appuis

On considère qu'il s'agit d'un pont rectiligne, non biais.

4.3.2.1 - Déformation

Les données sont les variations de longueurs $\Delta \ell_i$ de chaque travée d'un tablier continu. On connaît ainsi le déplacement relatif de l'appui "i" par rapport à l'appui "1" situé le plus à gauche :

$$\Delta_i - \Delta_1 = \sum_1^{i-1} \Delta \ell_i = d_i$$

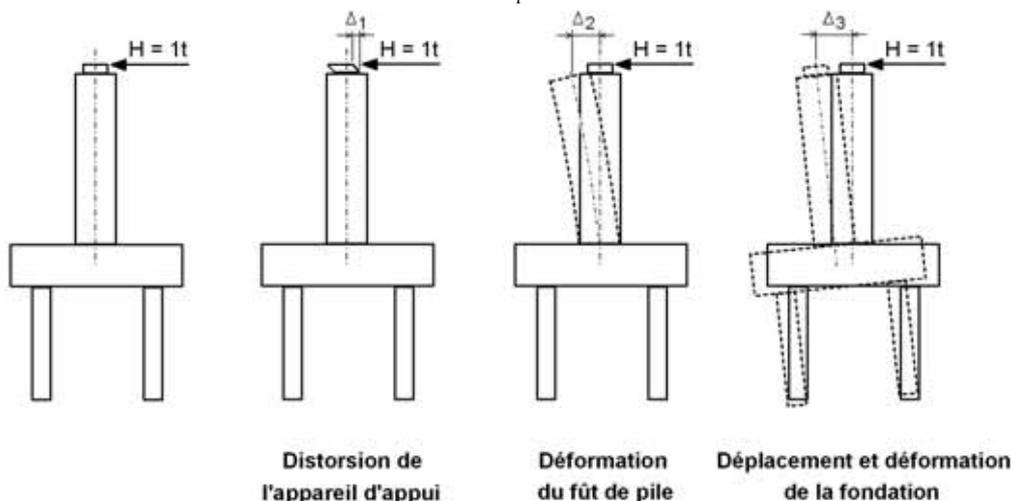


Figure 4.2 : déformation des appuis

$$\text{Des relations } H_{1,i} = k_{1,i} \Delta_i \text{ et } \sum_1^n H_{1,i} = 0 \text{ on déduit } \Delta_1 = -\frac{\sum_1^n R_{1,i} d_i}{\sum_1^n R_{1,i}}$$

Connaissant Δ_1 , on détermine $\Delta_i = \Delta_1 + d_i$ et $H_i = R_{1,i} (\Delta_1 + d_i)$

4.3.2.2- Effort de freinage (dynamique)

Lorsqu'une force H_2 est appliquée au tablier, les déplacements Δ_i des têtes d'appui sont égaux et l'on en déduit, avec :

$$H_{2,i} = \Delta_i R_{2,i} \quad \text{et} \quad \sum H_{2,i} = \Delta_i \sum R_{2,i} = H_2 \quad H_{2,i} = H_2 \frac{R_{2,i}}{\sum R_{2,i}}$$

A noter que ces formules s'appliquent aussi aux forces centrifuges.

4.3.2.3 - Application numérique

4.3.2.3.1 - Données numériques

On suppose un ouvrage construit symétriquement. Les culées sont identiques et sont équipées de deux appareils d'appui de :

$$350 \times 450 ; 3 (12 + 3) ; 2 \times 6$$

Les piles ont des caractéristiques mécaniques différentes et sont équipées de deux appareils d'appui de :

$$600 \times 600 ; 2 (16 + 4) ; 2 \times 8$$

Les calculs ont donné les raccourcissements suivants, par travée :

	travées de rive (1) et (3) mm	travée centrale (2) mm
retrait/fluage	7,6	10,6
température uniforme	7,6	10,6
total	15,2	21,2

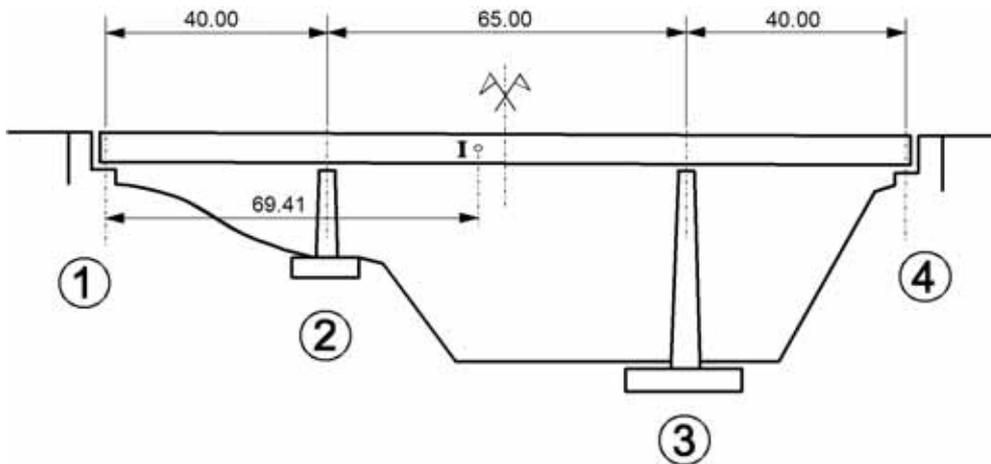


Figure 4.3 : élévation de l'ouvrage utilisé comme exemple

Les déplacements en tête d'appuis sont les suivants :

Culées : les culées sont supposées infiniment rigides, seuls les appareils d'appui se déforment. On a donc, en tenant compte de deux appareils d'appui par ligne :

- sous un effort statique : $\Delta_{u1} = \frac{1}{2} \frac{T_c}{G a b} = \frac{1}{2} \times \frac{0,048}{0,9 \times 0,35 \times 0,45} = 0,1693 \text{ m/MN}$

- sous un effort dynamique : $\Delta_{u2} = 0,0847 \text{ m/MN}$

On suppose que les culées reposent sur un sol de très bonne qualité et donc que la déformation de la fondation est négligeable.

Piles : l'ensemble des déplacements dus aux rotations et déplacements de la fondation sont indiqués dans le tableau ci-dessous. Les déplacements dus aux appareils d'appui sont calculés comme pour ceux des culées.

	Culée (1) et (4)		Pile (2)		Pile (3)	
	Δ_{stat}	Δ_{dyn}	Δ_{stat}	Δ_{dyn}	Δ_{stat}	Δ_{dyn}
Appareil d'appui	0,1693	0,0847	0,0741	0,0370	0,0741	0,0370
Fondation + fût	-	-	0,0091	0,003	0,0431	0,0143
Total	0,1693	0,0847	0,0832	0,040	0,1172	0,0513
$R_i = \frac{1}{\Delta_i}$	5,91	11,81	12,02	25,0	8,53	19,48

Remarque : à titre d'illustration, on a pris des valeurs fortement dissymétriques pour les souplesses des appuis.

Nous rappelons que la souplesse des piles doit être prise en considérant le module instantané du béton pour les efforts dynamiques et les effets journaliers de la température. **L'attention du projeteur est attirée sur le fait que le calcul de l'appareil d'appui doit être pris en compte avec la raideur instantanée maximale du sol, alors qu'il est pris avec sa raideur différée minimale lors du calcul des fondations.**

4.3.2.3.2 - Efforts horizontaux dus aux variations linéaires du tablier

Les déplacements relatifs d_i des appuis par rapport à l'appui de gauche sont :

$$\text{Déplacement appui 2} = -0,0152 = -0,015 \text{ m}$$

$$\text{Déplacement appui 3} = -0,0152 - 0,0212 = -0,036 \text{ m}$$

$$\text{Déplacement appui 4} = -0,0364 - 0,0152 = -0,052 \text{ m}$$

$$\sum_1^n R_{1,i} d_i = -(0,015 \times 12,02 + 0,036 \times 8,53 + 0,052 \times 5,91) = -0,798$$

$$\sum_1^n R_{1,i} = 5,91 \times 2 + 12,02 + 8,53 = 32,37$$

$$\text{et donc } \Delta_i = -\frac{\sum_1^n R_{1,i} d_i}{\sum_1^n R_{1,i}} = \frac{0,798}{32,37} = 0,0247 \text{ m}$$

$$\Delta_2 = -0,015 + 0,0247 = 0,0065 \text{ m}$$

$$\Delta_3 = -0,036 + 0,0247 = -0,0117 \text{ m}$$

$$\Delta_4 = -0,052 + 0,0247 = -0,0269 \text{ m}$$

4.3.2.3.3 - Calcul de la répartition d'un effort de freinage

Le cas prépondérant est celui de l'effort de freinage.

L'effort est de $0,60 \text{ MN}^{14}$.

Les efforts en tête des appuis seront donc :

$$H_{2,1} = H_{2,4} = 0,60 \times \frac{11,81}{68,10} = 0,104 \text{ MN pour les culées}$$

$$H_{2,2} = 0,60 \times \frac{25,0}{68,10} = 0,220 \text{ MN pour la pile 2}$$

$$H_{2,3} = 0,60 \times \frac{19,48}{68,10} = 0,172 \text{ MN pour la pile 3}$$

$$\text{On vérifie que : } 2 \times 0,104 + 0,220 + 0,172 = 0,60 \text{ MN}$$

¹⁴ Il est rappelé que la valeur proposée par l'annexe nationale à la norme NF EN 1991-2 est de $0,5 \text{ MN}$ (cf. § 4.1).

4.3.2.3.4 - Récapitulation

Le tableau suivant représente les déformations et les efforts calculés pour un seul appareil d'appui. On constate que les écarts sur les déplacements sont assez faibles, mais qu'il peut en aller différemment pour les efforts de freinage. La récapitulation de ces valeurs est présentée dans le tableau ci-dessous (efforts pour un appui).

① Dans cette colonne, le calcul est fait en supposant le point fixe au milieu de l'ouvrage et une répartition uniforme du freinage sur les 4 appuis ;

② Avec les souplesses des appuis et des appareils d'appui retenus :

	Culée 1		Pile 2	
	①	②	①	②
Δ_1 déformation (m)	0,026	0,027	0,011	0,012
freinage (MN)	0,045	0,031	0,045	0,066

Dans ce cas, par souci de simplification, s'agissant d'un ouvrage d'art courant, on disposera, sur culées et sur piles, les appareils d'appui du dimensionnement initial.

Tous calculs faits, les efforts sur les culées sont légèrement réduits dans le cas du freinage, mais dans une proportion insuffisante pour modifier les appareils d'appui. En conséquence, il est souvent inutile, dans les cas courants, d'effectuer des calculs complexes prenant en compte ces souplesses. On s'attachera plutôt à soigner le dimensionnement initial en évitant d'oublier un cas de charge qui pourrait être dimensionnant.

Ceux-ci restent donc des 350 x 450 ; 3 (12 + 3) ; 2 x 6 sur culées.

4.4 - Calcul des efforts horizontaux dans un ouvrage comportant des appareils d'appui glissants

4.4.1 - Généralités

Comme il a déjà été évoqué plus haut, lorsque les déplacements horizontaux sont importants, notamment sur les culées, le nombre de feuillettes nécessaire à la reprise de ces déformations risque d'être incompatible avec la stabilité au flambement de l'appareil d'appui. Il peut être alors nécessaire de disposer des appareils d'appui glissants en lieu et place d'appareils d'appui classiques.

Le mélange de ces deux types d'appareils d'appui est assez complexe à calculer, puisqu'il faut tenir compte de la souplesse des appuis eux-mêmes, de celle des appareils d'appui classiques et du coefficient de frottement des appareils d'appui glissants. Cependant, la présence d'un certain nombre d'appareils d'appui classiques en élastomère apporte une souplesse d'ensemble, très positive en particulier en cas de calcul au séisme de la structure.

Pour un appareil d'appui glissant, son fonctionnement se présente de plusieurs manières :

- pour un appui souple, sous l'effet d'une variation de longueur, l'effort horizontal se mobilise progressivement jusqu'au seuil de glissement. Une fois cette valeur H atteinte, un glissement se produit. Un nouvel état d'équilibre s'établit, ramenant l'effort horizontal à une valeur inférieure à H ;
- pour un appui très rigide, comme une culée, un déplacement du tablier mobilise instantanément l'effort horizontal à sa valeur de seuil H ;
- enfin, pour un appui très souple, le seuil de glissement peut ne pas être atteint et l'appareil d'appui fonctionne comme un appareil d'appui classique.

Pour la vérification d'un appareil d'appui isolé, la relation entre l'effort H mobilisable et l'effort vertical concomitant s'écrit :

$$H = (\mu + PP + PL) \times V$$

où

- μ est le coefficient de frottement de l'appareil d'appui pour la charge verticale V ;
- PP est la précision de pose de l'appareil d'appui correspondant à un éventuel défaut d'horizontalité (PP est positif dans la formule ci-dessus) ;
- PL pente éventuelle donnée volontairement au plan de glissement.

PP et PL sont positives dans la formule précédente.

Pour un calcul de répartition des efforts horizontaux, la précision de pose PP est négligée, car elle est déjà prise en compte par la pondération du coefficient de frottement (μ_a et μ_r) d'où $H = (\mu + PL) V$

On note que l'effort éventuel dû au freinage sur le tablier doit être intégralement repris par les appareils d'appui non glissants. (cf. § 4.4.1.4).

4.4.1.1 - Valeurs numériques de calcul

Les valeurs du coefficient de frottement μ sont données dans le chapitre 3 : $\mu_a = \frac{1,2 \cdot k}{10 + \sigma_p}$ avec $k = 1$ pour l'acier

inoxydable et σ_p pression de contact sur le PTFE, que l'on prendra égale à F_z/A pour les appareils de type D. On prendra en compte la surface réelle du PTFE pour les appareils de type E. En outre, la pression doit être limitée à 30 MPa.

4.4.1.2 - Charges d'exploitation à retenir pour le calcul des efforts horizontaux

Comme pour les appareils d'appui glissants à pot, on considère un calcul simplifié dans lequel on déterminera les efforts horizontaux extrêmes (à l'ELU) à partir des charges verticales extrêmes des combinaisons correspondantes. Cela va dans le sens de la sécurité sans pour autant majorer fortement les actions. On pourra se reporter au document sur les appareils d'appui à pot¹⁵ pour approfondir les explications concernant cette simplification.

4.4.1.3 - Coefficient de frottement pour les appareils d'appui glissants

On se réfère ici à la NF EN 1337-1 "Indications générales" pour les appareils d'appui. Dans notre cas les coefficients de frottement à retenir pour les appareils glissants sont les suivants :

$$\mu_a = 0,5 \mu_{\max} (1 + \alpha)$$

$$\mu_r = 0,5 \mu_{\max} (1 - \alpha)$$

μ_{\max} coefficient de frottement maximal pour un appareil d'appui glissant considéré individuellement ;

μ_a coefficient de frottement à retenir si le frottement est défavorable vis-à-vis de l'effet étudié ;

μ_r coefficient de frottement à retenir si le frottement est favorable vis-à-vis de l'effet étudié ;

α coefficient de dégressivité dépendant de "n", nombre d'appareils d'appui glissants intervenant dans l'équilibre de la structure.

n	α
≤ 4	1
$4 < n < 10$	$(16-n)/12$
≥ 10	0,5

Exemple : structure à 4 travées avec deux appareils d'appui classiques sur les piles centrales et deux appareils d'appui glissants sur chacune des culées :

$$n = 4 \quad \text{d'où } \alpha = 1$$

$$\mu_a = 0,5 \mu_{\max} (1 + 1) = \mu_{\max} = 5,3 \% \text{ (compte tenu de la pression } \sigma_p = 12,65 \text{ MPa)}$$

$$\mu_r = 0,5 \mu_{\max} (1 - 1) = 0$$

¹⁵ cf. Bibliographie

4.4.1.4 - Effort horizontal dû au freinage

Selon le paragraphe 6.7 de la norme NF EN 1337-2, les appareils d'appui glissants ne doivent pas participer à la reprise des efforts horizontaux de freinage. Ces efforts sont donc théoriquement repris intégralement par les appareils d'appui non glissants. Cette hypothèse est pessimiste car les appareils d'appui glissants participent effectivement à la reprise de ces efforts, mais dans une proportion non quantifiable.

4.4.2 - Exemple de calcul

4.4.2.1 - Caractéristiques de l'ouvrage

Il s'agit d'un ouvrage à quatre travées en béton précontraint construit par encorbellements successifs et dont les principales dimensions sont données sur la figure 4.4.

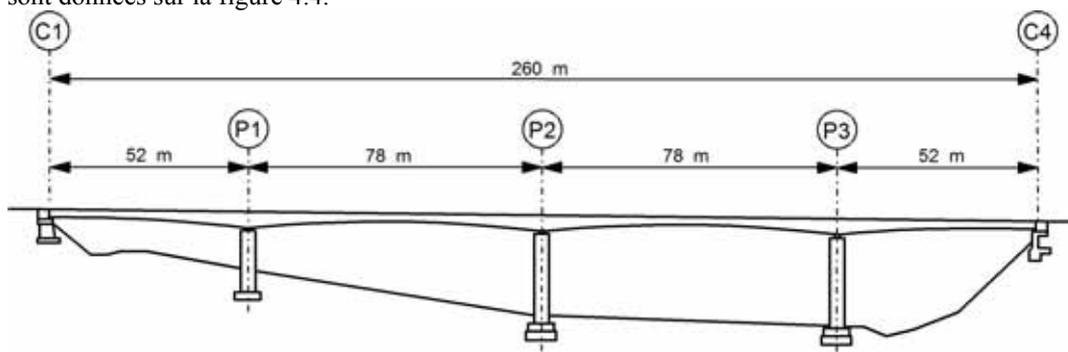


Figure 4.4 : principales dimensions de l'ouvrage étudié

Les descentes de charges sont résumées dans le tableau ci-après :

Pour une pile (2 appareils d'appui)				
		C0 et C4	P1 et P3	P2
Charges permanentes	V max (MN)	2,98	17,88	18,34
	V min (MN)	2,87	17,76	18,32
	rot max (10^{-3} rad)	1,1	-0,5	-0,2
	rot min	0,8	-0,8	-0,2
Charges routières	V max (MN)	1,57	3,74	3,78
	V min (MN)	-0,56	-0,66	-0,54
	rot concom Vmax (10^{-3} rad)	-2,0	-0,5	0
	rot concom Vmin (10^{-3} rad)	1,3	0,2	0
Gradient thermique	V (MN)	0,29	-0,40	0,22
	Rot (10^{-3} rad)	0,6	0,3	0

On indique ici les raccourcissements pris en compte pour chaque travée, de la même manière que dans le cas précédent :

	Travées de rive (1) et (4)	Travées centrales (2 et 3)
Retrait/fluage	10,4 mm	15,6 mm
Température uniforme	20,8 mm	31,2 mm
Total	31,2 mm	46,8 mm

Le calcul des déplacements s'effectue comme dans le paragraphe 4.3. Dans le cas où il y a des appareils d'appui glissants, la difficulté réside dans le fait que ces appareils d'appui agissent jusqu'à un certain seuil. En dessous de l'effort de glissement,

leur souplesse est la même que s'ils ne glissaient pas. Au-delà, leur souplesse est "infinie". Il convient donc de faire un premier calcul en les considérant comme appareils d'appui non glissants puis, si l'effort correspondant au déplacement dépasse le seuil, il faut remplacer leur souplesse par un effort limite correspondant et recalculer l'équilibre des efforts horizontaux.

4.4.2.2 – Pré-dimensionnement des appareils d'appui

Pour cela, on effectue un premier dimensionnement des appareils d'appui, essentiellement à partir des efforts verticaux et des rotations (qui ne dépendent pas des efforts horizontaux).

On obtient les efforts suivants pour un appareil d'appui :

	C0 et C4	P1 et P3	P2
V max (MN)	2,35	10,71	11,12
V min (MN)	1,16	8,39	8,87
rot max (10^{-3} rd)	2,4	1,2	2,1
rot min (10^{-3} rd)	1,0	0,6	1,5

On choisit (ce qui vérifie la contrainte maximum de 30 MPa sur le béton) :

C0 et C4	P1 - P2 - P3
1 appareil de 400 x 500	2 appareils de 700 x 600*

* les valeurs calculées pour les réactions maximales et minimales sur piles tiennent compte d'une différence de raideur de $\pm 15\%$ pour chaque appareil d'appui jumelé (cf. note du § 5.3.3.7 de NF EN 1337-3).

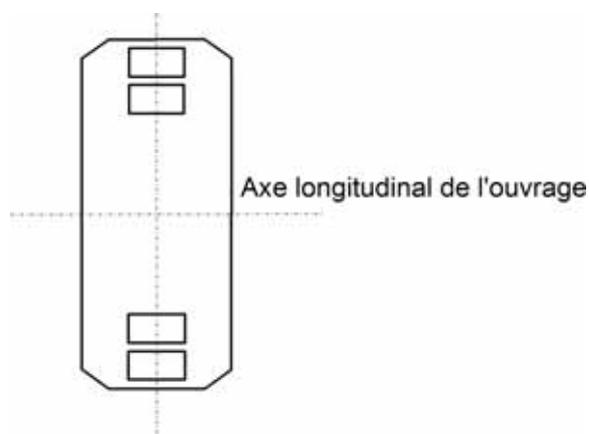


Figure 4.5 : dispositions des appareils d'appui sur pile.

Pour les déplacements horizontaux, on simplifie grandement les calculs en considérant un point 0 au milieu géométrique de l'ouvrage. Dans ce cas, les déplacements maximaux à prendre en compte seraient :

	C0 et C4	P1 et P3	P2	unité
v_i max	78	47	0	mm

Ce calcul permet de voir immédiatement que les appareils d'appui sur culées - de petites dimensions - devront être glissants car il ne sera pas possible d'empiler suffisamment de couches d'élastomère pour absorber le déplacement.

Avec les principes du paragraphe 4.2, on aboutit à :

C0 et C4	P1 - P2 -P3
1 appareil de 400 x 500 ; 3 (12 + 3) ; 2 x 6	2 appareils de 700 x 600 ; 6 (16 + 4) ; 2 x 8

4.4.2.3 - Efforts horizontaux pour les appareils d'appui glissants

On calcule la souplesse de ces appareils d'appui, tous considérés comme non glissants.

- En statique

Sur culée : une ligne de 2 appareils d'appui de 400 x 500 ; 3 (12 + 3) ; 2 x 6

$$\text{souplesse} = \frac{1}{2} \frac{0,048}{0,9 \times 0,4 \times 0,5} = 0,1333 \text{ m/MN} \quad (\text{en statique})$$

Sur pile : une ligne de deux fois 2 appareils d'appui de 700 x 600 ; 6 (16 + 4) ; 2 x 8

$$\text{souplesse} = \frac{1}{4} \frac{0,112}{0,9 \times 0,6 \times 0,7} = 0,0741 \text{ m/MN} \quad (\text{en statique})$$

- En dynamique (freinage), les souplesses sont divisées par 2.

Les appareils d'appui glissants sur culées ont un coefficient de frottement d'environ 5,3 % en charge maximale. Compte tenu d'un effort vertical maximum de 2,33 MN (pour un appareil), l'effort limite maximal de glissement - par culée - est de :

$$H_{\text{lim}} = 0,053 \times 2 \times 2,33 = 0,25 \text{ MN}$$

4.4.2.4 - Efforts horizontaux pour les appareils d'appui non glissants

4.4.2.4.1 - Efforts dus aux variations linéaires du tablier

1^{ère} itération

On effectue un premier calcul de manière analogue au paragraphe 4.3.

	Culées 0 et 4	Pile 1	Piles 2 et 3
	Δ_{stat}	Δ_{stat}	Δ_{stat}
Appareil d'appui	0,1333	0,0741	0,0741
Fondation + fût	-	0,0091	0,0431
Total	0,1333	0,0832	0,1172
$R_i = 1/\Delta$	7,502	12,019	8,532

Pour la déformation maximum, prise égale à 6×10^{-4} (CP et température uniforme), les déplacements relatifs d_i des appareils d'appui par rapport à l'appui de gauche sont :

$$\text{Déplacement appui 1} = -0,031 = -0,031 \text{ m}$$

$$\text{Déplacement appui 2} = -0,031 - 0,047 = -0,078 \text{ m}$$

$$\text{Déplacement appui 3} = -0,078 - 0,047 = -0,125 \text{ m}$$

$$\text{Déplacement appui 4} = -0,125 - 0,031 = -0,156 \text{ m}$$

$$\sum_1^n R_{1,i} d_i = -3,276 \quad \sum_1^n R_{1,i} = 44,09$$

$$\text{et donc } \Delta_0 = -\frac{\sum_1^n R_{1,i} d_i}{\sum_1^n R_{1,i}} = \frac{3,276}{44,09} = 0,074 \text{ m}$$

$$\Delta_1 = -0,031 + 0,074 = 0,043 \text{ m}$$

$$\Delta_2 = -0,078 + 0,074 = -0,004 \text{ m}$$

$$\Delta_3 = -0,125 + 0,074 = -0,051 \text{ m}$$

$$\Delta_4 = -0,156 + 0,074 = -0,082 \text{ m}$$

Le point 0 se situe donc à la distance $x_0 = \frac{0,074}{0,156} \times 260,00 = 123,83 \text{ m}$

On en déduit les efforts horizontaux correspondants :

		C0	P1	P2	P3	C4
déplacement	m	0,074	0,043	-0,004	-0,051	-0,082
H	MN	0,56	0,52	-0,03	-0,43	-0,61
H _{lim}		0,25	-	-	-	0,25

On constate bien que les appareils d'appui C0 et C4 glissent.

2^{ème} itération

Les appareils d'appui glissants ont une rigidité nulle. On remplace les valeurs de R_i pour C0 et C4 par 0. Cependant, le calcul se complique, car il faut étudier successivement trois cas de figure :

- les appareils d'appui glissants ont tous le même frottement ;
- celui des appuis situés à gauche du point 0 a une valeur égale à la valeur minimale (§ 4.4.1.3), et maximale pour ceux situés à droite ;
- et l'inverse, à savoir valeur maximale pour les appuis de gauche et valeur minimale pour les appuis de droite.

Il y a 4 appareils d'appui glissants sur l'ensemble des appareils d'appui.

Les coefficients de frottement à retenir sont donc (§ 4.4.1.3) :

- minimum $\mu_a = \mu_{\max} = 5,3 \%$
- maximum $\mu_r = 0$

Cas 1 - même valeur de coefficient de frottement à gauche et à droite

Dans ce cas, on remplace la valeur du produit $R_i \times d_i$ par la valeur limite de H pour les appuis de C0 et C4. Le calcul devient :

		C0	P1	P2	P3	C4
R _i		0	12,019	8,532	8,532	0
Somme R _i	29,084					
R _i x d _i ou H _{lim}		-0,235	-0,375	-0,666	-1,065	0,235
Somme H _i	-2,105					
point 0	120,65					
déplacement		0,072	0,041	-0,006	-0,052	-0,084
H		0,25	0,50	-0,05	-0,45	0,25
H _{lim}		0,25	-	-	-	0,25

Cas 2 - coefficient de frottement à gauche 0 % et à droite 5,3 %

On obtient le tableau suivant :

		C0	P1	P2	P3	C4
R _i		0	12,019	8,532	8,532	0
Somme R _i	29,084					
R _i x d _i ou H _{lim}		0	-0,375	-0,666	-1,065	0,235
Somme H _i	-1,870					
point 0	107,18					
déplacement		0,064	0,033	-0,014	-0,060	-0,092
H		0	0,40	-0,12	-0,52	-0,25
H _{lim}		0,25	-	-	-	0,25

Cas 3 - coefficient de frottement à gauche 5,3 % et à droite 0 %

On obtient le tableau suivant :

		C0	P1	P2	P3	C4
R _i		0	12,019	8,532	8,532	0
Somme R _i	29,084					
R _i x d _i ou H _{lim}		-0,235	-0,375	-0,666	-1,065	0
Somme H _i	-2,340					
point 0	134,11					
déplacement		0,080	0,049	0,002	-0,044	-0,076
H		0,24	0,59	-0,02	-0,38	0
H _{lim}		0,24	-	-	-	0,24

On en retire que le déplacement maximum en P 1 peut être de
 en P 2 0,014 m
 en P 3 0,060 m

Sous charges permanentes seules, les déplacements sont :
 en P 1 0,014 m
 en P 2 0,001 m
 en P 3 0,017 m

Nota : il faut comprendre que la présence d'appareils d'appui glissants transforme la structure en un système non linéaire. Il n'est donc pas rigoureusement possible de superposer les efforts et déplacements de chacune des actions pour les combiner. Cependant, cela entraînerait des calculs compliqués parfaitement inutiles par rapport aux différences sur les valeurs à calculer. On pourra donc se contenter de considérer que la valeur du déplacement due à la température uniforme est la différence entre le calcul avec le raccourcissement maximum (ici $6 \cdot 10^{-4}$) et le raccourcissement dû aux charges permanentes ($2 \cdot 10^{-4}$).

4.4.2.4.2 - Calcul de la répartition d'un effort de freinage

En ce qui concerne le freinage, il est supposé réparti uniquement sur les appareils d'appui **non glissants**. La valeur de l'effort pris par l'appui est directement proportionnelle à la rigidité de l'appui.

On obtient :

	Pile 1	Piles 2 et 3
	v_1	v_1
Appareil d'appui	0,0370	0,0370
Fondation + fût	0,003	0,0143
Total	0,040	0,0514
$R_i = \frac{1}{v}$	24,969	19,474

La somme des rigidités est égale à 63,92.

Pour un effort de freinage de 0,36 MN la répartition est donc :

$$\begin{aligned}
 \text{- pile 1} \quad H_1 &= \frac{24,97}{64,92} = 0,391 H_T = 0,14 \text{ MN} \\
 \text{- piles 2 et 3} \quad H_2 &= \frac{19,47}{64,92} = 0,305 H_T = 0,11 \text{ MN}
 \end{aligned}$$

4.4.2.4.3 - Incidence sur le calcul des appareils d'appui

Les calculs précédents conduisent, au cours de la vérification des appareils d'appui, à un léger surdimensionnement des appareils sur les piles, ceux sur culées ayant été d'emblée correctement dimensionnés.

Tous calculs faits, pour s'adapter le plus exactement possible aux efforts et déformations appliqués aux appareils d'appui, on pourrait réduire le nombre de feuillets.

C0 et C4	P1	P2	P3
1 appareil de 400 x 500	2 appareils de 700 x 600		
3 x (12 + 3) ; 2 x 6	4 x (16 + 4) ; 2 x 8	3 x (16 + 4) ; 2 x 8	6 x (16 + 4) ; 2 x 8
(inchangé)			(inchangé)

Les appareils d'appui sur piles étant modifiés, il faudrait refaire un nouveau calcul de répartition des efforts. Ce calcul montre que les appareils d'appui sur piles conviennent.

4.4.3 - Conclusion sur les calculs d'ouvrages comportant des appareils d'appui glissants

Dans le même esprit que la conclusion du paragraphe 4.3.2.3.4, nous attirons l'attention de chacun sur l'équilibre entre les calculs et les économies matérielles réalisables sur les appareils d'appui.

L'exemple précédent a été choisi volontairement avec une forte différence entre les souplesses des piles, de manière à grossir les écarts auxquels on pourrait aboutir pour le dimensionnement des appareils d'appui. Même dans ce cas, il montre une économie très modérée sur le volume total de ces appareils d'appui (4 et 5 feuillets au lieu de 7 au prédimensionnement), économie qui devient marginale par rapport au coût global de l'ouvrage. Il faudrait, par ailleurs, tenir compte de l'augmentation du coût des études nécessaires pour optimiser ces appareils d'appui. Si l'on ajoute à cela le risque (non négligeable) d'une erreur à la mise en œuvre par confusion entre des appareils d'appui peu différents (ex : 5 feuillets à la place de 4, etc.), erreur bien plus dommageable pour le fonctionnement des appuis que l'économie envisageable, **nous ne pouvons que conseiller la simplicité dans la détermination des appareils d'appui.**

Il est nettement préférable d'apporter la plus grande attention à la pose - soignée - de ces appareils d'appui, la durabilité est à ce prix.

Chapitre 5

Les contrôles

5.1 - Principes généraux

Les appareils d'appui sont des éléments importants des structures (ponts, viaducs, ...) dont ils assurent le bon fonctionnement. De leur qualité dépend le maintien en état de service et la durabilité de l'ouvrage.

On peut apprécier la nécessité de disposer d'appareils d'appui de qualité par les conséquences financières de leurs éventuelles défaillances. En effet, le coût induit par le changement d'un appareil d'appui déficient est sans commune mesure avec son coût de fourniture : le rapport est de l'ordre de 50 pour 1, parfois nettement plus.

La longévité des appareils d'appui résulte autant de leurs caractéristiques intrinsèques que du soin apporté à leur mise en œuvre. Il est donc nécessaire, outre le choix rationnel des différents types d'appareils d'appui, de s'assurer de la qualité et de la constance de leur fabrication.

La qualité de ces produits dépend de la maîtrise des procédés de fabrication. Les dispositions d'Assurance Qualité doivent permettre :

- de traduire la qualité requise en termes de méthodes de fabrication ;
- d'obtenir la qualité requise ;
- de vérifier qu'elle a été obtenue ;
- de justifier ultérieurement qu'elle a été atteinte et vérifiée.

Outre cet aspect général de la qualité, les appareils d'appui en élastomère fretté présentent certaines particularités :

- leur fabrication et leur commercialisation nécessitent des équipements et des investissements qui sont l'apanage de sociétés spécialisées ;
- leur technologie nécessite des analyses et des essais en laboratoires longs et coûteux qui ne peuvent être effectués à l'occasion de chaque chantier.

C'est l'ensemble de ces considérations qui a conduit à mettre en place une procédure de certification permettant d'apprécier la conformité aux exigences essentielles définies par la Directive sur les produits de construction (dite DPC du 21/12/88) et qui est attesté par **un marquage CE de niveau 1** (il existe un marquage CE sur les appareils d'appui de niveau 3 qui n'est pas utilisé sur les ponts). Ce marquage CE s'appuie sur la partie harmonisée de la norme NF EN 1337-3.

5.2 - Les contrôles de fabrication conduisant au marquage CE

5.2.1 – Le contenu de la certification CE

Pour obtenir un marquage CE de niveau 1, les répartitions correspondantes des tâches entre le fabricant et les organismes notifiés sont les suivantes :

a) le fabricant

- doit disposer d'un contrôle de la production en usine ;
- doit faire des essais complémentaires sur des échantillons prélevés dans l'usine selon un plan d'essais prescrit ;

b) l'organisme tiers (ou organisme notifié)

- réalise les essais de type initiaux ;
- effectue une inspection initiale de l'usine et du contrôle de production en usine ;

- assure une surveillance continue, une évaluation et une acceptation du contrôle de production en usine.

On notera que, par rapport à la marque de certification de qualité volontaire NF, il n'y a pas d'essais annuels de contrôle par un organisme tiers, ce qui constitue une diminution du niveau de qualité surtout quand on sait ce que les essais permettaient de mettre en lumière comme défaut de suivi de fabrication.

Cette question reste en suspens et des négociations sont en cours pour essayer de mettre en place une marque de qualité reprenant cet aspect du contrôle annuel régulier, en sus du marquage CE.

5.2.2 - Les méthodes d'essais

Elles définissent **les méthodes de mesure de l'aptitude à l'usage du produit fini.**

Elles permettent de juger le produit sur les quatre aspects suivants (§ 5.2.2.1 à 5.2.2.4) :

5.2.2.1 - Comportement aux actions de courte durée

Ce sont les essais fondamentaux qui permettent d'apprécier l'aptitude à satisfaire aux trois degrés de liberté :

a) Comportement en cisaillement

- **Détermination du module de cisaillement G** selon l'annexe F de NF EN 1337-3

On détermine le module G à l'aide de deux appareils d'appui qui sont intercalés entre trois plaques. Les plaques supérieures et inférieures sont fixées solidement sur les côtés aux plateaux de la presse, tandis qu'un effort horizontal est appliqué sur la plaque du milieu (*figure 5.1*). Pour empêcher le glissement des appareils d'appui, on applique pendant l'essai une charge constante.

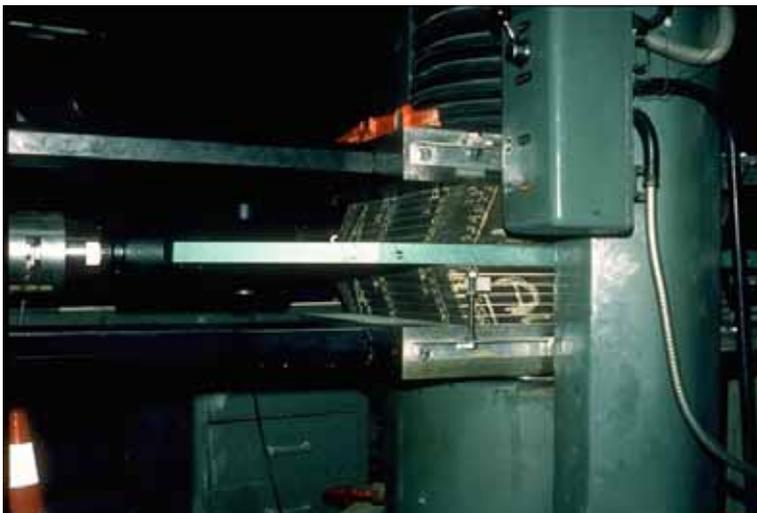


Figure 5.1 : essai de distorsion pour la détermination du module G et de la tenue au cisaillement. (photo Sétra)

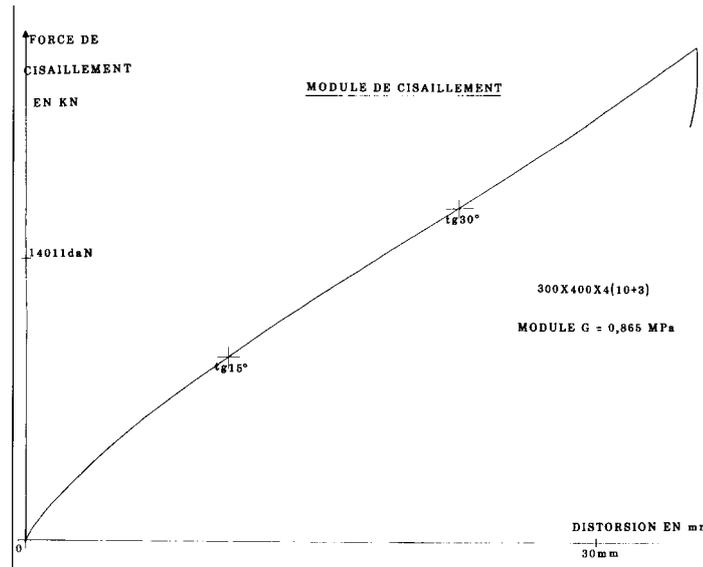


Figure 5.2 : exemple d'une courbe de détermination du module de cisaillement

- **Détermination de l'adhérence en cisaillement** selon l'annexe G de NF EN 1337-3

A la suite de l'essai précédent, on augmente l'effort horizontal, tout en augmentant la charge verticale jusqu'à obtenir une déformation correspondant à $\tan \gamma = 2,0$.

- b) **Comportement en compression** selon l'annexe H de NF EN 1337-3

On mesure en continu la déformation d'une éprouvette jusqu'à une contrainte de compression prédéterminée.

- c) **Comportement en rotation** sous charge excentrée selon l'annexe J de NF EN 1337-3

L'essai consiste :

- soit à mesurer l'angle de rotation et la perte éventuelle de surface de contact de l'éprouvette sous un effort de compression croissant et excentré de valeur prédéterminée ;
- soit à rechercher l'excentricité limite correspondant à une surface de contact prédéterminée, sous un effort de compression fixé.

5.2.2.2 - Comportement aux actions de longue durée

- a) **Détermination du fluage en compression selon la norme T 47.806**

Dans les conditions suivantes : à température ambiante : $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pendant une durée minimale de l'essai de un mois, sous une contrainte de compression de 25 MPa, on doit obtenir le résultat suivant :

- l'indice de fluage $\Delta\Sigma/\Sigma_1$ doit être inférieur à 0,2
- aucun défaut accepté : adhérence, craquelure, fissure, claquage, rupture, ...

- b) **Détermination de la relaxation de contrainte en cisaillement selon la norme XP T 47.807**

Dans les conditions suivantes : à température ambiante : $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pendant une durée minimale de l'essai de trois mois, sous une contrainte de compression de 6 MPa et une distorsion de $\tan \gamma = 0,7$, on doit obtenir le résultat suivant :

- $R_{\text{cst}} \leq 20\%$. DRC à 23°C , $C \leq 25\%$
- aucun défaut accepté : adhérence, craquelure, fissure, claquage, rupture, ...

Ces appréciations n'ont pas été retenues pour l'évaluation en vue du marquage CE. Cependant, les normes françaises sont maintenues et il est possible de faire des essais d'évaluation pour des situations spécifiques.

5.2.2.3 - Comportement sous l'influence de l'environnement

a) Détermination de la résistance à l'ozone selon l'annexe L de NF EN 1337-3

Cf. le § 1.3 sur le choix de la concentration d'ozone.

b) Vieillessement accéléré ou de tenue à la chaleur

L'évolution des caractéristiques mécaniques après vieillissement artificiel ou de tenue à la chaleur concerne les essais des annexes F, G et H de NF EN 1337-3.

c) Détermination de la résistance au brouillard salin selon la norme XP T 47.813

d) Détermination de la condition de non-glissement selon la norme XP T 47.811

Dans les conditions de l'essai, à température ambiante de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ avec un module $G = 0,9 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$, on doit obtenir les résultats suivants :

Contrainte verticale, en MPa	5	10	15
Élastomère/béton	$\geq 0,3$	$\geq 0,25$	$\geq 0,20$
Élastomère/acier peint	$\geq 0,12$	$\geq 0,06$	$\geq 0,04$

e) **D'autres normes**, applicables à l'élastomère vulcanisé et non au produit fini, permettent d'évaluer les éventuelles variations physiques et d'en mesurer les effets. C'est le cas, par exemple, de la norme NF ISO 1817 : "détermination de l'action des liquides (huiles de décoffrage)".

5.2.2.4 - Comportement aux actions dynamiques

Le comportement aux actions dynamiques accidentelles telles que les chocs, les vents cycloniques, les actions sismiques, etc., est ici visé.

En ce qui concerne le comportement aux actions sismiques, on se référera aux essais spécifiques définis dans la prEN 15129 sur les dispositifs antisismiques, ou à défaut, à l'annexe K de la NF EN 1998-2 (EC8-2).

5.2.3 - Conformité à la norme

Pour le Maître d'œuvre, la situation est extrêmement simple : **il ne peut pas y avoir de produits non marqués CE sur le marché**. Il doit donc vérifier si la marque CE est bien apparente sur le produit et que les documents d'accompagnement donnent bien toutes les informations nécessaires sur ce marquage et la bonne adaptation du produit au domaine d'emploi, en particulier que le produit a bien un certificat de conformité de niveau 1 (il existe, en effet, un niveau 3 pour les appareils d'appui ne donnant qu'une déclaration de conformité : cf. le § 5.1 ci-dessus).

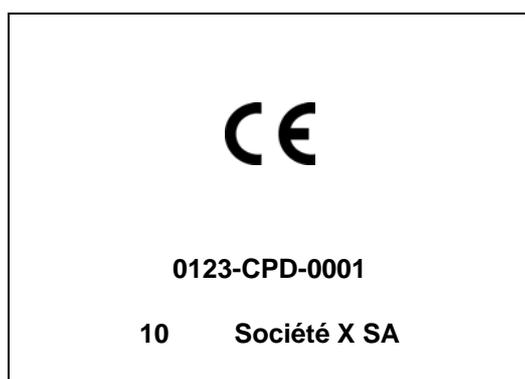


Figure 5.3 : exemple d'un marquage CE.

Il a, cependant, toute latitude pour procéder à des vérifications de conformité par des essais de réception. Dans le cas où le marquage CE et les spécifications de la norme n'auraient pas été respectées, il doit en référer aux services des fraudes.

Par contre, un Maître d'œuvre a tout loisir, pour une application particulière, de définir un produit qui sera spécifique à cet ouvrage et sera fabriqué uniquement pour celui-ci. Dans ce cas, il devra s'assurer, sur la base des normes NF EN et/ou simplement nationales (cf. § 5.2.2.2 et 5.2.2.3 sur les normes d'essais non reprises au niveau européen en norme EN) que le produit est conforme au marché.

Pour ce qui concerne le texte d'application nationale de la norme NF EN 1337-3, nous conseillons au Maître d'œuvre d'utiliser les exemples d'articles de CCTP que l'on trouvera en annexe 4.

5.3 - Les contrôles à la réception

Ils seront limités aux actions suivantes :

- vérification de la présence du marquage (CE) et de la conformité des documents d'accompagnement ;
- vérification visuelle pour s'assurer de l'absence de défauts ou d'endommagements ;
- contrôle de la conformité des dimensions réelles avec les dimensions portées sur les plans d'exécution de l'ouvrage ;
- éventuellement, réalisation d'essais de contrôle de conformité.

5.4 - Les contrôles à la mise en œuvre

Pour le détail des contrôles à la mise en œuvre, on pourra utilement se reporter à la fiche correspondante du guide Memoar (voir biblio).

Le Maître d'œuvre doit s'assurer de l'existence des documents suivants.

5.4.1 - Etablissement des documents préalables

5.4.1.1 - Existence des procédures particulières

- du mode d'exécution des bossages ;
- de pose des appareils d'appui ;
- de remise éventuelle à l'équilibre des déformations par distorsion de l'appareil d'appui tenant compte, en particulier, des conditions thermiques et de l'époque de l'exécution¹⁶.

5.4.1.2 - Etat prévisionnel du fonctionnement des appareils d'appui

Résumé des efforts (verticaux et horizontaux) et des déformations prévisionnelles (distorsion, rotation) pour les charges permanentes, charges d'exploitation et effets thermiques :

- à la mise en charge des appareils d'appui ;
- pour l'ouvrage terminé ;
- après déformation de fluage et retrait.

5.4.2 - Contrôles lors de l'exécution

On procédera, avant la pose des appareils d'appui, au contrôle du respect des tolérances d'exécution des bossages (cf. guide "environnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté", § 1.3.2.3, cf. Bibliographie).

Ce contrôle constitue un **POINT D'ARRET**.

Le bon positionnement de l'appareil d'appui une fois en place sera vérifié par un contrôle de vérification de la conformité du type d'appareil d'appui par rapport à son emplacement prévu sur les plans.

¹⁶ Cette opération est faite par vérinage et peut permettre d'éviter l'utilisation d'appareils d'appui glissants sur culée.

Vérifier l'absence de défaut de calage, notamment au niveau du bossage supérieur, et le parfait réglage des appareils d'appui glissants.

Ces contrôles sont réalisés :

- éventuellement le plus tôt possible après la mise en charge ;
- avant et après une opération de libération, par vérinage, des déformations prises pendant le chantier ;
- avant la mise en service de l'ouvrage (le point 0 défini ci-après) ;
- de manière périodique, en fonction des instructions générales ou particulières.

On n'oubliera pas, au moment de la réception du pont, de faire le point 0 de l'ensemble des appareils d'appui (distorsion, rotation, défauts de bossage, etc.).

5.5 - Les contrôles du comportement en service

Cet aspect fait l'objet du fascicule 13 "appareils d'appui"¹⁷ spécifique de la deuxième partie de l'Instruction Technique sur la Surveillance, l'Entretien et la Réparation des Ouvrages d'Art (Circulaire du 19 Octobre 1979, révisée le 26.12.95).

¹⁷ Publication Sétra sous la référence F0230 et LCPC FASC13.

Chapitre 6

Programme de pré-dimensionnement et de vérification

Il existe un programme de pré-dimensionnement des appareils d'appui en élastomère fretté : le programme NEOP, qui fait partie du catalogue des logiciels du Sétra (disponible sur commande auprès du bureau de vente).

Ce programme dimensionne ces appareils d'appui suivant les règles définies dans la norme NF EN 1337-3 et dans le présent document.

Le logiciel permet de traiter un ouvrage complet en entrant les définitions des lignes d'appui et des appuis de chaque ligne ainsi que la définition des travées.

Il comporte plusieurs modules indépendants, selon que l'on s'intéresse à l'ouvrage dans sa globalité ou bien à un appareil d'appui en particulier.

Au niveau de l'ouvrage, deux outils sont disponibles :

- pré-dimensionnement rapide des appareils d'appui de chaque ligne d'appui, sur la base des descentes de charges minimales et maximales, et des efforts et déplacements horizontaux ;
- calcul des efforts et déplacements horizontaux sous l'effet d'un effort horizontal imposé au tablier (effort de freinage...) ou d'une dilatation rapide ou lente du tablier. Ce module nécessite d'indiquer la valeur de la souplesse globale de l'appui et de sa fondation à laquelle il intègre automatiquement la souplesse des appareils d'appui issue du pré-dimensionnement ou bien imposée par l'utilisateur. Les résultats sont ensuite injectés dans le module de pré-dimensionnement afin d'affiner celui-ci.

En sélectionnant un appareil d'appui particulier, il est possible de :

- choisir la géométrie dans une gamme standard d'appareils d'appui rectangulaire ou circulaire, ou bien la définir manuellement ;
- définir les différentes combinaisons et options de calcul ;
- réaliser un pré-dimensionnement précis de l'appareil d'appui, et en choisir un dans la liste des propositions faites par le logiciel ;
- réaliser une vérification complète de l'appareil d'appui au sens de la norme NF EN 1337-3 ;
- modifier certains paramètres de calcul (défaut de pose, module de cisaillement...).

Dans tous les cas, les résultats peuvent être imprimés ou intégrés à une note de calculs sous Word.

Le programme NEOP fonctionne sur micro-ordinateur de type Pentium ou équivalent, sous l'interface Windows 98, 2000 et XP. Le programme NEOP est fourni dans un coffret qui comporte un CD d'installation, une disquette de protection et une documentation.

Le réseau des PRD (pôles régionaux de diffusion) peut renseigner sur la diffusion et l'utilisation de ce programme. Ce réseau des PRD comporte un correspondant par CETE.

Annexe 1

Calcul des appareils d'appui en élastomère fretté pour une utilisation en zone sismique

A1-1 - Cadre réglementaire

En France, il est maintenant obligatoire de prendre en compte le risque sismique lors de la construction d'un pont, comme cela est défini dans les textes :

- Loi n°87-565 du 22 Juillet 1987 relative à (...) la prévention des risques majeurs ;
- Décret n°91-461 du 14 Mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique ;
- Arrêté du 15 Septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la catégorie dite "à risque normal".

Ce dernier arrêté précise que les vérifications doivent être menées conformément à l'un des deux documents suivants :

- guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts ;
- document d'application nationale de l'ENV, 1998 - Partie 2 : Eurocode 8 - Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme - Partie 2 : Ponts.

Compte tenu de la publication proche de la norme NF EN 1998-2, le présent guide s'appuie principalement sur cette dernière.

Chacun de ces documents comporte des spécifications concernant les appareils d'appui en élastomère fretté. En effet, la grande souplesse de l'élastomère permet d'augmenter les périodes des modes propres de l'ouvrage et ainsi d'éviter la bande de fréquences la plus critique. C'est pourquoi l'utilisation des appareils d'appui en élastomère fretté est une disposition simple et efficace pour obtenir la résistance aux séismes.

Des deux règlements autorisés (AFPS 92 ou Eurocode 8), l'Eurocode est celui dont les méthodes de calcul sont les plus proches de celles de NF EN 1337-3. Il est donc logique de s'y référer ici.

Afin de faciliter l'application conjointe de l'Eurocode 8 et de la norme NF EN 1337-3, le tableau A.1 précise les notations des deux textes :

Module de cisaillement sous séisme	G_{dyn} Noté $G_b = 1,1 G_g$ dans l'EC8-2 § 7.5.2.3.3 (2)
Contrainte normale	σ_m
Force verticale	$F_{z,d}$
largeur des frettes	a'
longueur des frettes	b'
épaisseur d'une couche courante :	t_i
coefficient de forme	S
coefficient de forme de la couche la plus épaisse	S_1
aire réduite	A_r (au 1° ordre)
épaisseur totale d'élastomère	T_e Noté t_e dans l'EC8-2 § 7.5.2.3.3 (2)
distorsion due à l'effort horizontal	$\epsilon_{q,d}$
distorsion nominale totale	$\epsilon_{t,d}$

Tableau A.1 : notations de l'Eurocode 8 et de la NF EN 1337-3

L'EC8 classe les appareils d'appui en élastomère en deux types : **les appareils d'appui spéciaux en élastomère et les appareils d'appui simples en élastomère**.

Les appareils d'appui en élastomère dits spéciaux doivent être testés selon une procédure détaillée (EC8-2 annexe K et prEN 15129) relativement lourde et applicable à tous les dispositifs d'isolation parasismique.

Les appareils d'appui en élastomère qui n'ont pas subi ces tests sur prototypes sont dits **simples**.

La très grande majorité des appareils d'appui en élastomère fretté utilisés en France aujourd'hui entrent dans la catégorie dite **simple**. Ainsi, la présente annexe traite des **appareils d'appui simples en élastomère fretté**.

A1-2 - Combinaisons de calcul et cumul des directions

A1-2.1 - Action sismique

Il est d'usage de calculer l'effet du séisme sur un ouvrage séparément selon trois directions de l'espace X, Y et Z. Pour un pont droit, ces directions sont respectivement l'axe longitudinal du tablier, l'axe transversal du tablier et la verticale. Cette dernière composante du mouvement sismique doit obligatoirement être prise en compte pour la vérification des appareils d'appui (NF EN 1998-2, article 4.1.7 (3) P).

On obtient ainsi trois efforts sismiques qui agissent sur l'appareil d'appui :

- F_x : force horizontale qui crée une distorsion longitudinale ;
- F_y : force horizontale qui crée une distorsion transversale ;
- F_z : force verticale qui vient alourdir ou alléger la descente de charges.

La concomitance de ces trois efforts doit être prise en compte. Parmi les deux options proposées par NF EN 1998-2, pour combiner les effets calculés dans chaque direction, la plus pratique à appliquer aux appareils d'appui en élastomère fretté consiste en trois combinaisons linéaires pondérées comme représenté sur le schéma de la figure A.1 (NF EN 1998-2, article 4.2.1.4(2)).

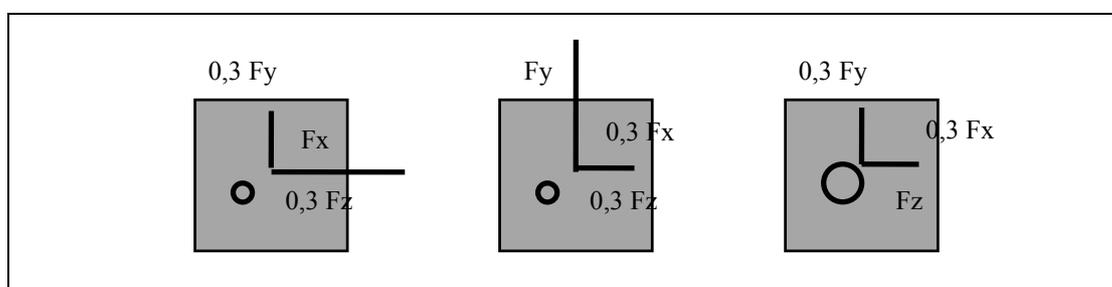


Figure A.1 : combinaisons des directions des séismes.

A1-2.2 - Combinaisons avec les autres cas de charge

L'action sismique doit être cumulée avec (NF EN 1998-2, articles 6.6.2.3(2) et 7.6.2(2)) :

- les charges permanentes, en valeurs caractéristiques ;
- les effets du retrait et du fluage pour les tabliers en béton ;
- 50 % des déplacements dus aux variations de la température (plus précisément, les valeurs à prendre en compte sont égales à 50 % de celles utilisées pour le calcul des appareils d'appui hors combinaisons sismiques).

Pour les ponts urbains à trafic intense, c'est-à-dire ceux de la classe 1 de NF EN 1991-2, il convient de rajouter également 20 % (30 % pour les ponts ferroviaires) des charges d'exploitation à caractère normal (à préciser dans le CCTP sur la base de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1998-2).

A1-3 - Modèle de calcul dynamique

A1-3.1 - Module de cisaillement G

La souplesse des appareils d'appui en élastomère est inversement proportionnelle au module de cisaillement. Or ce module dépend de la vitesse ou de la fréquence de l'excitation. Par exemple, les effets du freinage sont classiquement calculés avec un module deux fois plus important que la valeur correspondant aux charges quasi-statiques (cf. § 3.2.2).

Sous séisme, l'Eurocode propose pour les appareils d'appui courants d'utiliser un module de cisaillement $G_b = 1.1 G_g$ (NF EN 1998-2, § 7.5.2.3(5)).

Selon les règles de l'AFPS, la valeur de G utilisée pour le calcul sismique doit être prise entre 0,8 et 1,2 MPa. Ceci a été défini sur la base d'essais réalisés lors de la construction de centrales nucléaires dans des régions soumises au risque sismique.

Vu les incertitudes qui pèsent sur l'estimation de la valeur de G, liées notamment au vieillissement de l'élastomère et à la température ambiante, il n'est pas souhaitable de compliquer de manière irréaliste les méthodes de calcul. C'est pourquoi nous recommandons d'estimer les effets du séisme avec un module de cisaillement de 1,2 MPa. Cette proposition a d'ailleurs été introduite dans le guide AFPS 92.

Il est difficile de définir une loi de comportement plus précise sans connaître la formulation de l'élastomère, variable selon les fournisseurs. Bien entendu, une valeur différente du module de cisaillement pourra être adoptée si le fabricant fournit les justifications nécessaires (NF EN 1998-2, annexe J).

A1-3.2 - Modélisation des appareils d'appui

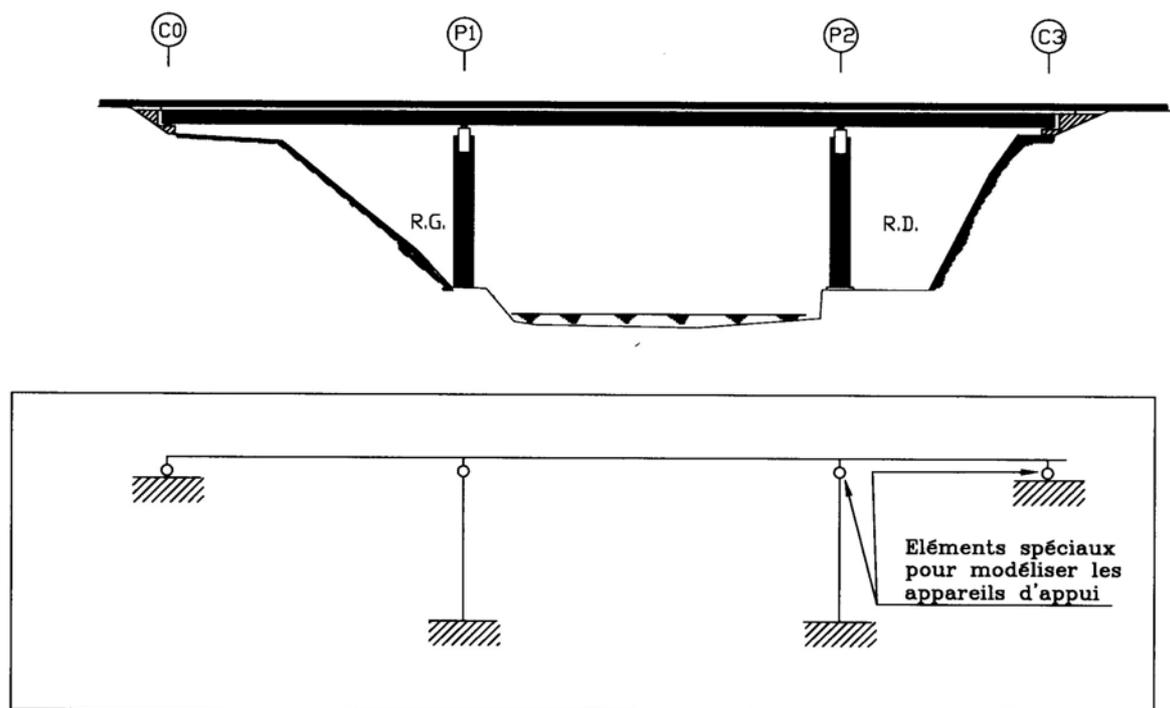


Figure A2 : modèle de calcul à poutres massives

Lorsqu'un tablier repose sur des appareils d'appui en élastomère fretté, ce sont ces derniers qui apportent le plus de souplesse à l'ouvrage. Il est donc primordial de les prendre en compte dans le modèle dynamique permettant de calculer les périodes propres. En théorie, l'appareil d'appui doit être modélisé par un ressort multi-directionnel, fonctionnant aussi bien en traction-compression qu'en rotation, c'est-à-dire par six raideurs (figures A2 et A3).

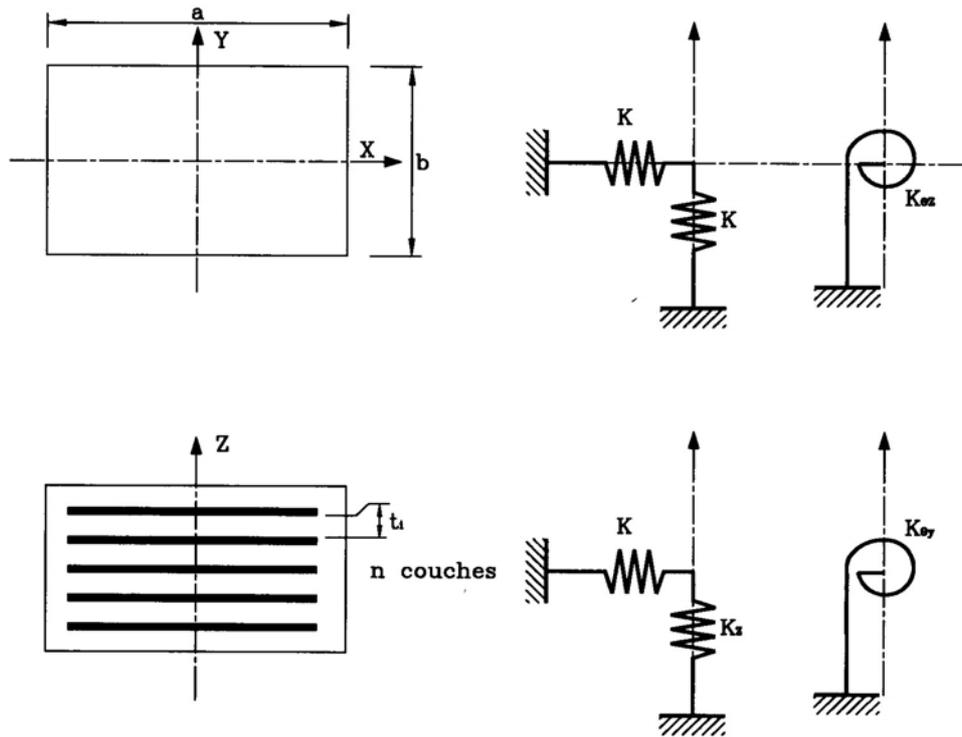


Figure A.3 : modélisation par ressorts

Les raideurs doivent être calculées comme cela est indiqué dans le tableau A.2 (NF EN 1337-3, § 5.3.3.7). Dans la grande majorité des cas, l'appareil d'appui peut être considéré comme infiniment rigide en direction verticale et infiniment souple en rotation, ce qui conduit à la formulation simplifiée de la troisième colonne.

Raideur	Formules complètes selon les notations de NF EN 1337-3	Formules simplifiées
K_x et K_y	$A \cdot G_b / T_e$	$A \cdot G_b / T_e$
K_z	$\left[\sum \frac{t_i}{A'} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G_b \cdot S_1^2} + \frac{1}{E_b} \right) \right]^{-1}$	∞
K_{θ} rectangulaire	$G_b \cdot \frac{a'^5 \cdot b'}{n \cdot t_i^3 \cdot K_s}$	0
K_{θ} circulaire	$G_b \cdot \frac{\pi \cdot D'^6}{512 n \cdot t_i^3}$	0
$K_{\theta z}$	-	0

Tableau A.2 : calcul des raideurs

K_s est un paramètre tabulé en fonction du rapport b/a (NF EN 1337-3, article 5.3.3.7, tableau 4).

A1-4 - Emploi d'un coefficient de comportement

A1-4.1 - Les deux méthodes de conception parasismique

Lorsque la conception parasismique d'un ouvrage est telle que l'essentiel de l'énergie transmise par le sol à la structure peut être dissipé par endommagement des piles, il est d'usage de réduire forfaitairement les efforts obtenus par un calcul élastique. Cette réduction s'opère en divisant les effets des actions par un coefficient de comportement qui dépend du matériau constitutif et de la forme des piles. On parle alors de conception *ductile* ou de la *méthode des rotules plastiques*. En contrepartie, le choix d'un comportement sismique ductile ($q > 1,5$) entraîne une grande complexité dans la conception, qu'il n'est pas possible de détailler ici (ferraillage de confinement des rotules plastiques, critère de cohérence, dimensionnement en capacité, ...). Le lecteur intéressé pourra se référer à *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings* par Paulay et Priestley (Wiley & Sons 1992).

L'autre méthode consiste à concevoir la structure de telle sorte que son endommagement reste très limité sous le séisme de calcul, comme on le fait habituellement sous les charges classiques : conception *essentiellement élastique* ou à *ductilité limitée*. Ceci ne dispense pas de prendre les dispositions nécessaires pour assurer un minimum de ductilité à la structure. Il est par ailleurs loisible de tenir compte de la fissuration des appuis, de préférence par une méthode de calcul itérative assurant la cohérence entre les efforts calculés et les inerties utilisées.

Cette dualité des méthodes de conception se retrouve lorsque l'on emploie des appareils d'appui en élastomère, que ce soit sur tous les appuis ou sur une partie d'entre eux seulement.

A1-4.2 - Appareils d'appui en élastomère sur tous les appuis

Les ouvrages dont les tabliers reposent uniquement sur des appareils d'appui en élastomère fretté sont souples et leurs périodes de vibrations propres se trouvent au-delà de la gamme la plus sensible aux séismes. En général, cet assouplissement suffit pour obtenir la résistance parasismique de l'ouvrage et par suite on utilisera un coefficient de comportement limité à 1,5 (NF EN 1998-2, article 7.3.2(2)P). Il s'agit donc d'une *conception essentiellement élastique (ou à ductilité limitée)*.

A1-4.3 - Appareils d'appui en élastomère sur une partie des appuis

Pour certains ouvrages, il peut être intéressant d'avoir des appareils d'appui en élastomère sur une partie seulement des appuis. Dès lors, la vérification globale du pont pourra être faite selon l'une des méthodes suivantes :

- avec division des efforts élastiques par un coefficient de comportement approprié à chaque pile (cas des ponts irréguliers, NF EN 1998-2, article 4.1.8). Dans ce cas, les appareils d'appui en élastomère fretté devront être calculés "*en capacité*", c'est-à-dire pour le niveau d'effort qui assure la formation des rotules plastiques prévues par le projeteur dans les piles encastrees ;
- sans utiliser de coefficient de comportement. Si des reports de charges vers les appareils d'appui en élastomère sont à craindre, on veillera alors à approcher au mieux la souplesse réelle des piles ne supportant pas d'appareil d'appui en élastomère (fissuration, plastification des aciers et grands déplacements). A cet effet, on pourra effectuer un calcul itératif avec un programme de flambement (type PYLOSTAB du Sétra), ou, à défaut, utiliser les inerties fissurées définies dans l'annexe C de NF EN 1998-2.

A1-5 - Prescriptions

Dans l'ensemble, les vérifications à effectuer sont analogues à celles concernant les autres chargements. Il n'est admis aucun soulèvement au droit des appareils d'appui en élastomère.

Les prescriptions sous les combinaisons de charges sismiques sont détaillées ci-dessous (NF EN 1998-2, article 7.6).

A1-5.1 - Distorsion maximale

Les vérifications concernent la distorsion totale et la distorsion provenant uniquement des efforts horizontaux.

A1-5.1.1 - Distorsion totale

Il convient de vérifier les appareils d'appui normaux en élastomère conformément aux règles de 5.3.3 de NF EN1337-3 en utilisant la valeur $K_L=1$ dans l'expression (5.1) de NF EN 1337-3 (NF EN 1998-2, § 7.6.2(5)).

La valeur attribuée à γ_m dans l'expression (5.2) de NF EN 1337-3 sera fixée par le Texte d'Application Nationale. La valeur recommandée actuellement dans NF EN 1998-2, est $\gamma_m = 1,15$.

En outre, le déplacement de calcul sous séisme doit être affecté d'un coefficient de fiabilité $\gamma_{IS}=1,50$ (valeur recommandée, à fixer dans l'Annexe Nationale de NF EN 1998-2).

A1-5.1.2 - Distorsion due à l'effort horizontal

La distorsion provenant des seuls efforts horizontaux autorisée sous séisme est deux fois supérieure à la valeur admise pour les autres charges (1,0) :

$$\varepsilon_{q,d} \leq 2,0$$

Le calcul de la distorsion tient compte des déformations imposées comme précisé ci-avant (cf. A.1.2).

A1-5.2 - Flambement

Comme pour les autres charges, on vérifiera sous combinaisons sismiques :

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} \leq \frac{2 \cdot a' \cdot G_b \cdot S'}{3 \cdot T_e}$$

A1-5.3 - Glissement

Là encore, on effectuera les mêmes vérifications que pour les charges courantes, mais en tenant compte du séisme. Toutefois, le coefficient de frottement à utiliser est celui de l'Etat Limite de Service.

$$F_{xy,d} \leq \left(0,1 + \frac{K_f}{\sigma_m}\right) \cdot F_{z,d} \quad \text{où} \quad \sigma_m = \frac{F_{z,d}}{A_r}$$

et $\sigma_m \geq 3,0 \text{ MPa}$

Contrairement aux spécifications de NF EN 1337-3, cette dernière clause n'est pas à vérifier sous les charges permanentes mais sous la combinaison sismique la plus défavorable (probablement lorsque le séisme vertical est ascendant).

Dans la plupart des cas, il ne sera pas possible de vérifier les conditions de non-glissement en zone sismique et on sera conduit à prévoir des dispositifs anti-cheminement.

A1-6 - Dispositions constructives complémentaires

L'environnement des appareils d'appui en élastomère fretté (visibilité, possibilités de vérinage, ...) doit être complété par les dispositions propres à l'action sismique. Ces dispositions sont essentiellement liées aux déplacements extrêmement importants entre un tablier et ses appuis mis en évidence lors de séismes récents : Kobé (Japon 1996), Loma Prieta (Californie 1989), ... Ces déplacements ont une ampleur très différente de celle prévisible par le calcul. Il convient donc de prendre des mesures complémentaires pour assurer l'intégrité de la structure.

On distinguera les différents cas d'emploi suivants :

- l'appareil d'appui en élastomère qui reprend les efforts sismiques ;
- l'appareil d'appui en élastomère qui est complété par un dispositif de blocage reprenant les efforts sismiques ;
- l'appareil d'appui en élastomère associé à un dispositif de glissement.

Par ailleurs, il convient de s'assurer dans certains cas que le recouvrement entre l'élément supporté et le support est suffisant (*repos d'appui minimal*).

A1-6.1 - Appareil d'appui en élastomère fretté reprenant les efforts sismiques

Lorsque l'appareil d'appui en élastomère fretté transmet les efforts dus à l'excitation de la masse du tablier aux appuis, le projecteur peut choisir entre les deux options suivantes (NF EN 1998-2, article 6.6.2.3) :

- concevoir les appareils d'appui pour reprendre l'intégralité des efforts sismiques de calcul majorés de 50 % (NF EN 1998-2, § 7.6.2) ;
- compléter l'appareil d'appui par une butée (encore appelée *attelage sismique*).

A1-6.1.1 - Attelages sismiques jouant le rôle de butées de sécurité

Dans certains cas de figure, il peut être intéressant de compléter les appareils d'appui en élastomère par des attelages sismiques jouant le rôle de butée de sécurité. C'est le cas notamment dans la direction longitudinale pour la mise à niveau des ponts existants au droit des appuis d'extrémité mobiles entre le tablier et la culée ou la pile, lorsque les exigences pour le repos d'appui minimal ne sont pas satisfaites (NF EN 1998-2, § 6.6.3.1(2)c).

Ces attelages doivent être prévus avec un jeu ou des marges appropriées de manière à demeurer inactifs sous l'action sismique de calcul, et n'intervenir qu'en fin de course de l'appareil d'appui.

Dans les règles AFPS, cette disposition est proposée selon les deux directions horizontales : longitudinale et transversale. Il est alors recommandé de prendre en compte dans le calcul du jeu, une portion des effets thermiques et la totalité des effets différés :

$$d_S = d_G + 0,40 d_T + d_{diff} + d_E$$

- d_G : déplacement dû aux effets de longue durée des actions permanentes et quasi permanentes ;
- d_T : déplacement de calcul dû aux mouvements thermiques ;
- d_{diff} : déplacement dû aux effets différés ;
- d_E : déplacement sismique de calcul.

Le jeu dégagé ne doit pas être plus important afin de limiter les effets de choc provenant de la mise en mouvement du tablier, et la butée est dimensionnée pour reprendre un effort H égale à 40 % de l'effort sismique de calcul.

La figure A.4 présente une disposition possible. Il s'agit d'une butée en béton armé solidaire du fût de pile. Cette butée pénètre dans une réservation aménagée en sous-face du tablier sur une hauteur de l'ordre de 10 cm, suffisante pour transmettre l'effort H . L'attelage sismique ainsi constitué fonctionne aussi bien dans le sens transversal que dans le sens longitudinal.

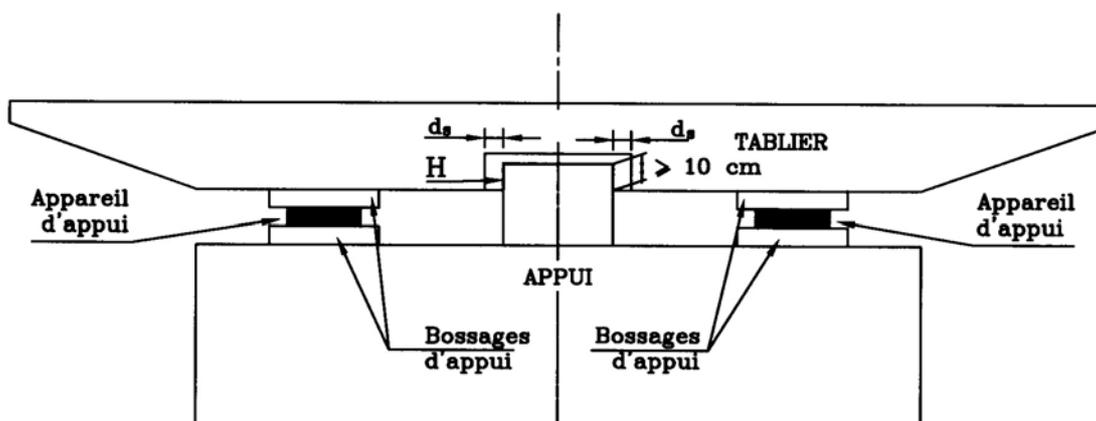


Figure A.4 : exemple de butée

Les attelages sismiques doivent être calculés selon le règlement adapté à leur matériau constitutif. Les vérifications se feront à l'Etat Limite Ultime, mais avec la valeur nominale du poids repris par l'appui considéré (c'est-à-dire que Q ne sera pas pondéré par 1,35). Les coefficients de sécurité portant sur les matériaux sont ceux correspondant aux combinaisons fondamentales (EC8-2 DAN article 5.2).

Pour des butées en béton armé, on appliquera par exemple la partie de NF EN 1992-2 (EC2) qui traite des consoles courtes. On prendra garde à ce que les butées n'amènent pas de dispositions préjudiciables à la durabilité des appareils d'appui (évacuation des eaux, possibilités de vérynage, gêne dans les dilatations thermiques, ...).

A1-6.1.2 - Appareil d'appui en élastomère complété par un dispositif de blocage qui reprend les efforts sismiques

Dans certains cas, il est utile de bloquer le fonctionnement de l'appareil d'appui dans une des deux directions horizontales, par exemple pour préserver l'intégrité des équipements (joints de chaussée, dispositifs de retenue, ...), ou parce qu'on ne souhaite pas dimensionner les appareils d'appui pour les efforts sismiques de calcul. Bien entendu, le modèle de calcul dynamique doit tenir compte de ce blocage.

Le dispositif peut être analogue à l'attelage sismique décrit ci-dessus, à la différence que le jeu est réduit à une valeur ne dépassant pas 15 mm. Ce nombre constitue un compromis entre :

- les tolérances de réalisation sur chantier ;
- un jeu nécessaire pour laisser libre les déformations dans la direction perpendiculaire au blocage ;
- un jeu à ne pas dépasser pour éviter les effets de chocs.

Dans ce cas, l'attelage sismique doit être dimensionné pour résister aux actions de calcul résultant du principe de dimensionnement en capacité (efforts résultant de l'atteinte du niveau de plastification dans la pile sous-jacente).

Pour des ouvrages non courants ou spéciaux, on peut aussi concevoir des dispositifs particuliers. Par exemple, un appareil d'appui en élastomère placé verticalement associé à un dispositif de glissement. Toutefois, le projeteur et le gestionnaire doivent garder à l'esprit que, plus le système sera sophistiqué, plus il a de chances de ne pas fonctionner en vieillissant et plus il nécessitera un entretien coûteux.

A1-6.1.3 - Appareil d'appui en élastomère associé à un dispositif de glissement

Il est bien évident qu'un tel appareil d'appui ne reprend pas les efforts sismiques.

Par contre, il doit être dimensionné pour supporter sans endommagement le déplacement sismique de calcul (NF EN 1998-2, article 7.6.2) :

$$d_{Ed} = \gamma_{IS} d_E + d_G \pm 0,50 \cdot d_T$$

A1-6.2 - Repos d'appui minimal

En sus des mesures constructives indiquées ci-avant, il est indispensable de vérifier que le recouvrement entre le tablier et son support présente une longueur suffisante.

La valeur du repos d'appui minimal défini dans l'Eurocode se calcule par la formule suivante (NF EN 1998-2, article 6.6.4) :

$$l_{ov} = l_m + d_{eg} + d_{es}$$

Le premier terme, l_m , représente la longueur minimale de recouvrement d'appui permettant de transmettre les charges. On n'utilisera pas de valeur inférieure à 40 cm.

Les deux derniers termes représentent le déplacement relatif entre le tablier et son appui sous séisme. Il comporte deux parties :

- d_{es} est le déplacement calculé sous l'excitation sismique (NF EN 1998-2, article 6.6.4 (3) A) ;
- d_{eg} est le déplacement effectif entre les deux parties dû au déplacement différentiel du sol (*cf. figure A.6*) ; il permet de tenir compte de l'écartement relatif entre les fondations de deux appuis, phénomène non pris en compte dans le calcul dynamique de la structure (donnant d_{es}) ; il doit être évalué selon les spécifications des textes définissant l'action sismique (NF EN 1998-2, § 6.6.4 (3) et annexe D ou guide AFPS 92).

On effectuera par exemple la vérification du repos d'appui lorsque les butées longitudinales sont des dispositifs unilatéraux placés sur les chevêtres des culées : il convient de vérifier que le débord du sommier est suffisant pour que le tablier ne tombe pas en cas d'écartement relatif entre les deux culées.

De même, pour des tabliers relativement rigides dans leur plan et pour des ouvrages courts, on peut se contenter de disposer les attelages sismiques transversaux sur les culées. On s'assurera alors que le repos d'appui est suffisant sur les différentes piles.

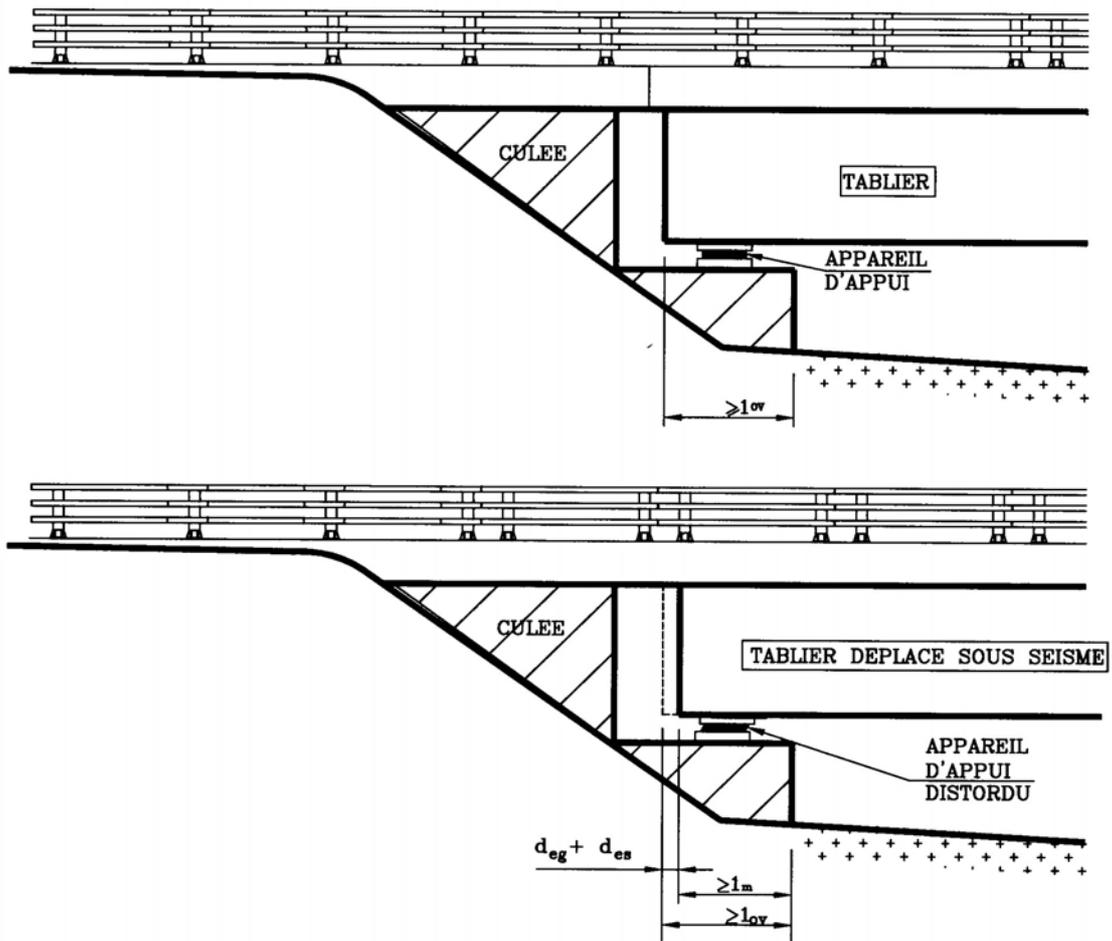


Figure A.5 : détermination du repos d'appui

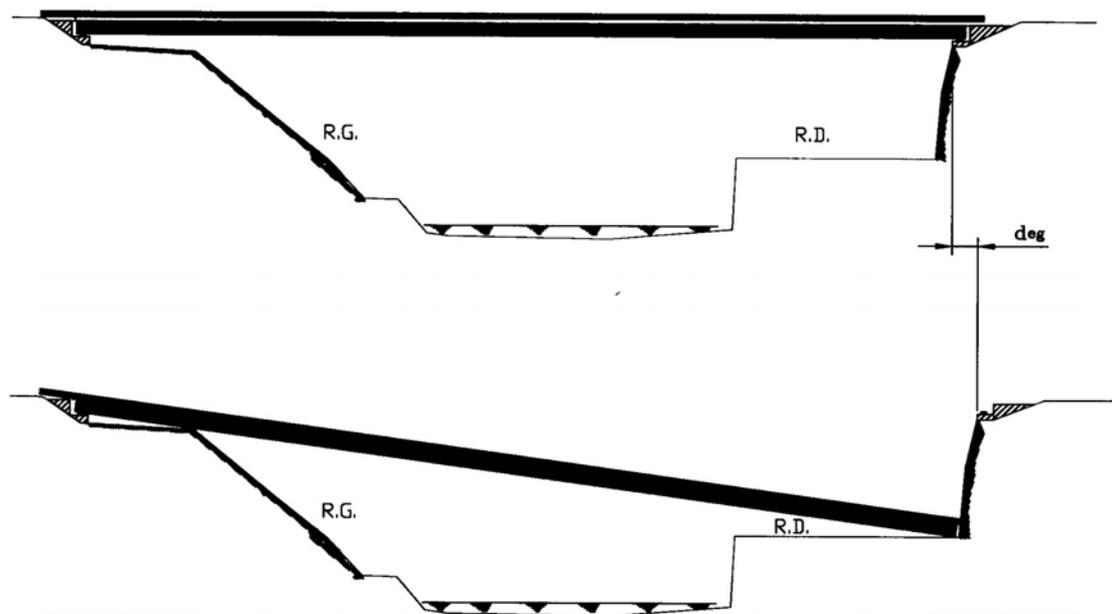


Figure A.6 : déplacement différentiel du sol

Annexe 2

Durabilité des appareils d'appui en élastomère fretté avec plan de glissement en zone sismique

Si la durabilité des appareils d'appui en élastomère fretté est satisfaisante, grâce, notamment, à la procédure de certification qui s'appuie sur une série d'essais dont certains visent à examiner cette tenue aux conditions environnementales, il n'en va pas de même pour l'ensemble constitué par un couple d'appareils d'appui en élastomère fretté comportant un plan de glissement (appareils d'appui glissants). Dans ce cas, on ne cumule pas les qualités des uns et des autres mais plus exactement on additionne les inconvénients.

Il en résulte que la durabilité des appareils d'appui glissants est beaucoup plus aléatoire. L'objet de la présente annexe est de rappeler les principales dispositions qu'il convient de prendre pour aboutir à des dispositifs ayant une durabilité plus satisfaisante. Ces dispositions sont à prendre dès la fabrication, puis au stade aussi bien de la conception de l'ouvrage que de la mise en œuvre et de la surveillance et de l'entretien.

A2-1 - Grandeur caractéristique du fonctionnement d'un appareil d'appui glissant

Comme grandeur caractéristique du fonctionnement d'un appareil d'appui glissant, on retient généralement son coefficient de frottement. La connaissance statistique de la probabilité d'obtenir la valeur définie de ce coefficient serait le moyen le plus correct de caractériser le fonctionnement d'un appareil d'appui glissant. Dans l'état actuel de la technique, nul n'est en mesure d'assurer, avec une probabilité connue, que la valeur de ce coefficient sera atteinte ou dépassée pendant une durée de service donnée. C'est pourquoi on a recours à des moyens empiriques qui sont à mettre en œuvre aux stades de :

- la conception de l'ouvrage ;
- la construction ;
- l'entretien.

A2-2 - Dispositions à prendre au stade de la conception

En règle générale, il convient de donner la préférence aux éléments de conception robuste, peu sensibles aux conditions de mise en œuvre et d'environnement. De ce point de vue, les appareils d'appui glissants font certainement partie des produits de construction particulièrement sensibles aux conditions de mise en œuvre, aux intempéries et au vieillissement. **On n'aura donc recours aux appareils d'appui glissants qu'après avoir épuisé les autres possibilités.** Les sollicitations, ainsi que les déplacements agissant sur l'ouvrage, sont à reprendre en utilisant au maximum, par ordre de priorité décroissant :

- la flexibilité des appuis. Si certains appuis sont trop rigides on peut prévoir des appuis pendulaires ou des appareils d'appui à rouleau, dont la hauteur est relativement grande par rapport au déplacement attendu ;
- la capacité de distorsion des appareils d'appui en élastomère fretté ;
- lorsque les solutions précédentes sont jugées insuffisantes, les appareils d'appui glissants de conception mécanique comportant des pièces usinées dans des tôles de fortes épaisseurs. Ce type d'appareil d'appui glissant est couramment incorporé aux appareils d'appui à pot. Les prescriptions de mise en œuvre de ces produits sont plus strictes que celles des appareils d'appui en élastomère fretté glissant. De même les contrôles qualité lors de la fabrication sont plus rigoureux et plus précis.

Les appareils d'appui en élastomère fretté avec un plan de glissement sont à utiliser dans les conditions suivantes :

- reprise des déformations différées (retrait-fluage) par le seul plan de glissement ;
- reprise des autres actions (température, freinage, etc.) par la distorsion de la partie élastomère fretté.

Nota : un vérinage après la construction de l'ouvrage, avant réception, peut éviter de faire appel à des plans de glissement et limiter l'emploi aux seuls appareils d'appui en élastomère fretté normalisés.

A2-3 - Dispositions à prendre au stade de la fabrication

Seuls les appareils d'appui de type D ou E de la norme NF EN 1337-3 peuvent s'accommoder de l'ajout de plaque de glissement.

Il est nécessaire de prévoir des alvéoles de graissage avec une lubrification du plan de glissement et sa protection appropriée contre les salissures sur ouvrage.

L'ensemble plan de glissement/bloc d'élastomère est à livrer, pour des raisons de manutention et de mise en œuvre, comme une pièce monolithique. Après mise en œuvre, la désolidarisation du plan de glissement du bloc d'élastomère doit être facilement réalisable.

A2-4 - Dispositions à prendre dans le cadre de la surveillance

Pour prévenir les désordres spécifiques aux appareils d'appui glissants, une surveillance régulière s'impose. Il convient de distinguer les risques spécifiques aux appareils d'appui mécaniques de ceux en élastomère fretté.

Les appareils d'appui en élastomère fretté avec plan de glissement sont des produits très déformables. Ils ont fréquemment des distorsions notables dès la première année de la mise en service. En relevant la distorsion sur le site, et connaissant les dimensions ainsi qu'une estimation de la charge sur l'appareil d'appui, on en déduit un coefficient de frottement. Cette évaluation du coefficient de non-glissement est une valeur par défaut du coefficient de glissement, puisque l'appareil d'appui n'a pas encore glissé. On peut trouver une valeur de l'ordre de 10 %, ce qui justifie la restriction de durée d'utilisation de ces produits évoquée précédemment.

A2-5 - Conclusion

Quelles que soient les dispositions déjà prises, ou qui seront prises au niveau de la normalisation européenne, pour ce qui concerne la fabrication des appareils d'appui glissants, il faut évaluer le risque et la gravité des désordres, ainsi que le coût de remplacement des appareils d'appui, pendant toute la durée de service de l'ouvrage, dès le stade du projet.

Annexe 3

Tableau de dimensions en zone sismique en plan courantes

Appareil d'appui de type B avec e = demi-feuillet

Enrobage par 2 demi feuillets, $T_q < a/3$ et $T_{b_{max}} < 300$ mm

Dimensions		Epaisseur des feuillets en mm					
a	b	6	8	10	12	16	20
100	150	x	x				
100	200	x	x				
150	200	x	x				
150	250	x	x				
150	300		x				
200	200		x				
200	250		x	x			
200	300		x	x			
200	350		x	x			
200	400		x	x			
250	250		x				
250	300		x	x			
250	350		x	x			
250	400		x	x			
300	300			x			
300	350			x	x		
300	400			x	x		
300	450			x	x		
300	500			x	x		
300	550			x	x		
300	600			x	x		
350	350			x			
350	400			x			
350	450			x			

Dimensions		Epaisseur des feuillets en mm					
350	500			x			
350	550			x	x		
350	600			x	x		
400	400			x	x		
400	450			x	x		
400	500			x	x		
400	550				x		
400	600				x		
450	500			x	x		
450	550				x		
450	600				x		
500	500			x			
500	550				x		
500	600				x	x	
500	650				x	x	
500	700				x	x	
600	600				x	x	
600	650				x	x	
600	700				x	x	
700	700				x	x	
700	800					x	x
700	900					x	x
800	800					x	x
800	900						x
900	900						x

Annexe 4

Aide à la rédaction des CCTP

La présente annexe propose des exemples de clauses à intégrer dans les CCTP afin de permettre une rédaction homogène de ceux-ci et de pouvoir intégrer les conseils du présent guide. Pour une application en zone sismique, le rédacteur est invité à compléter les présentes clauses sur la base de l'annexe 1.

Les propositions d'articles contenues dans cette annexe portent sur des aspects techniques.

Leur application devra cependant tenir compte des règles définies dans le Code des Marchés Publics.

A4.1 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "qualité des matériaux"

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
	Les appareils d'appui en élastomère fretté sont conformes à la norme NF EN 1337, parties 1 et 3 (et partie 2*) et au Texte d'Application Nationale. Cette conformité est attestée par un marquage CE de niveau 1.	<i>*A ajouter dans le cas d'appareils d'appui comportant un plan de glissement. Voir notamment la précision apportée par le Texte d'Application Nationale portant sur la norme NF EN 1337-3, § 4.4.4, pour l'utilisation de ce type d'appareils d'appui.</i>
§ 2.2.2	Conformément au § 4.4.1 de la norme NF EN 1337-3, les appareils d'appui seront en polychloroprène (CR).	
§ 2.2.2	Conformément au § 4.3.6 de la norme NF EN 1337-3, la concentration d'ozone prévue pour le test de tenue de l'appareil d'appui à l'ozone est de 50 ppcm.	

Article dans le cas d'utilisation d'appareils d'appui en élastomère fretté avec plan de glissement

§ A2.3	Les appareils d'appui avec plan de glissement comporteront des alvéoles dans le PTFE avec une lubrification et une protection appropriée du plan de glissement (cf. § 7.3 et 7.4 de la NF EN 1337-2).	<i>A noter que le 5^{ème} alinéa du § 4.4.4.3 de la NF EN 1337-3 n'exclut pas l'utilisation de feuilles de PTFE non alvéolées pour les appuis de type D, si le concepteur de la structure l'a spécifié</i>
--------	---	--

A4.2 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "principe de calcul"

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
§ 3.3 et 3.4	<p>Les appareils d'appui seront justifiés comme indiqué au § 5.3.3 de la norme NF EN 1337-3 complété par les indications du § 3.3 et 3.4 du guide Sétra en prenant en compte les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les demi-feuillets extérieurs qui peuvent être pris en compte dans le calcul ; - des feuillets de 10 mm sont possibles, - l'épaisseur des frettes qui peut être prise au moins égale à 2 mm (cf. formule 12 du § 5.3.3.5 de la norme NF EN 1337-3). 	<i>Voir Annexe 3 du guide</i>
§ 3.2.2	<p>Dans le cadre de l'application du § 4.3.1.1 "Module de cisaillement à température nominale" de la norme NF EN 1337-3, la valeur de module $G = 0,9$ est applicable.</p> <p>Les exigences relatives à la clause 4.3.1.3 de la norme NF EN 1337-3 "Module de cisaillement à très basse température" ne sont pas applicables.</p> <p>Dans le cadre de l'application de la clause § 4.3.3 "Raideur en compression" de la norme NF EN 1337-3, le niveau d'essai 3 n'est pas exigé*.</p>	<p><i>Sauf impératif particulier spécifique et précisé qui sera alors intégré dans cet article.</i></p> <p><i>* Puisqu'il s'agit de fabrications comportant du polychloroprène (cf. § 2.2.2 du présent guide et le Texte d'Application Nationale).</i></p>
	<p>Dans le cadre de l'application de la clause § 4.3.5 "Capacité de rotation statique (et tableau 7)" de la norme NF EN 1337-3, seul l'essai décrit dans la clause 4.3.5.2 : "Essai sous charge excentrée" est exigé. Dans le présent CCTP, le 3ème alinéa des exigences : "Sous une excentricité égale à 1/6 de la plus petite dimension en plan de l'éprouvette, aucun défaut n'est accepté (défauts d'adhérence, fissures, etc.) pour un angle de rotation de 0,025 rad" est requis. Dans le cas où l'angle ne peut être atteint, la pression est limitée à $3,5 G_d * A^* S/1,5$.</p>	
	<p>Conformément au § 4.3.7 de la norme NF EN 1337-3, l'essai d'adhérence en cisaillement PTFE/élastomère (et tableau 7) est requis.</p>	<i>Dans le cas d'utilisation d'appareils d'appui comportant des plans de glissement.</i>
	<p>Coefficient de frottement : § 4.4.4 de la norme NF EN 1337-3</p>	<p><i>Dans le cas courant, pour simplifier, on ne tiendra pas compte du facteur correctif de 2/3.</i></p> <p><i>Si on en tient compte dans le cas de justification particulière et pour les applications dans les DOM-TOM où la température effective d'appui ne descend pas en dessous de -5 °C.</i></p>
§ 3.4.1.4	<p>Dans le cadre de l'application du § 5.3.3.6 de la norme NF EN 1337-3 sur la condition limite pour la stabilité au flambement, il est précisé que par souci de simplification on appliquera dans la formule (15) la réaction maximale sous combinaison fondamentale et avec un module $G = 0,9$.</p> <p>Conformément au § 5.3.3.a de la norme NF EN 1337-3, la valeur de $\gamma_m = 1$ est applicable dans le cadre du présent CCTP.</p> <p>Pour les applications correspondant à l'objet du présent CCTP, seule la valeur de $K_L = 1,0^*$ est à prendre en considération.</p>	<i>*cf. Annexe C de la norme NF EN 1337-3</i>

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
	Conformément au § 5.3.3.4 de la norme NF EN 1337-3 "déformation de calcul due à la rotation angulaire", la vérification sous les angles de rotation est à faire à l'ELU.	
	Conformément au § 5.3.3.5 de la norme NF EN 1337-3 "épaisseur des frettes", la valeur de $\gamma_m = 1$ est applicable dans le cadre du présent CCTP.	
§ 3.4.1.3	Les rotations α_a et α_b doivent inclure les défauts de pose d'une valeur égale à : <i>A compléter suivant les indications ci-contre</i> Ce défaut de pose sera ajouté à la plus grande des rotations α_a ou α_b .	<i>Ceux-ci dépendent beaucoup du soin apporté à la mise en œuvre.</i> <i>La norme NF EN 1337-3 (§ 7.1.3) n'est pas claire sur les valeurs à adopter pour les défauts de pose, ni sur la façon de les prendre en compte. Les valeurs forfaitaires suivantes sont donc proposées :</i> <ul style="list-style-type: none"> • 0,003 radian dans le cas des méthodes de pose dite conjuguées ; • 0,010 radian pour les structures posées directement sur les appareils d'appui.
§ 5.2.3		<i>Un Maître d'œuvre a tout loisir, pour une application particulière, de définir un produit qui sera spécifique à son ouvrage et sera fabriqué uniquement pour celui-ci. Dans ce cas, il devra s'assurer, sur la base des normes NF EN et/ou simplement Nationales (voir § 5.2.2.2 et 5.2.2.3 sur les normes d'essais non reprises au niveau européen en norme EN) que le produit est conforme au marché.</i>
§ 2.2.4.1 et § 2.2.4.3	Le mode de fixation des plaques de glissement en acier inoxydable sur les tôles support sera soumis à l'agrément du Maître d'œuvre. La position des dispositifs de mesure ainsi que les modalités de protection contre les souillures seront soumis à l'agrément du Maître d'œuvre. Pour la dimension des plaques de glissement, les déplacements seront augmentés dans les deux directions de ± 20 mm. Par ailleurs, le déplacement minimum à prendre en compte est de ± 50 mm dans la direction principale des déplacements résultant de l'ouvrage.	

A4.3 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "mise en œuvre"

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
§ 5.4.2	Point d'arrêt : - acceptation des bossages des appareils d'appui ; - acceptation à la livraison des appareils d'appui ; - acceptation de la pose des appareils d'appui (réglage et implantation).	

Bibliographie

Documents généraux

- Environnement des appareils d'appui en élastomère fretté. Recueil des règles de l'art. Sétra /LCPC 10/1978. Réf. F 7810.
- Les appareils d'appui à pot. Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires. Guide technique. Sétra. Août 2007 - Réf. 0734 – *Annule et remplace le guide "Les appareils d'appui à pot de caoutchouc édité en septembre 1999"*.
- Appareils d'appui en caoutchouc. Documents scientifiques et techniques. AFPC. 07/1994.
- Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Seconde partie : Fascicule 13 "appareils d'appui". Sétra /LCPC. 2002. Réf. 0230
- MÉMOAR (Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art).
Voir plus particulièrement les fiches suivantes :
 - VIII-1 : Appareils d'appui en élastomère fretté ;
 - VIII-3 : Bossages des appareils d'appui ;
 - VIII-4 : Vérinage/Calage.
- Note d'information technique n° 27 sur l'application nationale de la norme NF EN 1337 (appareils d'appui structuraux). Sétra. Décembre 2006.

Normes

- NF EN 1337-1 – Appareils d'appui structuraux. Partie 1 : Indications générales
- NF EN 1337-2 - Appareils d'appui structuraux. Partie 2 : Eléments de glissement
- NF EN 1337-3 - Appareils d'appui structuraux. Partie 3 : Appareils d'appui en élastomère
- NF EN 1991-2 - Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 2 : Actions sur les ponts, dues au trafic et son annexe nationale (à paraître).
- NF EN 1992-1-1 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
- NF EN 1993-2 : Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 2 : Ponts métalliques (à paraître)
- NF EN 1991-1-5 : Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-5 : Actions générales - Actions thermiques
- NF EN 1990 : Eurocodes structuraux : Bases de calcul des structures et NF EN 1990/A1 : Annexe A2 (application aux ponts)
- Série Appareils d'appui en caoutchouc :
 - T 47.806 - Détermination du fluage en compression
 - XP T 47.807 - Détermination de la relaxation de contrainte en cisaillement.
 - XP T 47.811 - Détermination de la condition de non-glissement
 - XP T 47.813 - Détermination de la résistance au brouillard salin
 - XP T 47.814 - Détermination de la dureté apparente Shore A au moyen d'un duromètre de poche

Bibliographie spécifique à l'annexe 1

- Loi n° 87-565 du 22 Juillet 1987 relative à (...) la prévention des risques majeurs.
- Décret n° 91-461 du 14 Mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique.
- Arrêté du 15 septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la catégorie dite "à risque normal".
- Guide AFPS 92 pour la protection parasismique des Ponts.
- NF EN 1998-2 : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance au séisme - Partie 2 : Ponts (à paraître) et son annexe nationale (à paraître).
- PrEN 15129 - Dispositifs antisismiques

46 avenue
Aristide Briand
BP 100
92225 Bagneux Cedex
France
téléphone :
33 (0)1 46 11 31 31
télécopie :
33 (0)1 46 11 31 69
internet : www.setra.equipement.gouv.fr

Ce guide technique est destiné essentiellement aux concepteurs de pont. Les éléments qu'il contient doivent permettre de dimensionner les appareils d'appui en élastomère fretté en vue d'une utilisation sur les ponts, viaducs et les structures similaires.

Ce document comprend essentiellement les éléments suivants :

- une description sommaire des différents types d'appareils d'appui en élastomère fretté et des éventuels équipements particuliers qui lui sont liés ;
- les principaux textes réglementaires ou normatifs de base ;
- les critères de dimensionnement sur la base des projets de textes normatifs préparés par le CEN (Comité Européen de Normalisation) ;
- le principe des contrôles permettant le marquage CE ;
- une méthodologie de calcul dans un projet de pont avec des exemples d'application.

Enfin, il est complété par une série d'annexes traitant du dimensionnement de ce type d'appareils d'appui dans les zones sismiques, de la durabilité des appareils d'appui en élastomère fretté complétés par un plan de glissement et d'exemples de rédactions d'articles à introduire dans les CCTP.

Document disponible au bureau de vente du Sétra
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 : **0716** - Prix de vente : **18 €**

*Crédit photos : Sétra - CTOA
Conception graphique de la couverture : Philippe Masingarbe (Sétra)
Impression : Caractère - 2, rue Monge - BP 224 - 15002 Aurillac Cedex*

*L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document.
© 2007 Sétra - Dépôt légal : 3^{ème} trimestre 2007 - ISBN : 978-2-11-095820-4*

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
de l'Équipement

