

Guide technique

Appareils d'appui à pot

Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires



page laissée blanche

Guide technique

Appareils d'appui à pot

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 préparé, sous la direction de Thierry Kretz, chef du Centre des techniques d'ouvrages d'art (CTOA) du Sétra, par un groupe de travail composé de :

- Jean-François Derais, Sétra
- Michel Fragnet, Sétra
- Gilles Lacoste, Sétra
- Yvon Meuric, Sétra
- Florence Pero, Sétra
- Ludovic Picard, DREIF
- Yves Picard, Consultant.

Ont apporté leurs conseils et fait part de leurs observations :

- A. Chabert, LCPC
- B. Plu, SNCF
- Ph. Deniard, SNCF
- M. Dauvilliers, LROP
- J.B. Datry, SETEC
- V. Mauvisseau, SETEC
- J. Ryckaert, SETEC
- J.M. Lacombe, Sétra
- D. Lefaucheur, Sétra.

Les dessins ont été préparés par Jean-Pierre Gilcart (Sétra).
Illustrations photos : photothèque Sétra.



Le présent guide annule et remplace le guide technique
"Les appareils d'appui à pot d'élastomère. Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires"
de septembre 2000 (référence : F0033)

Sommaire

Chapitre 1 - Introduction	5
1.1 - Généralités. Objet et contenu du présent guide	5
1.2 - Domaine d'emploi.....	6
1.3 - Application de la norme NF en 1337-5 au contexte national français	6
Chapitre 2 – Composition d'un appareil d'appui à pot	7
2.1 - Principes généraux	7
2.2 - Les différents éléments constitutifs	7
2.3 - Avantages et inconvénients de ce type d'appareil d'appui	11
2.4 - Cotes géométriques importantes	11
Chapitre 3 – Commentaires sur la norme NF en 1337-parties 2 & 5	13
3.1 - Présentation	13
3.2 - Introduction	13
3.3 - Appareil d'appui à pot.....	13
3.4 - Élément de glissement.....	17
3.5 - Sécurité au glissement à l'interface appareil d'appui/structure.....	18
Chapitre 4 – Principes de calcul d'un ouvrage comportant des appareils d'appui à pot	19
4.1 - Contexte réglementaire.....	19
4.2 - Efforts verticaux extrêmes.....	21
4.3 - Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot glissants	22
4.4 - Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot fixes.....	26
4.5 - Autres recommandations	30
4.6 - Exemples de calcul.....	34
Chapitre 5 – Contrôle des appareils d'appui à pot	45
Annexe 1 – Aide à la rédaction des CCTP	49
Annexe 2 – Fiches récapitulatives des caractéristiques des appareils d'appui à pot	53
Bibliographie	61

Chapitre 1

Introduction

1.1 - Généralités, objet et contenu du présent guide

Les appareils d'appui à pot d'élastomère sont des produits qui ont été mis au point vers 1960 sur la base d'un système imaginé, notamment, par Andra, Beyer et Wintergerst. Les premières applications en France remontent à 1967 et le BT4¹ en avait fait une courte présentation dans son édition de 1974, en indiquant les principales caractéristiques de ces appareils d'appui utilisés à l'époque dans le but de délimiter un possible domaine d'emploi de ces produits.

Depuis, si les utilisations se sont développées, elles l'ont été sans véritables bases techniques autres que celles des documentations des fabricants et en fonction des informations qu'ils mettaient à la disposition des projeteurs. Ceci a conduit, dans le cadre de la concurrence entre les fabricants, à une certaine surenchère en matière de performance(s) possible(s).

C'est dans un but de clarification que la norme T 47-816 avait été rédigée. Depuis, les parties 1 (qui indique les principes généraux), 2 et 5 de la norme NF EN 1337², spécifiques de ces produits, sont maintenant publiées et disponibles.

Dans le prolongement de ces documents normatifs, il a paru nécessaire de prévoir un guide d'utilisation permettant de bien replacer l'appareil d'appui à pot dans son domaine d'utilisation pour les ponts en montrant les interactions entre appareils d'appui à pot, d'un appui à un autre.

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 a conduit, 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.

L'objet du présent guide est de constituer un complément explicitant les textes normatifs en vigueur au moment de la rédaction. 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 document comprend les éléments suivants :

- une description sommaire de ce type de produit et des équipements particuliers qui lui sont liés ;
- les principaux textes réglementaires de base ;
- les critères de dimensionnement que l'on trouve dans les normes préparées par le CEN ;
- une méthodologie de calcul non pas du produit lui-même mais de son utilisation dans un projet de pont avec un exemple pratique basé sur un cas réel ;
- les normes NF EN ont prévu une procédure de certification sous forme de la marque CE dont les modalités d'application sont en cours de mise en place ; dans ce nouveau contexte, nous essayerons de donner des éléments d'appréciation sur le choix entre les divers produits et les points à vérifier lors d'une réception sur chantier ;
- enfin, il a été mis au point un programme pour la vérification de ce type d'appareil d'appui. Il fait l'objet d'une présentation.

¹ Ce bulletin technique n°4 était un guide qui traitait des appareils d'appui en élastomère fretté. Cette publication n'est plus disponible.

² Cf. références en bibliographie.

1.2 - Domaine d'emploi

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 commune.

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 (calculé 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 de manière significative l'épaisseur d'élastomère, ce qui pose d'autres problèmes. Dans ce cas de figure, signalons que l'emploi des appareils d'appui sphériques (cf. NF EN 1337-7) peut apporter une réponse technique appropriée. 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.

1.3 - Application de la norme NF EN 1337-5 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 sur l'Application Nationale de la norme NF EN 1337 publiée par le Sétra³ (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.

Nota : le présent guide s'applique aux ouvrages routiers. Pour une utilisation spécifique sous pont rail, il est conseillé de prendre l'attache des services compétents.

³ Cf. référence en bibliographie.

Chapitre 2

Composition d'un appareil d'appui à pot

2.1 - Principes généraux

Dès leurs premiers usages, les appareils d'appui à pot ont été très largement employés et ils constituent le type d'appareil d'appui le plus utilisé après les appareils d'appui en élastomère fretté. Cette place importante est due à leur principe qui permet une forte descente de charge pour un encombrement réduit, notamment en épaisseur. Un autre avantage est leur simplicité de conception qui permet de rationaliser la fabrication.

Le principe d'un appareil d'appui à pot est d'avoir un coussin cylindrique d'élastomère⁴ enfermé dans un pot et qui reçoit la charge par l'intermédiaire d'un piston formant couvercle du pot. L'élastomère ne peut se déformer qu'à volume constant ce qui lui permet de transmettre des charges élevées et d'autoriser les rotations imposées par la structure.

Ainsi, un appareil d'appui à pot est constitué de trois parties principales dont chacune peut comporter des équipements particuliers. Ces trois parties, qui donnent les trois degrés de liberté en rotation, sont éventuellement complétées par une quatrième dont le but est d'assurer un ou deux degrés de liberté supplémentaires en déplacement. Bien que de conception adaptée au contexte des appareils d'appui à pot, le principe de cette quatrième partie se retrouve dans d'autres types d'appareils d'appui.

2.2 - Les différents éléments constitutifs

Un appareil d'appui à pot comprend (figures 2.1 & 2.2) :

2.2.1 - Une partie inférieure formant le pot

Selon les fabricants, il existe différents modes d'élaboration de ces pots (parfois appelés aussi "virole") ce qui peut influencer sur la capacité et la durabilité du produit, ceux-ci sont présentés à la figure 5 de la norme NF EN 1337-5. Parmi ces modes de fabrication, la meilleure solution (et pratiquement la seule utilisée dans les cas courants) consiste, en partant d'une plaque en acier (laminé pour l'essentiel des fabrications) de l'épaisseur du pot, à usiner celle-ci pour aboutir au pot.

Une autre solution réalise le pot par soudage d'une virole. La tenue de la virole est liée à la qualité de la soudure. La norme (NF EN 1337-5, § 6.2.2 d et e) a prévu une soudure pénétrante, mais elle laisse aussi la possibilité de faire un montage avec une qualité de soudure non pénétrante. Dans ces conditions, comme il ne semble pas que le contrôle systématique de la qualité des soudures soit envisagé dans la norme, ceci nous conduit à déconseiller l'usage d'appareils d'appui avec virole soudée.

Enfin, dans la dernière solution, la virole est boulonnée sur la platine inférieure.

Dans certains cas où la condition de non cheminement ou de non glissement ne serait pas respectée, les platines des pots peuvent être fixées par des vis ou des tiges filetées dans la structure sous-jacente (à l'exclusion de tout autre mode de fixation : pattes soudées noyées dans le béton, par ex.). Dans ce cas, lors d'un changement d'appareil d'appui à pot, l'inconvénient d'une fixation est d'obliger à un soulèvement d'une valeur permettant d'échapper à la fixation solidaire du béton. Pour assurer cette **possibilité de dépose qui doit être systématique**, il importe de respecter la limitation de soulèvement à une valeur de 10 mm fixée par la norme NF EN 1337-1 (§ 7.6).

⁴ Dans le cadre du domaine d'emploi défini au § 1, la norme ne retient qu'un coussin unique.

L'épaisseur minimale fixée par la norme NF EN 1337-5 (§ 6.2.2) pour le fond est de 12 mm. En général, pour les plaques usinées, les fabricants réalisent des épaisseurs d'au moins 20 mm pour se prémunir des déformations engendrées par la libération des contraintes internes enfermées dans la tôle avant usinage.

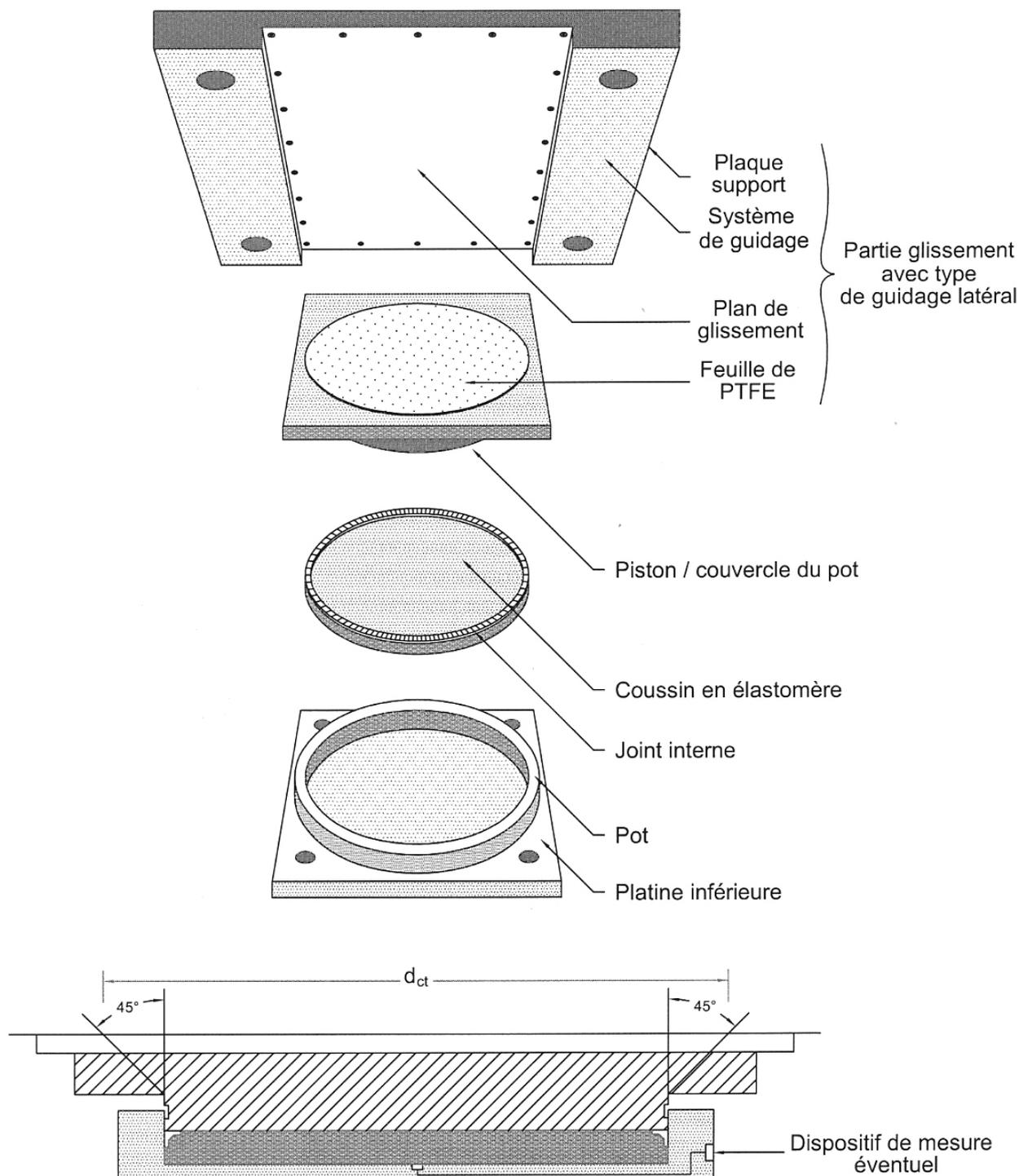


Figure 2.1 : composition schématique d'un appareil d'appui à pot

NB : la coupe montre un appareil d'appui à pot sans sa partie glissement.

Précision : le dispositif de mesure éventuel est situé sous le coussin et la partie droite est la prise de connexion.

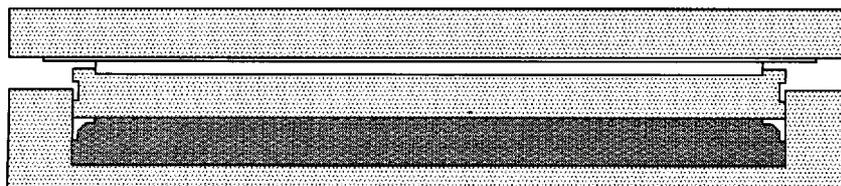
Pour des applications particulières, on peut équiper de systèmes de mesures les pots ou les couvercles afin de suivre la charge appliquée sur l'appareil d'appui ; ceux-ci sont installés au fond du pot, dans un emplacement spécifique, et permettent de suivre l'évolution de la pression subie par le coussin en élastomère.

2.2.2 - Un coussin en élastomère

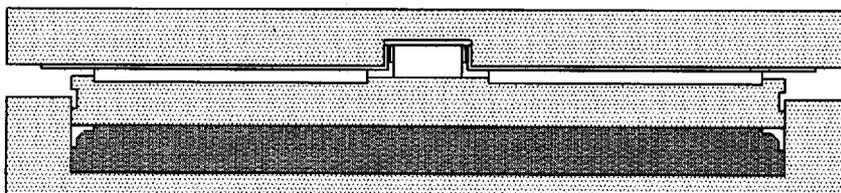
Il est réalisé en élastomère (naturel ou polychloroprène) comme indiqué dans la norme NF EN 1337-5 (§ 5.3). Il est vulcanisé dans des moules aux cotes du produit fini ou découpé (cf. cote d'ajustement dans NF EN 1337-5, § 7.3.2).

Le coussin est mis en place dans le pot qui a reçu un usinage lui donnant une rugosité conforme à celle fixée par la norme NF EN 1337-5 (§ 7.4) ; en complément, on ajoute une graisse. Dans ces conditions, l'élastomère, sous les pressions qu'il subit, a un comportement proche de celui d'un liquide.

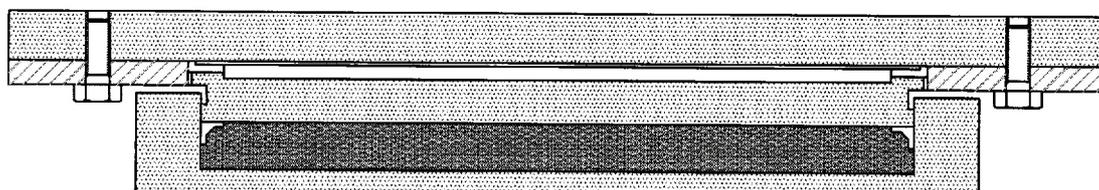
Figure 2.2 : appareils d'appui à pot avec dispositif de glissement



a) appareil d'appui à pot avec plaque de glissement sans guidage (multidirectionnel)



b) appareil d'appui à pot avec plaque de glissement à guidage central (unidirectionnel)



c) appareil d'appui à pot avec plaque de glissement à guidage latéral (unidirectionnel)

2.2.3 - Le piston ou couvercle

Cette partie, en acier, ferme la boîte et confine l'élastomère dans son volume. La forme et les dimensions sont adaptées au pot, elles sont définies dans la norme NF EN 1337-5, article 6.2.3.

Pour éviter l'extrusion de l'élastomère par le jeu dans la zone contact entre le piston et la paroi interne de la virole, on utilise un joint. La technologie et le matériau constitutif de ce joint sont variables d'un fabricant à l'autre. En général le joint est engravé dans le coussin après sa mise en place dans le pot. Il est souvent en laiton.

Le rôle de ce joint est important pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil d'appui à pot, notamment en évitant des extrusions d'élastomère (l'un des rares désordres que l'on peut constater sur ce type d'appareil d'appui).

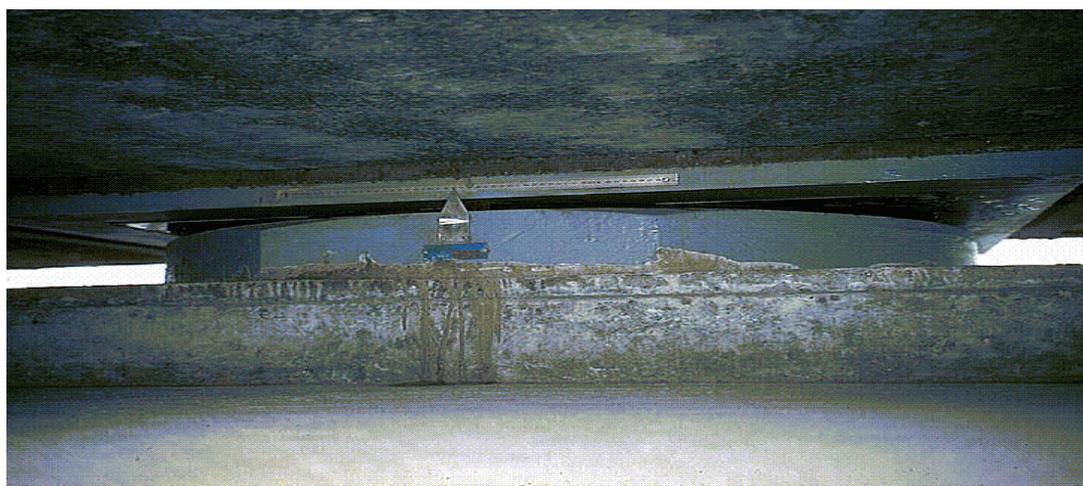
Il est recommandé de prévoir des plots de repères pour aider à la vérification de la rotation du pot.

2.2.4 - Les éléments de glissement

Ils sont constitués par une feuille de PTFE⁵ alvéolée engravée dans le dessus du piston graissée au montage, (§ 5.8) sur laquelle glisse une plaque d'acier inoxydable liée à une platine supérieure en acier. Ces éléments sont définis dans la norme NF EN 1337-2.

Comme pour la platine du pot, les parties supérieures peuvent être fixées 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 réglet de mesure. Il est impératif de prévoir le réglet du côté où se trouvera, fort probablement, le visiteur. D'autre part, il est aussi hautement recommandé de caler les réglets de façon homogène sur un même ouvrage pour faciliter l'exploitation.



Suivi des déplacements par réglet de mesure

Pour assurer la protection du plan de glissement, obligatoire selon NF EN 1337-2, § 7.3, il est recommandé de demander des dispositifs de type "joint racleur".

Si l'on souhaite limiter les déplacements de la structure à une seule direction, on met en place des systèmes de guidage dont il existe deux modes usuels :

- **latéral**, la plaque de glissement comporte deux retombées latérales qui viennent en butée avec le dessus du piston ;
- **central**, une clavette en relief de la partie supérieure du piston vient dans une rainure de la plaque de glissement.

Il est conseillé, bien que non prévu par la norme, d'étancher l'espace entre la plaque en acier inoxydable et son support.

2.2.5 – Une protection contre la corrosion

Toutes les parties métalliques (sauf dans les zones fonctionnelles de contact acier/acier et l'intérieur du pot) reçoivent une protection contre la corrosion conforme aux prescriptions de la norme NF EN 1337-9 éventuellement complétée par des systèmes en conformité avec le Fascicule 56 du CCTG et basée sur l'un des systèmes certifiés ACQPA. En cas d'utilisation de métaux de potentiels électrolytiques différents il est conseillé, pour éviter l'apparition de phénomènes de corrosion galvanique, d'isoler correctement les métaux (cf. NF EN 1337-9, art 4.2).

Nota : en général, la pose de ces appareils d'appui à pot est faite avec le pot en position inférieure, mais la pose avec le piston en position inférieure et le pot au-dessus est envisageable.

⁵ PolyTétraFluorÉthylène ou Téflon[®] ou similaire.

2.3 - Avantages et inconvénients de ce type d'appareil d'appui

2.3.1 - Avantages

Ces appareils d'appui permettent des descentes de charges élevées sous un encombrement limité. Les capacités courantes vont de 5 000 à 30 000 kN, mais d'autres capacités sont possibles.

Ils réalisent, grâce à la pression hydrostatique développée, une répartition presque uniforme des charges sur la structure.

Ils engendrent des forces de rappel élastique beaucoup moins importantes que pour d'autres types d'appareils d'appui.

Ils présentent une sécurité de fonctionnement satisfaisante. Les rares désordres⁶ portés à notre connaissance ont eu pour origine des extrusions d'élastomère du coussin dues à la défektivité du joint d'étanchéité ou parce que l'appareil a subi des rotations plus importantes que celles prévues lors de sa conception. Les autres problèmes sont des conséquences de défauts de pose (erreurs de calage, mauvaise implantation, ...) ou portent sur la tenue du système de glissement : échappement du PTFE, corrosion de la plaque de glissement en acier inoxydable (sic!), peinture de cette plaque de glissement lors des remises en peinture de l'ossature métallique, etc. Ceci n'est malheureusement pas spécifique à ce type d'appareil d'appui.

2.3.2 - Inconvénients

Le principal inconvénient est leur capacité de rotation limitée bien qu'elle réponde aux besoins de la majorité des ouvrages.

Ils nécessitent une mise en œuvre précise et rigoureuse d'un niveau inhabituel dans le domaine de la construction des ponts.

Leur fabrication nécessite des investissements notables en moyens industriels, notamment les robots pour l'usinage des pots et des pistons. Les tolérances de fabrication sont extrêmement faibles et obligent à des contrôles qualité en fabrication d'un niveau élevé.

Ceci explique que leur coût reste relativement élevé en comparaison notamment avec les appareils d'appui en élastomère fretté.

Ils présentent un intérêt technique et économique à partir d'un seuil qui correspond à des descentes de charges relativement élevées et des déplacements importants (sous réserve de l'utilisation de systèmes de glissement appropriés).

2.4 - Cotes géométriques importantes

Il existe quelques cotes importantes qu'il convient de bien relever dans les notices techniques. Ce sont celles données sur la figure 2.3.

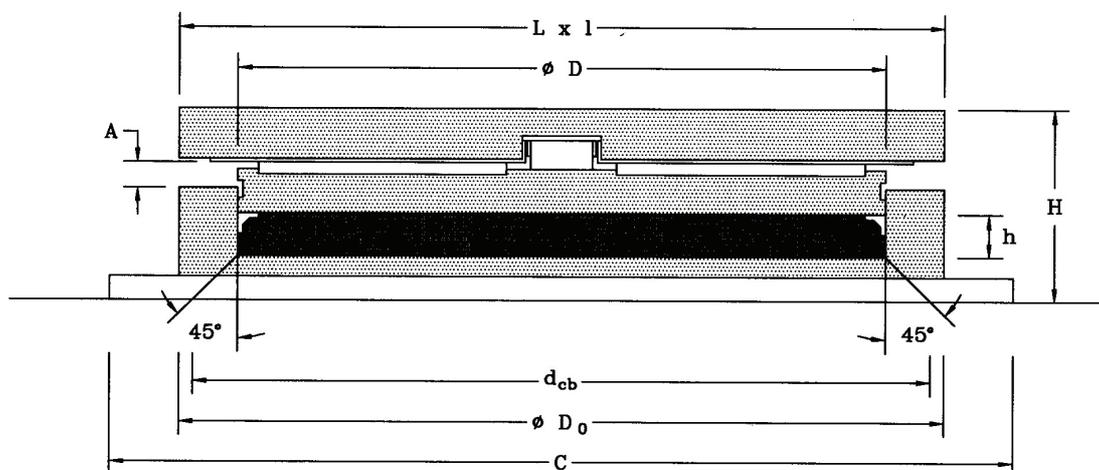


Figure 2.3 : principales cotes géométriques

⁶ Pour plus de détails, cf. le fascicule 13 "appareils d'appui" dont les références sont données en bibliographie.

Chapitre 3

Commentaires sur la norme NF EN 1337- parties 2 & 5

Points essentiels à considérer pour le dimensionnement

3.1 - Présentation

Les normes à considérer sont les normes NF EN 1337-5 pour les appareils d'appui à pot et NF EN 1337-2⁷ pour les parties glissantes, aussi, l'utilisation de ce guide ne peut se faire sans disposer, en parallèle, de la partie 5 et de la partie 2 si l'on traite d'appareil d'appui à pot multi- et/ou uni- directionnel (et la note d'Information technique n° 27).

Leur contenu est considéré par de nombreux experts (dont la France) comme non conforme à l'esprit de la Directive "produits de construction". Celle-ci demande des normes de performance et non des normes décrivant les produits, ce qui est le cas. Elles constituent malgré tout une information de grande valeur et il faut savoir que leur contenu a fait l'objet, depuis plusieurs années, d'un travail important d'harmonisation de la part des experts concernés des pays européens.

Sur l'aspect technique, nous avons pensé intéressant de donner ici quelques commentaires d'autant que les fabricants ont commencé à lancer des gammes de produits en conformité avec ces normes.

L'intérêt des maîtres d'œuvre est de bien connaître ces produits afin de les utiliser correctement et dans leur domaine d'emploi pour lequel ils ont été conçus.

3.2 - Introduction

L'objet principal de ces normes est la fabrication et l'indication des éléments de dimensionnement du produit, aussi, une bonne partie de ces documents n'intéresse pas le projecteur.

Le propos du présent chapitre est volontairement limité au recensement des points les plus importants ou au commentaire de certaines parties de ces documents. En complément, il attire l'attention sur certains choix techniques que le maître d'œuvre doit faire.

3.3 - Appareil d'appui à pot

(NF EN 1337-5)

3.3.1 - Épaisseur des aciers laminés

(NF EN 1337-5 : § 5.2)

La limite d'élasticité des aciers laminés est fonction de l'épaisseur des tôles à la sortie du laminoir : normes NF EN 10025 (A 35.501) pour $E \leq 30$ mm et, pour les épaisseurs supérieures à 30 mm, NF EN 10113 (A 35.505)⁸.

Quand ces tôles sont retaillées, on peut ne pas pouvoir retrouver la limite élastique de l'acier correspondant à l'épaisseur d'origine. Il est donc conseillé au Maître d'Œuvre d'exiger l'indication de l'épaisseur d'origine et de la nuance de l'acier sur le plan d'exécution de l'appareil d'appui à pot (cette information figure dans le CCPU des tôles employées).

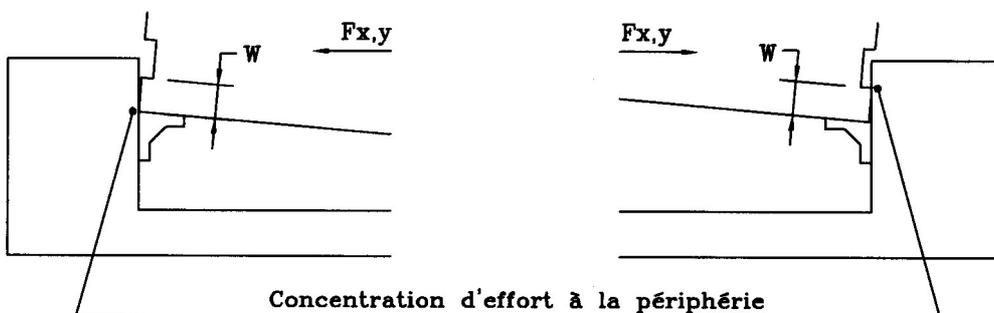
⁷ Il n'y a pas de marquage CE sur les parties glissantes seules. Ce sont les appareils d'appui (à pot ou autre) ayant des parties glissantes qui sont marqués CE.

⁸ Depuis la publication de la partie 5, ces références ont évolué. En effet, la norme NF EN 10025 de mars 2005 remplace la norme NF EN 10113 et prévoit d'autres désignations d'acier.

Les fabricants dimensionnent quelquefois leurs appareils d'appui avec des épaisseurs minimales, puis fabriquent l'appareil avec des épaisseurs supérieures en fonction des tôles disponibles. Dans ce cas, on devra porter son attention sur la compatibilité de l'épaisseur maximale de l'appareil d'appui à pot terminé avec la place prévue entre les dés d'appui.

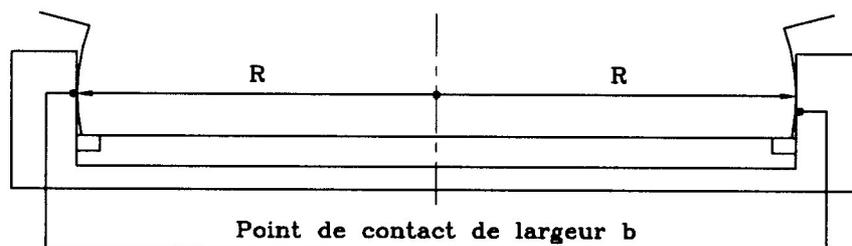
Figure 3.1 : types de contact piston/virole

a) type à face de contact plane

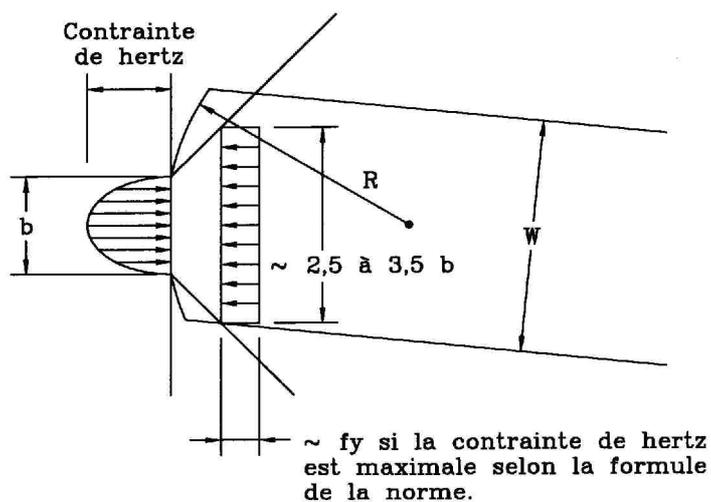


b) type à face de contact courbe

$$R \geq \max [D/2, 100 \text{ mm}]$$



c) point de contact courbe et transit des efforts



3.3.2 - Valeur de la rotation et contact pot/piston

(NF EN 1337-5 : § 6.1.2 & 6.2.3)

Pour connaître le couple de rappel de l'appareil d'appui à pot, il faut dissocier les rotations de longue durée (pendant la construction, y compris la précision de pose, le retrait, le fluage, la température, ...), des rotations instantanées (charges d'exploitation, ...). Ces valeurs sont à renseigner dans le bordereau des données prévu par l'annexe B de la NF EN 1337-1.

Si ces valeurs ne sont pas connues avec précision à la date du pré-dimensionnement de l'appareil d'appui à pot, il sera donc prudent d'indiquer les valeurs par excès.

La forme du contact du piston sur la virole du pot est fonction de la valeur des amplitudes de la rotation ainsi que l'intensité des efforts horizontaux. La norme NF EN 1337-5 prévoit deux types de contact : "à face de contact plane" et "à face de contact courbe" (cf. figure 3.1).

Dans la norme, le type "à face de contact plane" est admis pour une hauteur de contact "w", déterminée par le calcul, strictement inférieure à 15 mm (cf. NF EN 1337-5 § 6.2.3.1 et 6.2.3.2). Pour éviter des concentrations d'efforts, pouvant créer une engravure du piston dans la virole, il est conseillé de réserver cette disposition aux seuls appareils d'appui à pot multi-directionnels.

Le type "à face de contact courbe" est à utiliser avec un rayon "R" conforme à la norme NF EN 1337-5 (§ 6.2.3.3) tel que $R \geq [D/2, 100 \text{ mm}]$. Comme la norme n'évoque pas les conditions de diffusion de la contrainte de Hertz dans le bord du piston en position de rotation maximale, nous conseillons de respecter le principe de diffusion de la figure 3.1c. En général, la hauteur "w" obtenue est plus importante que celle préconisée au § 6.2.4 de la norme.

3.3.3 - Jeu pot/piston

(NF EN 1337-5 : § 7.3.1)

La norme, suivant en cela les pratiques des fabricants, borne le jeu maximum en plan entre la virole et le piston à 1 mm (si le joint est métallique) et à 0,8 mm pour les autres types de joints.

Pour tenir compte de ce jeu, la répartition des contraintes se fait selon le principe du § 6.2.3 de la norme NF EN 1337-5.

Cette approximation n'est pas satisfaisante dans tous les cas (efforts horizontaux importants, par exemple) et il semble souhaitable d'essayer de réduire cet intervalle à 0,5 mm, valeur facilement réalisable par les fabricants. La vérification se fera sur la base des dimensions du piston et de la virole sur les dessins d'exécution.

3.3.4 - Épaisseur du fond du pot

(NF EN 1337-5 : § 6.2.2)

La norme fixe sa valeur minimale à au moins 12 mm. Il doit également résister aux efforts définis au § 6.2.2a de la norme NF EN 1337-5.

L'attention est attirée sur le fait que pour assurer une meilleure diffusion des contraintes dans le bossage (cf. § 3.3.5 ci-après), on peut être amené à majorer cette épaisseur minimale.

Rappel : la tôle de fond de pot est obligatoirement plus épaisse pour les appareils d'appui à pot possédant des cellules de mesure de descente de charge ou d'autres dispositifs particuliers.

3.3.5 - Surface effective de contact sur la structure

(NF EN 1337-5 : § 6.1.5 et 6.2.6)

La norme a pris l'option de fixer l'angle de diffusion à 45° par rapport à la verticale dans les composants métalliques de l'appareil d'appui à pot. L'angle de diffusion dans la structure sera celui défini par les règlements pour le matériau au contact de l'appareil d'appui à pot. Un angle plus important (limité cependant à 60°) peut être pris en compte si l'assemblage avec le support est justifié.

La norme propose une surface de contact telle que définie à l'alinéa précédent mais réduite. Cette surface (inférieure et supérieure) résulte des moments créés par le couple de rappel du coussin d'élastomère et le couple résultant des efforts horizontaux au niveau du contact piston/virole et/ou celui au niveau du système de guidage. Pour ce calcul de surface réduite, il paraît logique d'utiliser les mêmes méthodes que pour les plaques de glissement (cf. § 4.2.2.1 du présent guide). En absence de logiciel spécifique, on conseille d'utiliser les formules proposées à l'annexe A de la norme NF EN 1337-2.

C'est cette surface réduite qui est à prendre en compte pour appliquer l'article 6.7 de l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1) pour la justification du béton adjacent. Le centre de l'appareil d'appui n'est donc pas le centre de la pression supposée répartie ; cet écart peut être significatif sur un appareil d'appui à pot fixe, voire même sur un mono-directionnel.

3.3.6 - Épaisseur du coussin d'élastomère

(NF EN 1337-5 : § 6.2.1.2)

La norme fixe l'épaisseur minimale du coussin en fonction de l'amplitude des rotations à reprendre dans l'appareil d'appui à pot. Or, à une géométrie donnée du coussin est liée une valeur de couple de rappel (NF EN 1337-5 : § 6.1.3). La détermination de la valeur de ce couple résulte d'essais ; mais ceux-ci ne sont faits que sur certains types d'appareils d'appui à pot (diamètre d'élastomère compris entre 500 et 600 mm : NF EN 1337-5, § D2) et il ne semble pas possible d'extrapoler les résultats obtenus sur quelques appareils d'appui à pot à toute la gamme intermédiaire ou au-delà.

Dans certains cas particuliers, il faudra être vigilant sur les valeurs des couples de rappel fournis par les fabricants.

Bien que non évoqué dans la norme, pour certain type de joint de piston, il paraît important de garder en toute circonstance l'intégralité de la surface de contact entre le coussin et le piston. En effet, une perte de contact partielle peut altérer le fonctionnement du joint de piston. Cette vérification peut être évitée dans les cas courants, quand le contact est assuré à des pressions moyennes supérieures ou égales à 10 MPa pour les appareils d'appui unidirectionnels et fixes, fortement sollicités horizontalement et environ 5 MPa pour les multidirectionnels. Il conviendra cependant d'être vigilant pour la vérification concernant les appareils d'appui sur culée soumis à des réactions hyperstatiques et de tenir compte de l'incertitude sur la valeur du couple de rappel en rotation.

3.3.7 - Tassement

(NF EN 1337-5 : Annexe B)

Il est rappelé que l'ordre de grandeur du tassement différentiel entre les appareils d'appui à pot peut dépasser 1 mm et que ceci est à prendre en considération pour le calcul de la structure.

3.4 - Élément de glissement

(NF EN 1337-2)

3.4.1 - Choix de la position des guidages : central ou latéral

Il n'y a pas d'éléments prépondérants en faveur d'une disposition par rapport à une autre. A priori, il est fortement déconseillé d'avoir les plaques horizontales de PTFE au contact de la clavette.

3.4.2 - Dimension des plaques de glissement

Il ne faut pas hésiter à sur-dimensionner les longueurs des plaques de glissement. Ceci permettra de tenir compte des préreglages en usine d'une part, des imprécisions résultant du calcul, de la date réelle de pose et de la température à la pose d'autre part. Comme il est indiqué dans la Note d'information technique n°27⁹ sur l'application nationale de la norme NF EN 1337 publiée par le Sétra, le § 5.4 b de la norme NF EN 1337-1 doit être interprété comme suit : "Les déplacements doivent être augmentés dans les deux directions et les deux sens 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". Ces valeurs ne sont pas applicables si l'appareil d'appui est mécaniquement bloqué.

Il est conseillé, en outre, de prévoir une sur-longueur de 10 cm de part et d'autre (cf. § 4.5.4 du présent guide).

3.4.3 - Coefficient de frottement

(NF EN 1337-2 : § 6.7 & tableau 11)

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 ; ce coefficient est à recalculer à l'ELS pour le dimensionnement des appuis.

L'attention est attirée sur la variation notable du coefficient de frottement en fonction de la contrainte de compression sur le PTFE pour les appareils recevant de forte amplitude de variation de charge. Ainsi, en charge minimale à l'ELU ou à l'ELS, le frottement risque d'être fortement majoré.

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 d'appui effective ne descend pas en dessous de -5°C (cf. note d'information technique série ouvrages d'art n° 27 publiée par le Sétra).

Pour les guides, le coefficient de frottement est indépendant de la pression de contact et l'attention est attirée sur l'existence de valeurs très différentes selon les matériaux employés.

3.4.4 - Vérification de la déformation des plaques de glissement et du piston

(NF EN 1337-2 : § 6.9.2)

La vérification est à faire systématiquement.

Nota : l'incidence de ce calcul est particulièrement importante par exemple dans le cas où le diamètre du PTFE est inférieur à celui du coussin ($L < D$).

3.4.5 - Installation

(NF EN 1337-2 : § 9 et NF EN 1337-11)

Pour la pose des appareils d'appui à pot, il est conseillé de se référer à la norme T 47.816-3.

Cependant, pour les appareils d'appui à pot avec guidage, on doit prendre en considération les tolérances sur l'horizontalité de la plaque et sur l'alignement du système de guidage. La tolérance de guidage définie au § 9 de la norme NF EN 1337-2 est de 0,3 % (cf. note d'information technique n° 27).

⁹ Cf. référence en bibliographie.

3.5 - Sécurité au glissement à l'interface appareil d'appui/structure

La norme NF EN 1337-1 (§ 5.2) précise les valeurs de coefficient de frottement à retenir dans les cas courants. Ces valeurs sont modifiées conformément à la note d'information technique n° 27 (et dans les conditions indiquées dans le nota) comme suit :

$$\mu_k/\gamma_\mu = 0,6/1,8 = 0,33 \text{ pour un interface acier-béton,}$$

$$\mu_k/\gamma_\mu = 0,4/3 = 0,13 \text{ pour un interface acier-acier (surfaces préparées).}$$

Ces valeurs ne s'appliquent pas aux ouvrages ferroviaires et aux ouvrages situés en zone sismique pour lesquels il existe des recommandations spécifiques.

Chapitre 4

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

4.1 - Contexte réglementaire

4.1.1 - Généralités

Ce chapitre traite des calculs relatifs aux appareils d'appui à pot d'élastomère, que ce soit vis-à-vis de la justification de l'appareil d'appui à pot ou vis-à-vis de la prise en compte de l'appareil d'appui à pot dans son environnement (influence des appareils d'appui à pot sur les calculs des appuis, etc.).

Les principales nouveautés apportées par la norme NF EN 1337-5 sont les suivantes :

- les efforts appliqués aux appareils d'appui sont calculés à l'ELU ;
- les différences de prise en compte des appuis " souples " et des appuis " rigides " sont plus marquées ;
- les coefficients de frottement pour les appareils sont déduits de sollicitations ELU ;
- pour la répartition des efforts horizontaux avec des forces favorables et défavorables, la précision d'horizontalité est négligée dans le calcul des coefficients de frottement ;
- la règle de résistance à un effort horizontal de 5 % de l'effort vertical maximum est supprimée ;
- les efforts de frottement sur les dispositifs de guidage doivent être pris en compte dans les calculs.

Au-delà des interrogations sur les valeurs numériques à retenir (contraintes limites, rotations limites, coefficients de frottement, ...), il semble que deux points importants paraissent poser tout particulièrement des problèmes aux projeteurs :

- quelles sont les charges verticales à retenir pour le calcul de l'effort horizontal maximal d'un appareil d'appui à pot glissant ?
- comment calculer les efforts horizontaux pour les appareils à pot des appuis fixes ?

Dans les normes NF EN 1337-2 et 1337-5, le calcul des appareils d'appui se fait uniquement à l'État 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 ;
- dans quelques cas particuliers, par exemple pour un fléau reposant en construction sur ses appareils d'appui définitifs.

Pour les calculs qui vont suivre, les combinaisons fournies par les textes suivants ont été utilisées :

- Annexe A de la norme NF EN 1993-2 : cette annexe fournit les règles de calcul pour les appareils d'appui des ouvrages métalliques. Elle peut toutefois être appliquée à tous les types de ponts, car elle doit être transférée dans la norme NF EN 1990. Cette annexe indique, notamment, comment prendre en compte les incertitudes sur la température de pose des appareils d'appui et comment les intégrer dans la variation de température de calcul T_d :
 - NF EN 1991-1-5 et son annexe nationale : 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 la norme NF EN 1990 : cette annexe définit les combinaisons à utiliser en particulier pour le calcul des appuis et des appareils d'appui.

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

		N°	
$1,35 G_{k,sup} + G_{k,inf} + P + S + C$	}	$+ 1,35 \{UDL_k + TS_k + q_{fk,comb}\} + 1,5 \min\{F_{Wk}^* ; 0,6 F_{Wk}\}$	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

(1) Incluant le freinage

Tableau 4.1 : liste des principales combinaisons fondamentales

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 :

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

L'effort de freinage varie de 340 à 400 kN environ pour des ouvrages modestes de 10 à 50 m de longueur et atteint la valeur maximum de 900 kN pour un ouvrage de 305 m de longueur entre joints de chaussée. Cette valeur est nettement supérieure à celle habituellement utilisée dans les anciens règlements (300 kN pour le freinage du camion Bc par exemple). Pour les ouvrages sur appareils d'appui en 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 :

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 Sud-ouest	-15 °C	-15 °C	-25 °C			
Est - Alpes	-20 °C	-20 °C	-30 °C			

Tableau 4.2

Les effets de la température sont définis dans la section 4 de l'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 nationale de NF EN 1991-1-5. Dans l'attente, on pourra utiliser les valeurs données dans le tableau 4.2.

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 $\pm 10^\circ\text{C}$ 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 $\pm 20^\circ\text{C}$, ou de $\pm 10^\circ\text{C}$ si la température de pose est spécifiée. L'annexe nationale pourra moduler ces valeurs.

Les coefficients de dilatation prévus 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.

4.1.2 – Aspects réglementaires et clauses de CCTP

La norme NF EN 1337-1 impose à l'entrepreneur de fournir un bordereau de données des efforts appliqués aux appareils d'appui (Tableau B1 ou B2) en plus de la note de calcul de ces appareils.

La note de calculs de l'entreprise doit comprendre les vérifications exigées dans les articles 6 des normes NF EN 1337-5 et 1337-2, y compris la vérification du paragraphe 6.9.2 qui est souvent oubliée.

Il est conseillé d'intégrer le texte suivant dans le paragraphe "justification des appareils d'appui" du chapitre II "Préparation, Organisation du chantier" du CCTP.

Les justifications des appareils d'appui à pot d'élastomère, des appuis et des fondations seront menées selon les règles du chapitre IV "Principes de calcul d'un ouvrage comportant des appareils d'appui à pot d'élastomère" du document "Les appareils d'appui à pot d'élastomère - Guide pour l'utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires" du Sétra (*cf.* bibliographie).

De plus, pour faciliter les contrôles de la note de calculs de l'entreprise, il est fortement conseillé d'exiger dans le CCTP la fourniture des fiches récapitulatives des caractéristiques des appareils d'appui (*cf.* annexe 2 du présent guide).

4.2 - Efforts verticaux extrêmes

4.2.1 - Généralités

L'attention des projeteurs est attirée sur le fait qu'il ne suffit généralement pas, pour obtenir la réaction maximale dans un appareil d'appui, de diviser la réaction maximale totale pour la pile ou la culée considérée par le nombre d'appareils d'appui. Il y a lieu de tenir compte de la rigidité transversale de la structure et de l'excentricité des charges par rapport aux appareils d'appui.

Les justifications de l'élastomère des appareils d'appui à pot et des dispositifs de glissement sont à mener à l'État Limite Ultime (*cf.* NF EN 1337-5, § 6.1 sauf la vérification selon le 6.1.2.3).

Les justifications de la pile (ou de la culée) et des fondations situées sous l'appareil d'appui à pot sont à mener à l'État Limite de Service et à l'État Limite Ultime.

Les conditions ci-dessous, relatives à l'élastomère de tous les appareils d'appui à pot et au PTFE des appareils d'appui à pot glissants, sont à compléter par les vérifications relatives au non-soulèvement de la plaque de glissement d'un appareil d'appui à pot mono ou multi-directionnel.

4.2.2 - Pression dans le PTFE

(pour les appareils d'appui à pot glissants uniquement).

4.2.2.1 - Pression maximale dans le PTFE

La norme NF EN 1337-2 (§ 6.6 et 6.8.3) limite la pression sur le PTFE à $\frac{f_k}{\gamma_m} = \frac{90}{1,40} = 64,3 \text{ MPa}$ à l'ELU. La contrainte sur le PTFE est à calculer sur une surface réduite A_r pour tenir compte de l'excentrement de la charge. On se reportera à l'annexe A de la norme NF EN 1337-2 pour le calcul de A_r .

D'autre part, la valeur de la pression limite doit être minorée de 2 % par degré au-dessus de 30° C, dans le cas où cette température serait dépassée à proximité de l'appareil d'appui.

Par simplification en France métropolitaine, pour une altitude inférieure à 1000 m, la pression f_{PTFE} sera limitée à $0,85 * \frac{f_k}{\gamma_m} = 0,85 * \frac{90}{1,40} \approx 55 \text{ MPa}$ pour les ouvrages en béton ou mixte et à $0,80 * \frac{f_k}{\gamma_m} = 0,80 * \frac{90}{1,40} \approx 51 \text{ MPa}$ pour les ouvrages métalliques (cette distinction entre types d'ouvrages provient d'une sensibilité différente à l'effet de la température).

4.2.2.2 - Pression moyenne dans le PTFE

Si les amplitudes de descente de charge le permettent, il est souhaitable que la pression moyenne à l'ELU soit de l'ordre de 41 - 42 MPa sous l'action de la combinaison de charges permanentes maximales pour minimiser les effets des frottements (cf. § 4.3.2 ci-après).

Cette valeur pourra servir de repère au stade du pré-dimensionnement.

4.2.3 - Pression moyenne dans l'élastomère

La norme NF EN 1337-5, § 6.2.2.1, limite la pression moyenne sur l'élastomère à $f_{e,d} \leq \frac{f_u}{\gamma_M} = \frac{60}{1,30} \approx 46 \text{ MPa}$ à l'ELU.

$$f_{e,d} \leq \frac{f_u}{\gamma_M} \text{ à l'ELU}$$

4.2.4 - Incidence sur la structure

Les contraintes sous les appareils d'appui à pot sont généralement élevées. Le § 3.3.5 du présent guide traite de la justification du béton sous l'appareil d'appui à pot.

4.3 - Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot glissants

4.3.1 - Généralités

Plusieurs types de fonctionnement des appareils d'appui à pot glissants sont envisageables :

- pour un appui souple, lorsque le tablier se déplace sous l'effet d'une variation de sa longueur, un effort horizontal se mobilise progressivement dans l'appareil d'appui à pot jusqu'à une certaine valeur H appelée seuil de glissement. Lorsque cette valeur est atteinte, un glissement se produit libérant une partie de l'effort H. Un nouvel état d'équilibre est atteint correspondant à une nouvelle valeur de l'effort horizontal H' inférieure à H ;
- pour un appui "infiniment rigide" (culée par exemple), tout déplacement du tablier dû à une variation de sa longueur, provoque une mobilisation instantanée de l'effort horizontal H (seuil de glissement) dans l'appareil d'appui à pot ;
- pour un appui très souple (pile de grande hauteur par exemple, cf. § 4.6.2), le seuil de glissement peut ne jamais être atteint. L'effort horizontal maximal mobilisable H_1 est alors inférieur à H (seuil de glissement).

L'effort horizontal H mobilisable par un appareil d'appui à pot glissant, juste avant de glisser, est obtenu à partir de l'effort vertical V concomitant par la relation :

$$H = (\mu_{\max} + PP + PL) \times V$$

où :

- μ_{\max} est le coefficient de frottement maximum de l'appareil d'appui à pot pour la charge verticale V (le paragraphe 4.3.3 définit la charge verticale V à retenir pour obtenir H maximal) ;
- PP est la précision de pose normalisée de l'appareil d'appui à pot qui correspond à un éventuel défaut d'horizontalité de 0,003 rd (PP positif dans la formule ci-dessus) ;
- PL comprend la pente éventuelle donnée volontairement au plan de glissement (cas par exemple d'une culée en pente où la dénivellation du joint de chaussée en positions extrêmes est ainsi minimisée) et celle résultant du cas de charge considéré (valeur en général négligeable sauf structure très souple ou dont la cinématique de construction est complexe vis à vis du transfert sur appareils d'appui définitifs) ainsi que les défauts de pose supérieurs à 0,003 rd (structure préfabriquée, erreur de calage ...).

4.3.2 - Valeurs numériques de calcul

4.3.2.1 - Coefficients de frottement pour un appareil d'appui à pot

Le coefficient de frottement du dispositif de glissement d'un appareil d'appui à pot glissant dépend de plusieurs paramètres :

- la pression de contact (et donc l'effort vertical concomitant) ;
- la nature des matériaux des plans de glissement ;
- l'usure de l'appareil d'appui à pot glissant ;
- la température ;
- l'agressivité de l'environnement.

La norme NF EN 1337-2 (§ 6.7) indique des coefficients de frottement de calcul pour des plaques de PTFE alvéolées lubrifiées à des températures courantes. Ces coefficients sont des valeurs nominales de calcul à utiliser pour les justifications aux États Limites Ultimes (pour les appareils d'appui, les appuis et les fondations) et aux États Limites de Service (pour les appuis et les fondations seulement).

La valeur maximum du coefficient de frottement μ est donnée par la formule : $\mu_{\max} = \frac{1,2 \cdot k}{10 + \sigma_p}$

avec :

$k = 1$ pour l'acier inoxydable ;

$k = 1,5$ pour l'aluminium ;

σ_p : pression de contact sur le PTFE.

On pourra aussi utiliser le tableau 4.3 suivant :

Pression de contact σ_p (MPa)	5	10	20	≥ 30
PTFE alvéolé / acier austénitique ou couche de chrome dur	0,08	0,06	0,04	0,03

Tableau 4.3 : coefficients de frottement de calcul.

Conformément au paragraphe 6.7 de la norme NF EN 1337-2, dans les zones où la température minimale réelle de l'appui ne descend pas en dessous de -5°C , les coefficients de frottement ci-dessus peuvent être multipliés par un facteur 2/3. A priori, cette clause ne concerne pas la France métropolitaine (cf. § 3.4.3).

Dans le cas d'un environnement agressif, en plus des précautions physiques à prendre pour protéger les appareils d'appui à pot, il serait souhaitable de majorer les coefficients de frottement de calcul mais les valeurs de cette majoration restent à définir.

Le coefficient de frottement étant une fonction décroissante de la pression de contact, il faut donc éviter de surdimensionner les dispositifs de glissement des appareils d'appui à pot glissants.

4.3.2.2 - Précision de pose des appareils d'appui à pot

La norme T 47-816-3 définit les tolérances d'horizontalité à la pose qui varient de 0,2 % à 0,3 % selon le type de structure et la méthode de pose. Par homogénéité avec la norme NF EN 1337-5, la valeur de 0,3 % est à prendre en considération.

4.3.2.3 - Coefficients de frottement sur les guides

La norme NF EN 1337-2 (§ 6.7) indique les coefficients de frottement de calcul à retenir pour les guides des appareils d'appui à pot glissants unidirectionnels :

- PTFE non alvéolé : $\mu_{\max} = 0,08$
- matériaux composites : $\mu_{\max} = 0,20$

(Cette dernière valeur est à retenir en l'absence d'essai complémentaire prenant en compte le vieillissement).

Pour la prise en compte des efforts transversaux, cf. le § 4.5.3 de ce guide.

4.3.2.4 - Coefficients simplifiés

Dans les cas courants, au niveau du pré-dimensionnement des appareils d'appui sollicité longitudinalement, notamment pour les ouvrages rectilignes de longueur inférieure à 600 m, par souci de simplification, il est proposé de ne retenir qu'une valeur unique du coefficient de frottement qui couvre les frottements sur la surface de glissement et les frottements sur les dispositifs de guidage :

$\mu_{\max} = 3,5$ % de la descente de charge maximale sur l'appui et

$\mu_{\max} = 4$ % de la descente de charge permanente, cf. 4,5 % à 5 % pour les tabliers légers ayant des prises au vent importantes (présence d'écrans de protection phonique par exemple, ...).

Le CCTP peut proposer d'autres valeurs numériques en fonction des particularités de l'ouvrage (environnement agressif, température basse, etc.).

4.3.3 - Charges à retenir pour le calcul des efforts horizontaux à l'ELU

Les charges d'exploitation verticales à retenir pour calculer l'effort horizontal maximal effectivement mobilisable par un appareil d'appui à pot glissant dépendent en toute rigueur du fonctionnement supposé de l'appareil d'appui à pot dans son contexte (cf. § 4.3.1) et donc des structures étudiées. Dans les cas courants, les seuils de glissement peuvent généralement être atteints et les charges permanentes représentent une part très importante des charges verticales.

Calculer les efforts horizontaux maximaux à partir des charges verticales extrêmes est sécuritaire, mais ne conduit en général qu'à une faible majoration des actions.

Par souci de simplification, il est donc loisible et sécuritaire de déterminer les efforts horizontaux extrêmes à partir des charges verticales maximales.

En fonction des particularités des structures étudiées (piles souples, etc.), le CCTP peut imposer la prise en compte d'autres charges verticales pour la détermination des efforts horizontaux maximaux.

Commentaires :

1 - Pour un appui très rigide (culée, pile très rigide), où tout déplacement du tablier - dû à une variation de sa longueur - suffit à provoquer le glissement de l'appareil d'appui à pot, la charge verticale à retenir est la charge maximale.

2 - Pour un appui de rigidité intermédiaire, le glissement n'est obtenu qu'après une certaine variation de longueur de tablier. Compte tenu :

- de la durée d'obtention de la variation de température provoquant la variation de longueur du tablier nécessaire au glissement ;
- de la durée d'application supposée très courte des charges d'exploitation avec leurs valeurs caractéristiques maximales ;

il apparaît pénalisant de calculer les efforts horizontaux à partir des charges verticales maximales.

En effet, considérons un appui sur le point de glisser à vide (seuil de glissement H). Si l'appui est soumis de plus aux charges d'exploitation avec leurs valeurs caractéristiques maximales, le nouvel effort horizontal H_1 à mobiliser avant glissement (proportionnel à la charge verticale) devient supérieur à H . La durée d'application des charges d'exploitation avec leurs valeurs caractéristiques est en général trop courte pour que la variation de température du tablier nécessaire pour mobiliser ce nouvel effort H_1 ait le temps de se produire. Le glissement aura donc plutôt lieu lorsque les charges d'exploitation vont diminuer.

D'autre part, ne retenir que les charges permanentes serait trop favorable. Il suffit pour s'en convaincre d'imaginer un ouvrage supportant un embouteillage un après-midi ensoleillé.

Dans ce cas, les charges verticales à retenir sont donc intermédiaires entre les charges permanentes et maximales. Le calcul peut donc être conduit avec la combinaison n° 8 du tableau 4.1 du présent guide.

3 - Pour un appui très souple pour lequel le seuil de glissement ne serait jamais atteint, les efforts horizontaux maximaux théoriques ne dépendent plus uniquement des charges verticales et ils doivent être calculés en prenant en compte les rigidités des appuis (cf. § 4.6.2). Dans ce cas un appareil d'appui à pot fixe peut être prévu à la place de l'appareil d'appui à pot glissant.

4.3.4 - Incidence sur la structure

4.3.4.1 - État Limite de Service

La justification en flexion composée des appuis (piles, culées, fondations) supportant les appareils d'appui à pot glissants peut être menée à partir des efforts concomitants suivants :

- des efforts verticaux extrêmes (maximal et minimal) correspondant aux combinaisons rares de l'ELS pour l'appareil d'appui à pot glissant considéré ;
- des efforts horizontaux calculés comme indiqué précédemment (cf. § 4.3.1, 4.3.2 & 4.3.3). Ces efforts proviennent des variations de longueur du tablier, les efforts horizontaux et verticaux étant calculés pour des cas de charge concomitants. Le CCTP peut imposer la prise en compte d'autres charges verticales pour la détermination des efforts horizontaux extrêmes ;
- des efforts induits par les frottements sur le dispositif de guidage éventuel.

Une étude spatiale de l'ouvrage est éventuellement nécessaire pour déterminer l'intensité des efforts de guidage. Dans ce cas, les efforts sont calculés en alternant d'un appui à l'autre un jeu latéral de 2 mm du dispositif de guidage et en simulant un mouvement du tablier en position de températures extrêmes en ayant au préalable imposé une déviation alternée en plan de $\pm 0,003$ rd sur l'orientation théorique des dispositifs de guidage (l'effet de ces 2 imprécisions est cumulé de la manière la plus défavorable).

Nota : pour les ouvrages simples et droits, on pourra se contenter d'évaluer ces efforts pour un appui à la plus grande valeur suivante : 100 KN ou 1 % de la réaction maximale à l'ELU sur l'ensemble de l'appui.

Il est également indispensable d'évaluer les efforts horizontaux dus aux effets du vent. En effet, ceux-ci ne sont pas forcément dimensionnant pour l'appui lui-même, mais ils sont indispensables à la vérification des guides de l'appareil d'appui.

4.3.4.2 - État Limite Ultime

Combinaisons fondamentales

Les sollicitations de calcul à considérer sont rappelées dans le tableau 4.1 du présent guide. Il est à remarquer que la combinaison 7 du tableau 4.1 (cas à prépondérance de vent) peut être dimensionnante et elle est indispensable dans l'étude des dimensionnements de l'épaisseur des viroles de pot et le système de guidage des appareils d'appui glissants.

Les principes de calculs des efforts horizontaux aux ELU sont identiques à ceux du paragraphe précédent.

Dans le cas d'ouvrages à piles hautes et élancées, l'attention du projeteur est attirée sur le fait qu'un calcul au second ordre est souvent nécessaire. En effet, le déplacement de la tête de pile n'est plus négligeable, et l'excentrement de la réaction verticale crée un moment de flexion additionnel dans le fût de la pile. Sur ce type de piles, les rotations induites par leurs déplacements ne sont pas toujours négligeables, dans ce cas il y a lieu de les ajouter aux rotations du tablier. Compte tenu des considérations du commentaire ② du paragraphe 4.3.3, on peut considérer que le seuil de glissement correspondant aux charges quasi permanentes n'est pas dépassé. Les efforts à retenir en tête de pile sont alors les suivants :

- effort horizontal : calculé en ne considérant que les charges quasi permanentes du tablier et les frottements sur les dispositifs de guidage éventuels ;
- effort vertical : calculé selon l'effet le plus défavorable, en prenant en compte ou non les charges d'exploitation.

Combinaisons accidentelles

Les combinaisons accidentelles à prendre en compte sont définies au paragraphe 6.4.3.3 de la norme NF EN 1990.

L'action accidentelle F_A considérée peut être due à une augmentation sensible du coefficient de frottement (échappement de PTFE, encrassement ou peinture de la tôle en acier inoxydable, etc.). Dans ce cas les valeurs numériques de coefficient de frottement définies au § 4.3.2 sont à remplacer par celle du frottement partiel métal/métal qui peut facilement atteindre globalement 10 % (voire même 15 %).

Le CCTP peut proposer d'autres valeurs en fonction des particularités de l'ouvrage.

L'augmentation du coefficient de frottement ne concerne **qu'un seul appareil d'appui à pot à la fois**.

Les autres actions accidentelles ne sont pas considérées ici et seront définies dans des documents spécifiques.

4.3.4.3 - Efforts instantanés et efforts différés

Rappelons que les Eurocodes prescrivent de calculer les effets de la température à l'aide du module instantané du béton.

Pour les appareils d'appui à pot les efforts horizontaux (même ceux dus à des charges permanentes) ne sont pas constants. Ils sont diminués, voire annulés, par les variations de longueur du tablier. Pour les calculs des fondations de ces piles ou culées, il est donc loisible et sécuritaire de considérer la totalité des efforts horizontaux comme instantanés.

Dans des cas particuliers, par exemple lorsque l'ouvrage comporte plusieurs appuis fixes, la distinction entre efforts instantanés et différés pourra être faite pour le calcul de ces appuis.

4.4 - Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot fixes

Par la suite le terme "appareil d'appui à pot fixe" désignera :

- soit un appareil d'appui à pot bloqué en déplacement horizontal dans les deux directions ;
- soit un appareil d'appui à pot glissant unidirectionnel bloqué en déplacement dans la direction considérée.

4.4.1 - Effort horizontal dû à une variation de longueur du tablier

4.4.1.1 - Généralités

Dans le cas d'une structure supportée à la fois par des appareils d'appui à pot fixes et par des appareils d'appui à pot glissants, l'effort horizontal repris par les appareils d'appui à pot fixes est obtenu en considérant l'équilibre longitudinal et transversal de la structure.

Des coefficients de frottement distincts sont affectés aux différents appareils d'appui à pot glissants selon qu'ils interviennent de façon favorable ou défavorable dans l'équilibre général de la structure vis-à-vis de l'effet étudié.

Ces autres coefficients de calculs traduisent les phénomènes suivants :

- les coefficients de frottement des matériaux varient effectivement d'un appareil d'appui à pot à un autre ;
- les efforts horizontaux ne sont pas forcément totalement mobilisés pour tous les appareils d'appui à pot ;
- la précision de pose des appareils d'appui à pot (défaut d'horizontalité) qui peut jouer un rôle favorable ou défavorable.

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

- pour un appui très rigide, comme une culée, un déplacement du tablier mobilise instantanément l'effort horizontal à sa valeur de seuil H ;
- 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 ;
- 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 fixe.

4.4.1.2 - Coefficients de frottement pour un appareil d'appui glissant isolé

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

$$H = (\mu_{\max} + PP + PL) \times V \quad \text{où :}$$

- V est la charge verticale appliquée à l'appareil d'appui ;
- μ_{\max} est le coefficient de frottement maximal de l'appareil d'appui (qui dépend de la charge verticale V : cf. le paragraphe 4.3.2.1) ;
- 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.

La précision de pose de l'appareil d'appui est de 0,3 % pour les tabliers en béton coulés en place et, pour les tabliers en béton préfabriqué, par dérogation à l'article 9 de la norme NF EN 1337-5, elle est de 1,0 % , valeur plus réaliste.

4.4.1.3 - Coefficients de frottement pour un ensemble d'appareils d'appui à pot glissants

Pour un calcul de répartition des efforts horizontaux, les coefficients de frottement à retenir pour les appareils glissants sont les suivants (NF EN 1337-1, § 6.2) :

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

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

avec :

- μ_{\max} coefficient de frottement maximal pour un appareil d'appui glissant considéré individuellement (cf. paragraphe précédent) ;
- 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 longitudinal de la structure selon le tableau ci-après :

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

Tableau 4.4

Ici, la précision de pose PP est négligée, car elle est déjà prise en compte par la pondération des coefficients de frottement μ_a et μ_r . On a donc, avec les notations du paragraphe précédent :

$$H = (\mu + PL) \times V \quad \text{avec } \mu = \mu_a \text{ ou } \mu_r$$

Exemple : pont à 4 travées avec deux appareils d'appui fixes sur la pile centrale et des appareils d'appui glissants sur les autres appuis :

$$n = 8 \quad \text{d'où } \alpha = 2/3$$

$$\mu_a = 0,5 \mu_{\max} \times 5/3 = 5/6 \times \mu_{\max}$$

$$\mu_r = 0,5 \mu_{\max} \times 1/3 = 1/6 \times \mu_{\max}$$

4.4.2 - 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 à pot fixes. Cette hypothèse est pessimiste car les appareils d'appui glissants participent effectivement à la reprise de ces efforts, mais dans une proportion non quantifiable.

4.4.3 - Effort horizontal de calcul maximal

4.4.3.1 - Charges à retenir pour le calcul des efforts horizontaux dus à une variation de longueur du tablier

Les efforts appliqués aux appuis fixes dépendent des efforts repris par les autres appareils d'appui du tablier qui sont glissants pour la plupart d'entre eux. Il faut donc évaluer les efforts sur l'ensemble des appuis pour connaître l'effort appliqué à l'appui fixe.

Pour les appareils d'appui glissants, les efforts horizontaux proviennent du frottement sur le plan de glissement qui dépend de la réaction verticale. Par souci de simplification, on pourra retenir les charges verticales permanentes maximum ($1,35 G_{\max}$) sur l'ensemble des appareils d'appui glissants pour calculer l'effort appliqué à l'appui fixe.

Pour les appareils d'appui glissants mono directionnels, les frottements sur les guides seront évalués comme indiqué au § 4.3.4.1. Les coefficients de frottement μ_{\max} de ces guides seront pondérés comme les coefficients de frottement pour les charges verticales (*cf.* § 4.4.1.3), « n » représentant le nombre d'appareils d'appui glissants mono-directionnels.

4.4.3.2 - Cumul des efforts horizontaux

Bien qu'ils ne correspondent pas toujours à des cas de charge concomitants, il est loisible de cumuler les efforts résultants des actions suivantes :

- variation de longueur de tablier (y compris efforts de frottements sur les guides) ;
- efforts dus au freinage ou efforts dus au vent.

Les combinaisons principales à former sont les combinaisons 4, 5 et 7 du tableau 4.1. Pour les ponts courbes, il faudra aussi prendre en compte la force centrifuge dans les combinaisons.

4.4.4 - Incidence sur la structure

Contrairement aux justifications des appareils d'appui eux-mêmes, deux calculs sont nécessaires pour les piles et culées : un calcul aux ELS et un calcul aux ELU. Il est donc indispensable de déterminer les efforts horizontaux sous ces deux états limites avec des coefficients de frottements qui peuvent être différents.

4.4.4.1 - État Limite de Service

La justification en flexion composée des appuis (piles, culées, fondations) supportant les appareils d'appui à pot fixes peut être menée de façon simplifiée à partir d'efforts non concomitants :

- efforts verticaux extrêmes (maximal et minimal) correspondant aux combinaisons rares de l'ELS pour l'appareil d'appui à pot fixe considéré ;
- efforts horizontaux calculés comme indiqué précédemment (*cf.* § 4.4.3.2 mais à l'ELS donc sans pondération par 1,35).

4.4.4.2 - État Limite Ultime

Combinaisons fondamentales

Les sollicitations de calcul à considérer sont rappelées dans le tableau 4.1 du présent guide.

Les valeurs numériques des coefficients de frottement à prendre en compte sont définies aux paragraphes 4.4.1.2 et 4.4.1.3.

Comme pour les calculs à l'ELS, la justification en flexion composée des appuis (piles, culées, fondations) supportant les appareils d'appui à pot fixes peut être menée de façon simplifiée à partir d'efforts non concomitants :

- efforts verticaux extrêmes (maximal et minimal) correspondant aux combinaisons fondamentales de l'ELU pour l'appareil d'appui à pot fixe considéré ;
- efforts horizontaux calculés comme indiqué précédemment. Là encore, ces efforts proviennent :
 - des variations de longueur du tablier (cf. § 4.4.1) en considérant les charges verticales permanentes maximales ($1,35 G_{\max}$) sur les appareils d'appui à pot glissants ;
 - du freinage (cf. § 4.4.2) ou du vent.

Le CCTP peut imposer un calcul non simplifié, les efforts horizontaux étant calculés pour d'autres cas de charges, concomitants ou non.

Combinaisons accidentelles

Les sollicitations de calcul sont données à l'article 6.4.3.3 de la norme NF EN 1990.

En général, les dispositifs de guidage et de fixation de l'appareil d'appui à pot ne sont pas dimensionnés pour résister aux actions accidentelles. Par contre les appuis doivent être munis de butées indépendantes empêchant de trop grands mouvements relatifs du tablier par rapport à la pile ou à la culée. Ces butées sont obligatoires en zones sismiques et fortement conseillées pour les chocs de bateaux importants. Pour les chocs de véhicules, il est souvent possible de vérifier que l'appareil d'appui résiste, ou que la stabilité du tablier est assurée en cas de destruction d'une partie de l'appui.

En sus des éventuelles combinaisons accidentelles du projet, il pourra être proposé (cas des appuis sensibles à l'effet des efforts horizontaux) une vérification en combinaison accidentelle simulant une défaillance d'un appareil d'appui en considérant une anomalie sur la valeur du coefficient de frottement : par exemple, $\mu_{\max} = 10\%$ ou 15% pour l'un des appareils (et un seul).

Cette défaillance peut, par exemple, survenir en cas d'usure prématurée du PTFE, d'encrassement ou de mise en peinture malencontreuse des organes de glissement.

4.4.5 - Vérification de l'effort horizontal maximal repris par un appareil d'appui à pot fixe

Pour les appareils d'appui à pot fixes (ou unidirectionnels bloqués dans la direction du déplacement), l'effort horizontal admissible garanti par le fournisseur doit être au moins égal aux sollicitations horizontales de calcul. Dans ce calcul, l'effort horizontal pour l'appareil d'appui sera majoré pour tenir compte de la répartition non uniforme entre appuis d'une même ligne.

Comme indiqué au paragraphe 4.4.3.1 du guide, dans les cas complexes, un calcul spatial prenant en compte les jeux et différentes rigidités, doit être fait pour évaluer les efforts sur chaque appareil d'appui bloqué dans une certaine direction.

Pour l'appareil d'appui fixe, outre les efforts horizontaux énumérés ci avant, il y a lieu d'ajouter les efforts transversaux amenés par l'effet de la température sur les autres appareils d'appui de l'appui fixe.

Note importante

Sur une pile remplissant la fonction d'appui fixe, si l'on dispose un appareil d'appui fixe et un ou plusieurs appareils d'appui mono directionnel bloquant les mouvements longitudinaux, l'effort horizontal longitudinal provenant du tablier va se répartir presque intégralement sur l'un de ces appareils d'appui.

En effet, le jeu (pot/piston et/ou entre les éléments de glissement) des tolérances de fabrication ne permet pas la concomitance des contacts sur tous les appareils d'appui de la ligne d'appui concernée.

Dans l'idéal, un seul appareil d'appui fixe est donc nécessaire, cependant, dans certains cas (par exemple pile souple en torsion) et pour assurer une meilleure distribution des efforts horizontaux sur l'appui fixe, on disposera au maximum deux appareils d'appui fixes.

En outre, avec deux appareils d'appui fixes sur une même pile, il faut considérer que la répartition des efforts entre les deux appareils d'appui est inégale, même si la pile est très souple.

4.5 - Autres recommandations

4.5.1 - Justification des éléments métalliques de l'appareil d'appui à pot

La justification des éléments métalliques des appareils d'appui à pot doit être conduite selon les prescriptions des normes NF EN 1337-2 et 1337-5. En l'absence de spécifications sur certains points, on appliquera les parties concernées de l'Eurocode 3 (NF EN 1993).

4.5.2 - Rotations

La norme NF EN 1337-5 limite les rotations à 0,03 rd à l'état limite ultime. Rappelons qu'une épaisseur de coussin d'élastomère classique égale à $1/15^{\text{ème}}$ du diamètre du pot permet d'absorber des rotations maxima de 0,02 rd, ce qui correspond aux valeurs atteintes pour les ponts courants. Au-delà de 0,02 rd, il convient d'augmenter l'épaisseur du coussin selon les prescriptions de l'article 6.2.1.2 de la norme NF EN 1337-5.

4.5.3 - Efforts horizontaux transversaux

Des efforts se produisent sur les guides longitudinaux :

- sous l'effet d'efforts transversaux (vent principalement) ;
- pour des ouvrages courbes (*cf.* § 4.5.6) ;
- par les jeux et tolérances d'orientation du dispositif de guidage ;
- ou à la suite d'une erreur dans l'orientation de l'axe de glissement à la pose (*cf.* NF EN 1337-2, § 9).

Du fait des frottements, ces efforts transversaux engendrent des efforts longitudinaux qui se cumulent à ceux déterminés aux paragraphes 4.3 et 4.4. Les valeurs du coefficient de frottement à prendre en compte pour les guides sont données dans ces paragraphes. Il est envisageable de pondérer les coefficients de frottement selon la méthode exposée au paragraphe 4.4.1.3.

4.5.4 - Dimensions des plaques de glissement

Les longueurs des plaques de glissement sont calculées en prenant en compte :

- la température ;
- le retrait (ouvrages en béton ou ouvrages mixtes acier/béton) ;
- le fluage (ouvrages en béton précontraint).

L'action de la température est définie dans la section 4 de la norme NF EN 1991-1-5 et dans son annexe nationale.

Un calcul en fourchette sur les coefficients doit être mené pour la détermination du point fixe (*cf.* la démarche de calcul développée dans l'exemple du § 4.6.2 ci-après).

Il faut ajouter des sur-longueurs aux valeurs calculées (*cf.* à ce sujet le paragraphe 3.4.2 du présent guide).

4.5.5 - Ouvrages particuliers

Les présentes recommandations doivent être adaptées dans le cas des ouvrages particuliers : ouvrages très larges, biais, courbes, ...

4.5.6 - Détermination des axes de glissement dans le cas des ouvrages courbes

4.5.6.1 – Vis-à-vis des déformations du tablier

Rappel : formules générales de déformation de Navier-Bresse

Connaissant le déplacement (rotation $\vec{\omega}_0$ et translation $\vec{\lambda}_0$) de la section Σ_0 d'abscisse curviligne S_0 et de centre de gravité G_0 , le déplacement (rotation $\vec{\omega}_1$ et translation $\vec{\lambda}_1$) de la section Σ_1 d'abscisse curviligne S_1 et de centre de gravité G_1 , est donné par les relations :

$$\vec{\omega}_1 = \vec{\omega}_0 - \int_{S_0}^{S_1} \delta \vec{\Omega} d\sigma$$

$$\vec{\lambda}_1 = \vec{\lambda}_0 - \vec{\omega}_0 \wedge G_0 \vec{G}_1 + \int_{S_0}^{S_1} \left(\delta \vec{\Lambda} + \delta \vec{\Omega} \wedge \Gamma \vec{G}_1 \right) d\sigma + \tau (G_0 \vec{G}_1)$$

avec $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ vecteurs unitaires des axes $\Gamma x'y'z'$ liés à une section Σ d'abscisse curviligne σ
 τ dilatation uniforme due par exemple à l'effet de la température ou du retrait

$$\delta \vec{\Omega} = -\frac{C}{GK} \vec{i} - \frac{M_y}{EI_y} \vec{j} - \frac{M_z}{EI_z} \vec{k} \quad \text{et} \quad \delta \vec{\Lambda} = -\frac{N}{ES} \vec{i} - \frac{T_y}{GS_{1y}} \vec{j} - \frac{T_z}{GS_{1z}} \vec{k}$$

Soit un ouvrage courbe situé dans le plan de normale \vec{k} . Considérons qu'à la section Σ_0 d'abscisse curviligne S_0 se trouve un appui "infiniment" rigide, fixe en translation ($\vec{\lambda}_0 = \vec{0}$) et en rotation autour de l'axe vertical dirigé par \vec{k} ($\vec{\omega}_{0k} = \vec{0}$).

Calculons les déplacements au droit d'un appui situé à la section Σ_1 d'abscisse curviligne S_1 .

Effet de la température et du retrait :

La translation de la section Σ_1 vaut

$$\vec{\lambda}_1 = G_0 \vec{G}_1$$

La rotation autour d'un axe vertical de la section Σ vaut

$$\vec{\omega}_{1k} = 0$$

Effet de la précontrainte (déformations instantanée et de fluage) :

Translation

- Le point Σ_1 est un appui, le déplacement vertical y est donc bloqué. On ne s'intéressera ci-après qu'aux composantes du déplacement de Σ_1 dans le plan de normale \vec{k} (plan de l'ouvrage). Les termes en \vec{k} , en $\vec{i} \wedge \Gamma \vec{G}_1$ et en $\vec{j} \wedge \Gamma \vec{G}_1$ ne seront donc pas considérés ;
- De plus l'appui en Σ_0 est bloqué à la rotation autour de \vec{k} . Donc $-\vec{\omega}_0 \wedge G_0 \vec{G}_1 = 0$
- Les déformations d'effort tranchant sont négligées, d'où $-\frac{T_y}{GS_{1y}} \vec{j} - \frac{T_z}{GS_{1z}} \vec{k} = 0$

La translation de la section Σ_1 vaut alors
$$\vec{\lambda}_1 = \int_{S_0}^{S_1} \left(-\frac{N}{ES} \vec{i} + \left(-\frac{M_z}{EI_z} \vec{k} \wedge \Gamma \vec{G}_1 \right) \right) d\sigma$$

Rotation d'axe vertical

- La rotation de la section Σ_1 vaut
$$\vec{\omega}_1 = \int_{S_0}^{S_1} \left(-\frac{C}{GK} \vec{i} - \frac{M_y}{EI_y} \vec{j} - \frac{M_z}{EI_z} \vec{k} \right) d\sigma$$

On ne s'intéressera ici qu'à la rotation d'axe vertical \vec{k} , d'où
$$\vec{\omega}_{1k} = -\int_{S_0}^{S_1} \frac{M_z}{EI_z} \vec{k} d\sigma$$

Hypothèses simplificatrices

Nous faisons de plus les hypothèses simplificatrices suivantes :

$$N/ES = \text{constante} = \varepsilon \quad \text{et} \quad M_z = 0 \quad (\text{précontrainte centrée})$$

La translation en Σ_1 devient alors $\bar{\lambda}_1 = \varepsilon \cdot \int_{S_0}^{S_1} \bar{i} \cdot d\sigma$ c'est-à-dire $\bar{\lambda}_1 = \varepsilon (G_0 \vec{G}_1)$

La rotation d'axe vertical en Σ_1 devient alors $\bar{\omega}_{1k} = 0$

Conclusion

Moyennant la validité des hypothèses simplificatrices retenues (appui fixe "infiniment" rigide, précontrainte centrée, contrainte due à la précontrainte constante le long de la fibre moyenne, faible courbure), il ressort de ce qui précède que les axes de glissement des appareils d'appui à pot monodirectionnels glissants doivent plutôt être orientés en éventail par rapport à l'appui fixe, vis-à-vis des déformations du tablier.

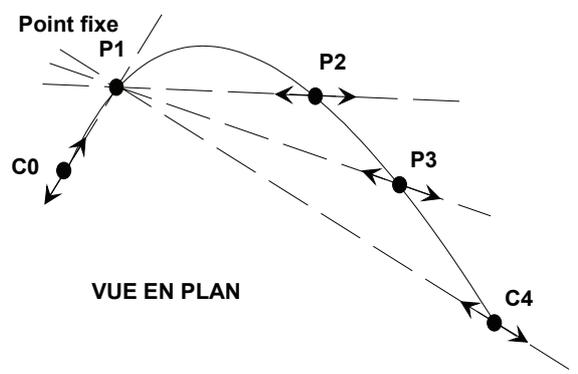


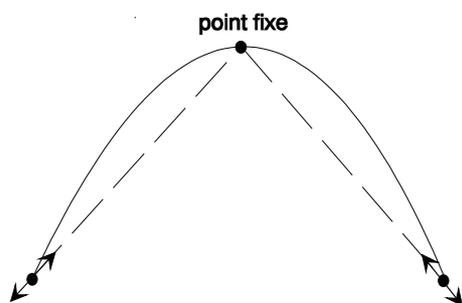
Figure 4.1

4.5.6.2 – Vis-à-vis des équipements

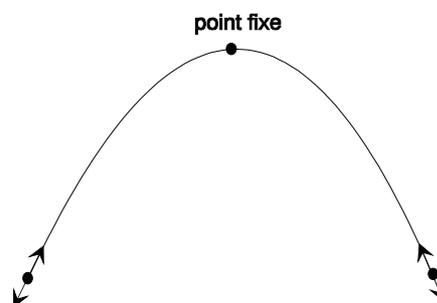
Vis-à-vis des équipements (joints de chaussée, garde-corps, écrans acoustiques, etc.) il est préférable d'orienter les appareils d'appui selon l'axe de l'ouvrage au niveau des culées, ce qui est souvent en contradiction avec la disposition évoquée ci-dessus.

Figures 4.2 : orientations optimales des axes de glissement des appareils d'appui à pot monodirectionnels des culées :

a) vis-à-vis des déformations du tablier



b) vis-à-vis des équipements



4.5.6.3 - Recommandations

Plusieurs paramètres doivent donc être pris en compte pour déterminer l'orientation des axes de glissement.

Vis-à-vis des déformations du tablier, il est préférable d'orienter les axes de glissement par rapport au point fixe. A défaut, la dilatation de l'ouvrage est gênée et des efforts transversaux importants peuvent apparaître dans les dispositifs de guidage si les appuis sont rigides. **Ces frottements supplémentaires doivent être pris en compte pour la détermination des efforts horizontaux longitudinaux.**

Au contraire, vis-à-vis des dispositifs de dilatation des équipements, il est très souhaitable d'orienter les axes de glissement des appareils d'appui à pot des culées selon l'axe de l'ouvrage.

Enfin d'autres paramètres peuvent également intervenir dans le choix de l'orientation des axes de glissement (gradient thermique transversal dépendant de l'orientation de l'ouvrage, fluage différentiel entre deux caissons reliés par le hourdis, etc.)¹⁰.

¹⁰ Pour les ponts rails, bien évidemment, les axes de glissement sont obligatoirement orientés selon l'axe des rails au niveau des culées.

Il n'est pas possible de donner des recommandations générales s'appliquant à tous les ouvrages courbes. Chaque ouvrage doit faire l'objet d'une réflexion particulière prenant en compte les différents aspects évoqués ci-dessus et basée sur un calcul de structure intégrant les rigidités des appuis et les axes de glissement des appareils d'appui à pot.

Finalement, le choix de l'orientation est un compromis entre ces différents aspects souvent antagonistes. Il importe donc **dès le calcul général de structure** de ne pas oublier ou sous-estimer les conséquences sur les équipements des orientations choisies pour les axes de glissement au niveau des culées.

Quelques principes généraux à retenir avec précaution :

- assurer un guidage selon l'axe de l'ouvrage au niveau des culées ;
- afin de ne pas avoir des points durs, éviter de disposer des appareils d'appui à pot glissants mono-directionnels et des appareils d'appui à pot fixes sur les piles très rigides (préférer si possible des appareils d'appui à pot glissants multidirectionnels ou des appareils d'appui en élastomère fretté).

4.5.7 - Appareil d'appui à pot et appareils d'appui en élastomère fretté

Lorsque les dimensions des têtes de pile et des chevêtres de culées le permettent, il peut être intéressant de combiner des appareils d'appui à pot et des appareils d'appui en élastomère fretté sur des lignes d'appui différentes.

Dans ce cas, les appareils d'appui en élastomère fretté sont placés vers le milieu de l'ouvrage sur tous les appuis où ils peuvent encaisser en se déformant les déplacements du tablier. Ils assurent donc deux fonctions :

- la reprise des efforts horizontaux ;
- leur répartition entre tous les appuis équipés d'appareils d'appui en élastomère fretté.

Des appareils d'appui à pot glissants peuvent être placés sur les autres appuis. En effet, du fait des faibles pressions de contact, l'utilisation d'appareils d'appui en élastomère fretté glissants conduit à des coefficients de frottement plus élevés (cf. § 4.3.2).

Le calcul des efforts horizontaux que doivent reprendre les appareils d'appui en élastomère fretté est mené selon les recommandations du guide Sétra "Appareils d'appui en élastomère fretté"¹¹, en prenant en compte les rigidités des fondations et des appuis.

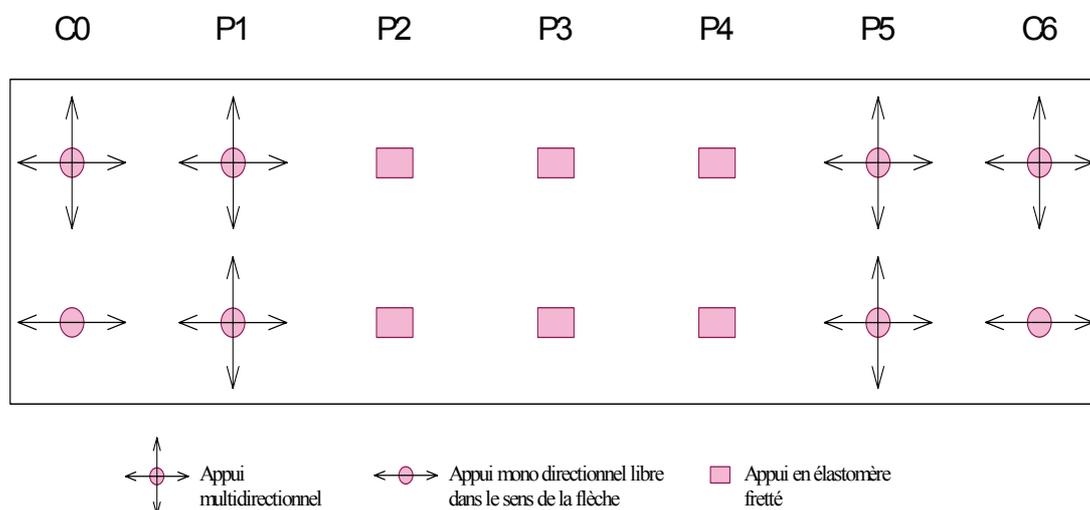


Figure 4.3 : disposition type de répartition des appareils d'appui

La figure 4.3 montre une disposition classique pour un ouvrage à six travées. Dans le cas où les efforts sur les guides des appareils unidirectionnels des culées seraient trop importants, il conviendrait de les remplacer par des appareils multidirectionnels et d'assurer le guidage par un système extérieur.

¹¹ Cf. référence en bibliographie.

4.6 - Exemples de calcul

4.6.1 - Application numérique dans un cas simple¹²

4.6.1.1 - Caractéristiques de l'ouvrage

L'ouvrage est un pont construit par encorbellement successif ; sa longueur totale est de 260 mètres. Il mesure 10,80 mètres de largeur et porte deux voies de circulation et deux trottoirs. Dans ce qui suit, nous proposons une application qui n'est qu'un exemple (qui n'est pas un cas réel et n'a pour seul but que d'illustrer la démarche).

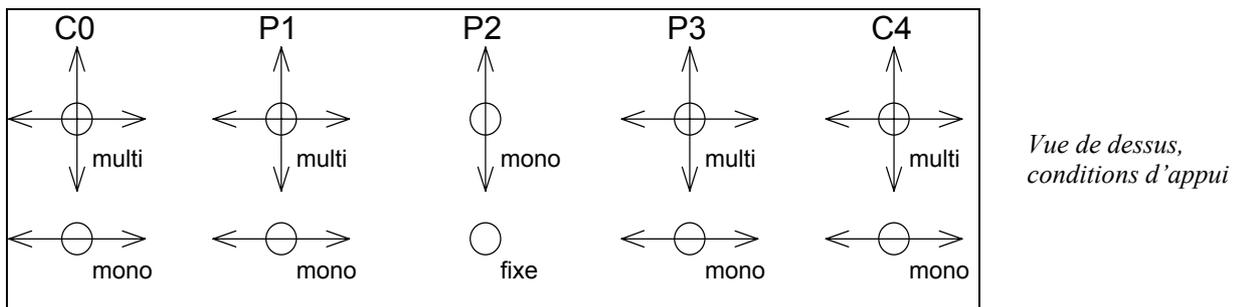
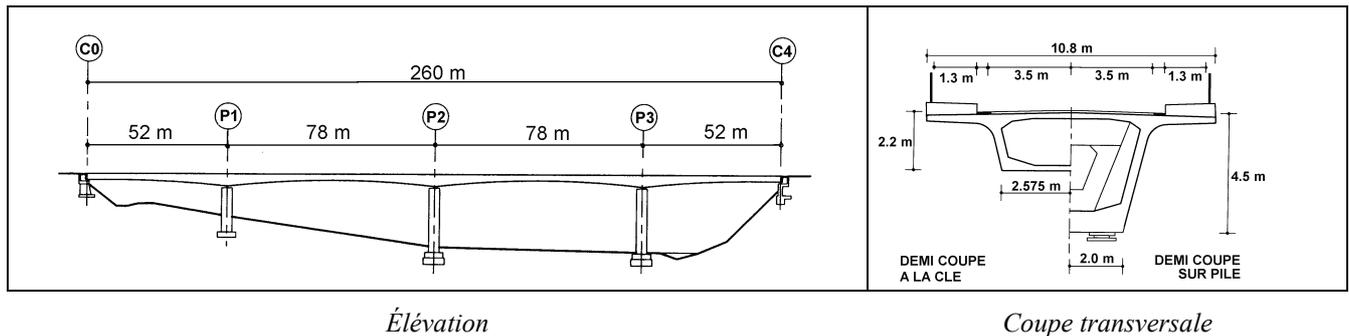


Figure 4.4 : caractéristiques principales de l'ouvrage utilisé dans l'application numérique du § 4.6.1

¹² Dans l'exemple, nous avons pris l'option de noter par H et V les forces horizontales et verticales comme il est d'usage courant en France alors que la norme (partie 3 car cela n'est pas homogène dans toutes les parties) utilise l'abréviation F et N respectivement.

Tableau 4.5

a) Descentes de charges du tablier pour une paire d'appareils d'appui à pot

Descentes des charges en MN (pour une paire d'appareils d'appui à pot)	C0	P1	P2	P3	C4
ELU combinaison permanente minimum	2,87	14,79	15,17	14,79	2,87
ELU combinaison permanente maximum	3,87	19,96	20,48	19,96	3,87
ELU combinaison accidentelle (réactions minimales)	2,30	16,90	17,36	16,90	2,30
ELU combinaison accidentelle (réactions maximales)	3,76	19,75	20,27	19,75	3,76
ELU combinaison fondamentale (réactions minimales)	2,33	14,24	14,75	14,24	2,33
ELU combinaison fondamentale (réactions maximales)	6,11	28,84	29,62	28,84	6,11

b) Descentes de charges du tablier pour un appareil d'appui à pot

Descentes des charges en MN (pour un appareil d'appui à pot)	C0	P1	P2	P3	C4
ELU combinaison permanente minimum	1,45	7,50	7,74	7,50	1,45
ELU combinaison permanente maximum	1,96	10,12	10,45	10,12	1,96
ELU combinaison fondamentale (réactions minimales)	1,12	7,03	7,11	7,03	1,12
ELU combinaison fondamentale (réactions maximales)	3,13	17,78	15,29	17,78	3,13

c) Rotations

Rotations en rd	C0	P1	P2	P3	C4
ELU combinaison fondamentale	0,0009	0,0010	0,0011	0,0010	0,0009

Les coefficients de majoration et de pondération des charges d'exploitation et des charges climatiques sont ceux définis au paragraphe 4.1.1 du présent guide.

L'attention des projeteurs est attirée sur le fait qu'il ne suffit généralement pas pour obtenir la réaction maximale dans un appareil d'appui de diviser par le nombre d'appareils d'appui la réaction maximale totale pour la pile ou la culée considérée. Il y a lieu de tenir compte de l'excentricité des charges par rapport aux appareils d'appui et de la rigidité transversale de la structure.

Par exemple, pour le chargement UDL, c'est la position de la voie la plus chargée (voie 1) qui détermine les réactions maximale et minimale sur un appareil d'appui considéré.

Compte tenu des tableaux précédents, l'ouvrage étant symétrique, on peut évaluer les efforts verticaux à prendre en compte à l'ELU pour un appareil d'appui :

Effort en MN	C0 et C4	P1 et P3	P2
1,35 G max	1,96	10,12	10,43
Effort maximum Fond	3,13	17,78	15,29
Effort minimum Fond	1,1	8,36	8,52

Tableau 4.6

Les combinaisons accidentelles ne sont pas prépondérantes ici (sinon, pour celles ci, on aurait : $\gamma_{M Acc} = 1,00$). On va effectuer les vérifications ou dimensionnements suivants selon les paragraphes 4.2 à 4.5 du présent guide.

4.6.1.2 - Efforts verticaux pour les appareils d'appui à pot

Pression dans le PTFE

La norme limite la pression moyenne sous combinaisons fondamentales à $f_{e,d moy} = 40,00$ MPa. On peut donc en déduire la surface minimum S_p du pot pour chaque appui :

Appui	C0 et C4	P1 et P3	P2
Surface S_p du pot en m ²	0,07825	0,4445	0,38225

Tableau 4.7

Pression dans l'élastomère

La pression moyenne $f_{e,d}$ du coussin est limitée à f_u / γ_M sous combinaisons fondamentales. Soit avec :

$$f_{e,d} \leq \frac{f_u}{\gamma_M}$$

$$f_u = 60,00 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad \gamma_{M \text{ Fond}} = 1,30$$

$$f_{e,d} = 46,15 \text{ MPa}$$

La contrainte limite $f_{e,d}$ donne la surface S_c du coussin pour les différents appuis :

Appui	C0 et C4	P1 et P3	P2
Surface S_c du coussin en m ²	0,06782	0,38523	0,33128

Tableau 4.8

4.6.1.3 - Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot glissants

Pour le coefficient de frottement d'un appareil d'appui isolé, on a : $\mu_{max} = 3,2 \%$ et $PP = 0,3 \%$

$$d'où H = (\mu_{max} + PP) \times V = 3,5 \% \times V$$

Calcul préliminaire :

nous avons appliqué une force $H = (\mu_{max} + PP) \times V$ en tête de chaque pile et nous avons vérifié que le déplacement de la tête de pile ainsi obtenu est inférieur au déplacement dû aux variations de longueur du tablier envisageables (température, fluage et retrait). Les piles sont donc suffisamment rigides pour que les seuils de glissement puissent être atteints.

Comme proposé dans le guide, on retient les charges verticales des combinaisons extrêmes de l'ELU.

Effort horizontal maximal à retenir pour l'étude d'un appareil d'appui glissant :

$$C0 \text{ et } C4 : H = 3,5 \% \times V = 3,5 \% \times 3,13 = 0,110 \text{ MN}$$

$$P1 \text{ et } P3 : H = 3,5 \% \times V = 3,5 \% \times 17,78 = 0,622 \text{ MN}$$

Effort horizontal maximal à retenir pour l'étude des piles (ou des culées) et des fondations :

$$C0 \text{ et } C4 : H = 3,5 \% \times V = 3,5 \% \times 6,11 = 0,214 \text{ MN}$$

$$P1 \text{ et } P3 : H = 3,5 \% \times V = 3,5 \% \times 28,84 = 1,009 \text{ MN}$$

4.6.1.4 - Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot fixes

Variations de longueur du tablier

Calculons les coefficients de frottement maximum et minimum μ_a et μ_r Il y a huit appareils d'appui à pot glissants d'où $n = 8$ et donc $\alpha = (16 - 8) / 12 = 2/3$ (cf. tableau du paragraphe 4.4.1.3 de ce guide). On a donc :

$$\mu_a = 0,5 \mu_{max} \times (1 + 2/3) = 5/6 \mu_{max} = 2,67 \%$$

$$\text{et } \mu_r = 0,5 \mu_{max} \times (1 - 2/3) = 1/6 \mu_{max} = 0,53 \%$$

$$\text{soit } \Delta\mu = 2/3 \mu_{max} = 2,13 \%$$

Par simplification pour l'appui fixe, on retient ici ce coefficient (cf. § 4.6.1.3, 1^{er} alinéa), soit 3,5 % - PP = 3,2 %.

L'effort longitudinal, dû aux variations de longueur du tablier, que doivent reprendre les appareils d'appui à pot fixes de la pile P2 à l'ELU vaut :

$$H_{P2} = [\mu_a \times (V_{C0} + V_{P1})] - [\mu_f \times (V_{P3} + V_{C4})] = \Delta\mu \times (V_{C0} + V_{P1})$$

$$H_{P2} = [2,67 \% \times (3,87 + 19,96)] - [0,53 \% \times (3,87 + 19,96)] = 0,508 \text{ MN}$$

Freinage

Les appareils d'appui à pot fixes de la pile P2 doivent également reprendre la totalité des efforts de freinage.

Cumul

Les efforts dus à la variation de longueur du tablier et au freinage doivent être cumulés. Compte tenu de la rigidité importante de la pile, ces efforts doivent être repris par un seul des appareils d'appui. Un calcul avec les coefficients μ_{\max} de 3 % (sans prise en compte forfaitaire des frottements sur les guides) et les frottements forfaitaires sur les guides (cf. § 4.3.4.1) aurait donné un résultat légèrement supérieur (0,537 MN au lieu de 0,508 MN d'apport des appuis glissants sur l'appui fixe). Cet écart peut être plus important dans l'étude d'une sollicitation avec des efforts transversaux importants comme l'effet du vent ou les forces centrifuges.

Note : dans cet exemple, les frottements sur les dispositifs de guidage n'ont pas été pris en considération et seraient à ajouter.

4.6.1.5 - Rotations

Les rotations calculées à l'ELU sont inférieures à 0,01 rd.

4.6.1.6 - Dimension des plaques de glissement

Les plaques de glissement sont à dimensionner à partir des positions de point fixe obtenues conformément à l'exemple du § 4.6.2.

4.6.1.7 - Incidence sur la structure

Attention : afin de ne pas alourdir l'exemple, les calculs ci-après sont des calculs simplifiés qui n'abordent pas toutes les valeurs du torseur des efforts à considérer. Il conviendrait d'étudier également le couple d'axe x maximal ($C_{x_{\max}}$) et l'effort horizontal d'axe z maximal ($H_{z_{\max}}$) :

$$\begin{array}{llll} C_{x_{\max}}, & H_x, & H_y, & V \quad (\text{effet du vent ou des charges excentrées}) ; \\ H_{y_{\max}}, & H_x, & V, & C_x \quad (\text{effet du vent}). \end{array}$$

De même les excentricités additionnelles ne sont pas prises en compte.

Convention de signe

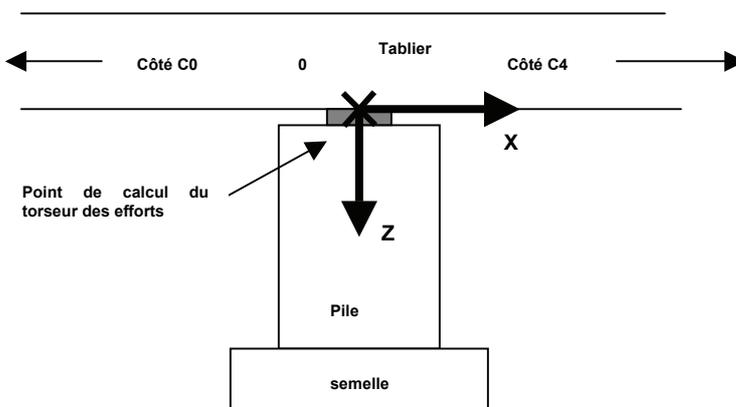


Figure 4.5 : convention de signes

On se limite ici au cas de l'ELU, mais l'ELS serait à traiter selon le même principe. D'autre part, les combinaisons accidentelles qui sont ici non prépondérantes ne sont pas calculées.

Les valeurs maximales et minimales des réactions verticales sont obtenues directement dans le tableau des descentes de charges du tablier ("ELU combinaison fondamentale -réactions maximales" et "ELU combinaison permanente minimum").

Les efforts horizontaux appliqués en tête de piles et de culées sont calculés à partir de ce même tableau, selon les mêmes principes que pour les appareils d'appui et avec les mêmes coefficients de frottement.

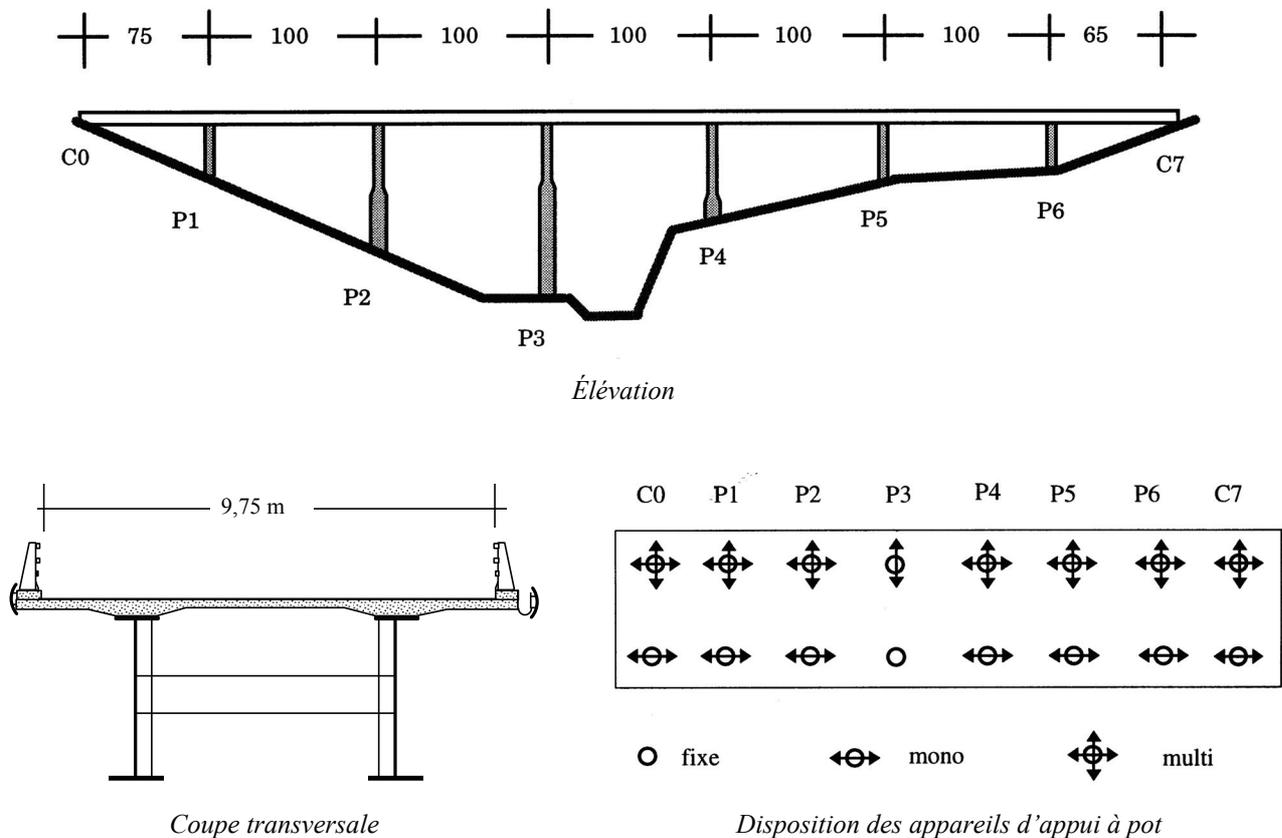
C0 et C4 :	$V_{max} = 6,11 \text{ MN}$	$H_x = \pm 0,214 \text{ MN}$	Coefficient de frottement :	3,5
	$V_{mini} = 2,33 \text{ MN}$	$H_x = \pm 0,082 \text{ MN}$		"
P1 et P3 :	$V_{max} = 28,84 \text{ MN}$	$H_x = \pm 1,009 \text{ MN}$		"
	$V_{mini} = 17,32 \text{ MN}$	$H_x = \pm 0,606 \text{ MN}$		"
P2 :	$V_{max} = 29,62 \text{ MN}$	$H_x = \pm 0,508 \text{ MN}$	$H_{P2} = [\mu_a \times (V_{C0} + V_{P1})] - [\mu_r \times (V_{P3} + V_{C4})]$	
	$V_{mini} = 17,89 \text{ MN}$	$H_x = \pm 0,442 \text{ MN}$		"

4.6.2 - Détermination du point fixe dans un cas complexe

Cet exemple traite de la détermination en fourchette du point fixe ou "point de déplacement nul" d'un tablier. Il n'existe pas un seul point fixe mais une plage de longueur à l'intérieur de laquelle se déplace ce point. Les deux positions extrêmes du point de déplacement nul sont à prendre en compte pour le dimensionnement des plaques de glissement. Elles sont également à utiliser pour le calcul du souffle des joints de chaussée.

4.6.2.1 - Caractéristiques de l'ouvrage

Il s'agit d'un ouvrage comportant des piles très souples (P3 : hauteur 100 m). Le tablier, en ossature mixte acier-béton, repose sur 16 appareils d'appui à pot. Dans le sens longitudinal tous les appareils d'appui à pot sont glissants à l'exception de ceux de la pile P3.



Figures 4.6

Appareil d'appui à pot	Type	Réaction verticale à vide (MN)	Rigidité MN/m
C0	glissant	5,238	300,00
P1	glissant	20,817	7,00
P2	glissant	20,857	5,00
P3	fixe	20,763	3,25
P4	glissant	20,587	5,00
P5	glissant	21,168	6,50
P6	glissant	19,750	8,00
C7	glissant	4,117	300,00

Tableau 4.8 : caractéristiques principales de l'ouvrage utilisé dans l'application numérique du § 4.6.2

Note : la rigidité R_i de chaque appui doit être calculée en tenant compte des souplesses de la fondation, de la pile (ou la culée) et des appareils d'appui :

$$R_i = \frac{1}{S_i^F + S_i^P + S_i^A} \quad \text{avec :} \quad \begin{aligned} S_i^F &= \text{souplesse de la fondation,} \\ S_i^P &= \text{souplesse de la pile,} \\ S_i^A &= \text{souplesse des appareils d'appui.} \end{aligned}$$

4.6.2.2 - Principe de calcul

Le calcul du point fixe se fait de façon itérative en imposant une variation de longueur au tablier. La variation de longueur doit tenir compte de la température, du retrait et du fluage éventuel.

Dans la première itération tous les appareils d'appui à pot sont supposés non glissants. On obtient une première position du point fixe et des efforts horizontaux qui seront écrêtés aux seuils de glissement.

Dans la deuxième itération :

- les appareils d'appui à pot pour lesquels le seuil de glissement n'a pas été atteint continuent à être considérés comme non glissants, l'effort horizontal est le produit de la rigidité R_i de l'appui et du déplacement δ_i : $H_i = R_i \delta_i$;
- les appareils d'appui à pot pour lesquels le seuil de glissement a été dépassé sont modélisés comme glissants et les efforts horizontaux correspondant aux seuils de glissement ($H_i = \mu_i V_i$) sont appliqués directement au tablier.

L'opération est recommencée jusqu'à l'équilibre.

L'équilibre est obtenu lorsque la somme des efforts horizontaux après écrêtement est égale à zéro, c'est à dire lorsque le type de fonctionnement de l'appareil d'appui à pot (fixe ou glissant) n'est pas modifié au cours de l'itération.

On détermine 4 positions du point fixe :

- une position médiane en adoptant des coefficients de frottement identiques sur tous les appareils d'appui à pot coefficient $\mu = \mu_{\max}$;
- deux positions extrêmes en adoptant des coefficients de frottement différents sur les appareils d'appui à pot. On prend le coefficient de frottement μ_a pour les appareils d'appui à pot glissants situés d'un côté de l'appui fixe et le coefficient μ_r pour les autres appareils d'appui à pot glissants et vice versa ;
- enfin la position la plus défavorable vis-à-vis de l'effort horizontal dans l'appui fixe, en considérant un coefficient de frottement μ_r si le frottement est favorable vis-à-vis de l'effet étudié et un coefficient μ_a s'il est défavorable.

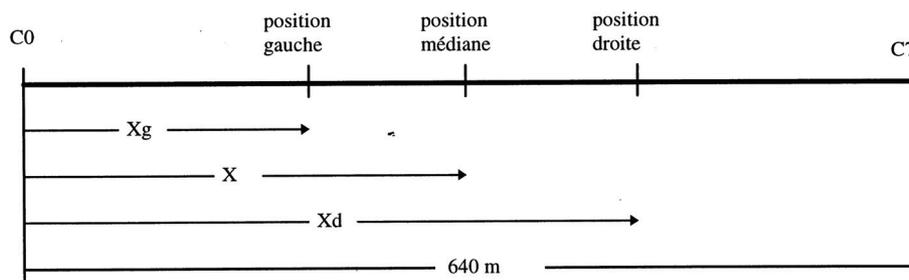


Figure 4.7 : résumé des positions du point "fixe"

4.6.2.3 - Position médiane du point fixe

Le même coefficient de frottement μ est retenu pour tous les appareils d'appui à pot glissants : $\mu = \mu_{\max} = 3,5 \%$

Variations linéaires de longueur du tablier (température, retrait) : $\varepsilon_p = 7,5 \cdot 10^{-4}$

Ce résultat est issu de la combinaison 8 du tableau 4.1.

- **première itération** : tous les appareils d'appui à pot supposés fixes

appui	$\mu \%$	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	3,50	0,183	75,990	0,183	Glissant
P1	3,50	0,729	1,380	0,729	Glissant
P2	3,50	0,730	0,610	0,610	fixe
P3	fixe	∞	0,153	0,153	fixe
P4	3,50	0,721	-0,140	-0,140	fixe
P5	3,50	0,741	-0,670	-0,670	fixe
P6	3,50	0,691	-1,424	-0,691	Glissant
C7	3,50	0,144	-75,900	-0,144	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,030 MN => position du point fixe : X = 337,70 m

- **deuxième itération** : appareils d'appui à pot fixes : P2, P3, P4 et P5 ;
appareils d'appui à pot glissants : C0, P1, P6 et C7.

appui	$\mu \%$	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	3,50	0,183	75,532	0,183	Glissant
P1	3,50	0,729	1,369	0,729	Glissant
P2	3,50	0,730	0,602	0,602	fixe
P3	fixe	∞	0,148	0,148	fixe
P4	3,50	0,721	-0,148	-0,148	fixe
P5	3,50	0,741	-0,679	-0,679	fixe
P6	3,50	0,691	-1,436	-0,691	Glissant
C7	3,50	0,144	-76,358	-0,144	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,0 MN => position du point fixe : X = 335,67 m

4.6.2.4 - Position gauche du point fixe

On affecte le coefficient de frottement μ_a aux appareils d'appui à pot de C0, P1 et P2 et μ_r aux appareils d'appui à pot de P4, P5, P6 et C7.

Il y a 14 appareils d'appui à pot glissants d'où $n = 14$ et $\alpha = 0,5$ (§ 4.4.1.2)

$$\mu_a = 0,5 \mu_{\max} (1 + \alpha) = 2,625 \%$$

$$\mu_r = 0,5 \mu_{\max} (1 - \alpha) = 0,875 \%$$

- **première itération :** on repart de la position calculée précédemment

appui	$\mu \%$	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	2,625	0,137	75,532	0,137	Glissant
P1	2,625	0,546	1,369	0,546	Glissant
P2	2,625	0,548	0,602	0,548	Glissant
P3	fixe	∞	0,148	0,148	fixe
P4	0,875	0,180	-0,148	-0,148	fixe
P5	0,875	0,185	-0,679	-0,185	Glissant
P6	0,875	0,173	-1,436	-0,173	Glissant
C7	0,875	0,036	-76,358	-0,036	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,838 MN => position du point fixe : X = 335,67 m

- **deuxième itération :** appareils d'appui à pot fixes : P3 et P4 ;
appareils d'appui à pot glissants : C0, P1, P2, P5, P6 et C7.

appui	$\mu \%$	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	2,625	0,137	45,067	0,137	Glissant
P1	2,625	0,546	0,658	0,546	Glissant
P2	2,625	0,548	0,095	0,095	fixe
P3	fixe	∞	-0,182	-0,182	fixe
P4	0,875	0,180	-0,655	-0,180	Glissant
P5	0,875	0,185	-1,340	-0,185	Glissant
P6	0,875	0,173	-2,248	-0,173	Glissant
C7	0,875	0,036	-106,823	-0,036	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,022 MN => position du point fixe : Xg = 200,28 m

- **troisième itération :** appareils d'appui à pot fixes : P3 et P4 ;
appareils d'appui à pot glissants : C0, P1, P2, P5, P6 et C7

appui	$\mu \%$	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	Fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	2,625	0,137	44,255	0,137	Glissant
P1	2,625	0,546	0,639	0,546	Glissant
P2	2,625	0,548	0,081	0,081	fixe
P3	fixe	∞	-0,191	-0,191	fixe
P4	0,875	0,180	-0,669	-0,180	Glissant
P5	0,875	0,185	-1,357	-0,185	Glissant
P6	0,875	0,173	-2,270	-0,173	Glissant
C7	0,875	0,036	-107,636	-0,036	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,0 MN => position du point fixe : Xg = 196,67 m

4.6.2.5 - Position droite du point fixe

On affecte le coefficient de frottement μ_p aux appareils d'appui à pot de C0, P1 et P2 et μ_a aux appareils d'appui à pot de P4, P5, P6 et C7.

- **première itération :** on repart de la position calculée précédemment

appui	μ %	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,875	0,046	44,255	0,046	Glissant
P1	0,875	0,182	0,639	0,182	Glissant
P2	0,875	0,183	0,081	0,081	fixe
P3	fixe	∞	-0,191	-0,191	fixe
P4	2,625	0,540	-0,669	-0,540	Glissant
P5	2,625	0,556	-1,357	-0,556	Glissant
P6	2,625	0,518	-2,270	-0,518	Glissant
C7	2,625	0,108	-107,636	-0,108	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 1,604 MN => position du point fixe : X = 196,67 m

- **deuxième itération :** appareils d'appui à pot fixes : P3, P4 et P5 ;
appareils d'appui à pot glissants : C0, P1, P2, P6 et C7.

appui	μ %	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,875	0,046	102,594	0,046	Glissant
P1	0,875	0,182	2,001	0,182	Glissant
P2	0,875	0,183	1,053	0,183	Glissant
P3	fixe	∞	0,441	0,441	fixe
P4	2,625	0,540	0,303	0,303	fixe
P5	2,625	0,556	-0,093	-0,093	fixe
P6	2,625	0,518	-0,714	-0,518	Glissant
C7	2,625	0,108	-49,296	-0,108	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,436 MN => position du point fixe : X = 455,93 m

- **troisième itération :** appareils d'appui à pot fixes : P3, P4 et P5 ;
appareils d'appui à pot glissants : C0, P1, P2, P6 et C7.

appui	μ %	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,875	0,046	93,736	0,046	Glissant
P1	0,875	0,182	1,794	0,182	Glissant
P2	0,875	0,183	0,906	0,183	Glissant
P3	fixe	∞	0,345	0,345	fixe
P4	2,625	0,540	0,156	0,156	fixe
P5	2,625	0,556	-0,285	-0,285	fixe
P6	2,625	0,518	-0,951	-0,518	Glissant
C7	2,625	0,108	-58,154	-0,108	Glissant

Somme des efforts horizontaux : 0 MN => position du point fixe : X = 416,56 m

Le point fixe peut donc se situer entre les abscisses $X_g = 196$ m et $X_d = 417$ m, soit une plage d'environ 220 mètres pour un ouvrage de 640 mètres de long.

4.6.2.6 - Position la plus défavorable du point fixe vis-à-vis de l'effort horizontal sur l'appui fixe

On repart de la configuration du § 4.6.2.5. On affecte le coefficient de frottement μ_r aux appareils d'appui à pot de C0, P1, P2 et P4, dont l'effort horizontal a le même signe que celui de l'appui fixe P3 et μ_a aux appareils d'appui à pot de P5, P6 et C7, dont l'effort horizontal a un signe opposé.

- **première itération :** on repart de la position calculée précédemment

appui	μ %	seuil de glissement (MN)	Effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,875	0,046	93,736	0,046	Glissant
P1	0,875	0,182	1,794	0,182	Glissant
P2	0,875	0,183	0,906	0,183	Glissant
P3	fixe	∞	0,345	0,345	fixe
P4	0,875	0,180	0,156	0,156	fixe
P5	2,625	0,556	-0,285	-0,285	fixe
P6	2,625	0,518	-0,951	-0,518	Glissant
C7	2,625	0,108	-58,154	-0,108	Glissant

Somme des efforts horizontaux : - 0 MN => **position du point fixe : X = 416,56 m**

La position la plus défavorable du point fixe coïncide avec la position droite du point fixe. En effet, bien que le seuil de glissement de l'appui P4 ait diminué par rapport à l'itération précédente (le coefficient de frottement est passé de μ_a à μ_r), il reste supérieur à l'effort sollicitant. Cette vérification peut s'avérer cependant utile dans certaines configurations.

Chapitre 5

Contrôle des appareils d'appui à pot

Le rôle des différents intervenants est précisé dans les colonnes du tableau en regard des différentes tâches à réaliser en utilisant les abréviations suivantes :

- fournisseur (**Fo**), entreprise (**En**), maître d'œuvre (**MO**),
- exécution et émission d'un document (**E**), destinataire d'un document pour exécution ou pour information (**D**), contrôle d'un document ou d'une opération (**V**).

5.1 - Documents de définition

Les différentes opérations nécessaires au contrôle de la conception, de la fabrication, de la mise en œuvre et du suivi des appareils d'appui reposent sur l'élaboration des documents suivants :

5.1.1 - Plans d'exécution génie civil (plans Entreprise)

5.1.1.1 - Plans d'implantation

- numérotation des lignes d'appui et position des appareils d'appui sur celles-ci ;
- type, orientation, sens et valeur du déplacement, réactions des appuis ;
- position des éléments de marquage et de contrôle permanent des appareils d'appui.

5.1.1.2 - Plans de détails complémentaires

- géométrie externe des appareils d'appui définitifs et dispositifs provisoires ;
- définition des interfaces : géométrie des structures d'appui, réservations, calage ;
- position et encombrement des appareils d'appui provisoires pour calage ou vérinage ;
- définition des gabarits et des moyens d'accès pour les opérations de mise en place, de suivi et de remplacement éventuel des appareils d'appui.

5.1.2 - Bordereau des données techniques (réf. NF EN 1337-1, annexe B)

Le bordereau des données techniques définit toutes les informations nécessaires pour formaliser la commande de l'appareil d'appui au fournisseur, en conformité avec les hypothèses des calculs d'exécution.

Le plan d'implantation des appareils d'appui défini ci-dessus doit être annexé au bordereau technique.

Fo	En	MO
D	E	V
D	E	V
D	E	V

Fo	En	MO
-	V	V
E	D	V
-	V	V
-	V	V
-	-	V

5.1.3 - Contrôle de réception sur chantier des appareils d'appui

- certificat de conformité ;
- emballage ;
- état général, protections des surfaces, protections permanentes ;
- dispositifs de blocage provisoires ;
- caractéristiques géométriques : hauteurs, parallélisme (rotations), pré-réglages ;
- marquage ;
- stockage.

5.1.4 - Note de calcul des appareils d'appui

Indépendamment des justifications fournies, cette note de calcul fait état des hypothèses prises en compte.

5.1.5 - Contrôle à la pose (réf. : T 47 816-3)

Ce contrôle constitue un **point d'arrêt** :

- emplacement ;
- orientation ;
- sens du déplacement et vérification du pré-réglage éventuel (appareils d'appui avec plan de glissement) ;
- conformité des scellements ou des calages (Vérification des calages provisoires et définitifs) ;
- propreté de l'environnement.

5.1.6 - Contrôle a la mise en service des appareils d'appui

L'appareil d'appui est considéré mis en service au moment du transfert de la réaction d'appui de l'ouvrage sur celui-ci (après s'être assuré que la résistance du béton a atteint sa valeur requise) :

- suppression des calages provisoires ;
- dépose des dispositifs de fixation provisoires (suivant procédure) ;
- propreté de l'environnement ;
- valeurs des hauteurs, des rotations et des déplacements ;
- valeurs des réactions d'appui théoriques et mesurées (appareils d'appui équipés de cellules de mesures) ;
- intégrité des bossages et calages ;
- relevé des températures ;
- document de suivi.

5.1.7 - État point "zéro" du suivi des appareils d'appui

Le point "zéro" du suivi ultérieur des appareils d'appui, pendant la durée de vie de l'ouvrage, correspond à l'état de chacun de ceux-ci à leur mise en service. Ce point "zéro" est intégré ultérieurement à l'état point "zéro" de l'ouvrage terminé.

Les documents de suivi comportent en particulier le relevé des valeurs des hauteurs, des rotations, des déplacements et éventuellement des réactions d'appui, y compris, ceux qui correspondent aux valeurs mesurées à la réception.

En cas de modification des structures, avant la mise en service de l'ouvrage (construction par phases avec clavage ou modifications des réactions d'appui par vérinage), des relevés complémentaires seront effectués avant et après chaque clavage ou vérinage.

Commentaires sur les contrôles en service

Les appareils d'appui à pot sont des organes qui font partie du domaine de la construction mécanique (et non pas de la charpente ou du génie civil). L'ensemble des procédures de calcul, de fabrication, de mise en place et de contrôle doit être en rapport avec cette définition.

La durée de vie projetée pour les appareils d'appui à pot doit être la même que celle de l'ouvrage, même si, comme tout organe mécanique, il est naturellement prévu le remplacement possible d'un appareil d'appui accidentellement défectueux.

Un certain nombre de contrôles géométriques sont à réaliser à la mise en place et durant la vie de l'ouvrage, en particulier les **mesures des déplacements et des rotations**. Pour cela, il est nécessaire :

- que l'accès aux appareils d'appui soit possible et donc que la hauteur, entre l'intrados du tablier et le niveau supérieur de la pile, soit d'au moins 50 cm en périphérie des appareils d'appui ;
- que les emplacements des 4 points permettant la mesure de l'intervalle existant entre le dessus de la virole et le piston/couvercle, permettant de définir les rotations, soient repérés et surfacés sur l'appui (ou directement sur l'appareil d'appui) et aient une orientation par rapport à la structure qui facilite leur accès (ces mesures sont effectuées avec une précision de quelques dixièmes de millimètres, à l'aide de jauges d'épaisseur de mécanicien). Ces points doivent être, en général, situés sur deux directions perpendiculaires orientées à 45° par rapport à l'axe longitudinal de l'ouvrage ;
- que les index qui permettent de repérer les déplacements horizontaux des appareils d'appui glissants, soient disposés de telle manière qu'ils n'entraînent pas la déchirure des jupes de protection lors de leur utilisation.

Lors du calage final des appareils d'appui, il est généralement utilisé un mortier de calage entre la platine du pot inférieur et le bossage en béton armé. Ce mortier ne doit pas dépasser de plus de 5 cm les dimensions de la platine.

Annexe 1

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.

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.

A1 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "Qualité des matériaux"

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
	<p>Les appareils d'appui à pot d'élastomère sont conformes à la norme NF EN 1337, parties 1 et 5 (et partie 2*) et au Texte d'Application Nationale (cf. Note d'Information Technique N° 27, publiée par le Sétra).</p> <p>Cette conformité est attestée par un marquage CE de niveau 1.</p>	<p>(*) à ajouter dans le cas d'appareils d'appui comportant un plan de glissement.</p>
§ 2.2.1 et 3.3.1	<p>La partie inférieure formant pot sera fabriquée uniquement à partir d'un usinage d'une tôle laminée à l'épaisseur du pot.</p>	
	<p>Le fabricant est tenu de porter l'indication de l'épaisseur d'origine et de la nuance de l'acier sur le plan d'exécution de l'appareil d'appui à pot.</p>	<p>Cette information figure dans le CCPU des tôles employées.</p>
§ 2.2.4	<p>Pour suivre les déplacements, les dispositifs de mesure seront positionnés du côté d'accès du visiteur indiqué sur les plans d'implantation. Les réglets seront calés de façon homogène sur un même ouvrage pour faciliter l'exploitation.</p>	
§ 2.2.4	<p>Pour assurer la protection du plan de glissement, des dispositifs de type "joint raqueur" sont à prévoir.</p> <p>L'espace entre la plaque en acier inoxydable et son support sera étanchée.</p>	<p>Cette protection est obligatoire selon NF EN 1337-2, § 7.3, mais aucune solution n'est imposée.</p> <p>Cette disposition, pour les appareils d'appui à pot avec plan de glissement, n'est pas prévue par la norme.</p>
§ 2.2.5	<p>Option 1 : Toutes les parties métalliques reçoivent une protection contre la corrosion conforme aux prescriptions de la norme NF EN 1337-9</p> <p>Option 2 : Toutes les parties métalliques reçoivent une protection contre la corrosion en conformité avec le Fascicule 56 du CCTG et basée sur l'un des systèmes certifiés ACQPA.</p> <p>En cas d'utilisation de métaux de potentiels électrolytiques différents, pour éviter l'apparition de phénomènes de corrosion galvanique, il est mis en place une isolation entre les métaux, conformément à NF EN 1337-9, art 4.2.</p>	<p>L'option 1 correspond au marquage CE</p>

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
§ 3.3.2	La valeur de la rotation et les conditions du contact pot/piston sont renseignées dans le bordereau des données prévu par l'annexe B de la NF EN 1337-1.	<p><i>Rappel : le type "à face de contact plane" est admis pour une hauteur de contact "w", déterminée par le calcul, strictement inférieure à 15 mm (cf. NF EN 1337-5 § 6.2.3.1 et 6.2.3.2) et doit être réservé aux seuls appareils d'appui à pot multi-directionnels.</i></p> <p><i>Le type "à face de contact courbe" est à utiliser avec un rayon "R" conforme à la norme NF EN 1337-5 (§ 6.2.3.3) tel que $R \geq [D/2, 100 \text{ mm}]$. Comme la norme n'évoque pas les conditions de diffusion de la contrainte de Hertz dans le bord du piston en position de rotation maximale, nous conseillons de respecter le principe de diffusion de la figure 3.1c. En général, la hauteur "w" obtenue est plus importante que celle préconisée au § 6.2.4 de la norme</i></p>
§ 3.3.3	Le jeu pot/piston est limité à 0,5 mm.	<i>Au lieu de 0,8 ou 1 fixé par la norme. Ceci n'est à retenir que pour les cas signalés au § 3.3.3.</i>
§ 3.4.2 et 4.5.4	La dimension des plaques de glissement sera établie conformément au § 5.4b de la norme NF EN 1337-1 et à l'interprétation qui en est donnée dans le texte d'application nationale 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	
§ 3.4.3	Coefficient de frottement On ne tiendra pas compte du facteur correctif de 2/3.	<i>Sauf justification particulière et pour les applications dans les DOM-TOM où la température d'appui effective ne descend pas en dessous de -5°C.</i>

A2 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "Justification des appareils d'appui" du chapitre II "Préparation, organisation du chantier" du CCTP

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
§ 4.1.2	Les justifications des appareils d'appui à pot d'élastomère, des appuis et des fondations sont menées selon les règles du chapitre IV "Principes de calcul d'un ouvrage comportant des appareils d'appui à pot d'élastomère" du document "Les appareils d'appui à pot d'élastomère - Guide pour l'utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires" du Sétra (Référence 0734 de août 2007).	
§ 4.3.2.4		<i>Le CCTP peut proposer d'autres valeurs numériques du coefficients de frottement en fonction des particularités de l'ouvrage (environnement agressif, température basse, etc.).</i>
§ 4.3.4.2		<i>Cf. l'article pour éventuellement proposer d'autres valeurs en fonction des particularités de l'ouvrage.</i>
§ 4.4.4.2		<i>Cf. l'article pour éventuellement imposer un calcul spatial de souplesse des appuis, les efforts horizontaux étant calculés pour d'autres cas de charges, concomitants ou non.</i>

A3 - Exemples de clauses à intégrer dans le chapitre "Mise en œuvre"

Article concerné du guide	Exemple de clause	Commentaires
§ 3.4.5	La pose des appareils d'appui à pot se fera conformément à la norme T 47.816-3	
§ 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).	

Annexe 2

Fiches récapitulatives des caractéristiques des appareils d'appui à pot

Appareil d'appui à pot fixe

Forces et rotations

N à l'ELS	<input type="text"/>	kN	N à l'ELU	<input type="text"/>	kN
Fx à l'ELU	<input type="text"/>	kN	Fy à l'ELU	<input type="text"/>	kN
Précision de pose	<input type="text"/>	rd			
$\varphi_{1,x}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd	$\varphi_{1,y}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd
$\varphi_{2,x}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd	$\varphi_{2,y}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd

Matériaux

Module coussin	<input type="text"/>	MPa	Coef Poisson acier	<input type="text"/>	
Module acier	<input type="text"/>	MPa	Angle diffusion acier	<input type="text"/>	degrés
Type d'acier	Pot <input type="text"/>	Piston <input type="text"/>			
Coef de pondération	<input type="text"/>		Coef de sécurité partielle	<input type="text"/>	
Coef de rotation F0	<input type="text"/>		Coef de rotation F1	<input type="text"/>	
Coef de rotation F2	<input type="text"/>		Coef de température	<input type="text"/>	
Température max en service	<input type="text"/>	°C			
Coef frott $\mu_{s,h}$ (acier-acier)	<input type="text"/>		Coef frott $\mu_{s,c}$ (acier-béton)	<input type="text"/>	
Facteur frott γ_F (acier-acier)	<input type="text"/>		Facteur frott γ_F (acier-béton)	<input type="text"/>	
Coef sécurité γ_m (acier-acier)	<input type="text"/>		Coef sécurité γ_m (acier-béton)	<input type="text"/>	

Dimensions du pot

Diamètre D 0	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t pot mini	<input type="text"/>	mm
Hauteur H pot	<input type="text"/>	mm	Réservations	<input type="text"/>	mm ²

Dimensions du coussin

Diamètre D	<input type="text"/>	mm	Épaisseur t mini	<input type="text"/>	mm
Tolérance épaisseur	<input type="text"/>	mm			

Dimensions du piston

Diamètre D pist	<input type="text"/>	mm	Épaisseur t b mini	<input type="text"/>	mm
Épaisseur t pist	<input type="text"/>	mm	Largeur face w	<input type="text"/>	mm
Face de contact pot/piston de forme sphérique ?	Oui	Non			
Rayon R face de contact (si sphérique)	<input type="text"/>	mm			

Support inférieur

Matériau du support inférieur ?	Métal	Béton			
Résistance à 28 jours ou limite élastique	<input type="text"/>	MPa			

Support supérieur

Matériau du support supérieur ?	Métal	Béton			
Résistance à 28 jours ou limite élastique	<input type="text"/>	MPa			

Ancrages inférieurs

Existe-t-il des ancrages inférieurs ?	Oui	Non			
Type des boulons	<input type="text"/>	Section résistante	<input type="text"/>	mm ²	
Classe des boulons	<input type="text"/>	Nombre de boulons	<input type="text"/>		
Entraxe inférieur	<input type="text"/>	mm			

Ancrages supérieurs

Existe-t-il des ancrages supérieurs ?	Oui	Non			
Type des boulons	<input type="text"/>	Section résistante	<input type="text"/>	mm ²	
Classe des boulons	<input type="text"/>	Nombre de boulons	<input type="text"/>		
Entraxe supérieur minimal	<input type="text"/>	mm			

Appareil d'appui à pot multidirectionnel

Forces et rotations

N à l'ELS	<input type="text"/>	kN	N à l'ELU	<input type="text"/>	kN
Précision de pose	<input type="text"/>	rd			
$\varphi_{1,x}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd	$\varphi_{1,y}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd
$\varphi_{2,x}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd	$\varphi_{2,y}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd

Matériaux

Module coussin	<input type="text"/>	MPa	Coef Poisson acier	<input type="text"/>
Module acier	<input type="text"/>	MPa	Angle diffusion acier	<input type="text"/> degrés
Type d'acier	Pot <input type="text"/>	Piston <input type="text"/>	Plaque supérieure	<input type="text"/>
Coef de pondération	<input type="text"/>		Coef de sécurité partielle	<input type="text"/>
Coef de rotation F0	<input type="text"/>		Coef de rotation F1	<input type="text"/>
Coef de rotation F2	<input type="text"/>		Coef de température	<input type="text"/>
Température max en service	<input type="text"/>	°C		
Coef frott $\mu_{s,h}$ (acier-acier)	<input type="text"/>		Coef frott $\mu_{s,c}$ (acier-béton)	<input type="text"/>
Facteur frott γ_F (acier-acier)	<input type="text"/>		Facteur frott γ_F (acier-béton)	<input type="text"/>
Coef sécurité γ_m (acier-acier)	<input type="text"/>		Coef sécurité γ_m (acier-béton)	<input type="text"/>

Dimensions du pot

Diamètre D 0	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t pot mini	<input type="text"/>	mm
Hauteur H pot	<input type="text"/>	mm	Réservations	<input type="text"/>	mm ²

Dimensions du coussin

Diamètre D	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t mini	<input type="text"/>	mm
Tolérance épaisseur	<input type="text"/>	mm			

Dimensions du piston

Diamètre D pist	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t b mini	<input type="text"/>	mm
Epaisseur t pist	<input type="text"/>	mm	Largeur face w	<input type="text"/>	mm
Face de contact pot/piston de forme sphérique ?	Oui Non				
Rayon R face de contact (si sphérique)	<input type="text"/>	mm			

Dimensions du PTFE

Diamètre D PTFE	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t p	<input type="text"/>	mm
Avancée h PTFE	<input type="text"/>	mm			

Dimensions de la plaque de glissement et de la plaque supérieure

Epaisseur de la plaque de glissement t gl	<input type="text"/>	mm			
La plaque supérieure est-elle de forme rectangulaire ?	Oui	Non			
Largeur ou diamètre de la plaque supérieure a b	<input type="text"/>	mm			
Longueur de la plaque supérieure b b	<input type="text"/>	mm			
Epaisseur plaque sup t sup	<input type="text"/>	mm			

Support inférieur

Matériau du support inférieur ?	Métal	Béton			
Résistance à 28 jours ou limite élastique	<input type="text"/>	MPa			

Support supérieur

Matériau du support supérieur ?	Métal	Béton			
Résistance à 28 jours ou limite élastique	<input type="text"/>	MPa			

Ancrages inférieurs

Existe-t-il des ancrages inférieurs ?	Oui	Non			
Type des boulons	<input type="text"/>	Section résistante	<input type="text"/>	mm ²	
Classe des boulons	<input type="text"/>	Nombre de boulons	<input type="text"/>		
Entraxe inférieur	<input type="text"/>	mm			

Ancrages supérieurs

Existe-t-il des ancrages supérieurs ?	Oui	Non			
Type des boulons	<input type="text"/>	Section résistante	<input type="text"/>	mm ²	
Classe des boulons	<input type="text"/>	Nombre de boulons	<input type="text"/>		
Entraxe supérieur minimal	<input type="text"/>	mm			

Appareil d'appui à pot unidirectionnel

Généralités

Angle de l'axe de la clavette par rapport à Ox	<input type="text"/>	degrés	
Type de guidage ?	Central	Latéral	
Mode de fixation du guidage ?	Boulonné	Soudé	

Forces et rotations

N à l'ELS	<input type="text"/>	kN	N à l'ELU	<input type="text"/>	kN
Fx à l'ELU	<input type="text"/>	kN	Fy à l'ELU	<input type="text"/>	kN
Précision de pose	<input type="text"/>	rd			
$\varphi_{1,x}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd	$\varphi_{1,y}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd
$\varphi_{2,x}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd	$\varphi_{2,y}$ à l'ELU	<input type="text"/>	rd

Matériaux

Module coussin	<input type="text"/>	MPa	Coef Poisson acier	<input type="text"/>	
Module acier	<input type="text"/>	MPa	Angle diffusion acier	<input type="text"/>	degrés
Type d'acier	Pot <input type="text"/>	Piston <input type="text"/>	Plaque supérieure	<input type="text"/>	
Coef de pondération	<input type="text"/>		Coef de sécurité partielle	<input type="text"/>	
Coef de rotation F0	<input type="text"/>		Coef de rotation F1	<input type="text"/>	
Coef de rotation F2	<input type="text"/>		Coef de température	<input type="text"/>	
Température max en service	<input type="text"/>	°C			
Coef frott $\mu_{s,h}$ (acier-acier)	<input type="text"/>		Coef frott $\mu_{s,c}$ (acier-béton)	<input type="text"/>	
Facteur frott γ_F (acier-acier)	<input type="text"/>		Facteur frott γ_F (acier-béton)	<input type="text"/>	
Coef sécurité γ_m (acier-acier)	<input type="text"/>		Coef sécurité γ_m (acier-béton)	<input type="text"/>	

Dimensions du pot

Diamètre D 0	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t pot mini	<input type="text"/>	mm
Hauteur H pot	<input type="text"/>	mm	Réservations	<input type="text"/>	mm ²

Dimensions du coussin

Diamètre D	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t mini	<input type="text"/>	mm
Tolérance épaisseur	<input type="text"/>	mm			

Dimensions du piston

Diamètre D pist	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t b mini	<input type="text"/>	mm
Epaisseur t pist	<input type="text"/>	mm	Largeur face w	<input type="text"/>	mm
Face de contact pot/piston de forme sphérique ?	Oui Non				
Rayon R face de contact (si sphérique)	<input type="text"/>	mm			
Engravure t ep	<input type="text"/>	mm	Largeur engravure l'cl	<input type="text"/>	mm
Hauteur guide	<input type="text"/>	mm	Type de guide	<input type="text"/>	
Diamètre filetages dans le piston d HR	<input type="text"/>	mm			

Dimensions de la clavette

Largeur l cl	<input type="text"/>	mm	Hauteur H cl	<input type="text"/>	mm
Longueur L cl	<input type="text"/>	mm			

Caractéristiques des boulons de la clavette

Type des boulons	<input type="text"/>	Classe des boulons	<input type="text"/>
Nombre de boulons	<input type="text"/>		

Dimensions du PTFE

Diamètre D PTFE	<input type="text"/>	mm	Epaisseur t p	<input type="text"/>	mm
Avancée h PTFE	<input type="text"/>	mm			

Dimensions de la plaque de glissement et de la plaque supérieure

Epaisseur de la plaque de glissement t gl	<input type="text"/>	mm			
La plaque supérieure est-elle de forme rectangulaire ?	Oui Non				
Largeur ou diamètre de la plaque supérieure a b	<input type="text"/>	mm			
Longueur de la plaque supérieure b b	<input type="text"/>	mm			
Epaisseur plaque sup t sup	<input type="text"/>	mm	Engravure sup t esup	<input type="text"/>	mm
Hauteur guide	<input type="text"/>	mm	Type de guide	<input type="text"/>	
Coefficient de frottement du guide	<input type="text"/>				

Support inférieur

Matériau du support inférieur ?	Métal	Béton
Résistance à 28 jours ou limite élastique	<input type="text"/>	MPa

Support supérieur

Matériau du support supérieur ?	Métal	Béton
Résistance à 28 jours ou limite élastique	<input type="text"/>	MPa

Ancrages inférieurs

Existe-t-il des ancrages inférieurs ?	Oui	Non
Type des boulons	<input type="text"/>	Section résistante <input type="text"/> mm ²
Classe des boulons	<input type="text"/>	Nombre de boulons <input type="text"/>
Entraxe inférieur	<input type="text"/>	mm

Ancrages supérieurs

Existe-t-il des ancrages supérieurs ?	Oui	Non
Type des boulons	<input type="text"/>	Section résistante <input type="text"/> mm ²
Classe des boulons	<input type="text"/>	Nombre de boulons <input type="text"/>
Entraxe supérieur minimal	<input type="text"/>	mm

Documents généraux

- Appareils d'appui en élastomère fretté. Guide technique. Sétra. Juillet 2007. Référence 0716.
- Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Seconde partie : fascicule 13 "Appareils d'appui". Sétra/LCPC. 2002. Référence Sétra : 0230, Référence LCPC : FASC 13
- MÉMOAR (Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art). CD Rom. Sétra. Octobre 2007. Référence 0757CD. *Accessible depuis le site I2¹³ du Sétra.*
Voir plus particulièrement les fiches suivantes : VIII-2 - Appareils d'appui à pot ; VIII-3 - Bossages des appareils d'appui ; VIII-4 - Vérinage/Calage.
- Note technique sur l'application nationale de la norme NF EN 1337 (appareils d'appui structuraux). Note d'information série Ouvrages d'art n° 27. Sétra. Décembre 2006. *En téléchargement sur les sites Internet¹⁴ ou I2 du Sétra.*
- XVIII^{ème} congrès mondial de la route. Bruxelles 1987. Comité technique n° 11 des ponts routiers. AIPCR. Paris. 1987. pp. 47-61.
- Notices techniques des fabricants.

Normes

- NF EN 1337-1 (IC T 47.820-1) : Appareils d'appui structuraux. Partie 1 : Indications générales
- NF EN 1337-2 (IC T 47.820-2) : Appareils d'appui structuraux. Partie 2 : Éléments de glissement
- NF EN 1337-5 (IC T 47.820-5) : Appareils d'appui structuraux – Partie 5 : Appareils d'appui à pot.
- NF EN 1337-11 (IC T 47.820-11) : Appareils d'appui structuraux. Partie 11 : Transport, entreposage intermédiaire et montage.
- NF EN 1337-9 (IC : T 47.820-9) : Appareils d'appui structuraux. Partie 9 : Protection.
- 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 ; et son annexe nationale.
- 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 ; et son annexe nationale.
- NF EN 1990 : Eurocodes structuraux : Bases de calcul des structures et NF EN 1990/A1 : Annexe A2 (application aux ponts)
- NF EN 1994-2 : Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier/béton - Partie 2 : règles générales et règles pour les ponts ; et son annexe nationale
- T 47.816 : Appareils d'appui en élastomère - Appareils d'appui à pot - Partie 3 : pose des appareils d'appui à pot

¹³ I2 (réseau intranet) : <http://intra.setra.i2>

¹⁴ Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>

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 ponts. Les éléments qu'il contient doivent permettre de dimensionner les appareils d'appui à pot d'élastomère en vue d'une utilisation sur les ponts et viaducs routiers, les passerelles et les structures similaires.

Ce document comprend essentiellement :

- une description sommaire de ce type de produit et des équipements particuliers qui lui sont liés ;
- les principaux textes réglementaires de base ;
- les critères de dimensionnement sur la base des textes normatifs préparés par le CEN (Comité Européen de Normalisation) ;
- une méthodologie de calcul, non pas du produit lui-même, mais de son utilisation dans un projet de pont avec un exemple pratique basé sur un cas réel.

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 : **0734** - Prix de vente : **14 €**

*Crédit photos : Gérard Forquet (Sétra)
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 : 4^{ème} trimestre 2007 - ISBN : 978-2-11-094622-5*

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

