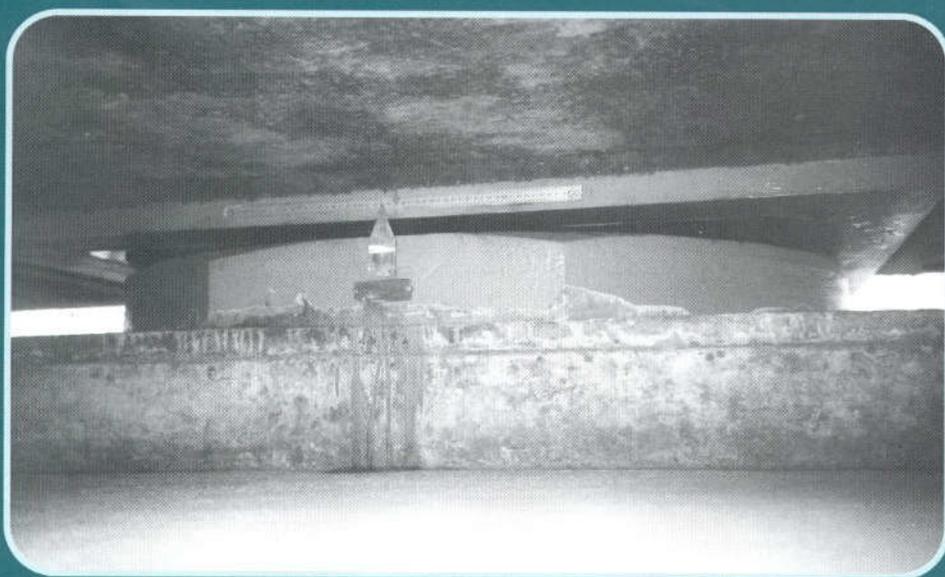




Ministère
de l'Équipement,
des Transports
et du Logement



APPAREILS D'APPUI à pot de caoutchouc



*UTILISATION
SUR LES PONTS, VIADUCS
ET STRUCTURES SIMILAIRES*

GUIDE TECHNIQUE

APPAREILS D'APPUI

à pot de caoutchouc



*UTILISATION
SUR LES PONTS, VIADUCS
ET STRUCTURES SIMILAIRES*

GUIDE TECHNIQUE

SEPTEMBRE 2000

Document réalisé et diffusé par le



SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES
Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art - Cellule Équipement des ponts
46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 BAGNEUX CEDEX - FRANCE
Tél. 01 46 11 31 53 - Fax 01 46 11 33 55 - www.setra.equipement.gouv.fr

AVERTISSEMENT

Le présent document n'est, pour le moment, qu'un guide provisoire ; en effet, les normes EN 1337 (notamment les parties 1, 2 et 5) ne sont pas encore publiées. Or le présent guide utilise largement des éléments qui résultent d'un consensus entre les différents pays européens et qui viennent, souvent, soit compléter soit modifier nos normes ou textes réglementaires. Ces normes EN sont en phase finale de mise au point mais elles peuvent encore subir des modifications aussi ce document n'aura sa forme définitive qu'une fois ces normes EN publiées.

En outre, les règlements de charge sont en cours d'harmonisation au niveau européen (Eurocode) mais ils ne sont pas encore applicables. Dans cette attente, le présent guide a été rédigé sur la base des règlements français (Fascicule 61, titre II), cependant les rédacteurs ont été amenés à utiliser des compléments venant des futurs Eurocodes sur des points pour lesquels les règlements français sont incomplets ou imprécis.

Quand ces documents (normes EN et Eurocodes) seront applicables, ce guide sera alors repris et quittera alors son statut provisoire.

REMERCIEMENTS

Ce guide provisoire a été préparé, sous la direction de M. C. Binet, chef du CTOA, et de M. AL. Millan, chef de la DML du CTOA, par un groupe de travail comprenant:

MM. M. Fragnet, SETRA/CTOA - Division Méthodologie et Logiciels
JM. Lacombe, DREIF/GOA
JY. Leblanc, SETRA/CTOA - Mission réglementation
Y. Picard, DREIF/GOA
D. Renault, Scetauroute, DOA
F. Tavakoli, CETE de Lyon, DOA

La gestion de ce guide est assurée par la Cellule Equipements des Ponts en collaboration avec les membres du groupe de travail.

Nous remercions aussi de leurs précieux conseils et observations les personnes suivantes : MM. D. Lecoindre (SETRA), D. Lefaucheur (SETRA), G. Pérez (CETE SW/DOA), M. Thénnoz (MISOA), P. Xercavins (PX Consultants).

Les dessins ont été préparés par M. JP. Gilcart.

Illustration photo: Photothèque SETRA/CTOA

Le présent guide annule et remplace le chapitre VII : "les appareils d'appui spéciaux", pages 46 à 52, du Bulletin Technique n° 4 de 1974.

SOMMAIRE

Chapitre I INTRODUCTION	7
Chapitre II COMPOSITION D'UN APPAREIL D'APPUI A POT DE CAOUTCHOUC	9
2.1 - PRINCIPES GENERAUX	9
2.2 - LES DIFFERENTS ELEMENTS CONSTITUTIFS	9
2.2.1 - Une partie inférieure formant le pot	9
2.2.2 - Un coussin en caoutchouc	11
2.2.3 - Le piston ou couvercle	11
2.2.4 - Les éléments de glissement	12
2.2.5 - Protection contre la corrosion	12
2.3 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CE TYPE D'APPAREIL D'APPUI	12
2.4 - COTES GEOMETRIQUES IMPORTANTES	13
Chapitre III COMMENTAIRES SUR LES NORMES PR EN 1337.2 & 1337.5 POINTS ESSENTIELS A CONSIDERER POUR LE DIMENSIONNEMENT	15
3.1 - PRESENTATION	15
3.2 - INTRODUCTION	15
3.3 - APPAREIL D'APPUI A POT	15
3.3.1 - Epaisseur des aciers laminés	15
3.3.2 - Valeur de la rotation et contact pot/piston	16
3.3.3 - Jeu pot/piston	16
3.3.4 - Epaisseur du fond du pot	18
3.3.5 - Surface effective de contact sur la structure	18
3.3.6 - Epaisseur du coussin de caoutchouc	18
3.3.7 - Tassement	19
3.4 - ELEMENT DE GLISSEMENT	19
3.4.1 - Choix de la position des guidages: central ou latéral	19
3.4.2 - Dimension des plaques de glissement	19
3.4.3 - Coefficient de frottement	19
3.4.4 - Vérification de la déformation des plaques de glissement et du piston	19
3.4.5 - Installation	20
3.5 - SECURITE AU GLISSEMENT DE L'INTERFACE APPAREIL D'APPUI/STRUCTURE	20
Chapitre IV PRINCIPES DE CALCUL D'UN OUVRAGE COMPORTANT DES APPAREILS D'APPUI A POT	21
4.1 - CONTEXTE REGLEMENTAIRE	21
4.1.1 - Généralités	21
4.1.2 - Clause de CCTP	22
4.2 - EFFORTS VERTICAUX EXTREMES	22
4.2.1 - Généralités	22
4.2.2 - Pression dans le PTFE	22
4.2.3 - Pression moyenne dans le caoutchouc	23
4.2.4 - Incidence sur la structure	23
4.3 - EFFORTS HORIZONTAUX LONGITUDINAUX POUR LES APPAREILS D'APPUI A POT GLISSANTS	23
4.3.1 - Généralités	23
4.3.2 - Valeurs numériques de calcul	24
4.3.3 - Charges d'exploitation à retenir pour le calcul des efforts horizontaux à l'ELS	25
4.3.4 - Incidence sur la structure	26
4.4 - EFFORTS HORIZONTAUX LONGITUDINAUX POUR LES APPAREILS D'APPUI A POT FIXES	27
4.4.1 - Effort horizontal dû à une variation de longueur du tablier	28
4.4.2 - Effort horizontal dû au freinage	29
4.4.3 - Effort horizontal de calcul maximal	29
4.4.4 - Incidence sur la structure	29
4.4.5 - Effort horizontal maximal repris par un appareil d'appui à pot fixe à l'ELS ou à l'ELU	31
4.5 - AUTRES RECOMMANDATIONS	31
4.5.1 - Justification des éléments métalliques de l'appareil d'appui à pot	31
4.5.2 - Rotations	31
4.5.3 - Efforts horizontaux transversaux	31

4.5.4 - Dimension des plaques de glissement.....	32
4.5.5 - Ouvrages particuliers.....	32
4.5.6 - Détermination des axes de glissement dans le cas des ouvrages courbes.....	32
4.5.7 - Appareil d'appui à pot et appareils d'appui en caoutchouc fretté.....	35
4.6 - EXEMPLES DE CALCULS.....	35
4.6.1 - Application numérique dans un cas simple.....	35
4.6.2 - Détermination du point fixe dans un cas complexe.....	40
Chapitre V CONTROLE DES APPAREILS D'APPUI A POT.....	47
Chapitre VI UN PROGRAMME DE CALCUL VERIFICATEUR.....	53
ANNEXE 1 CONTROLE DES APPAREILS D'APPUI.....	55
BIBLIOGRAPHIE.....	58

Chapitre I

INTRODUCTION

Les appareils d'appui à pot de caoutchouc sont des produits 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 BT4 [1] en fait une courte présentation dans son édition de 1974. Ce document donne les principales caractéristiques des appareils d'appui à pot 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 se sont faites sans véritables bases techniques autres que celles des documentations des fabricants et en fonction des informations qu'ils mettaient à la disposition des projecteurs. 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 [2] a été rédigée. D'autre part, le CEN¹ a préparé les normes pr EN 1337.1 [12], qui indique les principes généraux, et pr EN 1337.5 et 1337.2, spécifiques de ces produits [3] & [4].

Dans le prolongement des documents normatifs existants ou en préparation, 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 appareil d'appui à pot, d'un appui à un autre.

L'objet du présent guide est de constituer un complément explicitant les textes normatifs en vigueur au moment de la rédaction de la présente note (voir bibliographie et les renvois dans le texte sont signalés par []). 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 projets de textes normatifs préparés 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;
- à terme, les projets de normes CEN ont prévu une procédure de certification dont les modalités d'application et le moment de leur mise en place sont encore très flous; 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;

¹Comité Européen de Normalisation.

- enfin, il a été prévu de rédiger un programme pour la vérification de ce type d'appareil d'appui. Ce travail est en cours mais il n'a pas été possible de l'intégrer, pour le moment, dans le présent guide. Cela devrait être possible lors de la mise au point de sa version finale.

Le présent document est loin d'être parfait et nous avons été confronté à de nombreuses difficultés pour lui donner un contenu le plus complet possible. L'une des principales difficultés réside dans le fait que la plupart des normes harmonisées en préparation au niveau européen ne sont pas encore publiées et sont donc inconnues hors du cercle des experts travaillant sur le sujet dans les commissions de normalisation. Cependant ces documents en sont au stade final de leur élaboration et certains projets de normes sous forme de pr EN peuvent être commandés à l'AFNOR. Nous avons pris l'option d'en donner une courte exégèse afin que les futurs utilisateurs puissent les exploiter dès leur publication.

Chapitre II

COMPOSITION D'UN APPAREIL D'APPUI A POT DE CAOUTCHOUC

2.1 - PRINCIPES GENERAUX

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 caoutchouc freiné. 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 sans faire appel à des matériaux trop nobles.

Le principe d'un appareil d'appui à pot est d'avoir un coussin cylindrique de caoutchouc enfermé dans un pot et qui reçoit la charge par l'intermédiaire d'un piston formant couvercle du pot. Le caoutchouc 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 DIFFERENTS ELEMENTS 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 ce qui peut influencer sur la capacité et la durabilité du produit, ceux-ci sont présentés dans la norme pr EN 1337.5. Parmi ces modes de fabrication, la meilleure solution 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, aussi valable, réalise le pot par soudage d'une virole. La tenue de la virole est liée à la qualité de la soudure. Le projet de norme européenne a prévu une soudure pénétrante, mais il laisse la possibilité de faire un montage avec une qualité de soudure non pénétrante, ce qui est peu recommandé. 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 vérifiée, les platines des pots peuvent être fixées par des boulons dans la structure sous-jacente (à l'exclusion de tout autre mode de fixation: pattes soudées, par ex.). Par contre, 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 douille. Pour assurer cette possibilité de dépose, il importe de respecter la limitation de soulèvement à une valeur de 10 mm fixée par la norme pr EN 1337.1 (§ 7.6).

L'épaisseur minimale fixée par la norme pr EN 1337.5 (§ 6.3.3) pour le fond est d'un minimum de 12 mm.

Pour des applications particulières, certains pots peuvent être équipés de systèmes de jauges; celles-ci sont installées au fond du pot, dans une alvéole et permettent de suivre l'évolution de la pression subie par le coussin en caoutchouc.

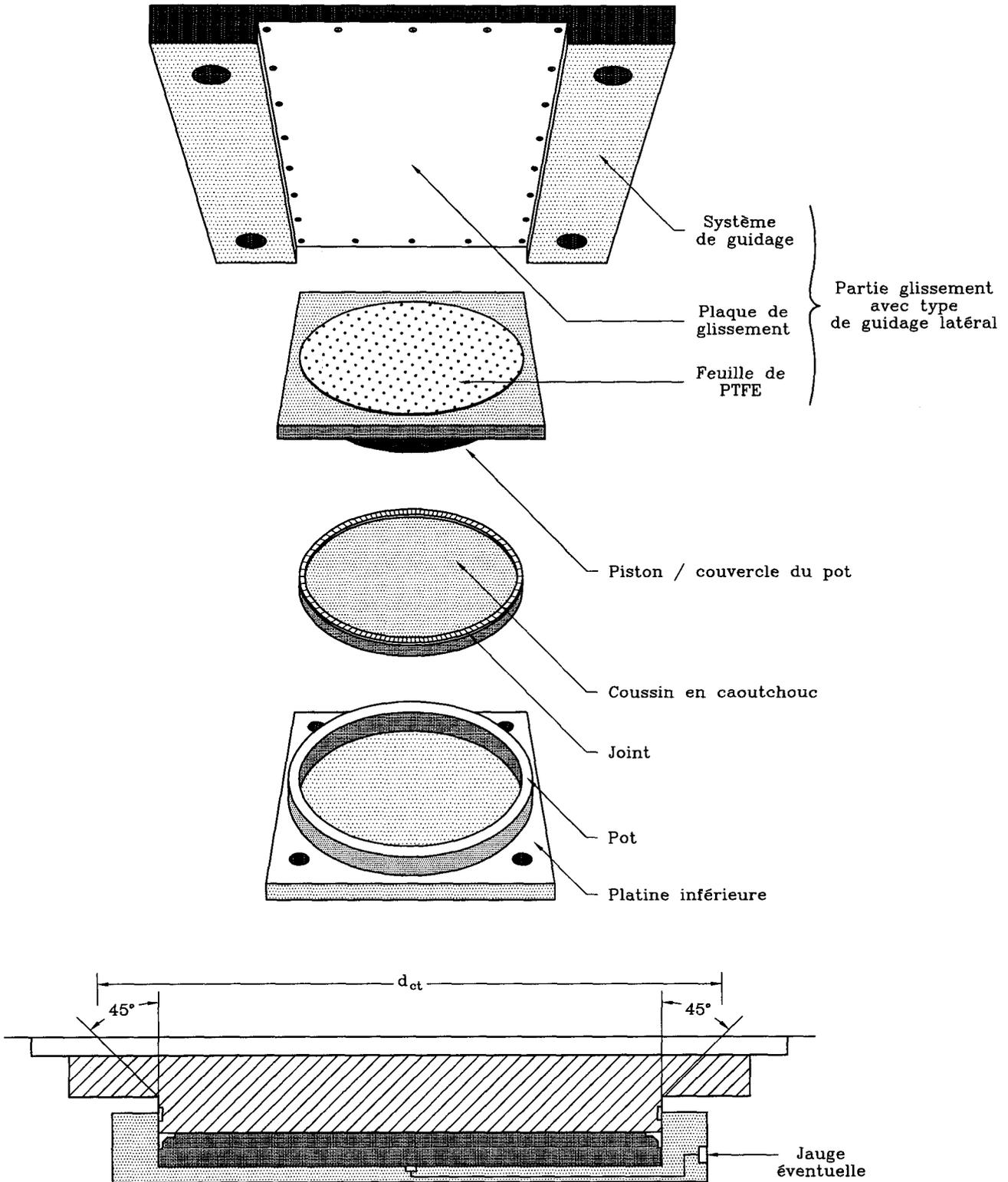


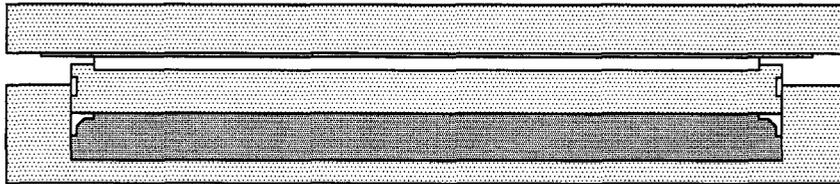
Figure 2.1 : Composition schématique d'un appareil d'appui à pot

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

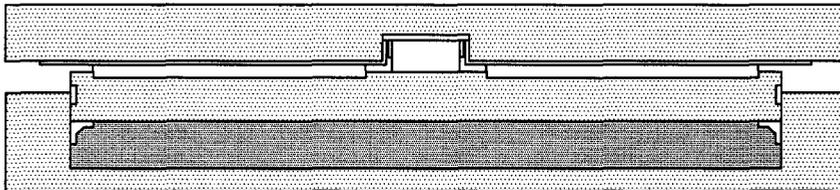
2.2.2 - Un coussin en caoutchouc

Il est généralement réalisé en caoutchouc naturel comme le prévoit la norme pr EN 1337.5 (§ 5.3), mais on peut relever dans certaines documentations techniques l'existence de coussins en Néoprène[®]. Il est vulcanisé dans des moules aux cotes du produit fini.

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



avec plaque de glissement à guidage central



avec plaque de glissement à guidage latéral

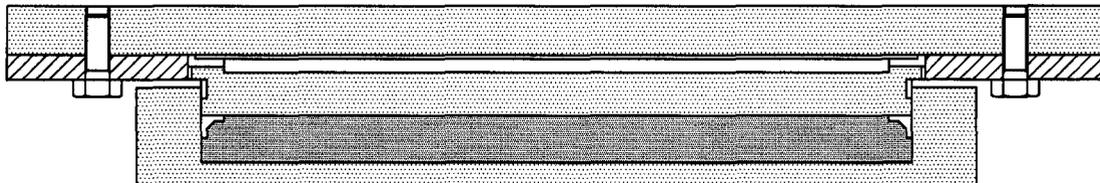


Figure 2.2 : Appareil d'appui à pot avec dispositif de glissement

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 pr EN 1337.5 (§ 7.5) ; en complément, on ajoute une graisse. Dans ces conditions, le caoutchouc, sous les pressions qu'il subit, a un comportement proche de celui d'un liquide.

2.2.3 - Le piston ou couvercle

Cette partie, en acier, ferme la boîte et confine le caoutchouc dans son volume. La forme et les dimensions sont adaptées au pot, elles sont définies dans la norme pr EN 1337.5, article 6.3.2.

Pour éviter les fuites de caoutchouc, on utilise un joint. La technologie et le matériau constitutif de ce joint sont variables d'un fabricant à l'autre et sont souvent gardés secrets. Parfois, le joint est intégré au coussin, dans d'autres solutions il fait partie du piston. 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 de caoutchouc (l'un des rares désordres que l'on peut constater sur ce type d'appareil d'appui).

2.2.4 - Les éléments de glissement

Ils sont constitués par une plaque de PTFE² collée sur le dessus du piston et glissant sur une plaque d'acier inoxydable liée à une platine supérieure en acier. Ces éléments sont définis dans la norme pr EN 1337.2.

Comme pour la platine du pot, les parties supérieures (piston ou platine de glissement) peuvent être fixées à la partie de la structure au contact de l'appareil d'appui à pot.

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. Voir photo en page de couverture.

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.

2.2.5 - Protection contre la corrosion

Toutes les parties métalliques 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 à la marque NF. 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.

Nota: en général, la pose de ces appareil 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.

2.3 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CE TYPE D'APPAREIL D'APPUI

a) Avantages

Ces appareils d'appui permettent de fortes descentes de charges sous un encombrement limité. Les capacités courantes vont de 5000 à 30000 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.

² PolyTétraFluorÉthylène ou Téflon®

Ils présentent une sécurité de fonctionnement satisfaisante. Les rares désordres portés à notre connaissance ont eu pour origine des extrusions de caoutchouc du coussin dus 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.

b) 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 oeuvre précise et rigoureuse d'un niveau inhabituel dans le domaine de la construction des ponts.

Leur fabrication nécessite des investissements importants 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 élevé comparativement à d'autres appareils d'appui, en particulier les appareils d'appui en caoutchouc fretté.

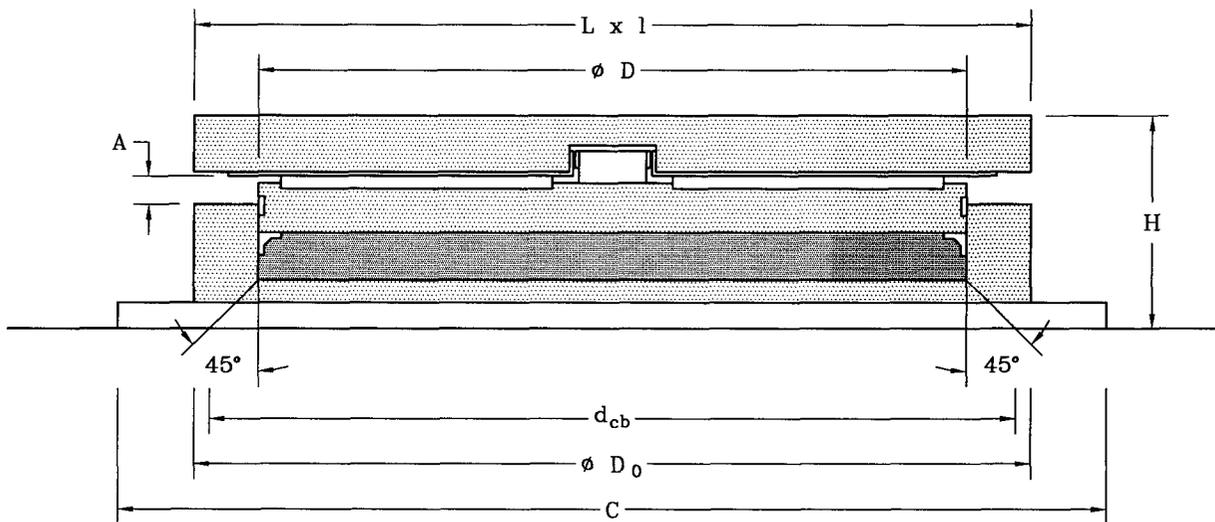


Figure 2.3: principales cotes géométriques

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 GEOMETRIQUES 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.

Chapitre III

COMMENTAIRES SUR LES NORMES PR EN 1337.2 & 1337.5 POINTS ESSENTIELS A CONSIDERER POUR LE DIMENSIONNEMENT

3.1 - PRESENTATION

Les normes T 47.816 ne sont pas des normes de produits (normes descriptives ou performanciennes) ; elles se limitent à un bordereau de données à remplir lors de la commande et à des conseils de pose. Par contre, au niveau européen, des normes harmonisées sont en phase finale de rédaction. Il s'agit des normes pr EN 1337.5 pour les appareils d'appui à pot et 1337.2 pour les parties glissantes. On notera, à ce sujet, qu'il faudra disposer de deux normes pour traiter d'appareil d'appui à pot multi et uni directionnel.

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 pour ces projets, d'où une forte opposition à leur approbation sous leur forme actuelle. 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 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'Oeuvre est de pousser à la généralisation d'emploi de produits conformes à ces futures normes.

Avertissement: les commentaires ci-après portent sur des projets encore susceptibles d'évolution. Aussi, ils sont provisoires et dès la publication des normes, ils seront révisés.

3.2 - INTRODUCTION

Ces normes sont volumineuses. Leur objet principal est la fabrication et l'indication des éléments de dimensionnement du produit.

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

3.3 - APPAREIL D'APPUI A POT

(Pr EN 1337.5)

3.3.1 - Epaisseur des aciers laminés

(Pr EN 1337.5 : § 5.2 & tableau I)

La limite d'élasticité des aciers laminés est fonction de l'épaisseur des tôles à la sortie du laminoir: Normes EN 10.025 (A 35.501) pour $E \leq 30$ mm et, pour les épaisseurs > 30 mm, EN 10.113 (A 35.505).

Ces tôles vont être retaillées et la trace de l'épaisseur d'origine risque de disparaître. Il est conseillé au Maître d'Oeuvre d'exiger:

- l'indication de la nuance de l'acier sur le plan d'exécution de l'appareil d'appui à pot,
- la fourniture des CCPU des tôles employées avec la désignation précise des pièces d'appareil d'appui à pot concernées.

Il se garantira ainsi contre l'emploi d'une nuance différente 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 l'ouverture entre les dés d'appui prévus.

3.3.2 - Valeur de la rotation et contact pot/piston

(Pr EN 1337.5 : § 6.1.2 & 6.3.2)

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 prévue par la norme T 47.816.2 ou par celui de l'annexe B de la pr 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 pr EN 1337.5 prévoit deux types de contact "simple" et "bombé"; en complément à ces deux types, nous proposons d'ajouter un type qui consisterait en un contact dit "très bombé". Voir figure 3.1.

Dans la norme, le type "simple" est admis pour une hauteur de contact "w", déterminée par le calcul, strictement inférieure à 15 mm et une amplitude des rotations inférieure ou égale à ± 0.025 rd (Cf. § 6.3.2.2). Pour éviter des concentrations d'efforts, pouvant créer une engravure du piston dans la virole, nous conseillons de réserver cette disposition aux seuls appareil d'appui à pot multi-directionnels.

Le type "bombé" est à utiliser avec un rayon "R" conforme à la norme pr EN 1337.5 (§ 6.3.2.3) tel que $R \geq [D/2, 250 \text{ mm}]$. Ce type est aussi utilisé quand l'amplitude des rotations est supérieure à ± 0.025 rd ou la hauteur de contact nécessaire $w \geq 15 \text{ mm}$.

Le type "très bombé", que nous proposons en complément à la norme pr EN, ne peut être utilisé que dans le cas où la norme pr EN autorise l'emploi du type "simple". Le type "très bombé" est une amélioration du type "simple" dans la mesure où le risque de concentration d'effort sur la périphérie de la zone de contact est réduit. Cependant l'usinage est délicat. Cette disposition permet de garder une épaisseur semblable à celle d'un appareil d'appui à pot de type "simple". La pression de Hertz et la surface de contact devront être calculées et vérifiées avec les formules employées pour le type "bombé" (Cf. § 6.3.2.3 de la norme pr EN).

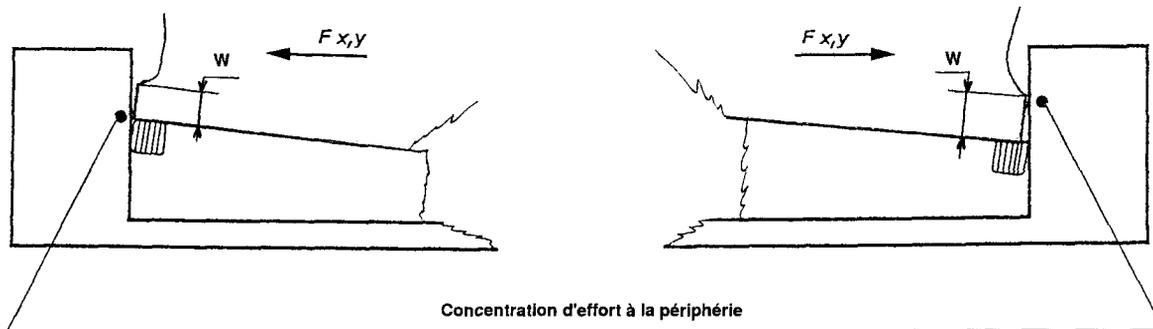
3.3.3 - Jeu pot/piston

(Pr EN 1337.5 : § 7.4)

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 § 6.3.2 de la norme pr EN 1337.5.

Type simple

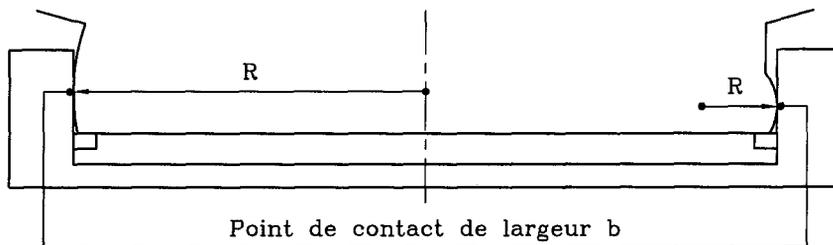


Type bombé

$$R \geq \max [D/2, 250 \text{ mm}]$$

Type très bombé

Si type simple autorisé dans la norme



Point de contact courbe et transit des efforts

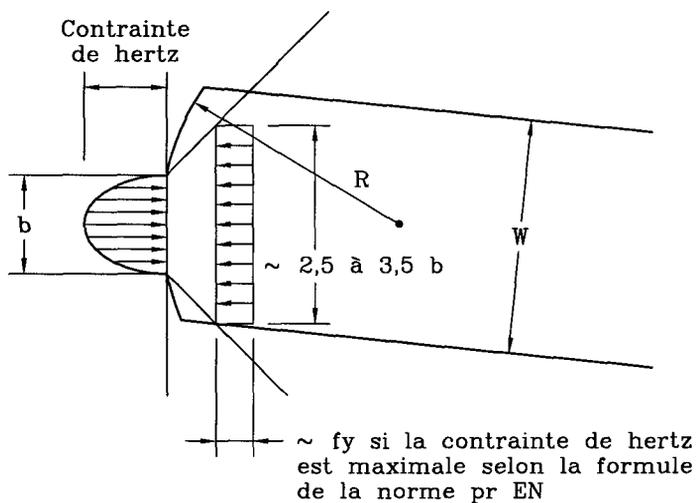


Figure 3.1: Types de contact piston/virole

Cette approximation n'est pas satisfaisante dans tous les cas et il semble souhaitable d'essayer de réduire cet intervalle à 0.5 mm, valeur facilement réalisable par les fabricants.

3.3.4 - Epaisseur du fond du pot

(Pr EN 1337.5 : § 6.3.3)

Le projet de norme fixe sa valeur minimale à au moins 12 mm. Il doit également résister aux efforts définis au § 6.3.1.3 de la pr EN 1337.5.

Cette épaisseur peut être majorée afin d'assurer une meilleure diffusion des contraintes dans le bossage (Cf. § 3.3.5 ci-après) et obtenir une amélioration du calage.

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.

3.3.5 - Surface effective de contact sur la structure

(Pr EN 1337.5 : § 6.3.4 et Annexe A de la partie 2)

Le projet de 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.

Le projet de 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 de caoutchouc et le couple résultant des efforts horizontaux au niveau du contact piston/virole et/ou celui au niveau du système de guidage.

C'est cette surface réduite qui est à prendre en compte pour appliquer l'article A.8.4 du BAEL (et l'annexe E.8). 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 monodirectionnel.

3.3.6 - Epaisseur du coussin de caoutchouc

(Pr EN 1337.5 : § 6.4.2)

La norme fixe l'épaisseur minimale du coussin en fonction de l'amplitude des rotations à appareil d'appui à pot. Or, à une géométrie donnée du coussin est liée une valeur de couple de rappel (pr EN 1337.5 : § 6.6.1). 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 (300, 450 et 600 mm de diamètre) et il ne nous 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.

Par ailleurs, la norme pr EN 1337.5, § 6.4.3, exige de garder en toute circonstance à l'ELS un contact entre le coussin et le piston. Cette vérification est complexe, cependant, dans les cas courants, le contact est assuré pour des pressions moyennes supérieures ou égales à 5 MPa pour les appareils d'appui multi directionnels et fixes et environ 10 MPa pour les multi directionnels fortement sollicités horizontalement.

Il conviendra d'être vigilant sur cette condition pour les appareils d'appui sur culée soumis à des réactions hyperstatiques et il sera loisible de considérer également le cas de charge ELU. Un soulèvement partiel peut entraîner la destruction du joint du piston.

3.3.7 - Tassement

(Pr EN 1337.5 : Annexe B)

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

3.4 - ELEMENT DE GLISSEMENT

(pr 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 surdimensionner 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. Le projet de norme Pr EN 1337.1 (§ 5.4 b) semble préconiser 40 mm (± 20 mm) en sus du mouvement total s'il est inférieur à ± 5 cm. Au-delà de cette valeur de déplacement, le texte reste imprécis. Pour notre part, nous conseillons de prévoir une valeur de 10 cm de part et d'autre (Cf. § 4.5.4 du présent guide).

3.4.3 - Coefficient de frottement

(Pr 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'ELS, ce coefficient ainsi obtenu peut être conservé pour les calculs à l'ELU.

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

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

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

(Pr EN 1337.2 : § 6.9.2)

Une vérification ne s'avère justifiée que pour les cas d'utilisation d'appareil d'appui à pot à capacité de charge importante (environ 50 000 kN) ou si le diamètre du pot et celui des plaques de PTFE sont différents ou pour des applications délicates ou particulières. Dans les autres cas, on pourra se contenter de vérifier les ordres de grandeurs.

3.4.5 - Installation

(Pr 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.

Par contre, pour les appareil 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 pr EN 1337.2 est de 0.3 %.

3.5 - SECURITE AU GLISSEMENT DE L'INTERFACE APPAREIL D'APPUI/STRUCTURE

La norme Pr EN 1337.1 (paragraphe 5.2) précise les valeurs de coefficient de frottement à retenir dans les cas courants, à savoir :

0,6/1,2 = 0,5 pour un interface acier-béton,

0,4/2 = 0,2 pour un interface acier-acier (surfaces préparées).

Ces valeurs ne s'appliquent pas aux ouvrages ferroviaires et aux ouvrages situés en zone sismique.

Chapitre IV

PRINCIPES DE CALCUL D'UN OUVRAGE COMPORTANT DES APPAREILS D'APPUI A POT

4.1 - CONTEXTE REGLEMENTAIRE.

4.1.1 - Généralités.

Avant la publication de ce document aucun texte ne traitait des calculs relatifs aux appareils d'appui à pot de caoutchouc, 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.). Le seul document qui pouvait être partiellement utilisé était le Bulletin Technique n°4 du SETRA (article 3.3 : "Cas particuliers des appareils d'appui glissants" et chapitre 7 : "Les appareils d'appui spéciaux"). Ce document, essentiellement consacré aux appareils d'appui en caoutchouc fretté, ne faisait qu'aborder le sujet et était périmé ; il avait été rédigé selon les Directives Communes de 1971 et les coefficients de frottement qu'il proposait étaient très optimistes ($1,2 \times 2\% = 2,4\%$ pour une pression de contact valant 16 MPa).

Du fait de ce vide, on observait de très grandes différences dans les règles de calcul particulières imposées par les projeteurs dans les CCTP d'ouvrages.

Au-delà des interrogations sur les valeurs numériques à retenir (contraintes limites, rotations limites, coefficients de frottement, ...), la comparaison des CCTP montre que deux points importants semblent 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 l'effort horizontal pour un appareil d'appui à pot fixe ?

En attendant la publication des normes en cours de rédaction (qui seront en cohérence avec les Eurocodes), les règles de calculs proposées ci-après donnent des réponses provisoires à ces questions.

Ces règles ont été rédigées en s'inspirant autant que possible des projets de normes tout en restant conformes aux textes réglementaires suivants en vigueur en 1995 :

- Directives Communes de 1979,
- Fascicule 61, Titre II du C.P.C. (charges d'exploitation),
- Fascicule 61, Titre V du C.P.C. (ouvrages métalliques),
- Fascicule 62, Titre I, Section I du C.C.T.G. (B.A.E.L. 91, notamment l'annexe D),
- Fascicule 62, Titre I, Section II du C.C.T.G. (B.P.E.L. 91, notamment l'annexe 8),
- Fascicule 62, Titre V du C.C.T.G. (Fondations).

4.1.2 - Clause de CCTP.

Le texte suivant (complété par une valeur numérique de μ_{\max}) peut être intégré dans le paragraphe "justification des appareils d'appui" du chapitre II "Préparation, Organisation du chantier" du C.C.T.P.

Les justifications des appareils d'appui à pot de caoutchouc, 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 de caoutchouc" du document "Les appareils d'appui à pot de caoutchouc - Guide pour l'utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires" du SETRA.

Le coefficient de frottement maximal μ_{\max} , retenu pour chaque appareil d'appui à pot glissant considéré individuellement est :

$$\mu_{\max} = (3,50\% \text{ par exemple, voir } \S 4.3)$$

4.2 - EFFORTS VERTICAUX EXTREMES.

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 du caoutchouc des appareils d'appui à pot et des dispositifs de glissement sont à mener à l'Etat Limite Ultime (Cf. pr EN 1337.5, § 6.4.1).

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'Etat Limite de Service et à l'Etat Limite Ultime.

Les conditions ci-dessous relatives au caoutchouc 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

Il faut respecter les vérifications définies au § 6.8.3 de la pr EN 1337.2 qui introduit la notion de surface réduite, à savoir :

$$\text{- à l'ELU} \quad \sigma_{\text{PTFE}} \leq \bar{\sigma}_{\text{ELU}} = 60 \text{ MPa maximum}$$

De plus, pour les températures à cœur supérieures à 30°C, il convient de réduire cette valeur de 2% par degré supplémentaire.

4.2.2.2 - Pression moyenne

Cependant, il est souhaitable que la pression répartie à l'ELS rare soit proche de 35 MPa pour minimiser le coefficient de frottement (cf. § 4.3.2).

Par souci de simplification, au niveau d'un prédimensionnement, on pourra se limiter dans les cas courants à considérer la pression moyenne dans le PTFE, avec les limites suivantes :

$$\text{ELS quasi permanent : } \sigma_{\text{PTFE}} \leq \bar{\sigma}_{\text{ELS quasi-perm.}} = 25 \text{ à } 30 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS rare : } \sigma_{\text{PTFE}} \leq \bar{\sigma}_{\text{ELS rare}} = 35 \text{ à } 40 \text{ MPa}$$

4.2.3 - Pression moyenne dans le caoutchouc.

$$\text{- ELU. } \sigma_c \leq \bar{\sigma}_{\text{ELU}} = 47 \text{ MPa}$$

Cf. pr EN 1337.5, § 6.4.1.

4.2.4 - Incidence sur la structure.

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

4.3 - EFFORTS HORIZONTAUX LONGITUDINAUX POUR LES APPAREILS D'APPUI A 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, voir § 4.6.2), le seuil de glissement peut ne jamais être atteint à l'ELS. L'effort horizontal maximal mobilisable H₁ 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 :

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

où - μ est le coefficient de frottement 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 de l'appareil d'appui à pot qui correspond à un éventuel défaut d'horizontalité (PP positif dans la formule ci-dessus).

L'effort éventuel dû au freinage sur le tablier est couvert par la formule ci-dessus pour les appareils d'appui à pot glissants. Voir § 4.4.2 ci-après.

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 pr 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 Etats Limites de Service et aux Etats Limites Ultimes, en considérant que σ_p est à l'ELS.

Conformément au paragraphe 6.7 de la norme pr En 1337-2, dans les zones où la température minimale réelle de l'appui ne descend pas en dessous de -5° Celcius, les coefficients de frottement du tableau ci-dessous peuvent être multipliés par un facteur 2/3.

A priori, cette clause ne concerne pas la France métropolitaine (Cf. § 3.4.3).

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

Coefficients de frottement de calcul.

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 sur dimensionner 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.

4.3.2.3 - Coefficients de frottement sur les guides.

La norme pr 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 : 0,08
- matériaux composites : 0,20 (cette valeur est à retenir en l'absence d'essai complémentaire prenant en compte le vieillissement).

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

4.3.2.4 - Coefficients simplifiés.

Pour les cas généraux, par souci de simplification, nous proposons de ne retenir qu'une seule valeur de coefficient de calcul applicable à tous les appareils d'appui à pot considérés individuellement.

Les calculs peuvent être menés à l'ELS et à l'ELU avec :

$$\mu_{\max} = 3,50\% \text{ (coefficient de frottement maximal d'un appareil d'appui à pot pour une pression moyenne de contact valant 25 MPa à l'ELS)}$$

$$PP = 0,30\% \text{ (précision de pose de l'appareil d'appui à pot, PP positif)}$$

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

4.3.3 - Charges d'exploitation à retenir pour le calcul des efforts horizontaux à l'ELS.

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 correspondant aux combinaisons rares de l'ELS est sécuritaire, mais ne conduit en général qu'à une faible majoration des actions (pour les piles de l'exemple du § 4.6.1, les charges verticales des combinaisons quasi-permanentes et fréquentes de l'ELS représentent respectivement 85% et 93%³ des charges verticales maximales des combinaisons rares de l'ELS).

Par souci de simplification, il est donc loisible et sécuritaire de déterminer les efforts horizontaux extrêmes à l'ELS à partir des charges verticales extrêmes des combinaisons rares de l'ELS.

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 (combinaisons fréquentes de l'ELS par exemple).

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 (combinaisons de l'ELS rare).*

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 leur valeurs caractéristiques (durée inférieure à 1 heure selon le second commentaire de l'article A.4.3.41 du B.A.E.L. 91),*

³ Ces ratios peuvent être différents pour une structure moins courante (un pont entièrement métallique, par ex.)

il apparaît conservateur de calculer les efforts horizontaux à partir des charges verticales maximales des combinaisons rares de l'ELS.

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, 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 (< 1 heure) 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 des combinaisons quasi-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 des combinaisons quasi-permanentes et rares de l'ELS. Le calcul peut être conduit par exemple avec les combinaisons fréquentes de l'ELS. (au sens de l'article 5.2.2 des D.C. de 1979).

③ pour un appui très souple pour lequel le seuil de glissement ne serait jamais atteint à l'ELS, 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 - Etat 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.

4.3.4.2 - Etat Limite Ultime.

⇒ Combinaisons fondamentales.

Les sollicitations de calcul à considérer sont selon l'article 7.2.1.1 des Directives Communes de 1979 :

$$\gamma_{F3} S (\gamma_{FI} G_{MAX} G_{MAX} + \gamma_{FI} G_{MIN} G_{MIN} + \gamma_{FI} Q_i Q_{ik} + \gamma_{FI} Q_i \sum_{i>1} \psi_{oi} Q_{ik})$$

Les valeurs numériques des coefficients de frottement définies au § 4.3.2. sont conservées. Les simplifications admises à l'ELS pour la détermination des efforts horizontaux sont également applicables dans ce cas.

Cas des calculs au second ordre : Dans ce cas la pile peut être considérée comme souple. 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,
- effort vertical : calculé selon l'effet le plus défavorable, en prenant en compte ou pas les charges d'exploitation.

⇒ combinaisons accidentelles.

Les sollicitations de calcul à considérer sont, selon l'article 7.2.2 des Directives Communes de 1979 :

$$S (F_A + G_{MAX} + G_{MIN} + \psi_1 Q_{1k} + \sum_{i>1} \psi_{2i} Q_{ik})$$

avec $\psi_1 = 0.6$ pour les charges d'exploitation du système A pour un pont de première classe (valeur fréquente).

L'action accidentelle F_A considérée peut être due à une augmentation sensible du coefficient de frottement (échappement de PTFE, corrosion 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.

Pour l'étude des appareils d'appui en caoutchouc fretté non glissant, il est fait une distinction entre efforts "instantanés" et efforts "différés".

Pour les appareils d'appui à pot posés sur des appuis très rigides ou de rigidité intermédiaire les efforts horizontaux (même ceux dus à des charges permanentes) ne sont pas constants. Ils sont diminués, voire annulés, par les glissements occasionnés par les variations de longueur du tablier. Pour les calculs des fondations de ces piles ou culées, il n'y a donc pas lieu de retenir d'efforts horizontaux "différés". La totalité de l'effort horizontal doit être considérée comme "instantané".

Au contraire pour les appareils d'appui à pot posés sur des appuis très souples pour lesquels aucun glissement n'est envisageable, il y a lieu de faire une distinction entre efforts "instantanés" et efforts "différés".

4.4 - EFFORTS HORIZONTAUX LONGITUDINAUX POUR LES APPAREILS D'APPUI A 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 est obtenu en considérant l'équilibre longitudinal (ou éventuellement transversal) de la structure.

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

Ces coefficients de calculs différents traduisent deux phénomènes :

- 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

Il faut également tenir compte de la précision de pose des appareils d'appui à pot (défaut d'horizontalité) qui peut jouer un rôle favorable ou défavorable.

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

Les règles ci-après sont inspirées du projet de norme EN 1337-1 (§ 6.2)

Dans le cas d'un ensemble d'appareils d'appui à pot, pour le calcul des efforts horizontaux repris par les appareils d'appui à pot fixes, les coefficients de frottement de calcul à retenir pour les appareils d'appui à pot glissants sont les suivants :

$$\begin{aligned} \mu_a &= 0,5 (\mu_{\max} + PP) (1 + \alpha) \\ \mu_r &= 0,5 (\mu_{\max} - PP) (1 - \alpha) \end{aligned}$$

μ_{\max} , μ_a et μ_r sont les coefficients de frottement des appareil d'appui à pot glissants.

μ_{\max} coefficient de frottement maximal retenu pour un appareil d'appui à pot considéré individuellement

(Cf. § 4.3).

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.

PP est la précision de pose de l'appareil d'appui à pot (PP positif dans les formules ci-dessus).

"n" est le nombre d'appareil d'appui à pot glissants intervenant dans l'équilibre de la structure (Cf. pr EN 1337.1, § 6.2).

α est un coefficient de dégressivité dépendant de "n".

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

Exemple 1 : structure à deux travées avec deux appareils d'appui à pot glissants par culée et deux appareils d'appui à pot fixes sur la pile centrale : n = 4 d'où $\alpha = 1$

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

et

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

soit $\Delta\mu = \mu_{\max} + PP$ (exemple $\Delta\mu = 3,8\%$ pour $\mu_{\max} = 3,5\%$ et $PP = 0,3\%$)

Exemple 2 : structure à six travées avec deux appareils d'appui à pot fixes sur la pile centrale et deux appareils d'appui à pot glissants pour chacune des culées et chacune des autres piles :

$n = 12$ d'où $\alpha = 0,5$

$$\mu_a = 0,5 (\mu_{\max} + PP) (1 + 0,5) = 0,75 (\mu_{\max} + PP)$$

et

$$\mu_r = 0,5 (\mu_{\max} - PP) (1 - 0,5) = 0,25 (\mu_{\max} - PP)$$

soit $\Delta\mu = (0,5 \mu_{\max}) + PP$ (exemple $\Delta\mu \approx 2\%$ pour $\mu_{\max} = 3,5\%$ et $PP = 0,3\%$)

Commentaire : Dans le cas d'un ouvrage comportant de nombreux appuis, ce coefficient α peut s'avérer pénalisant. En effet, la probabilité que tous les appareils d'appui d'un coté du point fixe soit bloqués alors que ceux de l'autre coté glissent paraît excessivement faible. Dans ce cas particulier, le projeteur est invité à apprécier la nécessité de modifier la valeur de α .

4.4.2 - Effort horizontal dû au freinage.

Conformément au paragraphe 6.7 de la norme pr EN 1337-2, les appareils d'appui à pot 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 fixes.

Cette hypothèse est pessimiste car les appareils d'appui glissant participent à la reprise des efforts de freinage dans une proportion non quantifiable.

4.4.3 - Effort horizontal de calcul maximal.

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

Par souci de simplification, pour un appareil d'appui à pot fixe, les efforts horizontaux provoqués par une variation de longueur du tablier peuvent être calculés en retenant pour les appuis glissants les charges verticales des combinaisons quasi permanentes de l'ELS. Si leurs influences sont importantes, il sera pris en compte les frottements sur les guides dus à la courbure et au vent.

Le CCTP pourra proposer d'autres charges verticales en fonction des particularités de l'ouvrage (ouvrages courts, etc.).

4.4.3.2 - Cumul des efforts horizontaux.

Bien qu'ils ne correspondent pas à des cas de charge concomitants, il est loisible de cumuler les efforts résultants de la variation de longueur de tablier calculés comme indiqué précédemment et les efforts dus au freinage (ou au vent).

4.4.4 - Incidence sur la structure.

4.4.4.1 - Etat 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.

4.4.4.2 - Etat Limite Ultime.

⇒ Combinaisons fondamentales.

Les sollicitations de calcul à considérer sont selon l'article 7.2.1.1 des Directives Communes de 1979 :

$$\gamma_{F3} S (\gamma_{F1} G_{MAX} + \gamma_{F1} G_{MIN} + \gamma_{F1} Q_{1k} + \gamma_{F1} \sum_{i>1} \psi_{oi} Q_{ik})$$

Les valeurs numériques des coefficients de frottement définis au § 4.4.1.2 sont conservées.

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. Ces efforts proviennent :

- . des variations de longueur du tablier (Cf. § 4.4.1) en considérant les charges verticales quasi permanentes sur les appareils d'appui à pot glissants
- . du freinage (cf. § 4.4.2) ou du vent.

Le C.C.T.P. 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 à considérer sont, selon l'article 7.2.2 des Directives Communes de 1979 :

$$S (F_A + G_{MAX} + G_{MIN} + \psi_1 Q_{1k} + \sum_{i>1} \psi_{2i} Q_{ik})$$

avec $\psi_1 = 0.6$ pour les charges d'exploitation du système A pour un pont de première classe (valeur fréquente).

L'action accidentelle F_A considérée peut être due à une augmentation sensible du coefficient de frottement (échappement de PTFE, corrosion, peinture de la plaque de glissement, etc.). Dans ce cas la valeur numérique du coefficient de frottement μ_a définie au § 4.4.1 est à ajouter **pour un seul appareil d'appui à pot à la fois** par celle du frottement partiel métal/métal qui peut facilement atteindre globalement 10 %. Les valeurs numériques des coefficients de frottement μ_r ne sont pas modifiées.

L'action accidentelle peut également être due à un séisme ou à un choc de véhicule ou de bateau. Dans ce cas, les coefficients de frottements définis au § 4.4.1 sont à conserver.

Les efforts horizontaux après rupture de l'appareil d'appui à pot fixe doivent être repris, par exemple par des butées.

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

4.4.4.3 - Domaine d'application.

Les présentes recommandations concernant la détermination des efforts horizontaux pour un appareil d'appui fixe associé à des appareils d'appui à pot glissants sont applicables à toute justification faisant intervenir à la fois des appareils d'appui fixes et des appareils d'appui glissants.

Par exemple, pour le calcul des longueurs des plaques de glissement ou pour la détermination des souffles de joint de chaussée (Cf. § 4.6.2), le calcul doit également être mené à partir des charges verticales quasi permanentes et avec les coefficients de frottement définis au paragraphe 4.4.1.2.

4.4.5 - Effort horizontal maximal repris par un appareil d'appui à pot fixe à l'ELS ou à l'ELU

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 à 5 % de la charge verticale nominale admissible et supérieur aux sollicitations horizontales de calcul. Dans ce calcul, l'effort horizontal pour l'appareil d'appui sera majoré de l'influence du vent et de celle des autres appareils d'appui fixes de la ligne d'appui.

NOTA IMPORTANT

Sur un appui remplissant la fonction d'appui fixe, l'effort horizontal longitudinal résultant va se répartir presque intégralement sur l'un des appareils d'appui jouant le rôle d'appareil d'appui fixe (cas d'un appareil d'appui fixe avec un ou plusieurs appareils d'appui mono directionnel bloquant les mouvements longitudinaux, par ex.).

En effet, le jeu (pot/piston et/ou entre les éléments de glissements) des tolérances de fabrication ne permettent pas la concomitance des contacts sur tous les appareils d'appui de la ligne d'appui concernée. Si la pile est souple, par simplification, on pourra effectivement considérer que l'effort horizontal se répartit sur deux appareils d'appui simultanément (et seulement deux).

4.5 - AUTRES RECOMMANDATIONS

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

En attendant la parution des normes pr EN 1337.2 et 1337.5, les éléments métalliques de l'appareil d'appui à pot doivent être justifiés selon le Titre V Fascicule 61 [8].

4.5.2 - Rotations.

Par rapport aux possibilités de rotation des produits fixées par la norme pr EN, nous recommandons de limiter la rotation des appareils d'appui à pot à environ 0,01 radian à l'Etat Limite de Service.

4.5.3 - Efforts horizontaux transversaux.

Des frottements peuvent également se produire sur les guides longitudinaux :

- sous l'effet d'effort transversaux (vent),
- pour des ouvrages courbes (voir § 4.5.6),
- ou à la suite d'une erreur dans l'orientation de l'axe de glissement à la pose (Cf. pr EN 1337.2, § 9 et T 47.816)

Le paragraphe 4.3.2.3 précise les valeurs de coefficient de frottement à prendre en compte pour les guides. Les efforts longitudinaux correspondant se cumulent à ceux déterminés aux paragraphes 4.3 & 4.4.

Si la ligne d'appui comporte plusieurs appareils d'appui, il est recommandé de ne disposer qu'un seul appareil d'appui unidirectionnel ou fixe par ligne d'appui.

4.5.4 - Dimension 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).

Le calcul des variations de longueur du tablier peut être mené selon le chapitre II du document "Joints de chaussées des ponts routes" du SETRA (juillet 86). Un calcul en fourchette doit être mené pour la détermination du point fixe (voir la démarche de calcul développée dans l'exemple du § 4.6.2 ci-après).

Des surlongueurs de 10 cm peuvent être prévues de part et d'autre dans le sens du glissement principal (Cf. § 3.4.2).

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 :

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

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

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 ($\vec{\lambda}_0 = 0$) et en rotation autour de l'axe vertical dirigé par \vec{k} ($\vec{\omega}_{0k} = 0$).

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

$$\vec{\lambda}_1 = \tau (\vec{G}_0 \vec{G}_1)$$

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. Nous ne nous intéresserons ci-après qu'aux composantes du déplacement de Σ_1 dans le plan de normale \vec{k} (plan de l'ouvrage). Nous ne considérons donc pas les termes en \vec{k} , en $\vec{i} \wedge \Gamma \vec{G}_1$ et en $\vec{j} \wedge \Gamma \vec{G}_1$.

* De plus l'appui en Σ_0 est bloqué à la rotation autour de \vec{k} . Donc $-\vec{\omega}_0 \wedge \vec{G}_0 \vec{G}_1 = 0$

* Nous négligeons les déformations d'effort tranchant, 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
$$\vec{\omega}_1 = \int_{s_0}^{s_1} \left(-\frac{C}{GK} \vec{i} - \frac{M_y}{EI_y} \vec{j} - \frac{M_z}{EI_z} \vec{k} \right) d\sigma$$

Nous ne nous intéressons 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 :

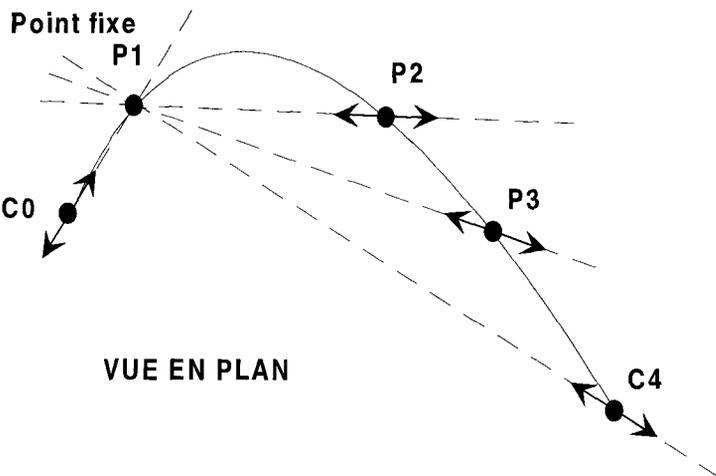
$$\frac{N}{ES} = \text{constante} = \varepsilon \quad \text{et} \quad M_z = 0 \quad (\text{précontrainte centrée}).$$

La translation en Σ_1 devient alors
$$\vec{\lambda}_1 = \varepsilon \cdot \int_{s_0}^{s_1} \vec{i} \cdot d\sigma \quad \text{c'est à dire} \quad \vec{\lambda}_1 = \varepsilon (\vec{G}_0 \vec{G}_1)$$

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

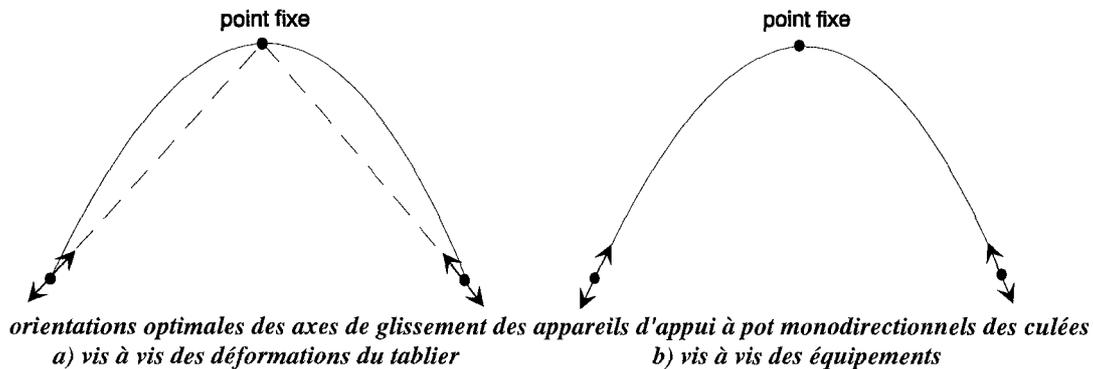
conclusion

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.



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.



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.).

Pour les ponts rail, 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 monodirectionnels 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 caoutchouc fretté).

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

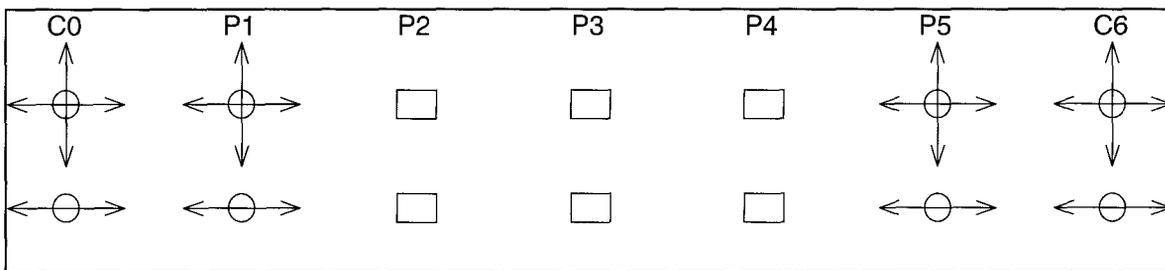
Dans ce cas, les appareils d'appui en caoutchouc fretté sont placés vers le milieu de l'ouvrage sur tous les appuis où ils peuvent encaisser en se déformant les déplacements du tablier. Ils assurent donc deux fonctions :

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

Des appareils d'appui à pot glissants peuvent être placés sur les autres appuis. En effet, du fait des faibles pressions de contact (15 MPa environ), l'utilisation d'appareil d'appui en caoutchouc 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 caoutchouc fretté est mené selon le paragraphe 4.4.2.

Le calcul de la répartition de ces efforts horizontaux entre les différents appuis équipés d'appareils d'appui en caoutchouc fretté est mené selon les règles de calcul exposées au paragraphe 8 du Bulletin Technique n°4 [1] en prenant en compte les rigidités des fondations et des appuis.



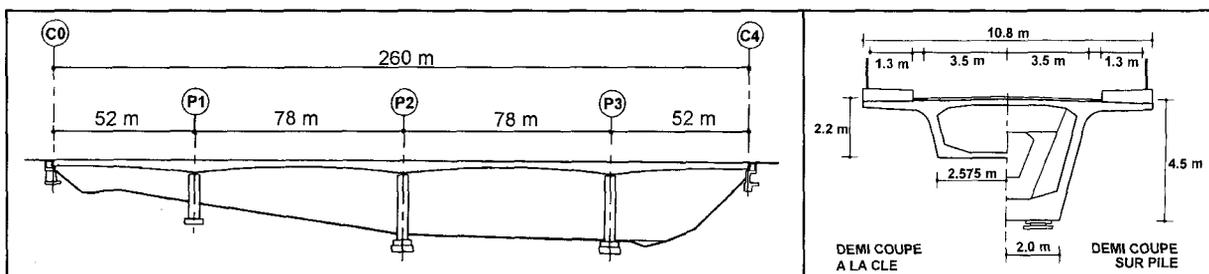
4.6 - EXEMPLES DE CALCULS.

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

Au moment de la rédaction de ce chapitre, la vérification des appareils d'appui à pot comportait une part importante de calcul à l'ELS, conformément au projet de norme rédigé alors. Depuis, la pr EN 1337.5 a évolué vers une part plus grande de calcul à l'ELU. Nous n'avons pu reprendre tous les calculs de cet exemple, ce qui sera fait lors d'une prochaine version. Quoiqu'il en soit, le principe de la démonstration subsiste même si les résultats sont différents.

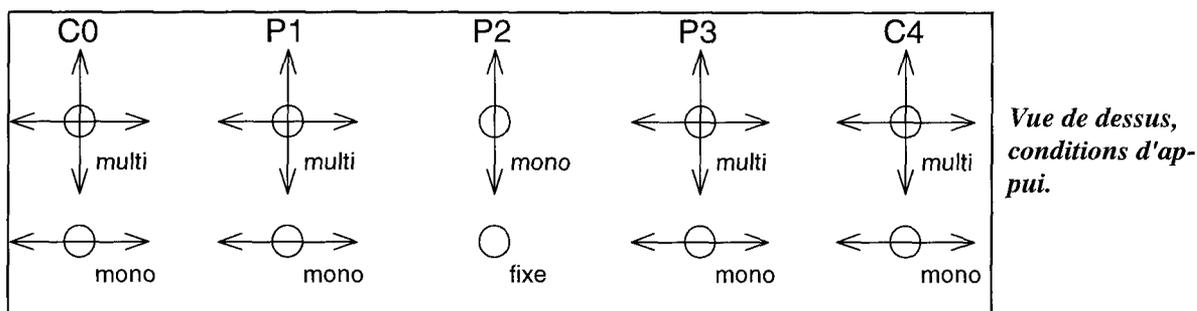
4.6.1 - Application numérique dans un cas simple.

a) Caractéristiques de l'ouvrage.



Elévation.

Coupe transversale.



Descentes des 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
ELS. combinaison quasi-permanente	2,87	17,87	18,31	17,87	2,87
ELS. combinaison fréquente (réactions maximales)	3,87	19,96	20,48	19,96	3,87
ELS. combinaison rare (réactions minimales)	2,47	17,26	17,92	17,26	2,47
ELS. combinaison rare (réactions maximales)	4,67	21,35	22,03	21,35	4,67
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	17,32	17,89	17,32	2,33
ELU combinaison fondamentale (réactions maximales)	6,11	28,84	29,62	28,84	6,11

Descentes des 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
ELS. combinaison quasi-permanente	1,43	8,93	9,15	8,93	1,43
ELS. combinaison fréquente (réactions maximales)	1,96	10,12	10,43	10,12	1,96
ELS. combinaison rare (réactions minimales)	1,67	9,43	9,59	9,43	1,67
ELS. combinaison rare (réactions maximales)	2,39	10,92	11,35	10,92	2,39
ELU combinaison fondamentale (réactions minimales)	1,10	8,36	8,52	8,36	1,10
ELU combinaison fondamentale (réactions maximales)	3,13	17,78	15,29	17,78	3,13

Rotations.

Rotations en radians	C0	P1	P2	P3	C4
ELS. combinaison rare	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 des Etats Limites de Service et des Etats Limites Ultimes définis dans les Directives Communes de 1979, dans le Fascicule 61, Titre II, du C.P.C., dans l'annexe D du B.A.E.L. 91 et dans l'annexe 8 du B.P.E.L. 91.

L'ouvrage comporte deux voies de circulation et deux trottoirs.

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'appareil 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 ici, les cas dimensionnants pour les charges d'exploitation sont les suivants (ce calcul simplifié n'aborde pas l'étude de l'effet du vent) :

- efforts verticaux :

pour un appareil d'appui à pot

1 voie chargée avec A(1) + 1 trottoir chargé

pour une paire d'appareil d'appui à pot

2 voies chargées avec A(l) + 2 trottoirs chargés

- rotations :

2 voies chargées avec A(l) + 2 trottoirs chargés

Les justifications ci-après sont menées en suivant le plan des paragraphes 4.2 à 4.5.

b) Efforts verticaux pour les appareils d'appui à pot

Soient S_c la surface de caoutchouc dans le pot et S_p la surface de contact du PTFE

Pression moyenne dans le PTFE (pour les appareil d'appui à pot glissants uniquement)

Au niveau d'un calcul de prédimensionnement, la surface de contact S_p doit vérifier :

- ELS permanent $\sigma_{PTFE} \leq \bar{\sigma}_{ELS \text{ permanent}} = 30 \text{ MPa environ}$

C0 et C4 : $S_p \geq (1,43 / 30) \text{ m}^2$

P1 et P3 : $S_p \geq (8,93 / 30) \text{ m}^2$

(il est souhaitable que la pression soit proche de cette valeur, voir paragraphe 4.3.2).

- ELS rare $\sigma_{PTFE} \leq \bar{\sigma}_{\text{maxi ELS rare}} = 40 \text{ MPa environ}$

C0 et C4 : $S_p \geq (2,39 / 40) \text{ m}^2$

P1 et P3 : $S_p \geq (10,92 / 40) \text{ m}^2$

Pression moyenne dans le caoutchouc.

La surface de caoutchouc S_c d'un appareil d'appui à pot doit vérifier :

- ELU. $\sigma_c \leq \bar{\sigma}_{\text{maxi ELU}} = 47 \text{ MPa}$

C0 et C4 : $S_c \geq (3,13 / \bar{\sigma}_{\text{maxi ELU}}) \text{ m}^2$

P1 et P3 : $S_c \geq (17,78 / \bar{\sigma}_{\text{maxi ELU}}) \text{ m}^2$

P2 : $S_c \geq (15,29 / \bar{\sigma}_{\text{maxi ELU}}) \text{ m}^2$

Soulèvement.

La condition de non soulèvement est vérifiée (cf. § 3.4.6).

c) Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot glissants.

Nous retenons $\mu_{\text{max}} = 3,5\%$ et $PP = 0,3\%$ d'où $H = (\mu_{\text{max}} + PP) \times V = 3,8\% \times V$

Nous retenons les charges verticales des combinaisons rares de l'ELS. (pour les piles, les charges verticales des combinaisons quasi-permanentes et fréquentes représentent respectivement 85% et 93% des charges verticales des combinaisons rares de l'ELS).

Calcul préliminaire :

Nous avons appliqué une force $H = (\mu_{\text{max}} + PP) \times V$ 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.

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

$$\begin{aligned} \text{C0 et C4 :} & \quad H = 3,8\% \times V = 3,8\% \times 2,39 = 0,09 \text{ MN} \\ \text{P1 et P3:} & \quad H = 3,8\% \times V = 3,8\% \times 10,92 = 0,42 \text{ MN} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{C0 et C4 :} & \quad H = 3,8\% \times V = 3,8\% \times 4,67 = 0,18 \text{ MN} \\ \text{P1 et P3:} & \quad H = 3,8\% \times V = 3,8\% \times 21,35 = 0,81 \text{ MN} \end{aligned}$$

d) Efforts horizontaux longitudinaux pour les appareils d'appui à pot fixes.

Variations de longueur du tablier.

Il y a huit appareils d'appui à pot glissants d'où $n = 8$ et donc $\alpha = (16 - 8) / 12 = 2/3$

$$\begin{aligned} \mu_a &= 0,5 (\mu_{\max} + PP) (1 + 2/3) = 5/6 (\mu_{\max} + PP) = 3,17\% \\ \text{et} \quad \mu_r &= 0,5 (\mu_{\max} - PP) (1 - 2/3) = 1/6 (\mu_{\max} - PP) = 0,53\% \\ \text{soit} \quad \Delta\mu &= (2/3 \mu_{\max}) + PP = 2,64\% \end{aligned}$$

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'ELS vaut :

$$H = [3,17\% \times (2,87 + 17,87)] - [0,53\% \times (2,87 + 17,87)] = 0,54 \text{ MN}$$

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. Ces efforts sont ici supérieurs à 5% de la charge verticale nominale de l'appareil d'appui à pot.

e) Rotations.

Les rotations calculées à l'ELS sont inférieures à 0,01 rad.

f) 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.

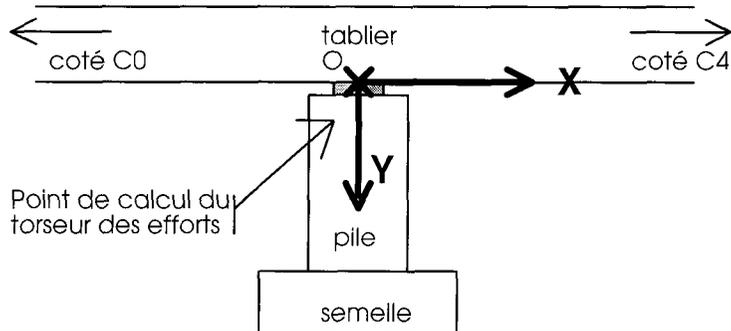
g) Incidence sur la structure.

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 ($H_{z_{\max}}$) :

Cx_{maxi}, Hx, Hz, Vy (effet du vent ou des charges excentrées)
 Hx_{maxi}, Hx, Vy, Cx (effet du vent)

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

⇒ Convention de signe.



⇒ Efforts appliqués en tête de pile ou de culée à l'ELS.

C0 et C4 :	$Vy_{max} = 4,67 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,18 \text{ MN}$
	$Vy_{mini} = 2,47 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,09 \text{ MN}$
P1 et P3 :	$Vy_{max} = 21,35 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,81 \text{ MN}$
	$Vy_{mini} = 17,26 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,66 \text{ MN}$
P2 :	$Vy_{max} = 22,03 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,54 \text{ MN}$
	$Vy_{mini} = 17,92 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,54 \text{ MN}$

⇒ Efforts appliqués en tête de pile ou de culée à l'ELU - Combinaisons fondamentales.

C0 et C4 :	$Vy_{max} = 6,11 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,23 \text{ MN}$
	$Vy_{mini} = 2,33 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,09 \text{ MN}$
P1 et P3 :	$Vy_{max} = 28,84 \text{ MN}$	$Hx = \pm 1,10 \text{ MN}$
	$Vy_{mini} = 17,32 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,66 \text{ MN}$
P2 :	$Vy_{max} = 29,62 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,74 \text{ MN} (= 1,35 \times (2,87 + 17,87) \times 2,64\%)$
	$Vy_{mini} = 17,89 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,74 \text{ MN}$

⇒ Efforts appliqués en tête de pile ou de culée à l'ELU - Combinaisons accidentelles.

Nous retenons 10% pour un des deux appareils d'appui à pot de l'appui considéré.

C0 et C4 :	$Vy_{max} = 3,76 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,26 \text{ MN}$
	$Vy_{mini} = 2,30 \text{ MN}$	$Hx = \pm 0,16 \text{ MN}$
P1 et P3 :	$Vy_{max} = 19,75 \text{ MN}$	$Hx = \pm 1,36 \text{ MN} (= (10\% + 3,8\%) \times 19,75 / 2)$
	$Vy_{mini} = 16,90 \text{ MN}$	$Hx = \pm 1,17 \text{ MN}$

Nous retenons 10% pour un des deux appareils d'appui à pot de P1.

P2 :	$Vy_{max} = 20,27 \text{ MN}$	$Hx = \pm 1,30 \text{ MN}$
	$Vy_{mini} = 17,36 \text{ MN}$	$Hx = \pm 1,30 \text{ MN}$

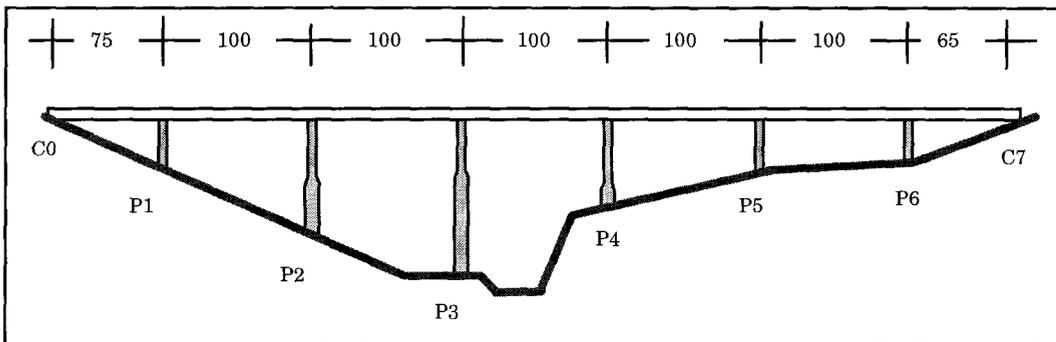
$$(Hx = (3,76 \times 3,17\%) + (19,75/2 \times (10\% + 3,17\%)) - (19,75 \times 0,53\%) - (3,76 \times 0,53\%)) = 1,30$$

4.6.2 - Détermination du point fixe dans un cas complexe.

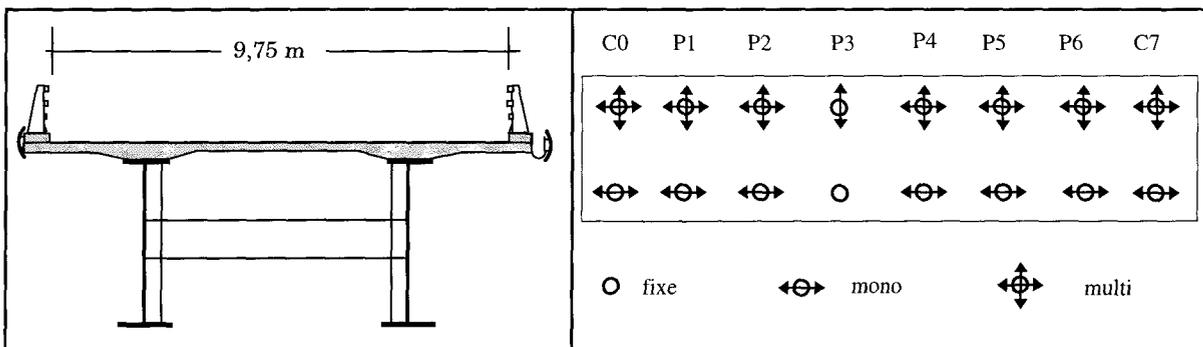
Cet exemple traite de la détermination en fourchette du point fixe ou "point de déplacement nul" d'un tablier. Il n'existe pas un seul point fixe mais une plage de longueur à l'intérieur de laquelle se déplace ce point. Les deux positions extrêmes du point de déplacement nul sont à prendre en compte 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.



Elévation



Coupe transversale

Disposition des appareils d'appui à pot

appareil d'appui à pot	Type	Réaction verticale à vide (MN)	Rigidité MN/m
C0	glissant	3,88	300,00
P1	glissant	15,42	7,00
P2	glissant	15,45	5,00
P3	fixe	15,38	3,25
P4	glissant	15,25	5,00
P5	glissant	15,68	6,50
P6	glissant	14,63	8,00
C7	glissant	3,05	300,00

Nota : 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 :

$$R_i = \frac{1}{S_i^F + S_i^P + S_i^A}$$

Avec :

S_i^F = souplesse de la fondation,

S_i^P = souplesse de la pile,

S_i^A = souplesse des appareils d'appui.

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. Nous obtenons une première position du point fixe et des efforts horizontaux qui seront écrêtés aux seuils de glissement.

Dans la deuxième itération :

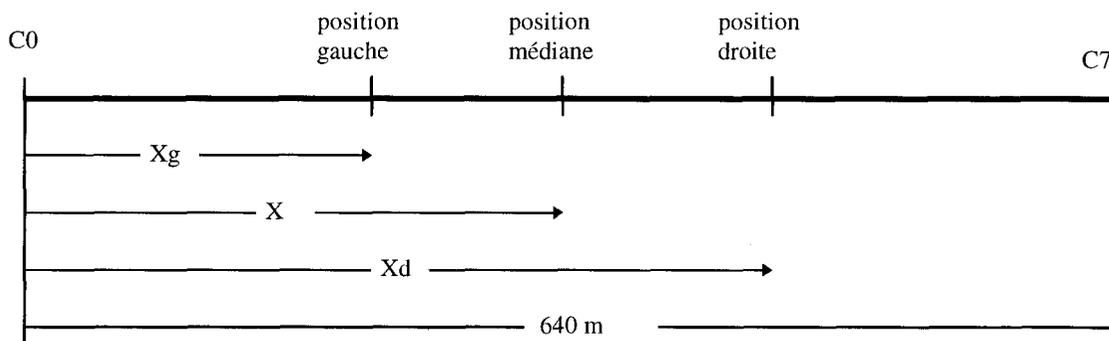
- les appareils d'appui à pot pour lesquels le seuil de glissement n'a pas été atteint continuent à être considérés comme non glissants, l'effort horizontal est le produit de la rigidité R_i de l'appui et du déplacement δ_i : $H_i = R_i \delta_i$
- les appareils d'appui à pot pour lesquels le seuil de 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.

Nous recommençons l'opération 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.

Nous déterminons 3 positions du point fixe :

- une position médiane en adoptant des coefficients de frottement identiques sur tous les appareils d'appui à pot (coefficient $\mu = \mu_{\max} + PP$).
- deux positions extrêmes en adoptant des coefficients de frottement différents sur les appareils d'appui à pot. Nous prenons 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.



4.6.2.3 - Position médiane du point fixe.

Nous retenons le même coefficient de frottement μ pour tous les appareils d'appui à pot glissants :

$$\mu = \mu_{\max} + PP = 3,5\% + 0,3\% = 3,80\%$$

Variations linéaires de longueur du tablier (température, retrait) : $\epsilon_r = 5.10^{-4}$

première itération :

tous les appareils d'appui à pot supposés fixes
position du point fixe : X = 321.16 m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal. après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	3,80	0,15	48,17	0,15	glissant
P1	3,80	0,59	0,86	0,59	glissant
P2	3,80	0,59	0,37	0,37	fixe
P3	fixe	∞	0,08	0,08	fixe
P4	3,80	0,58	-0,13	-0,13	fixe
P5	3,80	0,60	-0,50	-0,50	fixe
P6	3,80	0,56	-1,02	-0,56	glissant
C7	3,80	0,12	-47,83	-0,12	glissant

Somme des efforts horizontaux : - 0,12 MN => **position du point fixe : X = 321,16 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
position du point fixe : X = 334,59 m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	3,80	0,15	0,15	0,15	glissant
P1	3,80	0,59	0,59	0,59	glissant
P2	3,80	0,59	0,40	0,40	fixe
P3	fixe	∞	0,10	0,10	fixe
P4	3,80	0,58	-0,10	-0,10	fixe
P5	3,80	0,60	-0,46	-0,46	fixe
P6	3,80	0,56	-0,56	-0,56	glissant
C7	3,80	0,12	-0,12	-0,12	glissant

Somme des efforts horizontaux : 0.00 MN => **position du point fixe : X = 334,59 m**

4.6.2.4 - Position gauche du point fixe.

Nous affectons 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)

$$\mu_a = 0,5 (\mu_{\max} + PP)(1 + \alpha) = 2,85\%$$

$$\mu_r = 0,5 (\mu_{\max} - PP)((1 - \alpha)) = 0,80\%$$

• première itération :

tous les appareils d'appui à pot sont supposés fixes
position du point fixe : X = 321.16 m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	2,85	0,11	48,17	0,11	glissant
P1	2,85	0,44	0,86	0,44	glissant
P2	2,85	0,44	0,37	0,37	fixe
P3	fixe	∞	0,08	0,08	fixe
P4	0,80	0,12	-0,13	-0,12	glissant
P5	0,80	0,13	-0,50	-0,13	glissant
P6	0,80	0,12	-1,02	-0,12	glissant
C7	0,80	0,02	-47,83	-0,02	glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,61 MN => **position du point fixe : X = 321,16 m**

- deuxième itération :

appareils d'appui à pot fixes :

P2 et P3

appareils d'appui à pot glissants :

C0, P1, P4, P5, P6 et C7

position du point fixe : $X_g = 175,32$ m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	2,85	0,11	0,11	0,11	glissant
P1	2,85	0,44	0,44	0,44	glissant
P2	2,85	0,44	0,08	0,00	fixe
P3	fixe	∞	-0,16	-0,16	fixe
P4	0,80	0,12	-0,12	-0,12	glissant
P5	0,80	0,13	-0,13	-0,13	glissant
P6	0,80	0,12	-0,12	-0,12	glissant
C7	0,80	0,02	-0,02	-0,02	glissant

somme des efforts horizontaux : 0.00 MN ==> **position du point fixe : $X_g = 175,32$ m**

4.6.2.5 - Position droite du point fixe.

Nous affectons le coefficient de frottement μ_r 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 : tous les appareils d'appui à pot sont supposés fixes
position du point fixe : $X = 321,16$ m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,80	0,03	48,17	0,03	glissant
P1	0,80	0,12	0,86	0,12	glissant
P2	0,80	0,12	0,37	0,12	glissant
P3	fixe	∞	0,08	0,08	fixe
P4	2,85	0,43	-0,13	-0,12	fixe
P5	2,85	0,45	-0,50	-0,45	glissant
P6	2,85	0,42	-1,02	-0,42	glissant
C7	2,85	0,09	-47,83	-0,09	glissant

Somme des efforts horizontaux : -0,73 MN => **position du point fixe : X = 321,16 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
 position du point fixe : $X_d = 498,70$ m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,80	0,03	0,03	0,03	glissant
P1	0,80	0,12	0,12	0,12	glissant
P2	0,80	0,12	0,12	0,12	glissant
P3	fixe	∞	0,36	0,36	fixe
P4	2,85	0,43	0,31	0,31	fixe
P5	2,85	0,45	0,08	0,08	fixe
P6	2,85	0,42	-0,31	-0,31	fixe
C7	2,85	0,09	-0,09	-0,09	glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,62 MN => position du point fixe : $X = 498,70$ m

- troisième itération :

appareils d'appui à pot fixes : P3, P4, P5 et P6
 appareils d'appui à pot glissants : C0, P1, P2 et C7
 position du point fixe : $X_d = 442,82$ m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,80	0,03	0,03	0,03	glissant
P1	0,80	0,12	0,12	0,12	glissant
P2	0,80	0,12	0,12	0,12	glissant
P3	fixe	∞	0,27	0,27	fixe
P4	2,85	0,43	0,17	0,17	fixe
P5	2,85	0,45	-0,10	-0,10	fixe
P6	2,85	0,42	-0,53	-0,42	glissant
C7	2,85	0,09	-0,09	-0,09	glissant

Somme des efforts horizontaux : 0,11 MN => position du point fixe : $X = 442,82$ m

- quatrième itération :

appareils d'appui à pot fixes : P3, P4 et P5
 appareils d'appui à pot glissants : C0, P1, P2, P6 et C7
 position du point fixe : $X_d = 427,67$ m

appui	$\mu\%$	seuil de glissement (MN)	effort horizontal (MN)	effort horizontal après écrêtement (MN)	fonctionnement de l'appareil d'appui à pot
C0	0,80	0,03	0,03	0,03	glissant
P1	0,80	0,12	0,12	0,12	glissant
P2	0,80	0,12	0,12	0,12	glissant
P3	fixe	∞	0,25	0,25	fixe
P4	2,85	0,43	0,14	0,14	fixe
P5	2,85	0,45	-0,15	-0,15	fixe
P6	2,85	0,42	-0,42	-0,42	glissant
C7	2,85	0,09	-0,09	-0,09	glissant

somme des efforts horizontaux : 0.00 MN ==> **position du point fixe : $X_d = 427,67$ m**

Le point fixe peut donc se situer entre les abscisses $X_g = 175,32$ m et $X_d = 427,67$ m, soit une plage de 252 mètres pour un ouvrage de 640 mètres de long.

Chapitre V

CONTROLE DES APPAREILS D'APPUI A POT

Le rôle des différents intervenants est précisé dans le tableau en marge des différentes tâches à réaliser en utilisant les abréviations suivantes :

Fournisseur (Fo), Entreprise (En), Maître d'Oeuvre (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 DEFINITION

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

5.1.1 - PLANS D'EXECUTION GENIE CIVIL (plans entreprise)

5.1.1.1 - Plans d'implantation (réf. : NF T 47-816 [2])

- 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 DONNEES TECHNIQUES (réf. NF T 47-816 ou Pr EN 1337-1)

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.

5.1.3 - NOTE DE CALCUL DES APPAREILS D'APPUI

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

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

5.1.4 - PLANS ET DOCUMENTS D'EXECUTION DES APPAREILS D'APPUI

5.1.4.1 - Définition des matériaux

Ces documents précisent la nature et les spécifications concernant l'ensemble des matériaux relatifs aux différents composants de l'appareil d'appui.

5.1.4.2 - Plans des appareils d'appuis

Ces plans définissent le type, la géométrie, les tolérances fonctionnelles et les caractéristiques de mise en oeuvre et d'utilisation des appareils d'appui.

- Définition géométrique des différentes parties
- Nature et spécification des matériaux des différents composants
- Tolérances fonctionnelles, en particulier, jeu des systèmes de guidage
- Etat de surface des parties au contact avec les structures
- Les caractéristiques d'utilisation (force portante, capacité de rotation, moment résistant, amplitude de déplacement admissible)
- La définition et l'emplacement des dispositifs de contrôle et de suivi pour les déplacements, les rotations et éventuellement les réactions d'appui
- La définition des protections des surfaces
- La définition des dispositifs de protection anti-poussière permanents
- Les dispositifs de mesure intégrés (charge, déplacement ...)
- Les dispositifs provisoires de protection, de transport et de manutention
- Les procédures et tolérances de pose (NF T 47.816-3)
- Les procédures de dépose des systèmes de blocage provisoires
- Marquage des appareils d'appui:
 - . nom et adresse du fabricant
 - . type d'appareil d'appui, année de fabrication, numéro de série, capacité de déplacement, emplacement de pose et orientation

5.1.4.3 - Plans de fabrication et d'atelier

Ces documents peuvent être consultés dans les locaux du fabricant, ils précisent, en particulier :

- Les tolérances d'usinage et de montage
- La définition des états de surface des différents composants

5.2 - CONTROLES A LA FABRICATION

Les contrôles internes et externes à la fabrication sont réalisés par le fabricant dans le cadre de son plan qualité.

La nature et l'importance des contrôles extérieurs à exercer en cours de fabrication dépend de l'existence ou non d'une certification type du fabricant dans le domaine d'activité concernée (NF EN 29 000 [13]). Ces contrôles extérieurs sont à réaliser par le Maître d'Oeuvre ou son représentant.

5.2.1 - FABRICANT CERTIFIE

- Contrôle de l'existence d'une certification en vigueur couvrant, en particulier, la fabrication des appareils d'appui du type considéré

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

5.2.2 - FABRICANT NON CERTIFIE

Ces éléments sont à vérifier en liaison avec l'annexe 1

5.2.2.1 - CONTROLE DU SYSTEME QUALITE DU FABRICANT

- Organisation générale du Plan Qualité Fabrication
- Organigramme
- Maîtrise des documents
- Achats, vérification du produit acheté
- Identification et traçabilité
- Maîtrise des procédés
- Contrôles et essais à la réception, en cours de fabrication, essai final
- Maîtrise des équipements de contrôle, de mesure et d'essai
- Maîtrise du produit non conforme
- Actions correctives
- Manutention, stockage, conditionnement, livraison

5.2.2.2 - CONTROLE DU PLAN QUALITE DE FABRICATION

1 - Contrôle avant le lancement de la fabrication

- Vérification de l'existence de procédures particulières correspondantes au plan qualité de fabrication adapté à la réalisation des appareils d'appui.
- Contrôle des procédures, de la qualification du personnel, des matériels utilisés, des moyens d'essai et de contrôle interne, ...

2 - Contrôle en cours de fabrication des composants (cf. annexe 1)

Vérification de la mise en oeuvre des procédures prévues :

a) Contrôle de réception matières

Conformité aux spécifications, contrôle des CCPU si nécessaire, des matières premières, produits semi-finis et des composants :

- Aciers pour la fabrication des pots, couvercles, plaques de glissement, clavettes ou guides, acier inoxydable pour surface de glissement
- Caoutchouc vulcanisé pour coussins
- PTFE ou matériaux composites pour surface de glissement
- Graisse pour surface de glissement et coussin de caoutchouc
- Joints anti-extrusion, joints et dispositifs anti-poussière,
- Matériaux de revêtement et de protection

b) Contrôle en cours de fabrication

Conformité aux plans de définition et de fabrication: Pots, couvercles, plaques de glissement, clavettes ou guides, surfaces de glissement, joints ...

Fo	En	MO
E	V	V
-	-	V
	-	V

3 - Contrôle à l'assemblage des composants

Vérification de la mise en oeuvre des procédures de montage et de contrôle

- Jeu entre le diamètre intérieur pot et le diamètre du coussin de caoutchouc
- Graissage du coussin en caoutchouc
- Jeu entre le piston et le cylindre intérieur du pot
- Graissage du PTFE
- Jeu de guidage de la clavette ou des guides entre le couvercle ou la plaque
- Surface portante de guidage

4 - Contrôle des produits finis

Vérification de la mise en oeuvre des procédures de la réception interne des produits finis

- Hauteur de l'appareil d'appui
- Parallélisme des surfaces (marquage des emplacements de mesure)
- Hauteur du joint ("Compriband[®]" ou similaire)
- Pré-réglage des appareils d'appui glissants
- Protections anticorrosion des surfaces et dispositifs de protection anti-poussière
- Marquage de l'appareil d'appui (emplacement de pose et orientation)
- Dispositif de blocage provisoire
- Emballages
- Documents de suivi

5.3 - CONTROLE EXTERIEUR DE FABRICATION DES APPAREILS D'APPUI

- Fourniture correspondant aux fabrications à réaliser, telle que prévue par la norme pr EN 1 337-5. **E D V**
- Validation du système de mesure pour les appareils d'appui équipés d'un système de pesage. **E D V**
- Suivant les conclusions portant sur l'examen du système qualité et du respect des procédures du plan qualité de fabrication, contrôle d'un ou plusieurs appareils d'appui aux stades de la fabrication des composants, du montage de ceux-ci et des appareils d'appui assemblés. Ce contrôle aura alors lieu, pour chaque type d'appareil d'appui, au moins, en début d'exécution de la série et, éventuellement, en cours d'exécution de celle-ci, en fonction du nombre des appareils d'appui à réaliser. **- - V**

Ce contrôle est exécuté en usine par le maître d'oeuvre ou par un représentant de celui-ci.

5.4 - CONTROLE DE PRERECEPTION EN USINE

Il est souhaitable qu'un contrôle portant sur des appareils d'appui finis, sans et avec leur emballage, soit réalisé par l'entreprise avant expédition de ceux-ci **- V -**

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

Fo	En	MO
-	V	V
-	V	V
-	V	V
-	-	V

4.5 - CONTROLE DE RECEPTION SUR CHANTIER DES APPAREILS D'APPUI

- Certificat de conformité
- Emballage
- Etat général, protections des surfaces, protections permanentes
- Dispositifs de blocage provisoires
- Caractéristiques géométriques : hauteurs, parallélisme (rotations), pré-réglages
- Marquage
- Stockage

4.6 - CONTROLE A LA POSE (réf. : NF T 47 816-3)

- Emplacement
- Orientation
- Sens du déplacement
- Conformité des scellements ou des calages
- Propreté de l'environnement

4.7 - CONTROLE 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.

- 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)
- Relevé des températures
- Document de suivi

4.8 - ETAT POINT "ZERO" 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 CONTROLES 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 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.

Chapitre VI

UN PROGRAMME DE CALCUL VERIFICATEUR

Il existe un programme vérificateur des appareils d'appui à pot, disponible au SETRA. Ce programme a été mis au point par M. V. Eche (DREIF, 01.39.50.76.60) qui peut répondre aux questions concernant l'utilisation de ce programme, étant précisé que pour tout ce qui porte sur le produit et son utilisation sur les ponts on prendra contact avec le gestionnaire du présent guide.

Ce programme vérifie ces appareils d'appui suivant les règles des normes EN en préparation.

L'utilisateur fournit les efforts imposés à l'appareil d'appui. Le programme vérifie alors que tous les critères relatifs au dimensionnement de l'appareil d'appui sont satisfaits. Il signale les dépassements de contraintes par rapport aux limites réglementaires.

Les résultats peuvent être imprimés ; une extension en préparation permettra d'exporter les résultats sous Excel.

Le programme, qui fait partie du catalogue des logiciels, est disponible sur demande au bureau des ventes du SETRA (Tél : 01.46.11.31.53).

Le programme APPUIPOT fonctionne sur micro-ordinateur de type Pentium (minimum 133 MHz), sous l'interface Windows 3.11, Windows 95 ou Windows 98. Le programme APPUIPOT est fourni dans un coffret qui comporte une disquette d'installation et une documentation.

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

ANNEXE 1

CONTROLE DES APPAREILS D'APPUI

CONTROLE DE FABRICATION DES DIFFERENTS COMPOSANTS

• POT

Réception matière :	. Conformité des aciers aux spécifications, certificats (Caractéristiques mécaniques, analyse chimique et identification)
Dimensions :	. Virole : diamètre intérieur, extérieur, épaisseur . Pot : hauteur totale, hauteur de la virole, épaisseur de l'embase . Embase : dimensions extérieures
Planéité :	. Embase : intérieur du pot et sous-face
Rugosité :	. Embase : intérieur du pot et sous-face, virole : face intérieure
Soudures :	. Qualification du mode opératoire et du soudeur (NF P 22.472 - NF A 88.110) . Géométrie des chanfreins avant soudure . Contrôle des soudures, géométrie, visuel, ressuage, ultra sons
Peinture :	. Décapage par abrasif, degrés de soin DS 2.5, DS 3 . Délai de recouvrement, épaisseur des couches sèches appliquées

Identification et marquage

• COUVERCLE (piston)

Réception matière :	idem pot
Dimensions :	. Piston : diamètre et hauteur, rayon de courbure de la zone de contact avec la virole (si existant) . Dimensions extérieures (diamètre, largeur, longueur, épaisseur ...) . Face de guidage : parallélisme, perpendicularité . Engrèvement pour PTFE : profondeur, dimension en plan . Réserve pour joint racleur . Percement pour vis de fixation des clavettes (position, diamètre, profondeur)
Planéité :	. Face inférieure du piston, zone d'engrèvement du PTFE
Rugosité :	. Piston : face inférieure, latérale et zone de contact sur la virole . Zone d'engrèvement du PTFE . Débord inférieur du couvercle . Faces de guidages ou zones de fixation de la clavette
Soudures :	Idem pot
Peinture :	Idem pot

Identification et marquage

• PLAQUE DE GLISSEMENT

Réception matière : Idem pot

Dimensions : (avant et après fixation des revêtements de glissement et de guidage)

- . Plaques : dimensions extérieures, épaisseur
- . Guides latéraux : distance, parallélisme, perpendicularité
- . Percement éventuel pour fixation de guides latéraux (position, diamètre, profondeur)
- . Rainure de clavettes, largeur, profondeur, perpendicularité

Planéité : Plaque : face supérieure et inférieure (avant et après la pose de la tôle en acier inoxydable)

Fixation des revêtements de glissement et de guidage :

collage, vis en acier inoxydable, soudure en périphérie, rivets ...

Peinture : Idem pot

Identification et marquage

• CLAVETTE OU GUIDES LATÉRAUX DE GUIDAGE

Réception matière : Idem pot

Dimensions : (avant et après pose des revêtements de glissement et de guidage)

- . Largeur, longueur, hauteur, parallélisme (clavette)

Fixations des revêtements de glissement ou de guidage (idem : plaques de glissement)

Collage des revêtements de glissement ou de guidage

Peinture : Idem pot

Identification et marquage

• TOLE EN ACIER INOXYDABLE DE GLISSEMENT OU DE GUIDAGE

Réception matière : Idem pot

Dimensions : . Géométrie en plan, épaisseur

Rugosité

Contrôle visuel : . Propreté, absence de rayure, de défaut de planéité

• MATERIAUX COMPOSITES DE GLISSEMENT

Réception matière : (conformité aux spécifications)

Dimensions : . Epaisseur

• COUSSIN DE CAOUTCHOUC

Réception matière : . Bordereau de livraison, certificat matière, caractéristiques mécaniques et identification
. Essais ou résultats d'essais à l'aide de plaquettes en caoutchouc au moment de la confection)
. Dureté (NF T 46.003), traction (NF T 46.002), déformation rémanente (NF T 46.011), vieillissement artificiel (NF T 46.004)

Dimensions : . Diamètre, épaisseur (périphérie, centre)
. Engravure pour joint anti extrusion

Aspect : . Etat de surface

Planéité

Identification et marquage

• DISQUE DE PTFE

Réception matière : . Certificat et caractéristiques mécaniques

Dimensions : . Epaisseur (périphérie, centre), diamètre ou géométrie en plan

Contrôle visuel : . Disposition et profondeur des alvéoles pour le graissage

Contrôle de la propreté

Identification et marquage

Contrôle de la pureté : . Essai de pertes au feu à 450 °C

• JOINTS ANTI EXTRUSION

Réception matière : . Bordereau de livraison, certificat matière

Dimensions : . Diamètre extérieur, épaisseur, largeur ...

• JOINTS OU DISPOSITIFS ANTI POUSSIÈRE (type Compriband®)

Fiche technique

Dimensions

Taux de compression (Compriband®)après mise en place

• GRAISSE SILICONE (ou autres)

Réception matière : . Bordereau de livraison, conformité aux spécifications

Identification : . Spectrographie infrarouge

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Bulletin Technique n° 4 (dit "BT 4"): appareils d'appui en élastomère fretté. F 7410. SETRA. Bagnaux. 1974.
- 2 - T 47.816 : Appareils d'appui en caoutchouc - Appareils d'appui à pot - Partie 1: introduction, partie 2: bordereau de données technique, partie 3: pose des appareils d'appui à pot
- 3 - pr EN 1337.5 (4-1999) : Appareils d'appui structuraux - Appareils d'appui à pot.
- 4 - pr EN 1337.2 (4-1999) : Appareils d'appui structuraux - Eléments de glissement.
- 5 - XVIII^{ème} congrès mondial de la route. Bruxelles 1987. Comité technique n°11 des ponts routiers. AIPCR. Paris. 1987. pp. 47-61.
- 6 - Circulaire n° 79.25 du 13.03.79. Instruction technique sur les Directives Communes de 1979 relatives au calcul des constructions.
- 7 - Fascicule 61 du CPC. Conception, calcul et épreuves des ponts routes Titre II: Programme de charges et épreuves des ponts routes
- 8 - Fascicule 61 du CPC. Conception, calcul et épreuves des ponts routes. Titre V: Conception et calcul des ponts et constructions métalliques en acier.
- 9 - Fascicule 62 du CCTG, Titre I, Section I, dit Règles BAEL 91.
- 10 - Fascicule 62 du CCTG, Titre I, Section II, dit Règles BPEL 91.
- 11 - Fascicule 62 du CCTG, Titre V: Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages de génie civil.
- 12 - pr EN 1337.1 (4/1999) : Appareils d'appui structuraux. Conception générale
- 13 - NF EN 29.000 (IC: X 50.1..). Normes pour la gestion de la qualité et l'assurance de la qualité
- 14 - NF EN 1337.11 (11/1998) : Appareils d'appui structuraux. Transport, entreposage intermédiaire et montage. (Indice de classement : T 47.820-11)
- 15 - 14 - NF EN 1337.9 (11/1998) : Appareils d'appui structuraux. Protection. (Indice de classement : T 47.820-9)

Notices techniques des fabricants

Ce document est propriété de l'Administration,
il ne pourra être utilisé ou reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du SETRA.

Imprimerie de Montlignon

Dépot légal : Septembre 2000 - N° d'imprimeur : 20030
ISBN 2-11-091781-4

© 2000 SETRA

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

Ce document comprend essentiellement 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 sur la base des projets de 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 .

Ce guide est provisoire dans l'attente de la publication des normes NF EN 1337 (parties 1, 2 et 5) en préparation. Quand ces normes seront publiées, une révision de ce guide sera préparée et diffusée.

* * * *

This technical guide is mainly intended for bridge designers. It provides information to design rubber pot bearings for use on bridges, viaducts and similar structures.

This document contains the following main information:

- *a summary description of this type of product and the specific equipment used with it;*
- *the main basic regulatory texts;*
- *design criteria based on draft standards prepared by CEN (European Committee for Standardization);*
- *a designing methodology, not of the product itself, but of its use in a bridge project, with a practical example based on a real case;*

This is a provisional guide pending publication of standards NF EN 1337 (parts 1, 2 and 5) under preparation. When these standards are published, a revision of this guide will be prepared and issued.

Ce document est disponible sous la référence F 0033
au bureau de vente des publications du SETRA
46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - FRANCE
Tél. : 01 46 11 31 53 et 01 46 11 31 55 - Fax : 01 46 11 33 55
Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>

Prix de vente : 75 F