



Ministère
de l'Équipement,
des Transports
et du Logement



APPAREILS D'APPUI en caoutchouc fretté

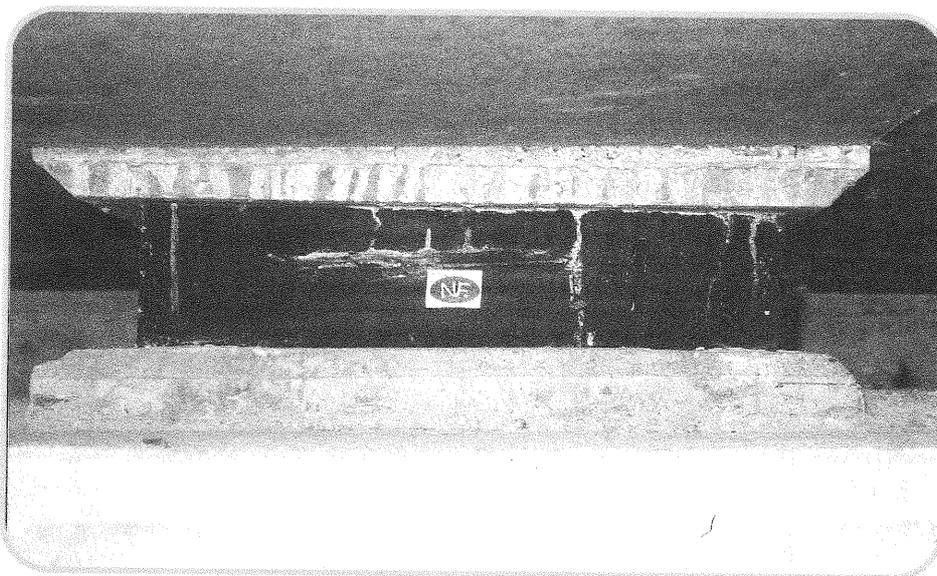


*UTILISATION
SUR LES PONTS, VIADUCS
ET STRUCTURES SIMILAIRES*

GUIDE TECHNIQUE

APPAREILS D'APPUI

en caoutchouc fretté



**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 3 (version Mai 1999) ne sont pas encore publiées. Or le présent guide, s'il fait référence aux normes NF actuelles, 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 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. A. Chabert, CETE de Lyon, DOA
M. Fragnet, SETRA/CTOA - Division Méthodologie et Logiciels. Cellule Equipements des ponts
G. Lacoste, SETRA/CTOA - Division Méthodologie et Logiciels. Mission Logiciels techniques .
D. Lecointre, SETRA/CTOA - Division des Grands Ouvrages.
Y. Picard, DREIF GOA
D. Renault, Scetauroute, DMOA

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 leur précieux conseils et observations les personnes suivantes : MM. Calgaro (SETRA), Dautel (SNCF/DOA), de Mattéis (SETRA), Doan (SNCF/DOA), Grèzes (CETE SW/DOA), Le Faucheur (SETRA), Le Khac (SETRA), Perrier (MISOA), Poineau (SETRA), Roche (SETRA), Thénoz (MISOA), Vial (MISOA).

Les dessins ont été préparés par M. JP. Gilcart et la DOA du CETE de Lyon.

Illustration photo

Page de garde : SETRA/CTOA

Dans le texte : origine précisée dans la légende.

Le présent guide annule et remplace le Bulletin Technique n° 4 de 1974.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	4
AVANT-PROPOS.....	7
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	9
1.1 - REMPLACEMENT DU BULLETIN TECHNIQUE N°4.....	9
1.2 - OBJET ET CONTENU DU PRESENT GUIDE.....	9
1.3 - LIAISON AVEC LES FUTURES NORMES EN.....	10
1.4 - DOMAINE D'EMPLOI.....	10
NOTATIONS ET SYMBOLES.....	11
CHAPITRE 2 CONSTITUTION ET DESCRIPTION.....	13
2.1 - PRINCIPES GENERAUX SUR LA CONSTITUTION.....	13
2.2 - PARTIES CONSTITUTIVES.....	14
2.2.1 - Constitution.....	14
2.2.2 - Le matériau caoutchouc.....	14
2.2.3 - Les frettes en acier.....	15
2.2.4 - Les éventuels éléments de glissement.....	15
2.2.5 - Les dispositifs anti-cheminement ou anti-soulèvement.....	16
2.3 - LES GAMMES DE FABRICATION.....	18
CHAPITRE 3 COMPORTEMENT ET DIMENSIONNEMENT.....	21
3.1 - INTRODUCTION.....	21
3.2 - CARACTERISTIQUES DES APPAREILS D'APPUI.....	23
3.2.1 - Définition géométrique.....	23
3.2.2 - Caractéristiques du caoutchouc.....	24
3.2.3 - Caractéristiques des frettes.....	24
3.2.4 - Caractéristiques des frettes extérieures.....	24
3.2.5 - Caractéristiques des plaques de glissement.....	25
3.3 - DIMENSIONNEMENT DE L'APPAREIL D'APPUI.....	25
3.3.1 - Principes.....	25
3.3.2 - Comportement des appareils d'appui.....	26
3.4 - VERIFICATIONS DU DIMENSIONNEMENT.....	28
3.4.1 - Vérification de base.....	28
3.4.2 - Vérifications complémentaires sur la limitation du soulèvement.....	32
3.5 - DISPOSITIONS SUR APPUI.....	34
CHAPITRE 4 PRINCIPES DE CALCUL D'UN OUVRAGE COMPORTANT DES APPAREILS D'APPUI.....	37
4.1 - GENERALITES - CONTEXTE REGLEMENTAIRE.....	37
4.2 - DIMENSIONNEMENT.....	37
4.2.1 - Aire de l'appareil d'appui.....	38
4.2.2 - Hauteur nette de caoutchouc.....	38
4.2.3 - Dimensions en plan.....	39
4.2.4 - Stabilité au flambement.....	39
4.2.5 - Respect de la limite de déformation.....	39
4.2.6 - Stabilité en rotation.....	41
4.2.7 - Vérification de la condition de non-glissement.....	41
4.2.8 - Vérification de la limitation du décollement.....	41
4.2.9 - Dimensionnement des frettes.....	43
4.3 - CALCUL DES EFFORTS HORIZONTAUX EN TETE DES APPUIS D'UN OUVRAGE - APPAREILS D'APPUI CLASSIQUES.....	43
4.3.1 - Généralités.....	43

4.3.2 - Détermination des efforts en tête des appuis	43
4.3.3 - Incidence sur la structure	47
4.3.4 - Relation calculs - économie des appareils d'appui	47
4.4 - CALCUL DES EFFORTS HORIZONTAUX DANS UN OUVRAGE COMPORTANT DES APPAREILS D'APPUI GLISSANTS	47
4.4.1 - Généralités	47
4.4.2 - Exemple de calcul.....	49
4.4.3 - Conclusion sur les calculs d'ouvrages comportant des appareils d'appui glissants.....	55
CHAPITRE 5 LES CONTROLES.....	57
5.1 - PRINCIPES GENERAUX.....	57
5.2 - LES CONTROLES DE FABRICATION CONDUISANT A LA MARQUE NF.....	57
5.2.1 - La normalisation	57
5.2.2 - Les normes d'essais	58
5.2.3 - Conformité aux normes	60
5.3 - LES CONTROLES A LA RECEPTION.....	61
5.4 - LES CONTROLES A LA MISE EN OEUVRE.....	61
5.4.1 - Etablissement des documents préalables.....	61
5.4.2 - Contrôles lors de l'exécution.....	62
5.5 - LES CONTROLES DU COMPORTEMENT EN SERVICE	62
CHAPITRE 6 PROGRAMME VERIFICATEUR.....	63
ANNEXE 1 CALCUL DES APPAREILS D'APPUI EN CAOUTCHOUC FRETTE POUR UNE UTILISATION EN ZONE SISMIQUE	65
A1.1 - LE CADRE REGLEMENTAIRE	66
A1.2 - COMBINAISONS DE CALCUL ET CUMUL DES DIRECTIONS	67
A1.2.1 - Action sismique	67
A1.2.2 - Combinaisons avec les autres cas de charge.....	67
A1.3 - MODELE DE CALCUL DYNAMIQUE.....	68
A1.3.1 - Module de cisaillement G.....	68
A1.3.2 - Modélisation des appareils d'appui.....	68
A1.4 - EMPLOI D'UN COEFFICIENT DE COMPORTEMENT.....	69
A1.4.1 - Les deux méthodes de conception parasismique.....	69
A1.4.2 - Appareils d'appui en caoutchouc sur tous les appuis.....	70
A1.4.3 - Appareils d'appui en caoutchouc sur une partie des appuis	70
A1.5 - PRESCRIPTIONS.....	71
A1.5.1 - Distorsion maximale	71
A1.5.2 - Flambement.....	71
A1.5.3 - Glissement.....	72
A1.6 - DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES COMPLEMENTAIRES	72
A1.6.1 - Appareil d'appui en caoutchouc fretté reprenant les efforts sismiques	72
A1.6.2 - Appareil d'appui en caoutchouc complété par un dispositif de blocage qui reprend les efforts sismiques	73
A1.6.3 - Appareil d'appui en caoutchouc associé à un dispositif de glissement	74
A1.6.4 - Repos d'appui minimal	74
ANNEXE 2 RAPPEL DES ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS A PRENDRE EN COMPTE DANS LE CALCUL DES APPAREILS D'APPUI EN CAOUTCHOUC FRETTE.....	77
A2.1 - DEFINITION DES ACTIONS	78
A2.1.1 - Charges routières.....	78
A2.1.2 - Température	78
A2.1.3 - Vent.....	78
A2.2 - COMBINAISONS D'ACTIONS	79
ANNEXE 3 TABLEAU DES APPAREILS D'APPUI PREVUS PAR LA PREN 1337.3.....	81
ANNEXE 4 DURABILITE DES APPAREILS D'APPUI EN CAOUTCHOUC FRETTE AVEC PLAN DE GLISSEMENT.....	83

A4.1 - GRANDEUR CARACTERISTIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UN APPAREIL D'APPUI GLISSANT	84
A4.2 - DISPOSITIONS A PRENDRE AU STADE DE LA CONCEPTION	84
A4.3 - DISPOSITIONS A PRENDRE AU STADE DE LA FABRICATION.....	84
A4.4 - DISPOSITIONS A PRENDRE DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE	85
A4.5 - CONCLUSION	85
ANNEXE 5 AIDE A LA REDACTION DES CCTP	87
BIBLIOGRAPHIE	90

AVANT-PROPOS

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

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

- Des défauts consécutifs à une qualité des produits défectueuse (corrosion, désadhésion, ...). De ce point de vue, la publication des normes sur les spécifications des produits et la certification marque NF pour les appareils d'appui en caoutchouc fretté sont des éléments allant dans le sens d'une amélioration, à condition que les prescripteurs fassent bien référence à ces normes et les appliquent.
- Des défauts de pose. Le respect des spécifications du document "Environnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté" (Cf. Biblio) est une condition *sine qua non* pour aller dans le sens d'une amélioration de ce point de vue.

Le présent guide ne traite pas de la mise en oeuvre puisque le guide ci-dessus existe. Nous tenons cependant à insister sur l'importance de bien reprendre dans les CCTP et dans les PAQ, les spécifications présentées dans ce document et de les appliquer.

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

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

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

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 - REMPLACEMENT DU BULLETIN TECHNIQUE N°4

Le Guide Technique traitant des appareils d'appui en caoutchouc fretté était constitué jusqu'à ce jour par le document appelé "Bulletin Technique N° 4" publié en 1974 par le CTOA du SETRA. En fait, ce document, déjà ancien, reprenait en le complétant sur quelques points (adaptation des méthodes de calcul aux principes de sécurité retenus dans les Directives Communes relatives au calcul des constructions, uniformisation des spécifications entre différents Maîtres d'Ouvrages, prise en compte des modifications de fabrication, ...) l'édition précédente de Novembre 1967.

Or l'évolution aussi bien des techniques que de la réglementation fait que de nombreuses parties sont devenues obsolètes. Cela concerne notamment :

- les modalités de contrôle qui sont maintenant du domaine de la certification sur la base de la norme XP T 47.815 par la marque NF-Appareils d'appui ;
- les aspects touchant à la mise en oeuvre développés dans un guide séparé : "environnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté" d'Octobre 1978 nettement plus complet et plus précis ;
- l'évolution des techniques : abandon des fabrications par découpes dans des plaques mères, traitement des appareils d'appui à pot dans un guide spécifique, ...;
- l'évolution de la normalisation avec les futures nouvelles normes EN.

L'ancienneté du Bulletin Technique N° 4, les tendances récentes en matière normative et l'évolution des techniques auraient largement justifié la refonte de ce guide. La prochaine publication des nouvelles normes prEN a rendu encore plus urgent ce travail.

C'est pourquoi, dans ce contexte, il a paru nécessaire de prévoir un guide permettant de bien replacer l'appareil d'appui en caoutchouc fretté dans son domaine d'utilisation pour les ponts en montrant les interactions entre appareils d'appui, d'un appui à un autre.

1.2 - OBJET ET CONTENU DU PRESENT GUIDE

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

Ce document comprend les éléments suivants:

- une description sommaire de ce type de produit et des éventuels équipements particuliers qui lui sont liés ;
- les principaux textes réglementaires ou normatifs de base ;
- les critères de dimensionnement que l'on trouve dans les projets de textes normatifs préparés par le CEN¹ ;
- le principe des contrôles sur la base de la certification par la marque NF-Appareils d'appui ;

¹ CEN : Comité Européen de Normalisation

- une méthodologie de calcul dans un projet de pont avec des exemples d'application ;
- à signaler l'existence du programme NEOP du SETRA permettant un prédimensionnement de ce type d'appareil d'appui ;
- Enfin, il est complété par une série d'annexes avec, notamment :
 - l'annexe A1 qui présente des éléments pour le dimensionnement de ce type d'appareils d'appui dans les zones sismiques, sur la base des nouvelles normes parasismiques,
 - l'annexe A4 qui attire l'attention sur la durabilité des appareils d'appui en caoutchouc fretté complétés par un plan de glissement,
 - et l'annexe A5 donnant des exemples de rédactions d'articles à introduire dans les CCTP.

1.3 - LIAISON AVEC LES FUTURES NORMES EN

L'une des difficultés rencontrées lors de l'élaboration de ce guide est 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. S'agissant de documents de travail susceptibles de subir encore des modifications à la suite des enquêtes nationales, nous ne pouvons les publier. C'est pourquoi nous avons pris l'option d'en donner une courte exégèse afin que les futurs utilisateurs puissent les exploiter dès leur publication. Ceci ne nous a pas paru constituer un véritable obstacle à partir du moment où :

a) le projet de norme EN pour les appareils d'appui en caoutchouc fretté (pr EN 1337.3) reprend dans ses grandes lignes les principes définis dans les normes françaises actuelles, ce qui ne devrait pas entraîner de grandes modifications dans nos méthodes de dimensionnement.

b) La partie "conception générale" (pr EN 1337.1) a été soumise à l'enquête CEN et, après corrections, devrait être très prochainement publiée (en même temps que la partie 2 et, fort probablement, peu de temps avant la partie 3 relative aux appareils d'appui en caoutchouc fretté).

1.4 - DOMAINE D'EMPLOI

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

appareils d'appui constitués de plaques de caoutchouc.

Ces règles ne sont applicables qu'aux

appareils d'appui constitués au moins de deux feuillets de caoutchouc adhésifs par vulcanisation à des frettes métalliques

(type A ou B de la norme XP T 47.815 ou type B de la pr EN 1337.3)

et, éventuellement,

complétés par des éléments de glissement ²

(type C de la norme XP T 47.815 ou type D ou E de la pr EN 1337.3)

d'anti-cheminement ou d'anti-soulèvement ³

(type C de la norme XP T 47.815 et de la pr EN 1337.3).

² Cf. Annexe 2

³ Cf. Chapitre 2

NOTATIONS ET SYMBOLES

Les notations utilisées dans le présent document sont celles de la pr EN 1337.3 (version 5/99) pour ce qui concerne le calcul des appareils d'appui en caoutchouc fretté. Pour faciliter la lecture de ce guide, on trouvera ici les seules notations et symboles utilisés dans ce document.

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

Les notations et symboles propres aux combinaisons d'actions sont ceux définis dans les Eurocodes et sont donnés dans l'annexe 2.

Lettres latines majuscules

A	Surface en plan générale d'un appareil d'appui en caoutchouc
A'	Surface en plan efficace d'un appareil d'appui fretté (surface des frettes en acier)
A _r	Surface en plan efficace réduite d'un appareil d'appui en caoutchouc
A _c	Surface en plan efficace de contact d'un appareil d'appui en caoutchouc
D	Diamètre général d'un appareil d'appui circulaire
D'	Diamètre effectif d'un appareil d'appui circulaire fretté
E	Module d'élasticité
E _b	Module de compressibilité
G	Module de cisaillement conventionnel d'un appareil d'appui en caoutchouc
G _{dyn}	Module de cisaillement conventionnel d'un appareil d'appui en caoutchouc subissant des actions dynamiques
F _d	Charge verticale de calcul
F _x , F _y	Forces horizontales
F _z	Force verticale
F _{xy}	Force résultante horizontale maximale obtenue par addition vectorielle de F _x et F _y
H	Effort horizontal
K _f	Coefficient de frottement
K _L	Coefficient des effets de charge roulante
K _r	Coefficient de rotation
M _d	Valeur calculée du moment de rappel
S	Coefficient de forme
S'	Coefficient de forme pour les feuillets les plus épais
T ₀	Épaisseur initiale totale du caoutchouc
T _b	Épaisseur nominale totale de l'appareil d'appui
T _{b0}	Épaisseur initiale totale moyenne de l'appareil d'appui
T _e	Épaisseur nominale totale du caoutchouc
T _q	Épaisseur initiale totale moyenne du caoutchouc en cisaillement, y compris les épaisseurs des feuillets supérieurs et inférieurs, sauf si cet enrobage est inférieur ou égal à 2.5 mm (prEN 1337.3, § 3.2 et 5.3.3)

Lettres latines minuscules

a	Largeur globale d'un appareil d'appui (dimension la plus courte d'un appareil d'appui rectangulaire)
a'	Largeur efficace d'un appareil d'appui fretté (largeur des frettes en acier)
b	Longueur globale d'un appareil d'appui (dimension la plus longue d'un appareil d'appui rectangulaire)
b'	Longueur efficace d'un appareil d'appui fretté (longueur des frettes en acier)
e	Épaisseur de l'enrobage supérieur et inférieur
f _{yd}	Limite d'élasticité de l'acier

l_p	Périmètre des frettes intermédiaires
n	Nombre de feuillet en caoutchouc
t_e	Épaisseur efficace de caoutchouc en compression
t_i	Épaisseur d'un feuillet individuel de caoutchouc dans un appareil d'appui freiné
t_s	Épaisseur de la frette en acier
v	Mouvement horizontal
v_x	Déplacement horizontal maximal relatif en direction de la dimension a
v_y	Déplacement horizontal maximal relatif en direction de la dimension b
v_z	Mouvement vertical
v_{xy}	Déplacement résultant horizontal maximal relatif obtenu par addition vectorielle de v_x et v_y .

Lettres grecques

α	Rotation angulaire d'un appareil d'appui ou Coefficient de dégressivité
α_a	Rotation angulaire perpendiculaire à la largeur a d'un appareil d'appui rectangulaire
α_b	Rotation angulaire perpendiculaire à la longueur b d'un appareil d'appui rectangulaire
γ_m	Coefficient partiel de sécurité de résistance du matériau
$\epsilon_{\alpha d}$	Distorsion nominale dans une plaque de caoutchouc due à la rotation angulaire
ϵ_{cd}	Distorsion nominale dans une plaque de caoutchouc due aux charges de compression
ϵ_{qd}	Distorsion nominale en cisaillement dans une plaque de caoutchouc due à des mouvements en translation
ϵ_{td}	Distorsion nominale totale dans une plaque de caoutchouc
μ	Coefficient de frottement
μ_d	Valeur de calcul du coefficient du frottement
μ_e	Coefficient de frottement pour le caoutchouc
σ	Contrainte
σ_c	Contrainte de compression
σ_s	Contrainte dans l'acier
σ_p	Pression de contact sur le PTFE
τ_N	Cisaillement dû à l'effort normal
τ_H	Cisaillement dû à l'effort horizontal
τ_α	Cisaillement dû à la rotation
ψ	Pourcentage de la surface d'appui comprimée

Indices

d	Calcul
dyn	Dynamique
k	Caractéristique
max	Maximum
min	Minimum

Chapitre 2

CONSTITUTION ET DESCRIPTION

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

2.1 - PRINCIPES GENERAUX SUR LA CONSTITUTION

Un appareil d'appui en caoutchouc fretté est un "bloc en caoutchouc vulcanisé renforcé à l'intérieur par des plaques d'acier (ou frettes) adhésives chimiquement lors de la vulcanisation. Le caoutchouc est une matière macromoléculaire qui retrouve approximativement ses dimensions et sa forme initiale après avoir subi une importante déformation sous l'effet d'une faible contrainte puis d'un relâchement de contrainte"⁴.

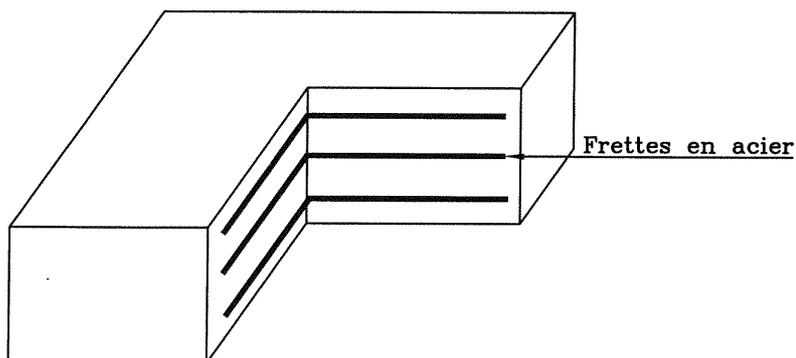


Figure 2.1 : Constitution type d'un appareil d'appui en caoutchouc fretté

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

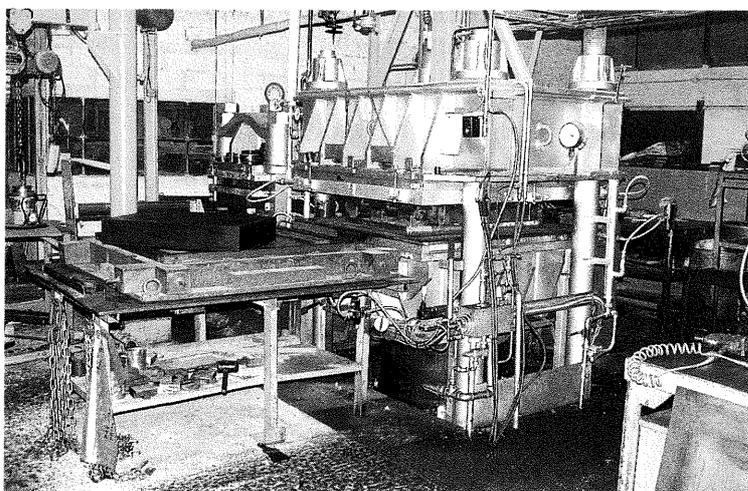


Figure 2.2 : Vue d'une presse au démoulage

(photo Couqueberg)

⁴ pr EN 1337.3, § 3.1

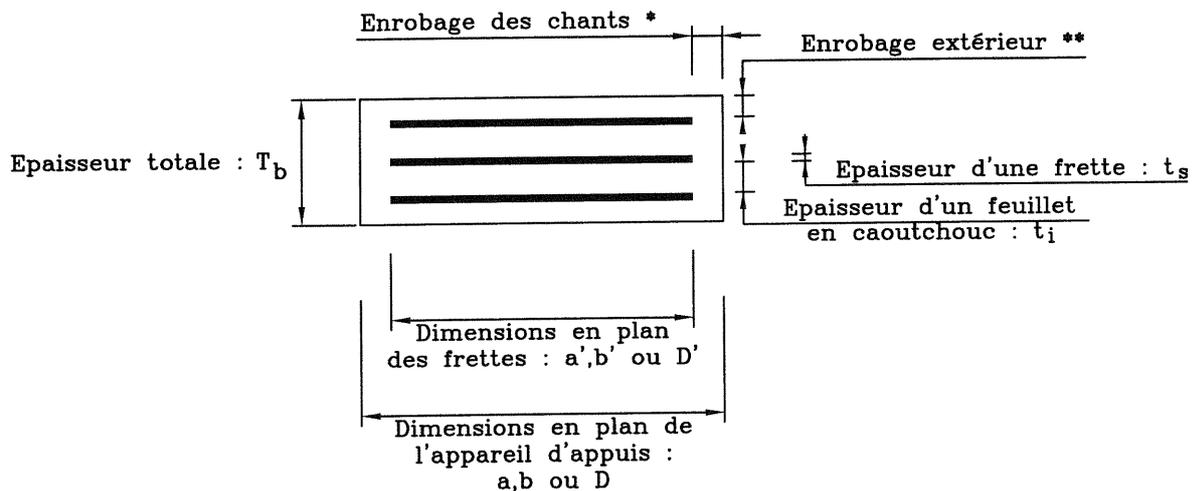
En fonction des degrés de liberté qu'il autorise, un **appareil d'appui en caoutchouc fretté** est, pour le bloc élémentaire, un **appareil d'appui mobile** : outre les rotations sur appui, les déplacements sont permis dans deux directions. On peut soit augmenter les possibilités de déplacement par l'ajout d'un plan de glissement, soit empêcher les distorsions par des platines métalliques constituant ainsi un appareil d'appui "fixe".

A titre d'information, les plus grandes dimensions dont la fabrication est actuellement possible en France sont 1000 x 1000 x 300 mm.

2.2 - PARTIES CONSTITUTIVES

2.2.1 - Constitution

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



Normes	XP T 47.815	pr EN 1337.3 (figure 1)
* Enrobage des chants	5 mm (-1,+3)	≥ 4 mm
** Enrobage extérieur	2.5 mm (± 1) pour le type A et t/2 pour le Type B.	2,5 mm (0, + 2)

Figure 2.3 : Constitution type d'un appareil d'appui selon la norme

2.2.2 - Le matériau caoutchouc

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

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

Le caoutchouc naturel présente (avec une formulation appropriée) une bonne résistance à la traction, un excellent allongement à rupture, un bon comportement aux sollicitations dynamiques et au froid avec, cependant une tendance à la cristallisation. En revanche, sa perméabilité aux gaz est importante, sa tenue aux huiles et aux solvants très médiocre et sa sensibilité au vieillissement doit être compensée par l'emploi d'antioxygène et antiozone⁵. La France, comme de nombreux autres pays européens, a choisi le polychloroprène qui présente, parmi d'autres qualités, une excellente résistance au vieillissement, un très faible taux de fluage sous charge et une bonne résistance au déchirement. Ceci le rend parfaitement bien adapté aux sollicitations des appareils d'appui.

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

⁵ Cf. "Appareil d'appui en caoutchouc". § 3.3.1. Voir Bibliographie.

Sur la tenue à l'ozone, la norme XP T 47.815 ne prévoit qu'un niveau de performance quelle que soit la nature de l'élastomère. Par contre, la norme pr EN 1337.3 (§ 4.3.6) a retenu deux niveaux : l'un pour le caoutchouc naturel, le second, plus élevé et bien adapté aux conditions de service sur un pont, pour le caoutchouc synthétique. Le choix du matériau est alors laissé au client et, dans ce cas, la résistance à l'ozone découle de ce choix. Pour notre part, nous proposons, quand la norme pr EN 1337.3 sera en application, de ne pas définir le matériau mais, **pour les appareils d'appui destinés à être employés sur les ponts et les ouvrages similaires, de fixer une spécification de tenue à l'ozone correspondant au maximum (c'est-à-dire la valeur prévue pour le caoutchouc synthétique).**

L'épaisseur minimale d'un feuillet ne pourra, en aucun cas, être inférieure à 8 mm (XP T 47.815 et pr EN 1337.3), ni supérieure à 16 mm (XP T 47.815) ou 20 mm (pr EN 1337.3).

2.2.3 - Les frettes en acier

Elles sont systématiquement en acier S 235⁶. Compte tenu de l'enrobage systématique par du caoutchouc, **il est inutile de les prévoir en acier inoxydable qui présente, en outre, l'inconvénient de rendre plus difficile l'adhésion du caoutchouc sur la frette.**

L'épaisseur des frettes ne pourra, en aucun cas, être inférieure à 2 mm (XP T 47.815 et pr EN 1337.3, § 4.4.3.1).

2.2.4 - Les éventuels éléments de glissement

2.2.4.1 - Constitution

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

Ces éléments de glissement comportent une plaque de PTFE⁷ alvéolée collée sur le dessus de l'appareil d'appui en caoutchouc, soit sur l'enrobage extérieur en caoutchouc (appareil de type A selon XP T 47.815 ou type D selon pr EN 1337.3), soit sur une tôle extérieure en acier (appareil de type C selon XP T 47.815 ou type E selon pr EN 1337.3). Une tôle en acier inoxydable poli liée à une platine supérieure en acier S235 glisse sur la plaque de PTFE.

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

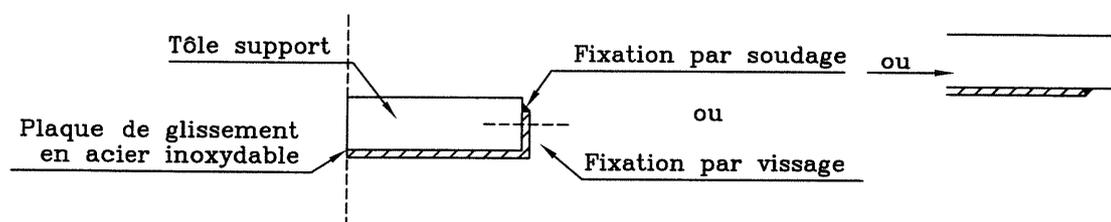


Figure 2.4 : Types de fixation complémentaire latérale des plaques de glissement en acier inoxydable

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

Pour suivre les déplacements et en permettre le relevé lors des inspections des ouvrages d'art, ces platines de glissement portent un régllet de mesure. Il est impératif de prévoir le régllet du côté où se trouvera, fort probablement,

⁶ NF EN 10025

⁷ PolyTetraFluoroEthylène ou Téflon ®

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. (Cf. figure 2.5).

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

Tous ces éléments sont définis dans la norme pr EN 1337.2.



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

(photo SETRA)

2.2.4.2 - Efforts horizontaux

Les appareils d'appui munis d'éléments de glissement sont conçus pour permettre de grands déplacements horizontaux. Les efforts horizontaux sont limités à environ 6 et 8 % (pour respectivement une pression moyenne de 10 et 5 MPa) des efforts verticaux. L'appareil peut toujours se déformer par compression et rotation. Ce type d'appareil d'appui est très intéressant pour les lancements d'ouvrages. Pour une utilisation en service, l'annexe 4 donne des éléments d'information sur la durabilité de ces dispositifs et des conseils sur leur emploi.

2.2.4.3 - Dimension des plaques de glissement

Il ne faut pas hésiter à surdimensionner les longueurs des plaques de glissement. Ceci permettra de pallier aux nombreuses imprécisions consécutives aux préreglages en usine, aux hypothèses de calcul, à la date réelle de pose et donc de la température à la pose. En l'absence d'informations dans les normes françaises actuelles, on se référera à la norme Pr EN 1337.1 (§ 5.4 b) qui 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, voire plus si le déplacement est important.

2.2.5 - Les dispositifs anti-cheminement ou anti-soulèvement

Lorsque le cheminement d'un appareil d'appui en caoutchouc fretté (Cf. EN § 5.3.3.6) est à craindre, il est possible de l'équiper de butées. Ces dispositifs doivent interdire uniquement le cheminement, sans empêcher ni gêner les déformations : compression, distorsion et rotation. Notamment, les butées doivent venir en contact avec une plaque (ou frette extérieure) dont l'épaisseur sera au moins égale à la hauteur de la butée (appareils d'appui de type C de la norme XP T 47.815 et de la pr EN 1337.3). **En aucun cas, la butée ne doit se faire sur le feuillet en caoutchouc.** Cf. figure 2.6.

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

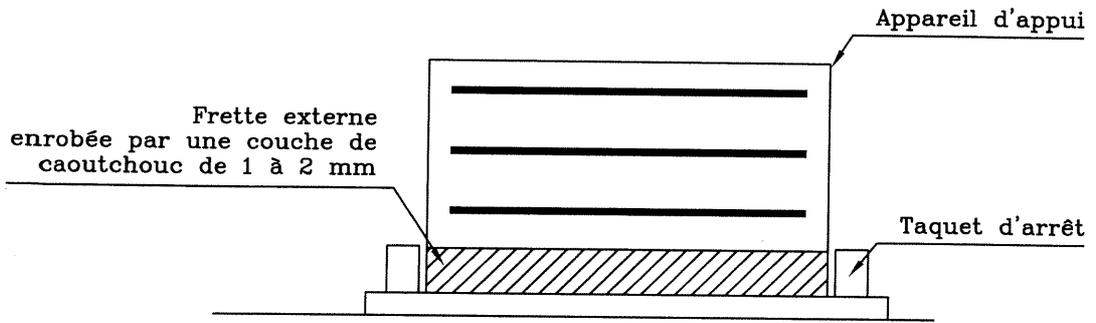


Figure 2.6 : Principe d'un dispositif anticheminement

Appareils d'appui anticheminement

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

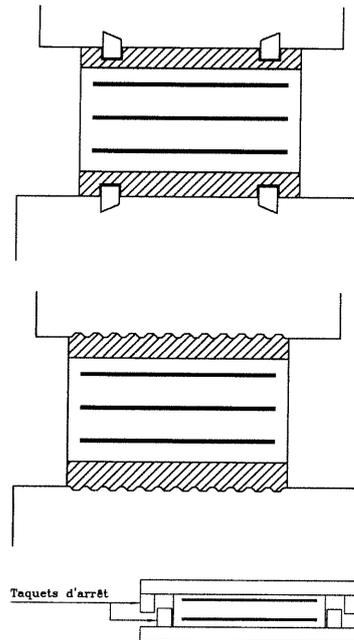
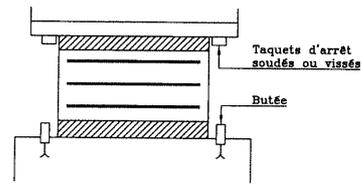
NB : sauf cas particulier, les taquets ne sont nécessaires que sur une face.

Voir aussi le dispositif de la figure 2.6.

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

- avec ancrages.

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



Appareils d'appui à distorsion limitée ou bloquée

Appareil d'appui à système anti-soulèvement

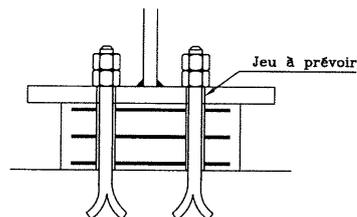


Figure 2.7 : Dessins de principe d'appareils d'appui "fixes".

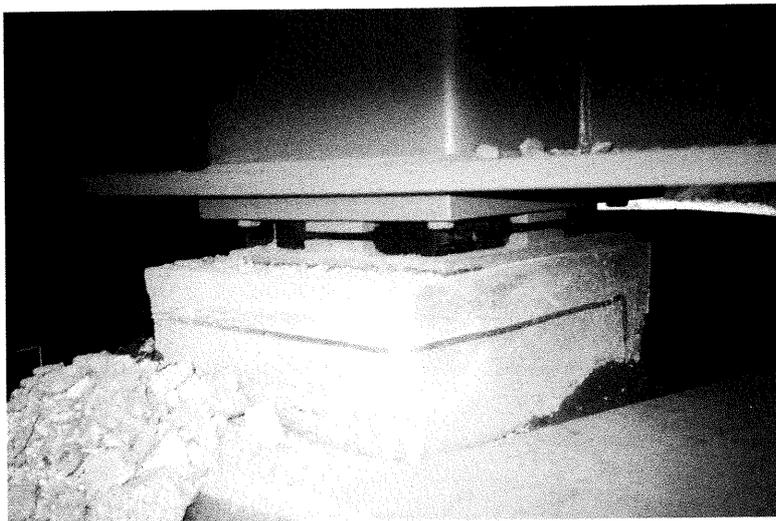


Figure 2.8 : exemple d'un appareil d'appui à distorsion limitée ou bloquée

(photo SETRA)

2.3 - LES GAMMES DE FABRICATION

Compte tenu de l'obligation d'enrober les frettes, la découpe des appareils d'appui dans des plaques mères de grandes dimensions est maintenant abandonnée. Son principal inconvénient résidait dans la mauvaise tenue à la corrosion des tôles de frettage dont les tranches apparaissaient après découpe. Cette découpe était souvent à l'origine de défaut d'adhésion caoutchouc/frette (échauffement lors du sciage, amorce de déchirure, mauvaise tenue de l'agent d'adhésion à l'environnement, etc.).

Pour fabriquer un appareil d'appui à frettes complètement enrobées, celui-ci doit être mis dans un moule et on ne peut fabriquer qu'une dimension par moule. Il y a donc autant de moules que de dimensions d'appareil d'appui. Pour limiter le nombre de ces moules et rationaliser la fabrication, on doit donc choisir les dimensions de l'appareil d'appui à l'intérieur d'une gamme. La gamme la plus rationnelle est celle qui sert actuellement de base à la certification par la marque NF et qui est présentée dans le tableau 1. Ce tableau donne les gammes standardisées de fabrication conformes à la norme XP T 47.815. On pourra comparer ce tableau avec celui de la norme pr EN 1337.3 qui est reproduit en annexe 3 de ce guide. On notera que cette norme pr EN 1337.3 envisage la possibilité d'avoir des appareils d'appui circulaires (Cf. pr EN 1337.3, tableau 3).

Par ailleurs, les grandes dimensions (supérieures à 700 x 700) doivent être utilisées avec précautions : en effet, pour de tels appareils d'appui, il n'est pas aisé d'obtenir une répartition uniforme des efforts.

Tableau 1 : dimensions courantes normalisées
des appareils d'appui en caoutchouc fretté de type B de la marque NF

(8+2)	2	3	4				
I : largeur L : Longueur	$100 \leq I \leq 200$ $150 \leq L \leq 300$	$150 \leq I \leq 200$ $200 \leq L \leq 400$	$I = 200$ $200 \leq L \leq 400$				
100 x 150	*						
100 x 200	*						
150 x 200	*	*					
150 x 250	*	*					
150 x 300	*	*					
200 x 200	*	*	*				
200 x 250	*	*	*				
200 x 300	*	*	*				
200 x 350		*	*				
200 x 400		*	*				
(10+3)		3	4	5			
I : largeur L : Longueur		$250 \leq I \leq 300$ $300 \leq L \leq 600$	$250 \leq I \leq 400$ $300 \leq L \leq 600$	$300 \leq I \leq 500$ $300 \leq L \leq 600$			
250 x 300		*	*				
250 x 350		*	*				
250 x 400		*	*				
300 x 300		*	*	*			
300 x 400		*	*	*			
300 x 450		*	*	*			
300 x 500		*	*	*			
300 x 550		*	*	*			
300 x 600		*	*	*			
400 x 400			*	*			
500 x 500				*			
12+3		3	4	5	6	7	8
I : largeur L : Longueur		$I = 350$ $L = 450$	$350 \leq I \leq 450$ $400 \leq L \leq 600$	$350 \leq I \leq 500$ $400 \leq L \leq 600$	$400 \leq I \leq 700$ $400 \leq L \leq 700$	$450 \leq I \leq 700$ $500 \leq L \leq 700$	$500 \leq I \leq 700$ $500 \leq L \leq 700$
350 x 450		*	*	*			
400 x 400			*	*	*		
400 x 500			*	*	*		
400 x 550			*	*	*		
400 x 600			*	*	*		
450 x 600			*	*	*	*	
500 x 500				*	*	*	*
500 x 600				*	*	*	*
500 x 700					*	*	*
600 x 700					*	*	*
700 x 700					*	*	*
(16+4)			4	5	6	7	
I : largeur L : Longueur			$I = 600$ $600 \leq L \leq 700$	$600 \leq I \leq 700$ $600 \leq L \leq 700$	$600 \leq I \leq 700$ $600 \leq L \leq 700$	$600 \leq I \leq 700$ $600 \leq L \leq 700$	
600 x 600			*	*	*	*	
600 x 650			*	*	*	*	
600 x 700			*	*	*	*	
700 x 700				*	*	*	

NOTA: Toute dimension intermédiaire est également possible à condition qu'elle soit dans les limites des dimensions maximales figurant dans le tableau ci-dessus.

Chapitre 3

COMPORTEMENT ET DIMENSIONNEMENT

3.1 - INTRODUCTION

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

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

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

La norme pr EN 1337-3 (*EN § 5.3.2*)⁸ s'applique à six types d'appareils d'appui tels que définis dans le tableau de la figure 3.1 :

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

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

Parmi les appareils d'appuis de type B, la norme pr EN 1337 distingue :

a) **les appareils d'appui définis au tableau 3 de la pr EN 1337.3, qui correspondent au type A de la norme française XP T 47.815.** Ils comportent n+1 frettes métalliques et n feuillets de caoutchoucs d'épaisseur constante. Ils sont enrobés sur leur périphérie d'une épaisseur de caoutchouc d'au moins 4 millimètres et sur les faces supérieure et inférieure d'une épaisseur de caoutchouc comprise entre 2,5 et 4 millimètres.

b) **d'autres appareils qui comprennent notamment les appareils de type B au sens de la norme XP T 47.815.** Ces derniers se distinguent par le fait que les enrobages supérieur et inférieur de caoutchouc sont plus importants. Il ne s'agit plus d'un simple enrobage de protection, mais d'un demi-feuillet dont l'épaisseur est prise en compte dans les calculs. Il y a donc n feuillets dont n-1 feuillets intermédiaires.

⁸ Dans la suite de ce chapitre, la référence du paragraphe concerné de la norme pr EN 1337.3 sera précisée entre parenthèses en italique gras.

Figure 3.1 : Tableau présentant les différents types d'appareils d'appui en caoutchouc fretté selon la norme pr EN 1337.3 et la norme XP T 47.815.

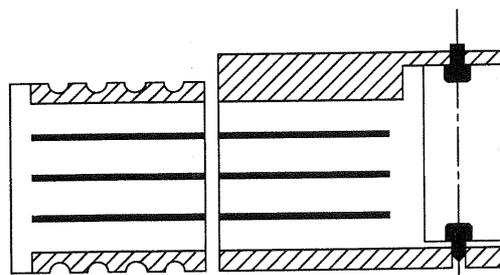
Types selon la norme pr EN 1337.3



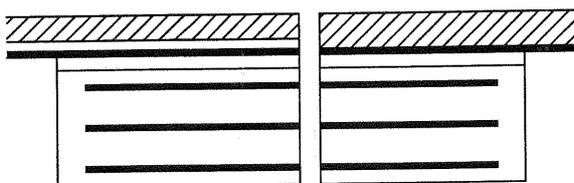
Type A : Appareil d'appui à une seule frette enrobée



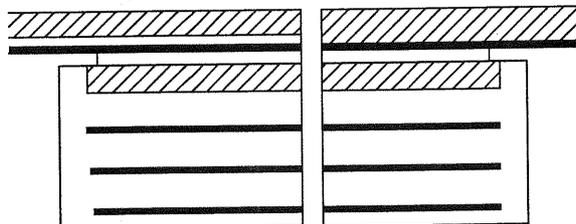
Type B : Appareil d'appui comportant au moins deux frettes et entièrement enrobé



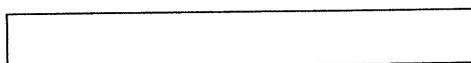
Type C : Appareil d'appui comportant des plaques métalliques extérieures,



Type D : Appareil d'appui glissant comportant en surface une feuille de PTFE

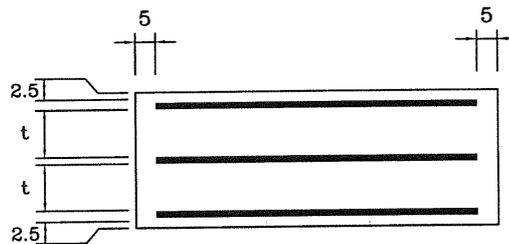


Type E : Appareil d'appui glissant comportant en surface une plaque métallique en contact avec la feuille de PTFE d'un plan de glissement

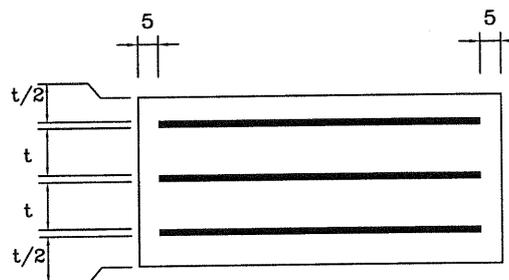


Type F : Appareil d'appui non fretté et appareil d'appui en bande

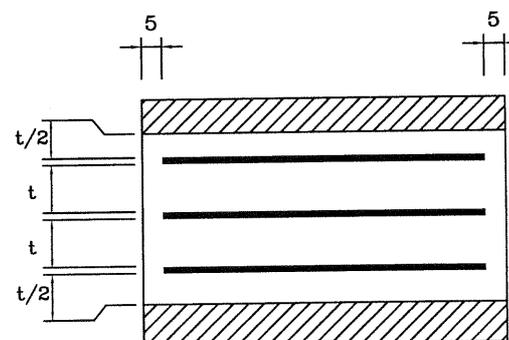
Types selon la norme XP T 47.815



Type A : enrobé à feuillets externes en caoutchouc de 2.5 mm



Type B : enrobé à feuillets externes



Type C : à frettes métalliques extérieures

La figure 3.2 résume les caractéristiques de ces appareils, pour des modèles à trois feuillets :

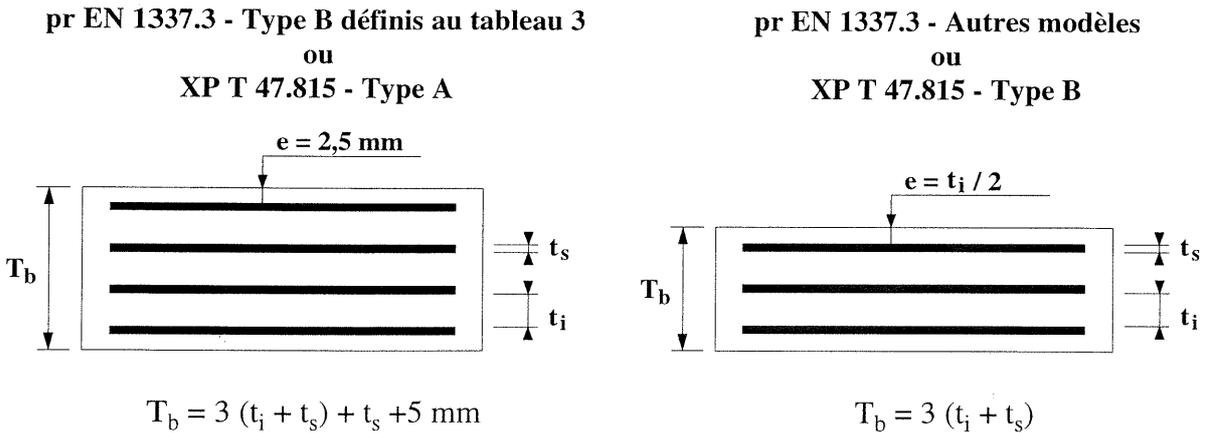


Figure 3.2 : Caractéristiques des appareils d'appui visés par le présent chapitre

De plus, les épaisseurs des feuillets de caoutchouc et des frettes associées peuvent être différentes :

pr EN 1337.3 Type B du tableau 3		X PT 47.815 Type B	
Elastomère (mm)	Frette (mm)	Elastomère (mm)	Frette (mm)
8	3	8	2
-	-	10	3
12	4	12	3
16	5	16	4
20	5	-	-

Figure 3.3 : Comparaison des caractéristiques des appareils d'appui entre la pr EN 1337.3 et XP T 47.815

La gamme des dimensions est également différente. Dans la norme européenne les dimensions maximales sont de 900 x 900 millimètres, alors que dans la norme française, elles ne sont que de 700 x 700.

3.2 - CARACTERISTIQUES DES APPAREILS D'APPUI

3.2.1 - Définition géométrique

La définition géométrique de l'appareil d'appui de type B de la norme pr EN 1337.3 est donnée sur la figure 3.4 (EN § 5.3.2) dans laquelle a, b, a', b' ⁽⁹⁾ sont les dimensions des appareils de forme rectangulaire, D et D' sont les diamètres des appareils d'appui de forme circulaire.

⁹ A noter que a est la plus petite dimension en plan de l'appareil d'appui, alors que dans le Bulletin Technique N°4, a désignait la longueur du côté parallèle à l'axe longitudinal de l'ouvrage.

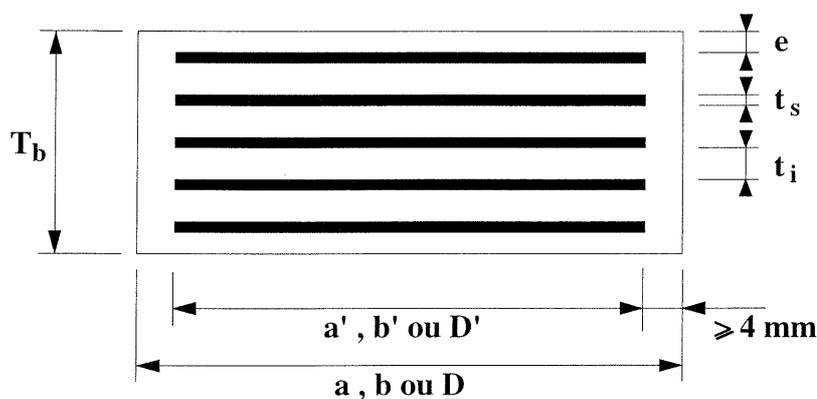


Figure 3.4 : Définition géométrique

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

Épaisseur nominale totale de l'appareil d'appui :	$T_b = n (t_i + t_s) + t_s + 2 e$
Épaisseur nominale totale de caoutchouc :	$T_e = n t_i + 2 e$
Épaisseur initiale totale moyenne de caoutchouc y compris les enrobages ou feuillets extérieurs ⁽¹⁰⁾ :	$T_q = n t_i + 2 e$ si $e > 2,5$ mm $T_q = n t_i$ si $e \leq 2,5$ mm

3.2.2 - Caractéristiques du caoutchouc

(EN § 4.3.1.1)

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

Sauf spécification contraire, la **valeur caractéristique G_k du module de cisaillement conventionnelle est de 0,9 MPa**. Cette valeur, identique dans les normes XP T 47.815 et pr EN 1337.3, est utilisée dans les calculs.

Sous les effets dynamiques, la norme conseille d'augmenter la valeur de calcul du module du caoutchouc (EN § 5.3.3 - note 2). Il est alors compris entre 1,2 et 4 fois la valeur du module statique. Pour les charges de courte durée d'application (freinage des charges routières, forces centrifuges des véhicules, ...) **on adoptera comme valeur 2 fois celle du module statique**. Pour les séismes, on se reportera à l'annexe 1 du présent document.

3.2.3 - Caractéristiques des frettes

(EN § 4.4.3.1)

L'épaisseur des frettes doit être supérieure ou égale à 2 millimètres. L'acier utilisé est de nuance S235. La limite élastique à utiliser dans les calculs est donc de 235 MPa (épaisseur inférieure à 16 mm dans la norme EN 10025).

3.2.4 - Caractéristiques des frettes extérieures

(EN § 4.4.3.2)

Pour les appareils d'appui de type C, l'épaisseur des frettes extérieures est de 15 millimètres pour des feuillets de caoutchouc d'épaisseur inférieure ou égale à 8 millimètres et de 18 millimètres au delà. L'acier utilisé est également de nuance S235. La norme XP T 47.815 est muette sur ce point. Nous conseillons d'appliquer dès maintenant les prescriptions du projet de la norme européenne.

¹⁰ Si l'épaisseur nominale de l'enrobage est supérieure à 2,5 mm, elle doit être prise en compte dans le calcul, en deçà elle est négligée (EN § 5.3.3).

3.2.5 - Caractéristiques des plaques de glissement

(EN § 4.4.4)

Les caractéristiques des plans de glissement sont donnés par la norme pr EN 1337-2.

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

L'épaisseur minimum de la plaque support est donnée par la formule (EN 1337.2 § 6.9.3) :

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

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

Le coefficient de frottement μ_d acier-PTFE alvéolé est donné dans le tableau 11 de la norme pr EN 1337-2. Ce tableau est défini à partir de la formule suivante (Norme - Annexe B) :

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

avec $k = 1,0$ pour l'acier austénitique (acier inoxydable)
 σ_p pression de contact sur le PTFE en MPa

Ces valeurs varient de 5 à 8 % suivant les pressions usuelles de contact.

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 effective d'appui ne descend pas en dessous de - 5°C.

La vérification de la déformation des plaques de glissement (pr EN 1337.2 § 6.9.2), ne s'avère justifiée que pour des applications délicates ou particulières. Dans les autres cas, on pourra se contenter de vérifier les ordres de grandeur.

3.3 - DIMENSIONNEMENT DE L'APPAREIL D'APPUI

3.3.1 - Principes

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

Pour les appareils de type B, la norme EN distingue :

- les appareils d'appui de taille normalisée, définis dans le tableau 3 de la norme pr EN 1337.3 (Voir annexe 3 de ce guide) ;

Ces appareils d'appui de type B de taille normalisée au sens de la norme pr EN 1337-3 (Tableau 3) doivent faire l'objet des mêmes vérifications que celles prévues par la norme pour les autres types d'appareils d'appui ci-après.

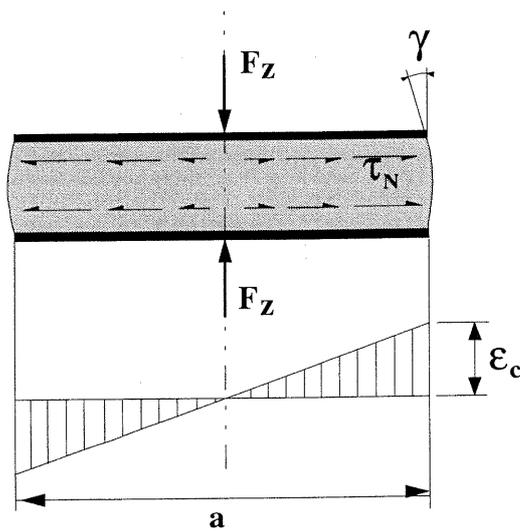
- les autres appareils d'appui.

Conformément à la pr EN 1337.3, quatre types de vérification doivent être faits pour les appareils d'appui en caoutchouc fretté :

- La distorsion totale maximale en tout point de l'appareil d'appui est limitée aux Etats Limites de Service ;
- L'épaisseur des frettes doit être suffisante pour résister à la traction calculée aux Etats Limites de Service ;
- La stabilité de l'appareil d'appui doit être assurée à la rotation, au flambement et au glissement à l'ELS et à l'ELU ;
- Les actions exercées par l'appareil d'appui sur le reste de la structure doivent être vérifiées à l'ELS et à l'ELU.

3.3.2 - Comportement des appareils d'appui

3.3.2.1. Comportement sous effort normal



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

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

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

Dans cette formule :

- G_d désigne le module de calcul du caoutchouc (§ 3.2.2) :

$$G_d = G_k = 0,9 \text{ MPa}$$

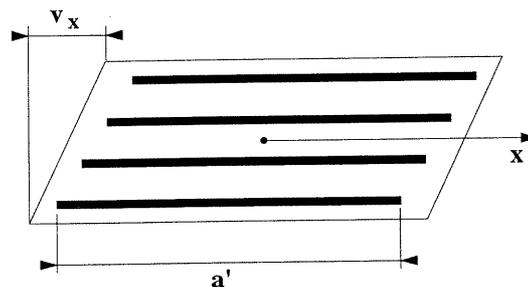
dans le cas d'un effort statique ;

$$G_d = G_{dyn} = 2 G_k = 1,8 \text{ MPa}$$

dans le cas d'un effort dynamique ;

- A_r est la surface en plan effective :

Pour calculer A_r , on doit retirer l'enrobage latéral nominal pour obtenir A' (surface des frettes), et tenir compte des déformations horizontales v_x et v_y provoquées par les efforts horizontaux concomitants de l'effort vertical F_Z



On a alors :
$$A_r = A' \left(1 - \frac{v_x}{a'} - \frac{v_y}{b'} \right) \quad \text{avec} \quad A' = a' \times b'$$

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

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

Pour un appareil d'appui rectangulaire, on a :

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

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

Rappel : la norme prEN 1337.3 prend en compte dans le calcul le feuillet externe lorsque son épaisseur est strictement supérieure à 2.5 mm.

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

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

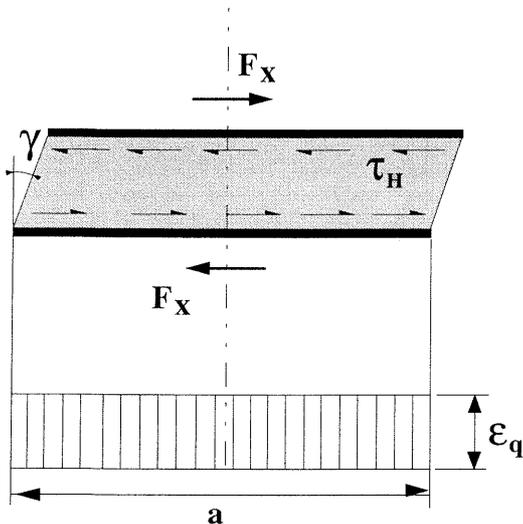
$$\sum v_z = \sum \frac{F_z t_i}{A'} \left(\frac{1}{5 G_d S^2} + \frac{1}{E_b} \right) \quad \text{avec} \quad E_b = 2000 \text{ MPa}$$

La norme précise que la déformation verticale n'est à peu près proportionnelle à la charge qu'après un premier tassement que l'on peut estimer à 2 millimètres. Cette valeur semble trop forte : des essais effectués avec des pressions de 5 à 15 MPa ont donné les tassements initiaux suivants :

- 0,5 mm pour des appareils d'appui 200 x 300 x 3 (8 + 2),
- 0,6 mm pour des appareils d'appui 300 x 400 x 4 (10 + 3),
- 0,75 mm pour des appareils d'appui 400 x 500 x 5 (12 + 3).

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

3.3.2.2 - Comportement sous effort horizontal



Sous un effort horizontal on constate une répartition uniforme de la distorsion ϵ_q liée au cisaillement τ_H dans le caoutchouc.

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

$$\epsilon_q = \frac{v_x}{T_q} = \frac{F_x}{G_d a b}$$

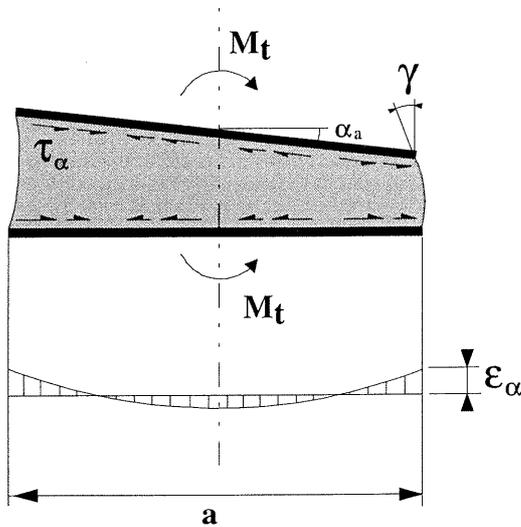
$$v_x = \frac{F_x T_q}{G_d a b}$$

$$\epsilon_q = \text{tg} \gamma$$

Dans ces formules, le module G_d sera pris égal à 0,9 MPa pour les chargements statiques et à 1,8 MPa sous les actions dynamiques.

D'autre part, le projeteur devra composer vectoriellement les efforts longitudinaux et transversaux suivant les combinaisons d'actions du chapitre 4 du présent document (pour obtenir un effort F_{xy}), lorsque le cas se présentera (voir Eurocode 1 - Partie 3 - Annexe C - § C2.1.1).

3.3.2.3 - Comportement sous une rotation d'axe horizontal



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

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

La répartition des distorsions est donnée dans la figure ci-contre.

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

$$M_t = \frac{G_d \alpha a'^5 b'}{\gamma_m n t_i^3 K_S}$$

Dans cette formule, α est la rotation d'axe parallèle au côté b de l'appareil d'appui.

γ_m est un coefficient égal à 1,00

K_S est donné dans le tableau suivant :

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

On peut également utiliser la formule approchée :

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

3.4 - VERIFICATIONS DU DIMENSIONNEMENT

3.4.1 - Vérification de base

3.4.1.1 - Limitation de la distorsion

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

$$\epsilon_\tau = K_L (\epsilon_c + \epsilon_q + \epsilon_\alpha) < 5$$

Dans cette formule :

K_L est un coefficient égal à 1,00 dans le cas général. Ce coefficient peut être porté à 1,5 dans le cas des ouvrages ferroviaires et des ouvrages routiers fortement sollicités. Cette particularité, si elle est prise en compte, doit être spécifiée dans le CCTP (ou dans la notice descriptive du marché).

ε_c , ε_q et ε_α sont les distorsions calculées respectivement sous l'effort vertical, les efforts ou déplacements horizontaux et les rotations du tablier.

De plus, la norme (EN § 5.3.3.3) limite la distorsion sous les efforts ou déplacements horizontaux à 0,7¹¹:

$$\varepsilon_q < 0,7$$

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

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

3.4.1.2 - Traction dans les frettes

Les frettes doivent avoir au moins 2 millimètres d'épaisseur. La norme demande aussi de vérifier l'épaisseur minimale des frettes métalliques à l'Etat Limite de Service. Pour des appareils d'appui sans alvéoles (non percés), dont les feuillettes sont d'épaisseur constante t_1 , l'épaisseur minimale t_s des frettes est définie par (EN § 5.3.3.5) :

$$t_s = \frac{1,3 F_z (t_1 + t_2) \gamma_m}{A_r f_y}$$

avec :

F_z Effort vertical maximum appliqué

f_y limite élastique de l'acier qui compose les frettes (soit 235 MPa pour l'acier S235)

γ_m Coefficient partiel de sécurité, égal à 1 si la frette est sans trou et à 2 si la frette comporte des trous.

En principe, cette vérification est inutile pour les appareils d'appui de type B de taille normalisée définie dans le tableau 3 de la norme prEN 1337.3, car les épaisseurs des frettes ont été renforcées par rapport aux appareils d'appui de la norme XP T 47.815 (Exemple : 8+2 \Rightarrow 8+3 ou 12+3 \Rightarrow 12+4).

3.4.1.3 - Stabilité en rotation

La stabilité en rotation de l'appareil d'appui se vérifie à l'Etat Limite de Service et à l'Etat Limite Ultime. On doit vérifier (EN § 5.3.3.7.1) :

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

avec :

α_a et α_b rotations d'axes perpendiculaires aux côtés a et b de l'appareil d'appui

K_r coefficient égal à 3

$\sum v_z$ somme des déformations verticales calculées comme dans le paragraphe 3.3.2.1 du présent document.

Rappelons que les rotations α_a et α_b doivent inclure les défauts de pose. Ceux-ci dépendent beaucoup du soin apporté à la mise en oeuvre.

¹¹ Cette valeur est susceptible d'adaptation quand on appliquera les charges de l'EC1.

La norme pr EN 1337.3 (§ 7.1.3) n'est pas claire sur les valeurs à adopter pour les défauts de pose, ni sur la façon de les prendre en compte. Les valeurs suivantes sont donc proposées :

- 0,003 radian dans le cas :
 - * d'un tablier coulé en place directement sur l'appareil d'appui,
 - * d'un appareil d'appui fixé sous un élément préfabriqué, ou maté par dessous ou par dessus,
 - * de bossages préfabriqués ;
- 0,010 radian pour les structure préfabriquée posés directement sur les appareils d'appui.

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

Commentaire : il apparaît, à l'usage, que seule la vérification à l'ELS en combinaison fréquente est suffisante dans la majorité des cas.

3.4.1.4 - Stabilité au flambement

La stabilité au flambement doit être vérifiée aux Etats Limites de Service et Ultime dans les conditions suivantes (*EN § 5.3.3.6*) :

$$\frac{F_z}{A_r} < \frac{2 G_d a' S'}{3 T_e}$$

On peut faire les remarques suivantes :

- Cette condition est toujours plus sévère aux Etats Limites Ultimes ; dans la pratique, cette seule vérification suffit ;
- La norme ne précise pas si l'effort F_z est statique ou dynamique ; par souci de simplification, on appliquera cette formule avec la réaction maximum sous combinaisons rares, et avec un module égal à 0,9 Mpa.

3.4.1.5 - Stabilité au glissement

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

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

avec :

$F_{z,Gmin}$	Réaction minimale sous charges permanentes,
F_z et F_{xy}	Réaction verticale et effort horizontal concomitant,
μ_e	Coefficient de frottement entre l'appareil d'appui et la structure.

Ces deux conditions sont à vérifier aux Etats Limites de Service et Ultime.

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

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

Aux ELS : $\mu_e = 0,1 + \frac{K_f}{\sigma_m}$ avec $\sigma_m = \frac{F_z}{A_r}$ en MPa
 et $K_f = 0,60$ pour le béton
 $K_f = 0,20$ pour les autres surfaces y compris mortier de résine

Aux ELU : $\mu_e = 0,9$

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

3.4.1.6 - Pression sur les plans de contact

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

Pour les appareils d'appui de type B de taille conforme au tableau de la norme EN, la contrainte maximum sur l'appareil d'appui est de toute façon limitée à l'ELS par la dite norme. Pour un prédimensionnement, on pourra reprendre la valeur usuelle d'une contrainte maximale uniforme de 15 MPa, étant entendu que la contrainte finale découlera de la formule globale du § 5.3.3 de la pr EN 1337.3.

Pour les autres appareils d'appui de taille non conforme au tableau de la norme EN, reposant sur des bossages en béton, on pourra considérer que cette contrainte reste uniforme, et vérifier les bossages et le chevêtre de la pile aux Etats Limites Ultimes selon les règles de l'annexe E8 et de l'article A.8.4 du BAEL 91. La contrainte sur le béton pourra être calculée en prenant en compte la surface totale A' de l'appareil d'appui.

Voir aussi les commentaires au § 3.4.2.2.

Vérification	ELS Toutes combinaisons	ELU Combinaisons fondamentales
Limitation de la distorsion ϵ $\epsilon = K_L (\epsilon_c + \epsilon_q + \epsilon_\alpha) < 5$ et $\epsilon_q < 0,7$	✓	
Traction dans les frettes $t_s = \frac{2,6 F_z t_i}{A_r f_k}$	✓	
Stabilité en rotation $\sum v_z \geq \frac{(a' \alpha_a + b' \alpha_b)}{K_r}$		✓
Stabilité au flambement $\frac{F_z}{A_r} < \frac{2 G_d a' S'}{3 T_e}$		✓
Stabilité au glissement $F_{xy} \leq \mu_e F_z$ et $\frac{F_{z,Gmin}}{A_r} \geq 3 \text{ MPa}$		✓

Figure 3.5 : Synthèse des vérifications à effectuer

Par ailleurs, dans le cas général notamment, pour les appareils d'appui de taille non conforme au tableau de la norme EN, il est conseillé de ne pas dépasser 15 MPa sauf cas particulier dûment justifié.

3.4.2 - Vérifications complémentaires sur la limitation du soulèvement

3.4.2.1 - Résultats expérimentaux

Toutes les prescriptions données par la norme pr EN 1337.3 sont basées sur un module de cisaillement déduit d'essais de cisaillement pur. Or, le comportement d'un appareil d'appui en compression simple est plus complexe. Le module varie en différents points du caoutchouc et n'est pas constant en fonction de la contrainte appliquée. La rotation vient encore compliquer la distribution des cisaillements.

Ce phénomène pourrait être la cause de nombreux soulèvements que l'on a constaté sur des appareils en place, sous l'effet des rotations imposées par le tablier. En effet, même avec un appareil d'appui correctement dimensionné suivant les règles du BT4 de 1974 (qui ne tolérait aucun soulèvement), les rotations extrêmes pouvaient provoquer sur un bord de l'appareil d'appui, une décompression supérieure à l'effet de la charge verticale centrée.

Les formules de stabilité en rotation de la norme pr EN 1337.3 sont beaucoup moins strictes que celles du BT4. Ceci pourrait donc conduire, si l'on n'y prenait garde, à des décollements et des déformations importants, susceptibles de détériorer les appareils d'appui.

Les études expérimentales¹² ont permis d'établir les courbes limites de soulèvement en fonction de la rotation α et de la compression. Ces courbes sont présentées sur la figure 3.6, à titre d'illustration du phénomène observé par rapport au calcul théorique. Elles justifient le coefficient de minoration K de 2 (Cf. ci-après, § 3.4.2.2, équation [1]).

3.4.2.2 - Vérification proposée

Nous proposons donc, pour tenir compte de ces problèmes d'effectuer un calcul complémentaire avec pour hypothèses :

- une réduction de la surface d'appui causée par un éventuel décollement ;
- une minoration de la déformation du caoutchouc sous l'effort vertical de compression, dont la surestimation conduisait à tolérer d'importantes rotations.

Si on appelle ψ le pourcentage de la surface d'appui qui reste comprimée :

$$\psi = \frac{A_c}{A'}$$

A_c désignant la surface effective de contact

La distorsion due à la compression centrée s'exprime par :

$$\epsilon_c = \frac{1,5 F_z}{G_d a' b' \psi \times \frac{a' b' \psi}{2 (\psi a' + b') t_i}}$$

La distorsion extrême sous rotation est donnée par :

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

¹² Essais faits au LROP dans le cadre de recherches.

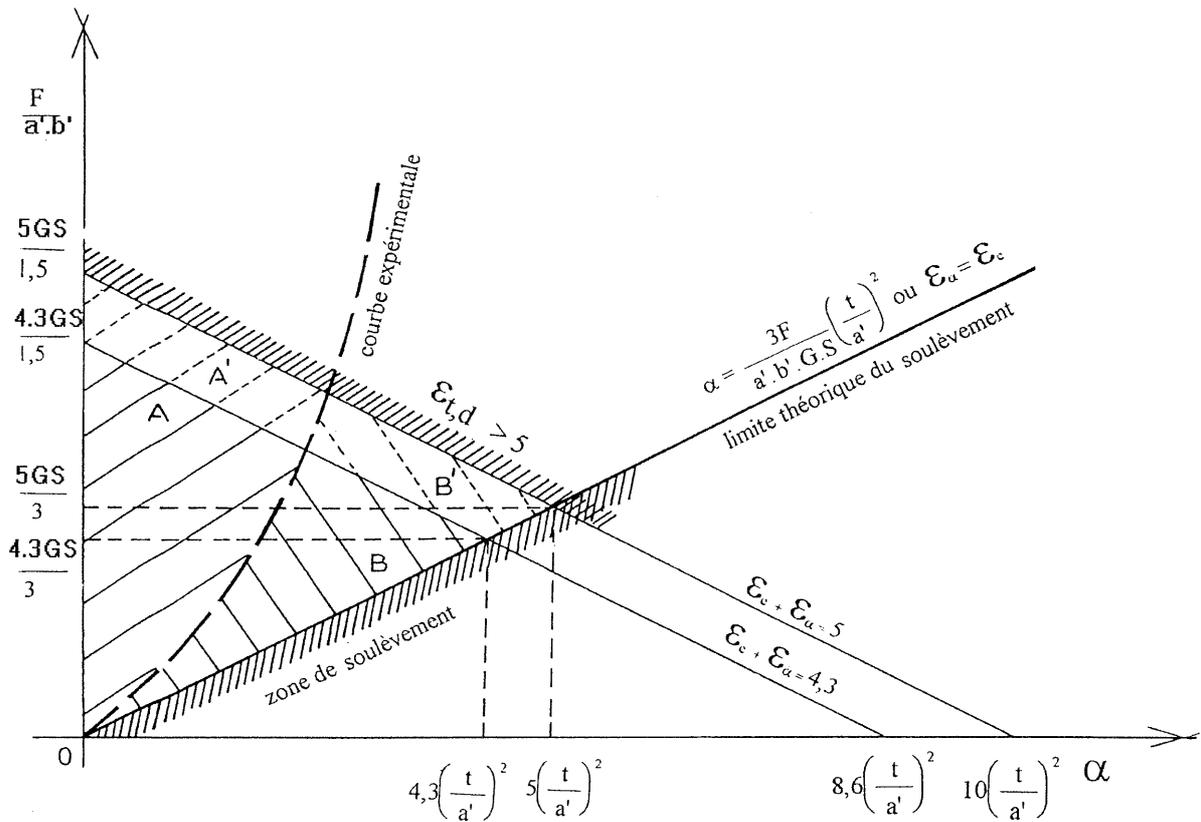


Figure 3.6

Commentaires sur la figure 3.6

On peut réduire le domaine à $\epsilon_c + \epsilon_\alpha = 4,3$ en considérant la distorsion maximale $\epsilon_q = 0,7$. Malheureusement les essais montrent que la droite théorique

$$\alpha = \frac{3F}{a'.b'.G \cdot S} \left(\frac{t}{a'} \right)^2$$

est loin de converger avec la courbe obtenue par des essais sur des appareils d'appui réels (courbe expérimentale).

A est le domaine d'utilisation sans soulèvement selon les essais et en considérant la distorsion maximale de $\epsilon_q = 0,7$.

AA' est le domaine d'utilisation sans soulèvement selon les essais et en considérant la distorsion nulle de $\epsilon_q = 0$.

AB est le domaine d'utilisation sans soulèvement selon la théorie et en considérant la distorsion maximale de $\epsilon_q = 0,7$.

AA'BB' est le domaine d'utilisation sans soulèvement selon la théorie et en considérant la distorsion nulle de $\epsilon_q = 0$.

A la limite théorique du soulèvement, les cisaillements s'annulent, ce qui revient à dire que les distorsions sont égales en valeur absolue.

Compte tenu d'une minoration sur le calcul théorique de la distorsion en compression simple, la condition de non-soulèvement s'exprime donc par :

$$\epsilon_{\alpha} \leq \frac{\epsilon_c}{K} \quad [1]$$

Pour tenir compte de l'expérience, il est proposé d'adopter la valeur 2 pour le coefficient de minoration K.

A l'issue de la vérification avec cette méthode, deux cas se présentent :

- aucun cas de charge ne provoque de décollement, auquel cas, le dimensionnement est satisfaisant ;
- des décollements apparaissent sous certains cas de charges. Ces décollements sont particulièrement inopportuns sous les charges maximales. Nous conseillons alors de les limiter à 10% de la surface (soit $\psi = 0,90$) ; sous les charges minimum, on peut admettre des valeurs atteignant 20%.

Cependant, il peut être avantageux d'ajouter un feuillet si la condition de non-flambement reste respectée.

Le calcul de la valeur exacte de ψ est complexe. Nous proposons donc la méthode suivante pour contrôler les appareils d'appui :

On calcule ϵ_{α} et ϵ_c avec $\psi = 1,00$:

- Si l'équation [1] est vérifiée pour tous les cas de charges, l'appareil d'appui convient ;
- dans le cas contraire, on refait un calcul avec $\psi = 0,90$ pour vérifier l'équation [1] avec F_{zmax} et un calcul avec $\psi = 0,80$ pour vérifier l'équation [1] avec F_{zmin} .

Par contre, la réduction de surface qui résulte des soulèvements ne semble pas préjudiciable vis-à-vis du flambement. En effet, cette réduction se produit surtout sous réaction minimum. D'autre part, le flambement met en jeu l'ensemble du bloc de caoutchouc, et non uniquement la "colonne" située au dessus de la zone comprimée. C'est pourquoi, nous ne proposons pas de justification supplémentaire (sauf cas particuliers) vis à vis de ce phénomène.

Par contre, la pression sur les plans de contact avec la structure devra être revérifiée en considérant que la contrainte est uniforme sur cette surface réduite, conformément à l'article 5.3.3.7 de la norme pr EN 1337-3.

3.5 - DISPOSITIONS SUR APPUI

3.5.1 - Sur une même ligne d'appuis, les appareils d'appui doivent être de même nature (susceptibles notamment de présenter un même tassement), étant toutefois précisé que leurs possibilités de translation ne sont pas nécessairement les mêmes (fig. 3.1 & 3.2).

3.5.2 - Il est déconseillé de juxtaposer dans le sens longitudinal plusieurs appareils d'appui destinés à ne former qu'un seul point de report de charge (fig. 3.7 moitié supérieure). Cette restriction ne s'applique pas au cas des appareils d'appui dédoublés, dont la distance entre axes est en général de l'ordre de 2 m ou plus.

3.5.3 - Dans le sens transversal, il est possible de juxtaposer plusieurs appareils d'appui (fig. 3.7 moitié inférieure) destinés à ne former qu'un seul point d'appui. Ces appareils d'appui doivent être obligatoirement identiques dans leur composition et leurs dimensions. Il convient de rappeler que de telles dispositions doivent être justifiées en tenant compte en particulier des rotations dues aux défauts de pose susceptibles d'exister dans le sens transversal.

Il est en général déconseillé de placer au droit d'un même point d'appui, des appareils ne présentant pas les mêmes dimensions, en raison de leur différence de rigidité (fig. 3.8). Dans le cas d'un pont biais, à poutres multiples, il est le plus souvent préférable de disposer sur une même ligne des appareils d'appui identiques dont le dimensionnement sera celui de l'appareil le plus sollicité, mais en portant son attention sur les contraintes minimales sur l'appareil d'appui le moins sollicité pour éviter un cheminement.

DISPOSITION D'APPAREILS D'APPUI
SUR UN MEME APPUI

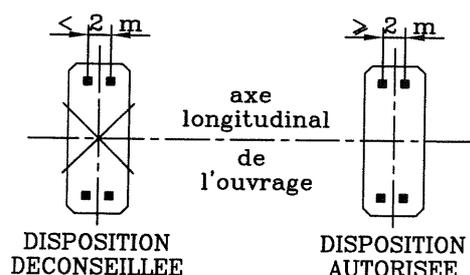
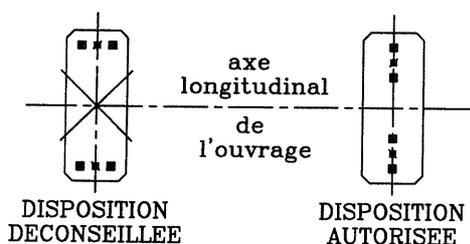


Figure 3.7 : Exemples de dispositions admises et fortement déconseillées dans le sens longitudinal.



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

Lorsque les appuis sont en béton armé, il convient de ménager une revanche de 10 à 15 cm minimum en vue d'assurer la répartition correcte des contraintes, la mise en place des frettes et leur ancrage (fig. 3.9). En tout état de cause, il conviendra de suivre les prescriptions relatives aux constructions en béton armé.

DISPOSITION D'APPAREILS D'APPUI
SUR UN MEME APPUI

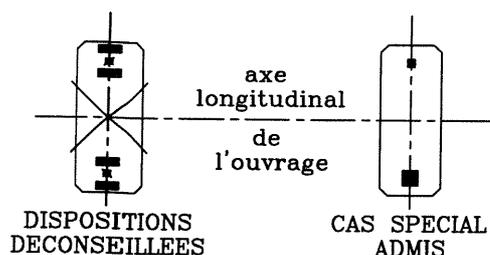


Figure 3.8 : Exemple de dispositions admises et fortement déconseillées dans le sens transversal.

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

3.5.6 - Repérage sur les appuis

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

3.5.7 - Remplacement d'appareils d'appui

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

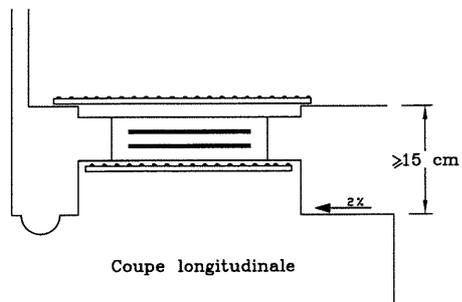
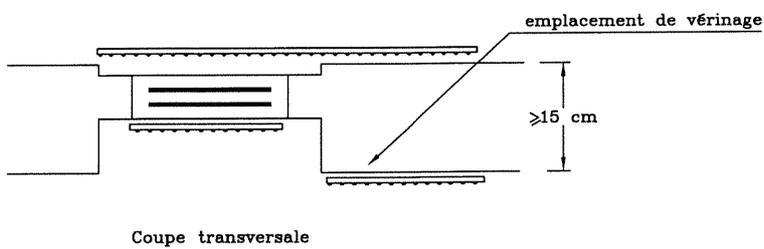


Figure 3.9 : Exemple de dispositions constructives.



CHAPITRE 4

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

4.1 - GENERALITES - CONTEXTE REGLEMENTAIRE

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

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

Pour les calculs qui vont suivre, on a utilisé les combinaisons habituelles, complétées par celles définies en annexe 2 au présent document.

4.2 - DIMENSIONNEMENT

La meilleure manière de comprendre le déroulement des calculs de dimensionnement d'appareils d'appui est de s'appuyer sur un exemple.

On considère le dimensionnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté d'un ouvrage en béton précontraint coulé en place.

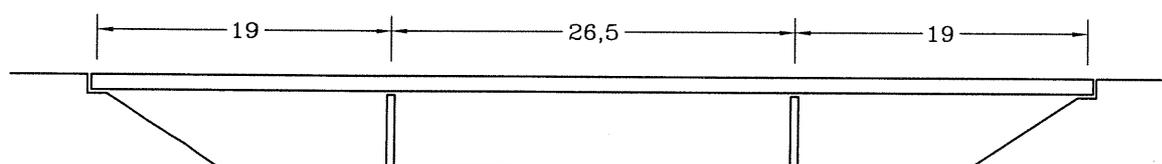


Figure 4.1 : Coupe longitudinale d'un PSI-DP

Chaque ligne d'appui comporte deux appareils d'appui. Les efforts et déformations imposées sont récapitulés dans le tableau 2 (efforts pour un appareil). Ces efforts résultent d'un calcul de dimensionnement général de la structure (calcul informatique complété par des notes manuelles supposant une répartition égale des efforts horizontaux).

Tableau 2

sur culée		Effort vertical MN	Rotation (en 10^{-3} rad)	Effort horizontal MN	Déplacement m
Charges permanentes	maxi	1,05	4,6	-	0,013
	mini	0,96	1,8	-	-
Charges routières (pondérées par 1,2)	maxi	0,67	-1,0	Hx = 0,36	-
	mini	-0,14	0,5	(pour tout le tablier)	-
Température	uniforme	-	-	-	0,013
	gradient thermique	0,13	0,8	-	-
Vent		-	-	Hy = 0,01	-

En appliquant les combinaisons définies dans le BPEL, on aboutit aux principales valeurs ci-dessous (pour un seul appareil)¹³ :

	V MN	α (en 10^{-3} rad)	v_x m	H (*) MN	
Charges routières G + Q _r + 0,6 T + 0,5 grad effort vertical maxi (Al)	1,78	4,0	0,024	H _x = 0,03	(cas 1)
mini	0,82	2,3	0,024	H _x = 0,03	
effort vertical maxi (Bc)	1,68	4,3	0,024	H _x = 0,045	(cas 1bis)
mini	0,86	2,1	0,024	H _x = 0,045	
rotation maxi (Bc)	1,01	5,3	0,024	H _x = 0,045	(cas 1ter)
Température G + T + 0,5 grad	1,11	5,0	0,029	-	(cas 2)
Vent G + W + 0,6 T + 0,5 grad	1,11	5,0	0,024	H _y = 0,009	(cas 3)

(*) Les efforts horizontaux sont calculés sur la base d'une répartition égale.

Les tests qui ont été réalisés jusqu'à présent ont montré que, généralement, c'est le cas de la rotation qui dimensionne l'appareil d'appui pour le nombre de frettes et leur épaisseur.

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

4.2.1 - Aire de l'appareil d'appui

Sauf prescriptions particulières (appareils d'appui provisoires de pont poussé), et sous réserve de justifications complémentaires, la contrainte de compression moyenne ne peut dépasser la limite de 15 MPa sur la surface A'.

On obtient donc, pour la réaction verticale maximale :

$$A' > \frac{1,78}{15} = 0,1187 \text{ m}^2 \text{ soit } 1187 \text{ cm}^2$$

4.2.2 - Hauteur nette de caoutchouc

La condition habituellement prépondérante est celle liée au déplacement horizontal maximal ϵ . Celui-ci est dû, essentiellement, au déplacement imposé par la température uniforme sur la structure.

$$\epsilon_q = \frac{v_{xy,d}}{T_q} \leq 0,7 \quad \text{avec} \quad v_{xy,d} = v_1 + v_2 = v_1 + \frac{H_x \times T_q}{2G a b} = 0,024 + \frac{0,045 \times T_q}{2 \times 0,9 \times 0,1187} = 0,024 + 0,21 T_q \text{ m}$$

$$\text{d'où } T_q \geq 0,048 \text{ m}$$

On peut choisir 4 feuillets de 12 mm ou 5 feuillets de 10 mm. Les appareils d'appui de taille conforme au tableau de la norme EN n'ont généralement qu'une seule épaisseur de feuillet disponible en fonction des dimensions en plan.

On vérifie la valeur du déplacement total :

$$v_{xy,d} = v_1 + v_2 = 0,024 + \frac{0,045 \times 0,048}{2 \times 0,9 \times 0,1187} = 0,034 \approx 0,7 \times 0,048$$

¹³ Les notations utilisées ici sont celles du BPEL.

4.2.3 - Dimensions en plan

On peut donc choisir un appareil parmi la gamme de dimensions du tableau de la norme EN, en respectant la surface minimale donnée en 4.2.1 mais en conservant une pression moyenne minimale de 3 MPa sous charge permanente minimale.

On détermine donc une surface maximale : $A' \leq \frac{0,82}{3} = 0,2733 \text{ m}^2$

Les dimensions sont donc :

300 x 400	→	$A' = 0,1131 \text{ m}^2$	(non retenu car insuffisant)
300 x 450	→	$A' = 0,1276$	
300 x 500	→	$A' = 0,1421$	
350 x 450	→	$A' = 0,1496$	

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

Ceci conduirait à choisir un appareil d'appui de 300 x 450. Mais pour illustrer les problèmes de décollement, nous avons retenu un appareil de 350 x 450. Soit les valeurs $a' = 340$ et $b' = 440$ mm.

On vérifie alors que $A_r = (0,34 \times 0,44) \left(1 - \frac{0,034}{0,34}\right) = 0,1346 \text{ m}^2 > 0,1187 \text{ m}^2$

4.2.4 - Stabilité au flambement

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

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

$$S' = \frac{a'b'}{2t(a'+b')} = \frac{0,34 \times 0,44}{2 \times 0,012(0,34 + 0,44)} = 7,991 \text{ (feuillet intermédiaire)}$$

A l'ELU, sous V_{\max} , la valeur de l'effort vertical est environ : $V_{\max} \cong 1,35 \times 1,78 = 2,40 \text{ MN}$ d'où une pression moyenne de $\sigma_m = \frac{2,40}{A_r} = 17,85 \text{ MPa}$ avec $A_r = (0,34 \times 0,44) \left(1 - \frac{0,029}{0,34}\right) = 0,1368$

L'épaisseur totale de caoutchouc est de $T_e = 4 \times 0,012 = 0,048 \text{ m}$ (La définition de cette hauteur nette T_e a été donnée dans le chapitre 3).

$$\text{pression limite} = \frac{2a'GS'}{3T_e} = \frac{2 \times 0,34 \times 0,9 \times 7,991}{3 \times 0,048} = 33,96 \text{ MPa} > \sigma_m = 17,85 \text{ MPa} \quad \text{condition vérifiée}$$

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

4.2.5 - Respect de la limite de déformation

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

$$\boxed{\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{ad} < 5}$$

Cas n° 1 Effort vertical maximum avec déplacement dû au freinage et à l'effet thermique

$$\varepsilon_{cd} = \frac{1,5 F_z}{G A_r S} = \frac{1,5 \times 1,78}{0,9 \times 0,1368 \times 7,991} = 2,714$$

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

$$v_1 = 0,024 \quad v_2 = \frac{H_x \cdot T_q}{2 \cdot G \cdot a \cdot b} = \frac{0,03 \times 0,048}{2 \times 0,9 \times 0,1575} = 0,005 \quad v_{xy} = 0,024 + 0,005 = 0,029$$

$$\varepsilon_{qd} = \frac{0,029}{0,048} = 0,606$$

$$\varepsilon_{\alpha d} = \frac{0,34^2 \times 0,007 \times 0,012}{2 \times (3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3)} = 0,865 \quad (\alpha = 0,007 = 0,004 + 0,003 \text{ de défaut de pose})$$

$$\text{d'où} \quad \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{\alpha d} = 2,714 + 0,606 + 0,865 = \mathbf{4,184} < 5$$

Cas n° 1ter rotation maximum avec charges routières

$$\varepsilon_{cd} = \frac{1,5 F_z}{G A_r S} = \frac{1,5 \times 1,01}{0,9 \times 0,1368 \times 7,991} = 1,521$$

$$v_1 = 0,024 \quad v_2 = \frac{H_x \cdot T_q}{2 \cdot G \cdot a \cdot b} = \frac{0,045 \times 0,048}{2 \times 0,9 \times 0,1575} = 0,008 \quad v_{xy} = 0,024 + 0,008 = 0,032$$

$$\varepsilon_{qd} = \frac{0,032}{0,048} = 0,659$$

$$\varepsilon_{\alpha d} = \frac{0,34^2 \times 0,0083 \times 0,012}{2 \times (3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3)} = 1,025 \quad (\alpha = 0,0083 = 0,0053 + 0,003 \text{ de défaut de pose})$$

$$\text{d'où} \quad \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{\alpha d} = 1,521 + 0,659 + 1,025 = \mathbf{3,205} < 5$$

Cas n° 2 Déplacement longitudinal maximum

$$v_1 = 0,029$$

$$A_r = 0,1496 \left(1 - \frac{0,029}{0,34} \right) = 0,1368$$

$$\varepsilon_{cd} = \frac{1,5 \times 1,11}{0,9 \times 0,1360 \times 7,991} = 1,692$$

$$\varepsilon_{qd} = \frac{0,029}{0,048} = 0,604$$

$$\varepsilon_{\alpha d} = \frac{0,34^2 \times 0,008 \times 0,012}{2 \times (3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3)} = 0,988$$

$$\text{d'où} \quad \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{\alpha d} = 1,692 + 0,604 + 0,988 = \mathbf{3,284} < 5$$

Cas n° 3 Vent

$$v_{2y} = \frac{0,009 \times 0,048}{2 \times 0,9 \times 0,1575} = 0,0015 \quad v_{xy} = \sqrt{0,024^2 + 0,0015^2} = 0,024$$

$$A_r = 0,1496 \left(1 - \frac{0,024}{0,34} \right) = 0,1390$$

$$\varepsilon_{cd} = \frac{1,5 \times 1,11}{0,9 \times 0,1439 \times 7,991} = 1,655$$

$$\varepsilon_{qd} = \frac{0,024}{0,048} = 0,500$$

$$\varepsilon_{od} = \frac{0,34^2 \times 0,008 \times 0,012}{2 \times (3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3)} = 0,988$$

$$\text{d'où } \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{qd} + \varepsilon_{od} = 1,655 + 0,500 + 0,988 = \mathbf{3,153} < \mathbf{5}$$

4.2.6 - Stabilité en rotation

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

Le cas de charge déterminant est généralement celui qui donne la rotation maximum.

$$\alpha_{\max} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ soit, avec le défaut de rotation initial de } 3 \cdot 10^{-3}, \text{ une valeur de } \alpha_{xT} = 8,3 \cdot 10^{-3}$$

pour $V_{\max} = 1,01 \text{ MN}$, on calcule le tassement pour les 4 feuillets de 12 mm.

$$\text{Tassement théorique : (avec le coefficient de forme pour le feuillet de 6 mm, } S_6 = \frac{2 \times S'}{1,4} = 11,416$$

$$\sum v_{z,d} = \sum \frac{F_z t_i}{A'} \left(\frac{1}{5 G S^2} + \frac{1}{E_b} \right) =$$

$$\frac{1,01}{0,1496} \left[3 \times 0,012 \left(\frac{1}{5 \times 0,9 \times 7,991^2} + \frac{1}{2000} \right) + 2 \times 0,006 \left(\frac{1}{5 \times 0,9 \times 11,416^2} + \frac{1}{2000} \right) \right] = 0,00129 \text{ m, soit } \mathbf{1,29} \text{ mm}$$

$$\boxed{\geq} \text{ valeur de stabilité en rotation } \frac{a' \alpha_x + b' \alpha_y}{K_r} = \frac{0,34 \times 8,3 + 0,44 \times 0}{3} = 0,00094 \text{ m, soit } \mathbf{0,94} \text{ mm}$$

4.2.7 - Vérification de la condition de non-glissement

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

C'est donc le cas de charge de freinage associé à la température uniforme qui est *a priori* déterminant sous V_{\min} .

$$\sigma_{\min} = \frac{0,86}{0,1364} = 6,34 \text{ MPa}$$

$$\mu_e = 0,1 + \frac{K_f}{\sigma_m} = 0,1 + \frac{0,6}{6,34} = 0,195$$

$$\text{d'où } F_{xy,d} = \left(\frac{0,024}{0,048} \times 0,9 \times 0,35 \times 0,45 \right) + 0,045 = \mathbf{0,116} < \mu_e F_d = 0,195 \times 0,86 = \mathbf{0,167} \text{ MN}$$

4.2.8 - Vérification de la limitation du décollement

La durabilité des appareils d'appui dépend essentiellement de leur fonctionnement, qui est correct lorsque le contact s'effectue sur toute la surface de l'appareil d'appui.

Il est donc important de vérifier qu'il n'y a pas de décollement d'une partie du bloc, ou que ce décollement est réduit. Comme il a été indiqué dans le § 3.4 du présent guide, nous proposons de considérer un décollement limité à 10% sous charge maximum, et 20% sous charge minimum dans les combinaisons.

Comme les efforts peuvent être combinés dans les deux directions, l'influence du vent peut être déterminante.

Par ailleurs, ce sont les feuillets intermédiaires (les plus épais) qui commandent le décollement, les feuillets extérieurs ou les enrobages atteignant rapidement leur rotation limite et formant ainsi un bloc "accroché" aux feuillets principaux. On prendra donc en compte la valeur du S' pour le calcul de $\epsilon_{cd,\alpha}$.

Pour la combinaison $G + Q_r + 0,6 T + 0,5 grad$ (rotation maximum)

$$V_{max} = 1,63 \text{ MN} \quad v_1 = 0,024 \text{ m} \quad H_y = 0 \text{ MN} \quad \alpha_x = 0,0008 \text{ d'où } \alpha_{xT} = 0,0038^{14} \quad \alpha_y = 0 \text{ d'où}$$

$$2 \epsilon_{\alpha,d} = \frac{(a^2 \alpha_x + b^2 \alpha_y) t_i}{\sum t_i^3} = \frac{0,34^2 \times 0,0038 \times 0,012}{3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3} = 1,09 < \epsilon_{cd,\alpha} = \frac{1,5 F_z}{G A' S} = \frac{1,5 \times 1,63}{0,9 \times 0,1496 \times 7,991} = 1,93$$

Donc, **pas de décollement**.

$$V_{min} = 0,97 \text{ MN} \quad \alpha_x = 0,0055 \text{ d'où } \alpha_{xT} = 0,0085^{15} \quad \alpha_y = 0 \quad \text{d'où}$$

$$2 \epsilon_{\alpha,d} = \frac{0,34^2 \times 0,0085 \times 0,012}{3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3} = 1,71 \quad \boxed{\geq} \quad \epsilon_{cd,\alpha} = \frac{1,5 \times 0,97}{0,9 \times 0,1496 \times 7,991} = 1,35$$

Attention : il y a **décollement** !

Le calcul exact de ce décollement nécessite la résolution d'une équation du quatrième degré en ψ (Cf. § 3.4). Il est plus simple de vérifier les valeurs des rotations correspondantes en admettant un décollement de 10 ou 20 %.

Toujours sous V_{min} , avec un décollement de 10 % ($\psi = 0,9$), la surface effective devient :

$$A_c = \psi A' = 0,9 \times 0,1496 = 0,1346 \text{ et } \psi a' = 0,306 \text{ donc}$$

$$2 \epsilon_{\alpha,d} = \frac{(0,9 \times 0,34)^2 \times 0,0085 \times 0,012}{3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3} = 1,38 < \epsilon_{cd,\alpha} = \frac{1,5 \times 0,97}{0,9 \times (0,9 \times 0,1496) \times 7,520} = 1,60$$

Condition respectée

Le décollement est donc compris entre 0 et 10 %, ce qui est acceptable.

Pour la combinaison $G + W + 0,6 T + 0,5 grad$

$$V_{max} = 1,11 \text{ MN} \quad \alpha_x = 0,0050 \text{ d'où } \alpha_{xT} = 0,0080^{16} \quad \alpha_y = 0$$

$$\text{d'où } 2 \epsilon_{\alpha,d} = \frac{0,34^2 \times 0,0080 \times 0,012}{3 \times 0,012^3 + 2 \times 0,006^3} = 1,61 \quad \epsilon_{cd,\alpha} \quad \boxed{\geq} \quad = \frac{1,5 \times 1,11}{0,9 \times 0,1496 \times 7,991} = 1,55$$

Attention : il y a **décollement** !

Avec un décollement de 10%, on obtient la vérification suivante :

$$2 \epsilon_{\alpha,d} = 1,30 < \epsilon_{cd,\alpha} = 1,83$$

Condition respectée

Sous $V_{min} = 0,96 \text{ MN}$ et $\alpha_x = 0,0018$ on obtient :

$$2 \epsilon_{\alpha,d} = 0,96 < \epsilon_{cd,\alpha} = 1,34$$

¹⁴ avec défaut de pose.

¹⁵ avec défaut de pose

¹⁶ avec défaut de pose

Il n'y a pas de décollement.

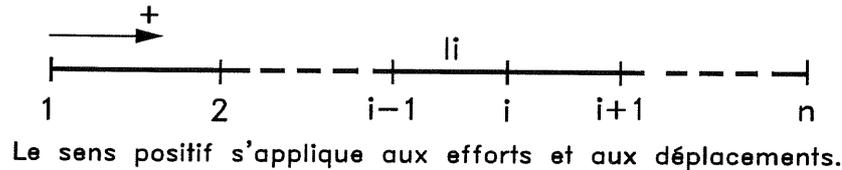


Fig 4.2 : Orientation des axes

Dans le cas où le décollement est trop important (voir les limites indiquées plus haut), le paramètre essentiel sur lequel on doit intervenir est le *nombre de feuillettes* qui donne une plus grande capacité de rotation. Il faut cependant vérifier que l'on reste en deçà des limites du flambement.

4.2.9 - Dimensionnement des frettes

La condition à vérifier pour les frettes est $t_s \geq \frac{1,3 F_{z,d} (t_1 + t_2) \gamma_m}{A_r f_k}$

avec $\gamma_m = 1$ et un acier S 235 dont la limite élastique vaut $f_k = 235$ MPa, on aboutit à la valeur de l'épaisseur minimum, sous effort vertical maximum bien entendu :

$$t_s = \frac{1,3 \times 1,78 \times (0,012 + 0,012) \times 1}{0,1368 \times 235} = 0,0017 \text{ m soit } 1,7 \text{ mm}$$

Pour un appareil de taille normalisée de 350 x 450, les frettes retenues sont de 3 mm d'épaisseur (norme française), largement supérieure à celle calculée.

4.3 - CALCUL DES EFFORTS HORIZONTAUX EN TÊTE DES APPUIS D'UN OUVRAGE - APPAREILS D'APPUI CLASSIQUES

4.3.1 - Généralités

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

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

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

Ce déplacement $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ procède de la distorsion de l'appareil d'appui, de la déformation du corps de l'appui et enfin de la déformation de la fondation (Fig. 4.3).

Il est à noter que les rigidités R_1 et R_2 d'un appui sont à calculer pour les deux cas signalés ci-dessus, déformations lentes et efforts dynamiques, étant entendu que les modules de déformations du béton et du caoutchouc ne sont pas les mêmes pour ces deux genres de sollicitations.

4.3.2 - Détermination des efforts en tête des appuis.

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

4.3.2.1 - Déformation lente

Les données sont les variations de longueurs $\Delta \ell_i$ de chaque travée d'un tablier continu.

On connaît ainsi le déplacement relatif de l'appui i par rapport à l'appui 1 situé le plus à gauche :

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

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

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

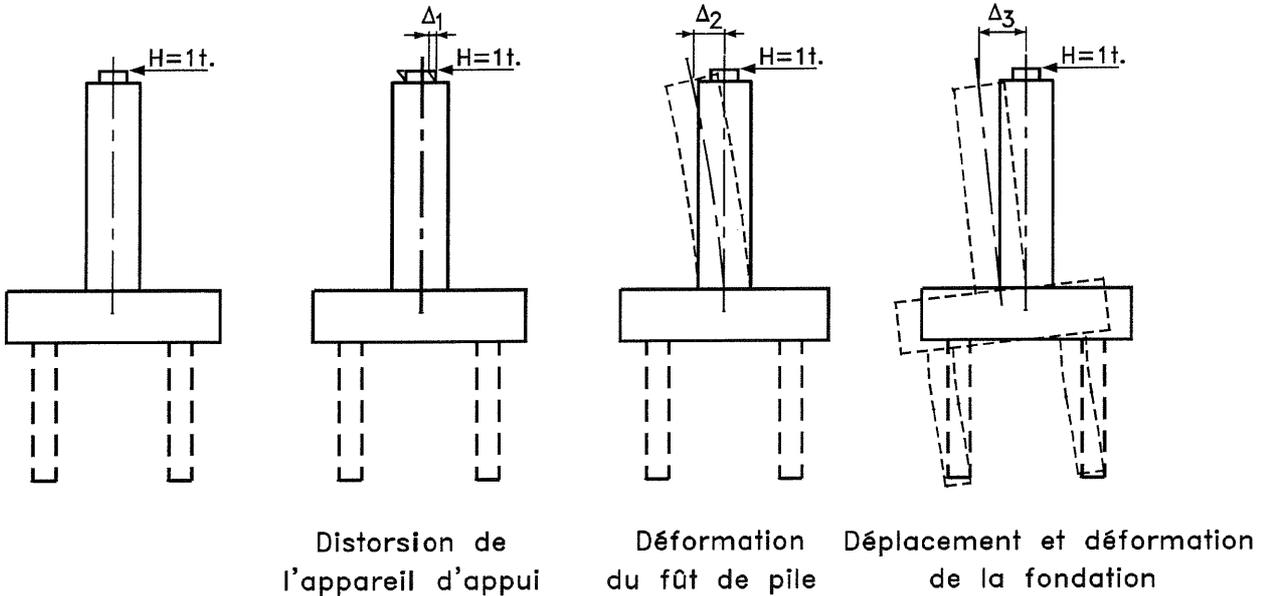


Figure 4.3

4.3.2.2- Effort dynamique

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

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

4.3.2.3 - Application numérique

4.3.2.3.1 - Données numériques

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

$$350 \times 450 \times 4 (12 + 3)$$

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

$$600 \times 600 \times 3 (16 + 4)$$

Les calculs ont donné les raccourcissements suivants, par travée :

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

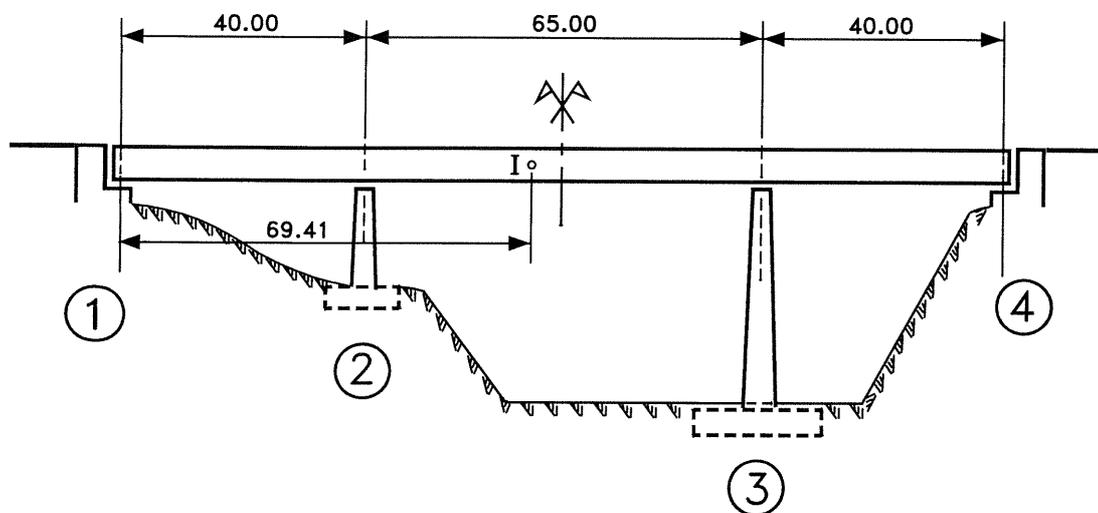


Figure 4.4

Les déplacements en tête d'appuis sont les suivants :

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

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

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

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

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

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

4.3.2.3.2 - Efforts horizontaux dus aux variations linéaires du tablier

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

Déplacement appui 2 = - 0,0152 = - 0,015 m
 Déplacement appui 3 = - 0,0152 - 0,0212 = - 0,036 m

Déplacement appui 4 = - 0,0364 - 0,0152 = - 0,052 m

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

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

$$\text{et donc } \Delta_1 = - \frac{\sum_1^n R_{1,i} d_i}{\sum_1^n R_{1,i}} = \frac{0,798}{32,37} = 0,0247 \text{ m}$$

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

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

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

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

Le cas prépondérant est celui de l'effort de freinage dû à la charge de type B.

L'effort de base général est de 0,36 MN.

Les efforts en tête des appuis seront donc :

$$H_{2,1} = H_{2,4} = 0,36 \times \frac{11,81}{68,10} = 0,062 \text{ MN pour les culées}$$

$$H_{2,2} = 0,36 \times \frac{25,0}{68,10} = 0,132 \text{ MN pour la pile 2}$$

$$H_{2,3} = 0,36 \times \frac{19,48}{68,10} = 0,103 \text{ MN pour la pile 3}$$

On vérifie que : $2 \times 0,062 + 0,132 + 0,103 = 0,36 \text{ MN}$

4.3.2.3.4 - Récapitulation

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

	Culée		Pile	
	initial	après itération	initial	après itération
Δ_1 déformation * (m)	0,026	0,027	0,011	0,012
freinage (MN)	0,045	0,031	0,045	0,066

*Par souci de simplification, s'agissant d'un ouvrage d'art courant, on disposera les mêmes appareils d'appui sur culées et sur piles.

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

Ceux-ci restent donc des 350 x 450 x 4 (12 + 3) sur culées.

4.3.3 - Incidence sur la structure

La pression maximum est calculée sur la surface A' ou, éventuellement en cas de décollement partiel, sur la surface effective ψA_r . On se reportera aux calculs habituels de pression localisée selon l'article A.8.4.1 du BAEL 91.

Compte tenu de la pression modérée admise sur l'appareil d'appui - 15 MPa à l'ELS - cela ne présente généralement pas de difficultés pour les bétons de tête de pile, dans la mesure où l'on respecte un débord suffisant par rapport à la paroi la plus proche. Dans le cas contraire, on s'expose à une rupture du béton sous le bord extérieur de l'appui ou, à tout le moins, une fissuration importante. On veillera de toute façon à soigner les bossages d'appui et à fretter suffisamment non seulement les bossages mais également le sommet de l'appui lui-même.

4.3.4 - Relation calculs - économie des appareils d'appui

Comme on vient de le voir dans l'exemple de calcul ci-dessus, la prise en compte des souplesses des appuis et des appareils sur lesquels ils reposent, ne conduit généralement pas à un redimensionnement des appareils d'appui eux-mêmes. En effet, ni les déplacements, ni les efforts dynamiques horizontaux ne varient suffisamment pour modifier le nombre de feuillettes (ces écarts n'ayant évidemment aucune influence sur les dimensions en plan).

4.4 - CALCUL DES EFFORTS HORIZONTAUX DANS UN OUVRAGE COMPORTANT DES APPAREILS D'APPUI GLISSANTS

4.4.1 - Généralités

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

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

Pour un appareil d'appui glissant, son fonctionnement - toujours à l'ELS - se présente de plusieurs manières :

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

La relation entre l'effort H mobilisable et l'effort vertical concomitant s'écrit :

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

où

- μ est le coefficient de frottement de l'appareil d'appui pour la charge verticale V,
- PP est la précision de pose de l'appareil d'appui correspondant à un éventuel défaut d'horizontalité (PP est positif dans la formule ci-dessus).

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

4.4.1.1 - Valeurs numériques de calcul

Les valeurs du coefficient de frottement μ sont données dans le chapitre 3 : $\mu_d = \frac{1,2 \cdot k}{10 + \sigma_p}$ avec σ_p pression de contact sur le PTFE, que l'on prendra égale à la pression sur le béton calculée comme précédemment.

La précision de pose de l'appareil d'appui est de 0,3 % pour les tabliers en béton coulés en place, et 1,0 % pour les tabliers en béton préfabriqués.

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

Comme pour les appareils d'appui glissants à pot, on considère un calcul simplifié dans lequel on déterminera les efforts horizontaux extrêmes (à l'ELS) à partir des charges verticales extrêmes des combinaisons rares correspondantes. Cela va dans le sens de la sécurité sans pour autant majorer fortement les actions. On pourra se reporter au document sur les appareils d'appui à pot¹⁷ pour approfondir les explications concernant cette simplification.

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

Comme il n'existe pas de référence pour cet aspect, on reprend ici la prEN 1337-1 "Règles générales de conception et de calcul" pour les appareils d'appui.

Les coefficients de frottement à retenir pour les appareils 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} coefficient de frottement maximal pour un appareil d'appui glissant considéré individuellement,
 μ_a coefficient de frottement à retenir si le frottement est défavorable vis-à-vis de l'effet étudié,
 μ_r coefficient de frottement à retenir si le frottement est favorable vis-à-vis de l'effet étudié,
 PP précision de pose de l'appareil d'appui (PP positif dans les formules ci-dessus),¹⁸
 α coefficient de dégressivité dépendant de "n", nombre d'appareils d'appui glissants intervenant dans l'équilibre de la structure

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

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

$$\begin{aligned}n &= 4 \quad \text{d'où } \alpha = 1 \\ \mu_a &= 0,5 (\mu_{\max} + PP) (1 + 1) = (\mu_{\max} + PP) \\ \mu_r &= 0,5 (\mu_{\max} - PP) (1 - 1) = 0\end{aligned}$$

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

Remarque : Le coefficient de frottement de 5% correspond à une pression moyenne de 15 MPa sur l'appareil d'appui.

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 soient bloqués alors que ceux de l'autre coté glissent paraît extrêmement faible. Dans ce cas particulier, le projeteur est invité à apprécier la nécessité de modifier la valeur de α .

¹⁷ Cf. Bibliographie

¹⁸ Pour fixer la valeur de PP, on se reportera au § 3.3.3.3.

4.4.1.4 - Effort horizontal dû au freinage

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

4.4.2 - Exemple de calcul

4.4.2.1 - Caractéristiques de l'ouvrage

Il s'agit d'un ouvrage à quatre travées en béton précontraint construit par encorbellements successifs et dont les principales dimensions sont données sur la figure 4.5.

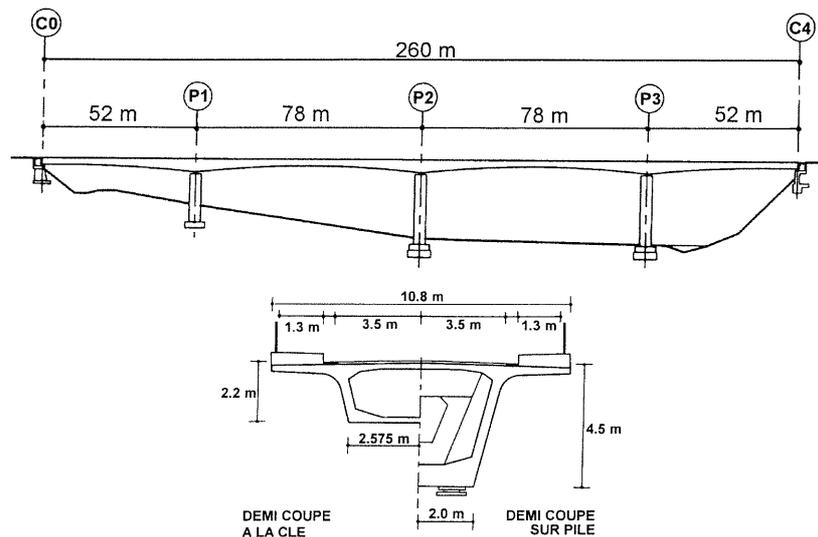


Figure 4.5 : Principales dimensions de l'ouvrage étudié

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

pour une pile (2 appareils d'appui)					
		C0 et C4	P1 et P3	P2	
Charges permanentes	V max	2,98	17,88	18,34	MN
	V min	2,87	17,76	18,32	
	rot max	1,1	-0,5	-0,2	10^{-3} rad
	rot min	0,8	-0,8	-0,2	
charges routières	V max	1,57	3,74	3,78	MN
	V min	-0,56	-0,66	-0,54	
	rot - Vmax	-2,0	-0,5	0	concom
	rot - Vmin	1,3	0,2	0	
Gradient thermique (12°)	V	0,29	-0,40	0,22	MN
	rot	0,6	0,3	0	

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

Selon les règles du BPEL, on considère les combinaisons suivantes :

- pour les charges routières en action de base, 0,6 T et 0,5 grad comme actions d'accompagnement,
- pour la température en action de base, aucune charge routière,
- de même, le vent est exclusif des charges routières,

- le gradient étant positif et égal à 12°.

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

mm	travées de rive (1) et (4)	travées centrales (2 et 3)
retrait/fluage	10,4	15,6
température uniforme	20,8	31,2
total	31,2	46,8

Le calcul des déplacements s'effectue comme dans le paragraphe 4.3. Dans le cas où il y a des appareils d'appui glissants, la difficulté réside dans le fait que ces appareils d'appui agissent jusqu'à un certain seuil. En dessous de l'effort de glissement, leur souplesse est la même que s'ils ne glissaient pas. Au-delà, leur souplesse est "infinie". Il convient donc de faire un premier calcul en les considérant comme appareils d'appui non glissants puis, si l'effort correspondant au déplacement dépasse le seuil, il faut remplacer leur souplesse par un effort limite correspondant et recalculer l'équilibre des efforts horizontaux.

4.4.2.2 - Prédimensionnement des appareils d'appui

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

Avec les combinaisons du BPEL, on obtient les efforts suivants :

pour un appareil d'appui				
	C0 et C4	P1 et P3	P2	Unité
V max	2,35	10,71	11,12	MN
V min	1,16	8,39	8,87	
rot max	2,4	1,2	2,1	10 ⁻³ rd
rot min	1,0	0,6	1,5	

Compte tenu de la contrainte maximum de 15 MPa, on obtient :

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

* Sur piles, les dimensions normalisées ne permettent pas de disposer un seul appareil d'appui par âme, il est donc nécessaire d'en disposer deux côte à côte, le petit côté étant dans le sens transversal. Figure 4.6.

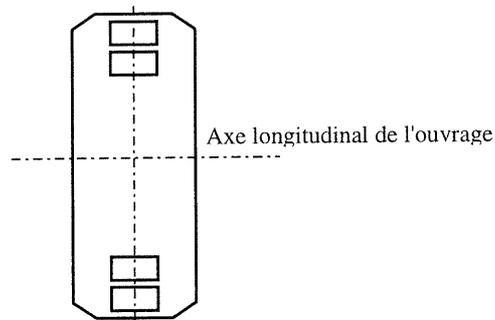


Figure 4.6 : Dispositions des appareils d'appui

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

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

Ce calcul permet de voir immédiatement que les appareils d'appui sur culées - de petites dimensions - devront être glissants car il ne sera pas possible d'empiler suffisamment de couches de caoutchouc pour absorber le déplacement ($T_{\text{mini}} > 91/0.7 = 130$ mm sous un appareil d'appui avec $a = 400$ mm).

Avec les principes du paragraphe 4.2, on aboutit à :

C0 et C4	P1 - P2 -P3
1 appareil de 400 x 500 4 x (12 + 3)	2 appareils de 700 x 600 7 x (16 + 4)

4.4.2.3 - Efforts horizontaux pour les appareils d'appui glissants

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

♦ En statique.

Sur culée : une ligne de 2 appareils de 400 x 500 x 4 (12 + 3)

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

Sur pile : une ligne de deux fois 2 appareils de 700 x 600 x 7 (16 + 4)

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

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

Les appareils d'appui glissants sur culées ont un coefficient de frottement maximum de 5,3% (pour une pression de 15 MPa, et un défaut de pose de 0,3%). Compte tenu d'un effort vertical maximum de 2,33 MN (pour un appareil), l'effort limite de glissement - par culée - est de :

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

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

4.4.2.4.1 - Efforts dus aux variations linéaires du tablier

1ère itération

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{Déplacement appui 1} &= -0,031 &= -0,031 \text{ m} \\ \text{Déplacement appui 2} &= -0,031 - 0,047 &= -0,078 \text{ m} \\ \text{Déplacement appui 3} &= -0,078 - 0,047 &= -0,125 \text{ m} \\ \text{Déplacement appui 4} &= -0,125 - 0,031 &= -0,156 \text{ m} \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= -0,031 + 0,074 = 0,043 \text{ m} \\ \Delta_2 &= -0,078 + 0,074 = -0,004 \text{ m} \\ \Delta_3 &= -0,125 + 0,074 = -0,051 \text{ m} \\ \Delta_4 &= -0,156 + 0,074 = -0,082 \text{ m} \end{aligned}$$

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

On en déduit les efforts horizontaux correspondants :

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

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

2ème itération

Les appareils d'appui glissants ont une rigidité nulle. On remplace les valeurs de R_i pour C0 et C4 par 0.

Cependant, le calcul se complique, car il faut étudier successivement trois cas de figure :

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{minimum} \quad \mu_a &= \mu_{\max} + PP = 5,3 \% \\ \text{maximum} \quad \mu_r &= 0 \end{aligned}$$

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

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

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

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

On obtient le tableau suivant :

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

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

On obtient le tableau suivant :

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

On en retire que le déplacement maximum en P 1 peut être de 0,049 m
 en P 2 0,014 m
 en P 3 0,060 m

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

NOTA : il faut comprendre que la présence d'appareils d'appui glissants transforme la structure en un système non linéaire. Il n'est donc pas rigoureusement possible de superposer les efforts et déplacements de chacune des actions pour les combiner. Cependant, cela entraînerait des calculs compliqués parfaitement inutiles par rapport aux différences sur les valeurs à calculer. On pourra donc se contenter de considérer que la valeur du déplacement due à la température uniforme est la différence entre le calcul avec le raccourcissement maximum (ici 6.10^{-4}) et le raccourcissement dû aux charges permanentes (2.10^{-4}).

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

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

On obtient :

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

La somme des rigidités est égale à 63,92.

Pour un effort de freinage de 0,36 MN à l'ELS rare, la répartition est donc :

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

4.4.2.4.3 - Incidence sur le calcul des appareils d'appui

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

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

C0 et C4	P1	P2	P3
1 appareil de 400 x 500 4 x (12 + 3)	2 appareils de 700 x 600		
(inchangé)	5 x (16 + 4)	4 x (16 + 4)	7 x (16 + 4) (inchangé)

4.4.2.5 - Itération sur les efforts horizontaux

Il faut alors reprendre les calculs de répartition des efforts horizontaux dus aux variations linéaires du tablier comme à la température uniforme.

Les souplesses d'appareil d'appui étant proportionnelles au nombre de feuilletts, les nouvelles valeurs sont les suivantes (en statique) :

pour	P1	0,0529 m/MN
	P2	0,0423
	P3	0,0741

	C0 et C4	P1	P2	P3
Appareil d'appui	0,1333	0,0529	0,0423	0,0741
Fondation + fût	0	0,0091	0,0431	0,0431
Total	0,1333	0,0620	0,0854	0,1172
$R_i = 1/v$	7,50	16,12	11,71	8,53

On peut gagner une itération en considérant d'emblée que les appareils d'appui sur culée sont glissants. D'où, dans le premier cas, appareils glissants avec le même coefficient de frottement à gauche et à droite :

		C0	P1	P2	P3	C4
R_i		0	16,12	11,71	8,53	0
Somme R_i	36,371					
$R_i \times d_i$ ou H_{iim}		-0,235	-0,503	-0,913	-1,065	0,235
Somme H_i	-2,481					
point 0	113,71					
déplacement		0,068	0,037	-0,010	-0,057	-0,088
H		0,25	0,60	-0,11	-0,48	0,25
H_{iim}		0,25	-	-	-	0,25

En poursuivant les autres configurations (frottements différents à gauche et à droite du point 0), on en retire les nouveaux déplacements maximum :

en P 1	0,043 m
en P 2	0,016 m
en P 3	0,069 m

Sous charges permanentes seules, les déplacements sont :

en P 1	0,013 m
en P 2	0,002 m
en P 3	0,018 m

On note que les déplacements sous charges permanentes ne diffèrent que de 1 mm !

La répartition des efforts de freinage est également modifiée :

pile 1	$H_1 = 0,416 H_T = 0,15 \text{ MN}$
pile 2	$H_2 = 0,346 H_T = 0,13 \text{ MN}$
pile 3	$H_3 = 0,239 H_T = 0,09 \text{ MN}$

Ces nouvelles valeurs ne remettent pas en cause le dimensionnement obtenu après la première itération, c'est à dire en considérant :

5 feuillets pour P1
4 feuillets pour P2
7 feuillets pour P3

Comme on l'a déjà constaté, ce sont essentiellement les déplacements horizontaux qui déterminent le nombre de feuillets. La faible différence entre les deux itérations (6 mm en moins pour P1) explique cela.

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

De manière analogue au paragraphe 4.3.3, nous attirons l'attention de chacun sur l'équilibre entre les calculs et les économies matérielles réalisables sur les appareils d'appui.

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

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

Chapitre 5

LES CONTROLES

5.1 - PRINCIPES GENERAUX

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

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

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

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

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

Dans le contexte de la qualité en matière de produits pour la construction des ponts, une procédure de contrôle centralisée adaptée au produit a semblé mieux convenir qu'un contrôle à la réception de chaque fourniture sur un chantier.

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

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

C'est l'ensemble de ces considérations qui a conduit à mettre en place une procédure de certification permettant d'apprécier la conformité aux normes françaises de ces appareils d'appui, notamment les normes XP T 47.801 à 815

Cette procédure est **la Marque NF Appareils d'appui en caoutchouc fretté**.

Nous ne détaillerons pas ici les étapes de la procédure et les obligations qui en résultent pour le fabricant ; ceci fait l'objet d'un règlement particulier à cette marque. Voir aussi le document AFPC (Cf. Bibliographie).

5.2 - LES CONTROLES DE FABRICATION CONDUISANT A LA MARQUE NF

5.2.1 - La normalisation

Les normes sur lesquelles s'appuie la procédure de certification "marque NF" sont les suivantes :

- Norme XP T 47.801 Généralités et terminologie,
- Normes XP T 47.802 à 814 Normes d'essais,
- Norme XP T 47.815 Spécifications.

A terme, ces normes seront remplacées par les normes EN :

- Norme pr EN 1337.1 Règles générales de conception et de calcul,
- Norme pr EN 1337.3 Appareils d'appui en caoutchouc fretté (qui contient les méthodes d'essais),
- Norme pr EN 1337.2 Eléments de glissement.

Cette modification de la normalisation ne changera que peu les principes de la certification.

5.2.2 - Les normes d'essais

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

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

5.2.2.1 - Comportement aux actions de courte durée

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

a) Comportement en cisaillement

- Détermination du module de cisaillement G selon la norme XP T 47.802

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

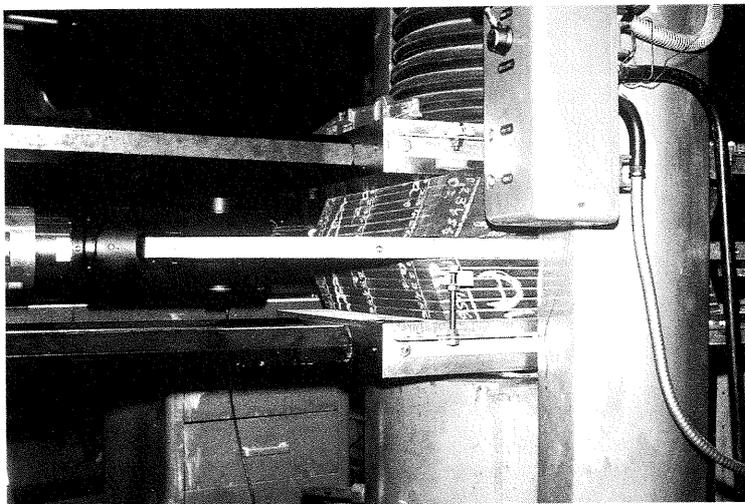


Figure 5.1 : Essai de distorsion pour la détermination du module G et de la tenue au cisaillement.

(photo SETRA)

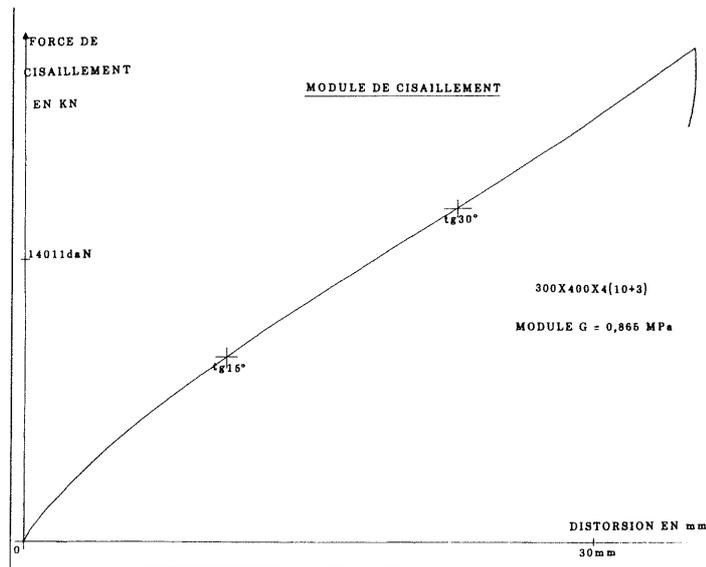


Figure 5.2 : Exemple d'une courbe de détermination du module de cisaillement

- Détermination de l'adhérence en cisaillement selon la norme XP T 47.803

A la suite de l'essai précédent, on augmente l'effort horizontal, tout en augmentant la charge verticale jusqu'à obtenir une déformation correspondant à $\text{tg } \gamma = 2.0$.

b) **Comportement en compression** selon la norme XP T 47.804

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

c) **Comportement en rotation** selon les normes :

- XP T 47.808 méthode de la cale biaisée

L'essai consiste à mesurer, par paliers, jusqu'à l'obtention d'une contrainte de compression moyenne maximale, les déplacements relatifs des deux surfaces et la perte éventuelle de surface portante.

- XP T 47.810 méthode de l'excentration

L'essai consiste :

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

Pour des raisons de commodité, seul l'essai par excentration est pratiqué.

5.2.2.2 - *Comportement aux actions de longue durée*

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

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

5.2.2.3 - Comportement sous l'influence de l'environnement

- a) Détermination de la résistance à l'ozone selon la norme XP T 47.812
- b) Détermination de la résistance au brouillard salin selon la norme XP T 47.813
- c) Vieillessement accéléré ou tenue à la chaleur

L'évolution des caractéristiques mécaniques après vieillissement artificiel ou tenue à la chaleur concerne les essais des normes XP T 47.802, 803, 804 et 814.

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

e) D'autres normes, applicables au caoutchouc vulcanisé et non au produit fini, permettent d'évaluer les éventuelles variations physiques et d'en mesurer les effets. C'est, par exemple, la norme NF T 46.013 : Détermination de l'action des liquides (huiles de décoffrage).

5.2.2.4 - Comportement aux actions dynamiques

Le comportement aux actions sismiques est ici visé. Pour apprécier celui-ci, il existe des essais spécifiques qui ne sont pas encore normalisés.

5.2.2.5 - Conformité aux spécifications.

Ces spécifications sont rassemblées dans la norme XP T 47.815. C'est la conformité à cette norme qui sert de base à l'établissement de la marque NF

5.2.3 - Conformité aux normes

Pour vérifier la conformité à la norme, le Maître d'Oeuvre va se trouver face à deux situations.



Figure 5.3 : Exemple d'un appareil d'appui portant le logo de la certification marque NF.

(photo SETRA)

5.2.3.1 - Le produit rentre dans le cadre de la marque NF

C'est-à-dire que le produit est un appareil d'appui de type B conforme aux dimensions du tableau 1 du chapitre 2 (qui reprend un tableau de la norme XP T 47.815).

Le Maître d'Oeuvre doit s'assurer de l'existence du marquage et reporter, sur la fiche suivi de chantier, le numéro du(des) lot(s) correspondant(s).

5.2.3.2 - *Le produit n'entre pas dans le cadre de la marque NF*

Ce peut être pour des raisons de dimensions spécifiques au chantier, ou parce qu'il s'agit d'appareils d'appui de type A ou C, ou autres.

On considérera alors deux cas de figures :

a) Le produit est issu d'une chaîne fabriquant des produits à la marque NF

On peut estimer que les fabricants n'ont pas deux chaînes de fabrication selon que le produit est certifié ou non et que l'on bénéficie alors d'une assurance de qualité. C'est pourquoi nous conseillons d'exiger une **Attestation de conformité du fabricant** libellé sous la forme suivante :

Le fabricant atteste que les appareils d'appui respectent les spécifications techniques de la norme XP T 47.815 à l'exception de leurs caractéristiques dimensionnelles et que l'attestation porte sur l'existence et l'application d'un PAQ.

b) Le produit n'est pas issu d'une chaîne fabriquant des produits ayant la marque NF

Dans ce cas, on exigera des essais spécifiques sur la base des spécifications soit conformes à la norme XP T 47.815, soit selon des spécifications particulières.

Voir l'Annexe 5 sur un exemple de rédaction du CCTP.

5.3 - LES CONTROLES A LA RECEPTION

Ils seront limités aux actions suivantes :

- vérification de la présence du marquage (NF) si l'appareil d'appui peut s'y référer ou de l'existence de l'attestation ou des résultats d'essais ;
- vérification visuelle pour s'assurer de l'absence de défauts ou d'endommagements ;
- contrôle de la conformité des dimensions réelles avec les dimensions portées sur les plans d'exécution de l'ouvrage.

5.4 - LES CONTROLES A LA MISE EN OEUVRE

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

5.4.1 - Etablissement des documents préalables

5.4.1.1 - *Existence des procédures particulières*

- du mode d'exécution des bossages,
- de pose des appareils d'appui,
- de remise éventuelle à l'équilibre des déformations par distorsion de l'appareil d'appui tenant compte, en particulier, des conditions thermiques et de l'époque de l'exécution¹⁹.

¹⁹ Cette opération est faite par vérinage et peut permettre d'éviter l'utilisation d'appareils d'appui glissants sur culée.

5.4.1.2 - Etat prévisionnel du fonctionnement des appareils d'appui

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

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

5.4.2 - Contrôles lors de l'exécution

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

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

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

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

Ces contrôles sont réalisés :

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

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

5.5 - LES CONTROLES DU COMPORTEMENT EN SERVICE

Cet aspect fait l'objet d'un fascicule 13 "appareils d'appui"²⁰ spécifique de la deuxième partie de l'Instruction Technique sur la Surveillance, l'Entretien et la Réparation des Ouvrages d'Art (Circulaire du 19 Octobre 1979, révisée le 26.12.95)

²⁰ Publication SETRA/LCPC 1999. En préparation.

Chapitre 6

PROGRAMME VERIFICATEUR

Il existe un programme de pré-dimensionnement des appareils d'appui en caoutchouc fretté : le programme NEOP, disponible au SETRA auprès de M. G. Lacoste 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 dimensionne ces appareils d'appui suivant les règles de l'ancien Bulletin Technique n°4, mais une nouvelle version tenant compte des principes de calcul définis dans le présent document et dans les normes en préparation est en cours de développement.

L'utilisateur fournit les efforts et distorsions imposées à l'appareil d'appui. Il peut ensuite choisir un appareil d'appui dans une gamme standard qui est proposée par le programme.

Le programme vérifie alors que tous les critères relatifs au dimensionnement de l'appareil d'appui sont satisfaits. Il signale les dépassements de contraintes ou de distorsions par rapport aux limites réglementaires. Il fournit également les éléments de la matrice de souplesse modélisant une file de plusieurs appareils d'appui. Les résultats peuvent être imprimés ou intégrés à une note de calculs sous Word.

La gamme des appareils d'appui ainsi que leurs autres caractéristiques et la plupart des coefficients servant au dimensionnement peuvent être modifiés dans un fichier de paramètres.

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 NEOP fonctionne sur micro-ordinateur de type PC 486 ou supérieur, sous l'interface Windows 3.1 ou Windows 95, 98. Le programme NEOP 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

CALCUL DES APPAREILS D'APPUI EN CAOUTCHOUC FRETTE POUR UNE UTILISATION EN ZONE SISMIQUE

A1.1 - LE CADRE REGLEMENTAIRE

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

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

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

- Guide AFPS 92 pour la protection parasismique des Ponts ;
- Document d'Application Nationale de l'ENV 1998 Partie 2 : Eurocode 8 - Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme - Partie 2 : Ponts.

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

Des deux règlements autorisés (AFPS 92 ou Eurocode 8), l'Eurocode est celui dont les méthodes de calcul sont les plus proches de celle de la Pr EN 1337.3. Il est donc logique de s'y référer ici.

Afin de faciliter l'application conjointe de l'Eurocode n°8 et de la norme Pr EN 1337.3, le tableau A.1 suivant met en parallèle les notations des deux textes :

	Terminologie EN	Terminologie EC8
Module de cisaillement sous séisme	-	G
Contrainte normale	-	σ_e
Force verticale	$F_{z,d}$	N_{Sd}
largeur des frettes	b'	b_x
longueur des frettes	a'	b_y
épaisseur d'une couche courante :	t_i	t_i
coefficient de forme	S	S
coefficient de forme de la couche la plus épaisse	S'	S_{min}
aire réduite	A_r (au 1° ordre)	A_r
épaisseur totale de caoutchouc	T_g	t_t
distorsion ultime	-	ε_{bu}
distorsion due à l'effort horizontal	$\varepsilon_{q,d}$	ε_s
distorsion nominale totale	$\varepsilon_{t,d}$	ε_{td}

Tableau A.1 : Correspondance de notation entre l'Eurocode 8 et la prEN1337.3

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

Les appareils d'appui en caoutchouc dits *spéciaux* doivent être testés selon une procédure détaillée (EC8-2 annexe J) relativement lourde et applicable aux autres dispositifs d'isolation parasismique.

Les appareils d'appui en caoutchouc qui n'ont pas subi ces tests sur prototypes sont dits *normaux*. L'EC8-2 spécifie simplement que les règles simplifiées proposées ne s'appliquent que si la dureté Shore A est de 60 ± 5 . Il n'est

malheureusement pas fait référence à la dureté Shore dans la prEN1337-3. On pourra toutefois considérer que les appareils d'appui conformes à la prEN1337-3 entrent dans la catégorie dite normale.

Au stade du projet et sauf cas particulier, il serait audacieux de prévoir à l'heure actuelle des appareils d'appui dits spéciaux. En effet, peu de fournisseurs sont, à notre connaissance, en mesure de présenter des procès-verbaux de tests conformes à l'annexe J de l'EC8-2.

Le projeteur devra donc plutôt considérer que les appareils d'appui entrent dans la catégorie dite *normale*. Ainsi, la présente annexe traite des *appareils d'appui normaux en caoutchouc fretté*.

A moyen terme, il est probable que les fournisseurs proposeront dans leur catalogue des appareils d'appui spéciaux pour les zones sismiques.

A1.2 - COMBINAISONS DE CALCUL ET CUMUL DES DIRECTIONS

A1.2.1 - Action sismique

Il est d'usage de calculer l'effet du séisme sur un ouvrage séparément selon trois directions de l'espace X, Y et Z. Pour un pont droit, ces directions sont respectivement l'axe longitudinal du tablier, l'axe transversal du tablier et la verticale. Cette dernière composante du mouvement sismique doit obligatoirement être prise en compte pour la vérification des appareils d'appui (EC8-2 DAN article 4.1.7 (2) P).

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

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

La concomitance de ces trois efforts doit être prise en compte. Parmi les deux options proposées par l'EC8 pour combiner les effets calculés dans chaque direction, la plus pratique à appliquer aux appareils d'appui en caoutchouc fretté consiste en trois combinaisons linéaires pondérées comme représenté sur le schéma de la figure A.1 (EC8-2 DAN article 4.2.1.4).

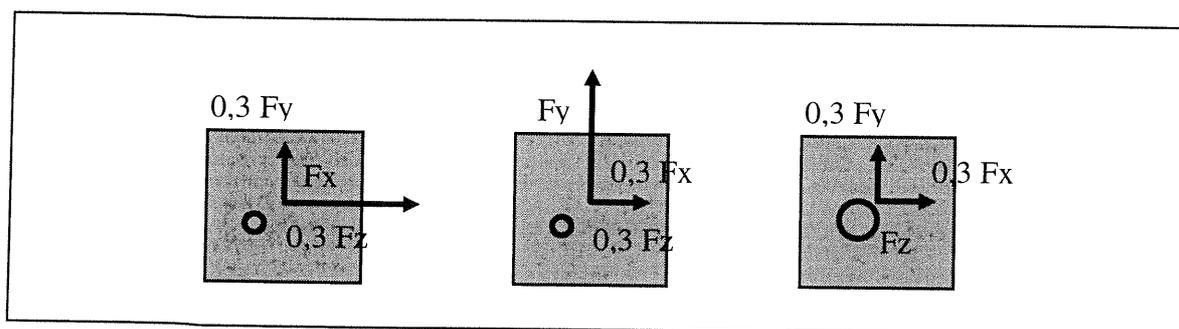


Figure A.1 : Combinaisons des directions des séismes.

A1.2.2 - Combinaisons avec les autres cas de charge

L'action sismique doit être cumulée avec (EC8-2 DAN article 7.5.2.3) :

- les charges permanentes, en valeurs caractéristiques,
- les effets du retrait et du fluage pour les tabliers en béton,
- 40% des déplacements dus aux variations de la température (plus précisément, les valeurs à prendre en compte sont égales à 40% de celles utilisées pour le calcul des appareils d'appui hors combinaisons sismiques).

Pour les ponts urbains à trafic intense, c'est-à-dire ceux de la classe 1 de l'ENV 1991-3 (EC1-3 DAN article 4.3.2.7 A), il convient de rajouter également 20 % des charges d'exploitation à caractère normal (à préciser dans le CCTP).

A1.3 - MODELE DE CALCUL DYNAMIQUE

A1.3.1 - Module de cisaillement G

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

Sous séisme, l'Eurocode propose pour les appareils d'appui courants d'utiliser un module de 1,2 MPa, et de prendre en compte un durcissement jusqu'à 1,6 MPa pour des distorsions de l'ordre de 2 (EC8-2 article 7.6.1). Mais ceci oblige à effectuer un calcul non linéaire.

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

Vu les incertitudes qui pèsent sur l'estimation de la valeur de G, liées notamment au vieillissement du caoutchouc et à la température ambiante, il n'est pas souhaitable de compliquer de manière irréaliste les méthodes de calcul. C'est pourquoi nous recommandons d'estimer les effets du séisme avec un module de cisaillement de 1,2 MPa. Cette proposition est d'ailleurs introduite dans le projet de DAN de l'EC8-2.

Il est difficile de définir une loi de comportement plus précise sans connaître la formulation du caoutchouc, variable selon les fournisseurs. Bien entendu, une valeur différente du module de cisaillement pourra être adoptée si le fabricant fournit les justifications nécessaires (EC8-2 annexe J).

A1.3.2 - Modélisation des appareils d'appui

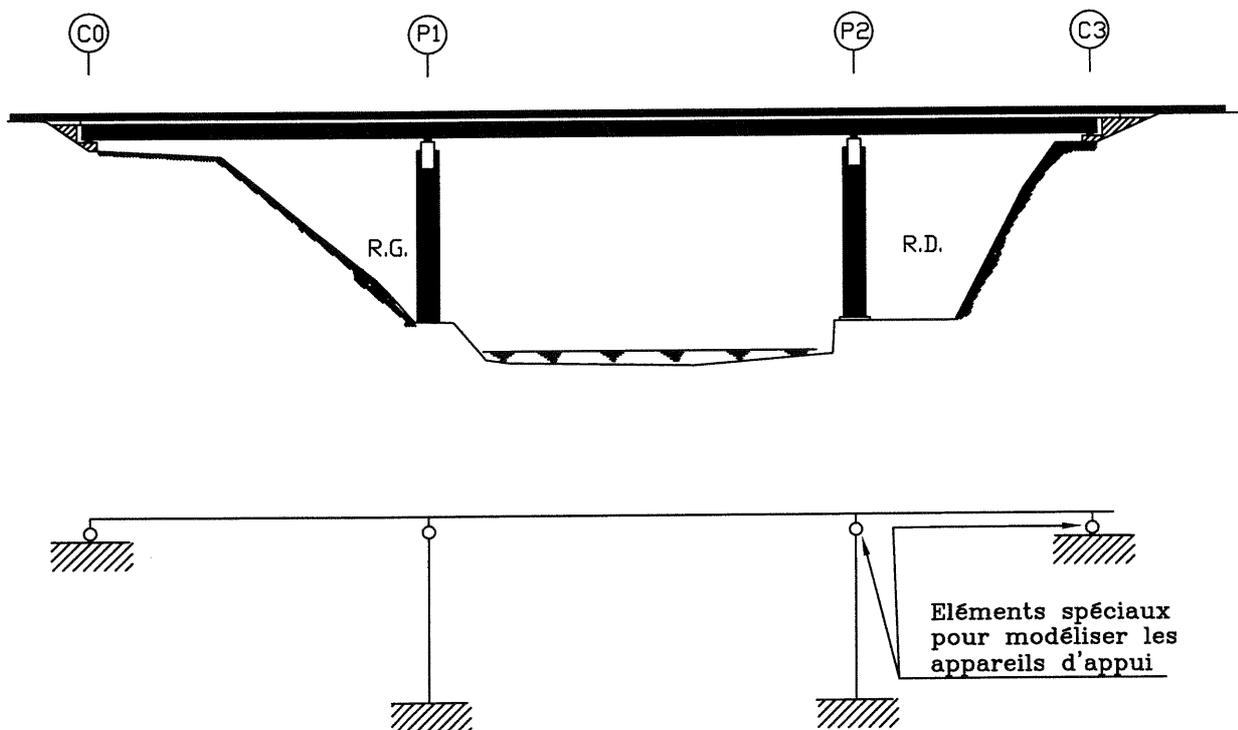


Figure A2 : Modèle de calcul à poutres massives

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

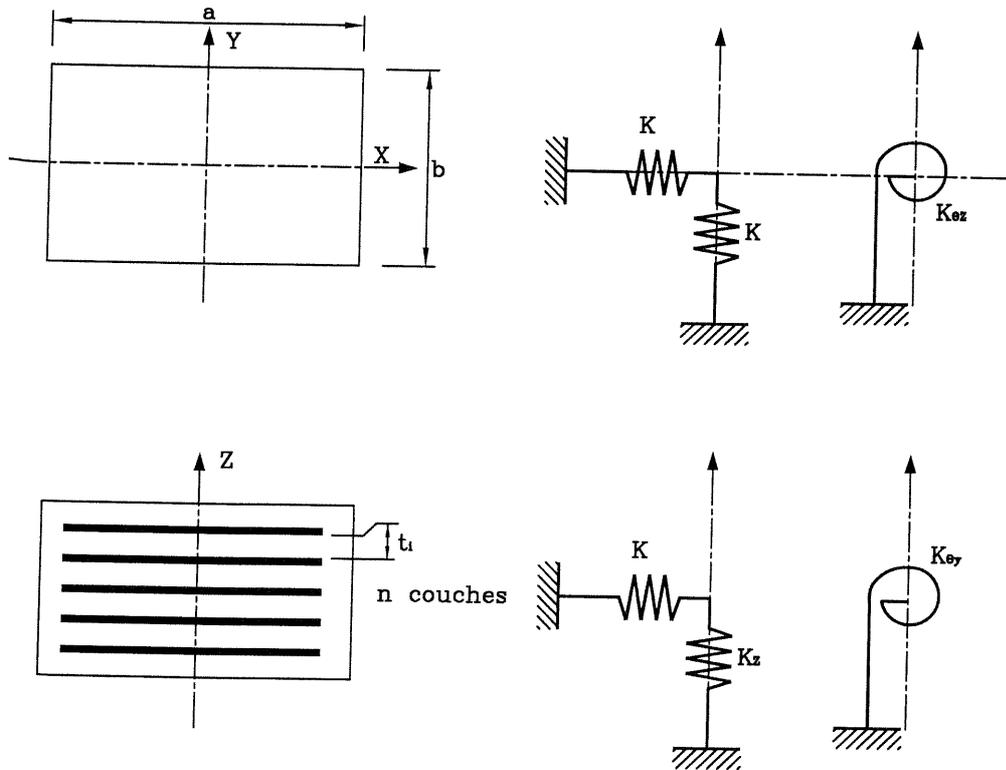


Figure A.3 : Modélisation par ressorts

Les raideurs doivent être calculées comme cela est indiqué dans le tableau A.2 (pr EN1337-3). Dans la grande majorité des cas, l'appareil d'appui peut être considéré comme infiniment rigide en direction verticale et infiniment souple en rotation, ce qui conduit à la formulation simplifiée de la troisième colonne.

Raideur	Formules complètes selon les notations de pr l'EN 1337-3	Formules simplifiées
K_x	$G \cdot \frac{a' \cdot b'}{T_q}$	$G \cdot \frac{a' \cdot b'}{T_q}$
K_y	$G \cdot \frac{a' \cdot b'}{T_q}$	$G \cdot \frac{a' \cdot b'}{T_q}$
K_z	$\left[\sum \frac{t_i}{A'} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S_i^2} + \frac{1}{E_b} \right) \right]^{-1}$	∞
$K_{\theta x}$	$G \cdot \frac{a' \cdot b'^5}{n \cdot t_i^3 \cdot K_s}$	0
$K_{\theta y}$	$G \cdot \frac{a'^5 \cdot b'}{n \cdot t_i^3 \cdot K_s}$	0
$K_{\theta z}$	-	0

Tableau A.2 : Calcul des raideurs.

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

A1.4 - EMPLOI D'UN COEFFICIENT DE COMPORTEMENT

A1.4.1 - Les deux méthodes de conception parasismique

Lorsque la conception parasismique d'un ouvrage est telle que l'essentiel de l'énergie transmise par le sol à la structure peut être dissipé par endommagement des piles, il est d'usage de réduire forfaitairement les efforts obtenus.

nus par un calcul élastique. Cette réduction s'opère en divisant les effets des actions par un coefficient de comportement qui dépend du matériau constitutif et de la forme des piles. On parle alors de conception *fortement ductile* ou de la *méthode des rotules plastiques*. En contrepartie, le choix d'un comportement sismique fortement ductile ($q > 1,0$) entraîne une grande complexité dans la conception, qu'il n'est pas possible de détailler ici (ferraillage de confinement des rotules plastiques, critère de cohérence, conception en capacité, ...). Le lecteur intéressé pourra se référer à *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings* par Paulay et Priestley (Wiley & Sons 1992).

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

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

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

Les ouvrages dont les tabliers reposent uniquement sur des appareils d'appui en caoutchouc fretté sont souples et leurs périodes de vibrations propres se trouvent au-delà de la gamme la plus sensible aux séismes. En général, cet assouplissement suffit pour obtenir la résistance parasismique de l'ouvrage et par suite on n'utilisera pas de coefficient de comportement (EC8-2 DAN article 4.1.6 (10)P). Il s'agit donc d'une *conception essentiellement élastique*.

Cependant, le DAN de l'EC8-2 reprend une spécification du guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts : il est possible d'utiliser un coefficient de comportement obtenu en effectuant la moyenne entre celui de la pile et celui de l'appareil d'appui (1,0) pondérés au prorata des souplesses.

$$q = \frac{q_a \cdot S_a + q_p \cdot S_p}{S_a + S_p}$$

q_a : coefficient de comportement de l'appareil d'appui (1,0 en général)

q_p : coefficient de comportement de la pile

s_a : souplesse de l'appareil d'appui

s_p : souplesse de la pile

Sauf si les piles sont extrêmement souples, cette formule ne donne qu'une valeur limitée pour le coefficient de comportement. Par suite, et compte tenu des dispositions particulières à prendre en cas de *conception fortement ductile* ($q > 1,0$), nous conseillons au projeteur de s'en tenir dans ce cas à une *conception essentiellement élastique* ($q = 1,0$).

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

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

- Avec division des efforts élastiques par un coefficient de comportement approprié à chaque pile (cas des ponts irréguliers, EC8-2 DAN article 4.1.6 (6P) I). Dans ce cas, les appareils d'appui en caoutchouc fretté devront être calculés « *en capacité* », c'est à dire pour le niveau d'effort qui assure la formation des rotules plastiques prévues par le projeteur.
- Sans utiliser de coefficient de comportement. Si des reports de charges vers les appareils d'appui en caoutchouc sont à craindre, on veillera alors à approcher au mieux la souplesse réelle des piles ne supportant pas d'appareil d'appui en caoutchouc (fissuration, plastification des aciers et grands déplacements). A cet effet, on pourra effectuer un calcul itératif avec un programme de flambement (type PYLOSTAB du SETRA), ou, à défaut, utiliser les inerties fissurées définies dans l'annexe C de l'EC8-2 DAN.

A1.5 - PRESCRIPTIONS

Dans l'ensemble, les vérifications à effectuer sont analogues à celles concernant les autres chargements. La stabilité en rotation (ou la sécurité vis-à-vis du non-soulèvement) et l'épaisseur des frettes ne sont pas à vérifier sous séisme.

Les prescriptions sous les combinaisons de charges sismiques sont détaillées ci-dessous (EC8-2 DAN article 7.6.3).

A1.5.1 - Distorsion maximale

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

A1.5.1.1 - Distorsion totale

Selon l'Eurocode 8, la relation suivante doit être satisfaite :

$$\varepsilon_{t,d} \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{bu}$$

Dans le cas des appareils d'appui *normaux*, pour lesquels il n'est pas fait d'essais sismiques spécifiques définis dans l'annexe J de l'Eurocode n°8, on prendra : $\varepsilon_{bu} = 4$.

On devrait donc vérifier : $\varepsilon_{t,d} \leq 3$.

Mais cette clause a été invalidée lors de la rédaction du Document d'Application Nationale de l'Eurocode 8-2 pour les raisons suivantes :

1. Il apparaît que la valeur maximale de 3 est inférieure à celle proposée par la pr EN 1337-3 et à appliquer notamment sous les charges non sismiques. L'Eurocode 8 et la prEN 1337-3 ne semblent pas cohérents car il paraît illogique d'être plus sévère sous les combinaisons sismiques que sous les combinaisons de service.
2. Dans de nombreux cas pratiques, il a été constaté que le simple effet de la charge verticale conduit à une distorsion sur les bords de l'appareil d'appui proche de 3. Il ne resterait donc qu'une marge très faible pour la part de la distorsion provenant de l'action sismique horizontale.
3. Le guide AFPS 92 ne demande aucune vérification sur la distorsion totale. La limitation de la distorsion due à l'effort horizontal (5.1.2 ci-dessous) est suffisante.

A1.5.1.2 - Distorsion due à l'effort horizontal

La distorsion provenant des seuls efforts horizontaux autorisée sous séisme est nettement supérieure à la valeur admise pour les autres charges (0,7) :

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

Le calcul de la distorsion tient compte des déformations imposées comme précisé ci avant (voir A.2.2).

A1.5.2 - Flambement

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

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

A1.5.3 - Glissement

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

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

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

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

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

A1.6 - DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES COMPLEMENTAIRES

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

On distinguera les différents cas d'emploi suivants :

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

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

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

Lorsque l'appareil d'appui en caoutchouc fretté transmet les efforts dus à l'excitation de la masse du tablier aux appuis, le projeteur peut choisir entre les deux options suivantes (EC8-2 DAN article 6.6.1 (3)P) :

- concevoir les appareils d'appui en capacité, c'est à dire pour le niveau d'effort qui provoque à coup sûr la rupture de la pile ou de la culée ;
- compléter l'appareil d'appui par une butée (encore appelée *attelage sismique*).

A1.6.1.1 - Conception en capacité

La conception en capacité, qui est loin d'être évidente à mettre en œuvre, est une méthode inconnue de la plupart des projeteurs. De plus, il est probable que dans de nombreux cas il ne soit pas possible de trouver des appareils d'appui en caoutchouc fretté capables de supporter réglementairement les efforts qui provoquent la rupture de l'appui. Nous conseillons donc de préférer dans les cas courants la seconde option.

A1.6.1.2 - Attelages sismiques

Les attelages sismiques doivent être dimensionnés sous un effort H égal à αQ (EC8-2 DAN article 6.6.3(2)P cas c) où :

$$- \alpha = \frac{a_g}{g},$$

- g désigne l'accélération de la pesanteur,
- a_g représente la valeur de calcul de l'accélération du sol,
- Q est le poids repris par l'appui considéré.

Par ailleurs, les attelages sismiques doivent être conçus de telle sorte qu'ils laissent libre un jeu égal au déplacement calculé sous la combinaison sismique, avec majoration de 20% de la portion de ce déplacement provenant directement du séisme (EC8-2 DAN article 7.6.3.4) :

$$d_S = d_G + 0,40 \cdot d_T + 1,20 \cdot d_E$$

- d_G : déplacement dû aux effets de longue durée des actions permanentes et quasi permanentes,
- d_T : déplacement de calcul dû aux mouvements thermiques,
- d_E : déplacement sismique de calcul.

Le jeu dégagé ne doit pas être plus important afin de limiter les effets de choc provenant de la mise en mouvement du tablier.

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

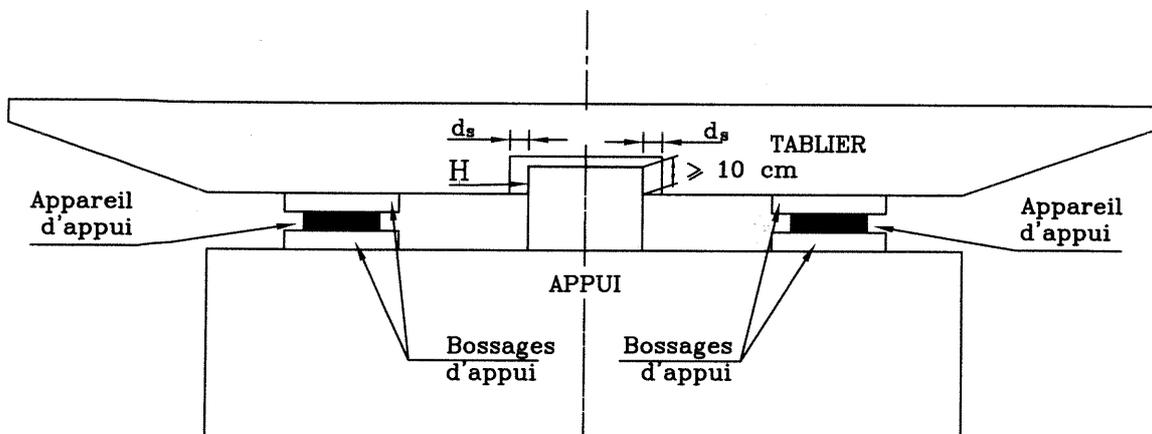


Figure A.4 : Exemple de butée.

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

Pour des butées en béton armé, on appliquera par exemple l'annexe du BAEL qui traite des consoles courtes. On prendra garde à ce que les butées n'amènent pas de dispositions préjudiciables à la durabilité des appareils d'appui (évacuation des eaux, possibilités de vérinage, gêne dans les dilatations thermiques, ...).

A1.6.2 - Appareil d'appui en caoutchouc complété par un dispositif de blocage qui reprend les efforts sismiques

Dans certains cas, il est utile de bloquer le fonctionnement de l'appareil d'appui dans une des deux directions horizontales, par exemple pour préserver l'intégrité des équipements (joints de chaussée, dispositifs de retenue, ...). Bien entendu, le modèle de calcul dynamique doit tenir compte de ce blocage.

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

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

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

A1.6.3 - Appareil d'appui en caoutchouc associé à un dispositif de glissement

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

Par contre, il doit être dimensionné pour supporter sans endommagement le déplacement sismique de calcul (EC8-2 DAN article 6.6.2.2) :

$$d_{Ed} = d_E + d_G \pm 0,40 \cdot d_T$$

A1.6.4 - Repos d'appui minimal

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

La valeur du repos d'appui minimal défini dans l'Eurocode se calcule par la formule suivante (EC8-2 DAN article 6.6.4) :

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

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

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

- d_{es} est le déplacement calculé sous l'excitation sismique ; cette valeur doit faire l'objet d'une majoration dans le cas des tabliers biais (EC8-2 DAN article 6.6.4 (3)A).
- d_{eg} est le déplacement effectif entre les deux parties dû au déplacement différentiel du sol (Cf. Figure A.6) ; il permet de tenir compte de l'écartement relatif entre les fondations de deux appuis, phénomène non pris en compte dans le calcul dynamique de la structure (donnant d_{es}) ; il doit être évalué selon les spécifications des textes définissant l'action sismique (EC8-1.1 ou guide AFPS 92).

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

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

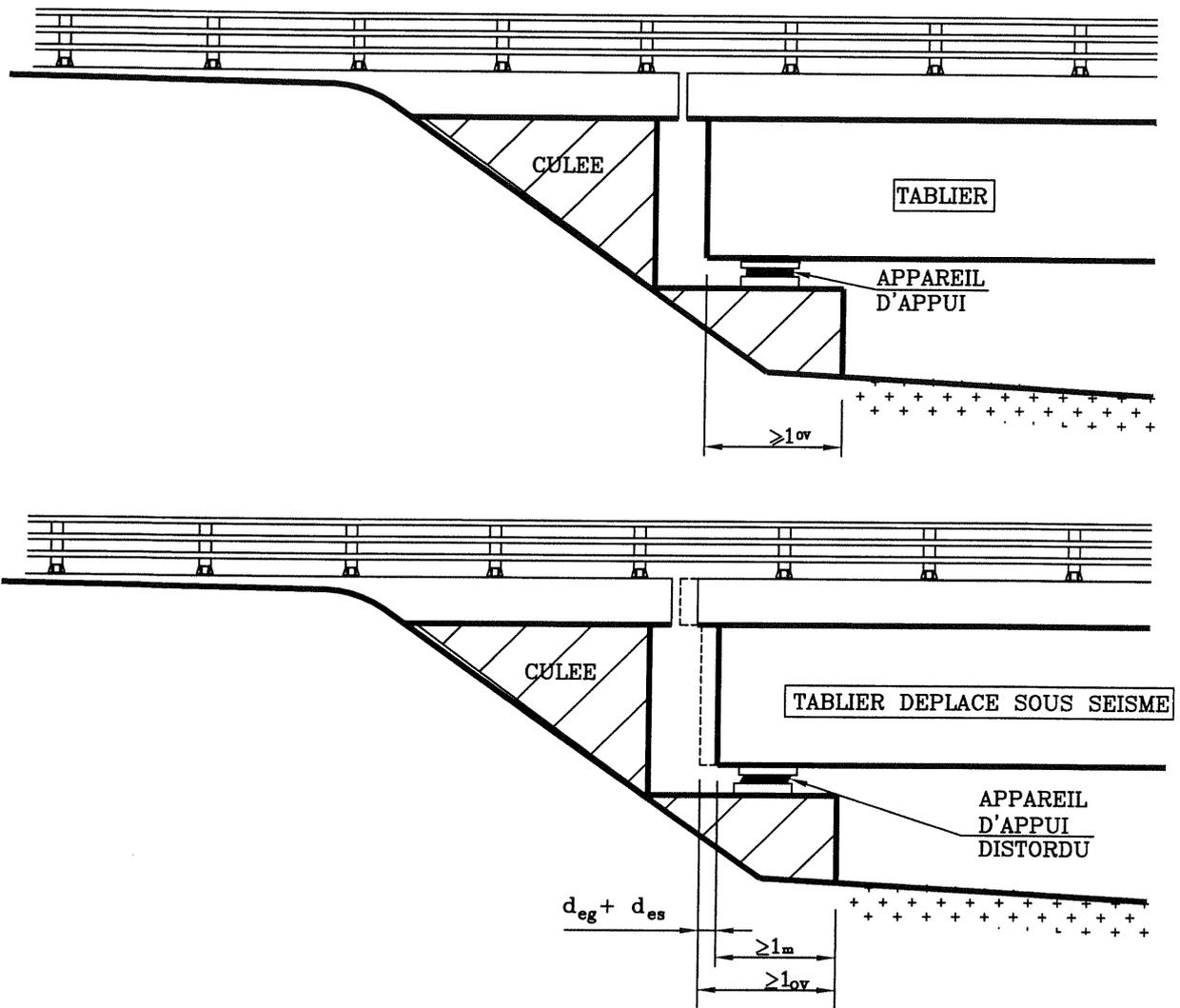


Figure A.5 : Détermination du repos d'appui.

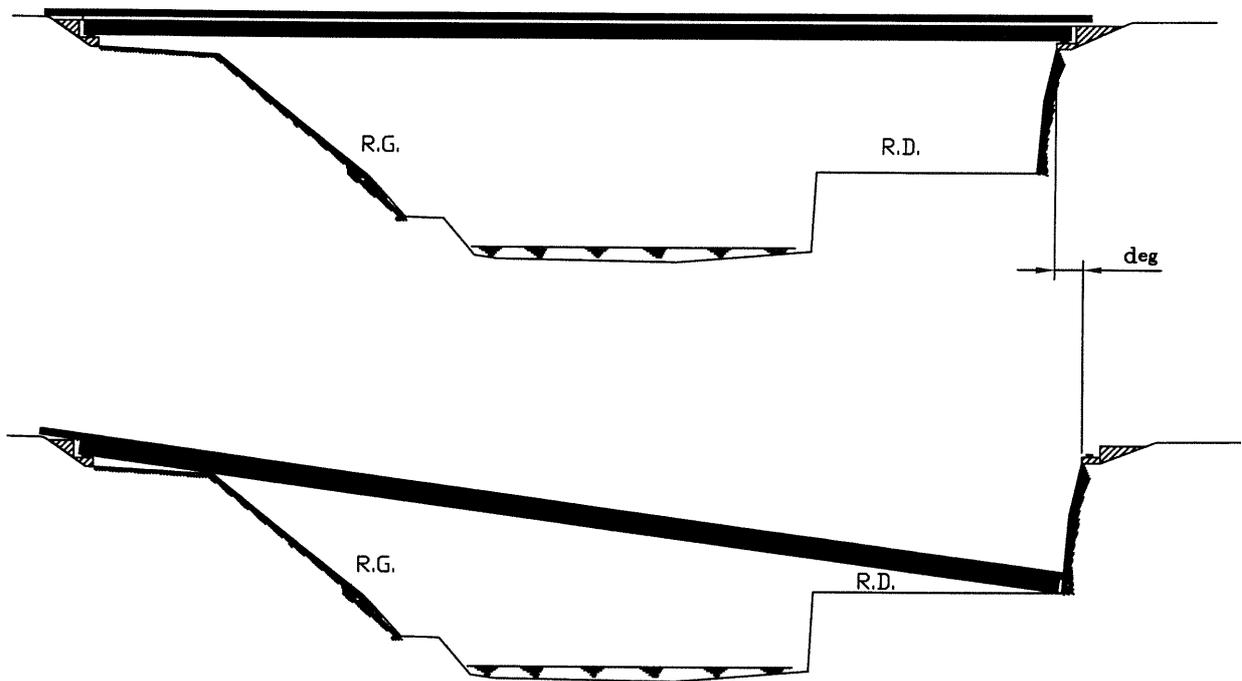


Figure A.6 : Déplacement différentiel du sol.

ANNEXE 2

RAPPEL DES ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS A PRENDRE EN COMPTE DANS LE CALCUL DES APPAREILS D'APPUI EN CAOUTCHOUC FRETTE

Les Eurocodes, encore en phase de tests, ne sont pas très connus. Cependant, ils devraient bientôt servir de référence en Europe et il nous a semblé utile de s'en inspirer pour compléter les règlements en vigueur, en particulier vis-à-vis des combinaisons.

A2.1 - DEFINITION DES ACTIONS

Les principales actions sont les suivantes :

G_k	Charges permanentes (valeurs caractéristiques),
Q_R	Charges routières (rappel = 1,2 A(I))
ΔT	Action de la température se décomposant en :
	ΔT_N température uniforme (dilatation / raccourcissement),
	ΔT_M gradient thermique.
W	Vent.

A2.1.1 - Charges routières

En attendant la mise en application des Eurocodes (EC 1, partie 3), on pourra considérer les charges routières du fascicule 61, titre II.

A2.1.2 - Température

En ce qui concerne la température uniforme, l'Eurocode 1, partie 2-5, définit des écarts de température selon les régions et selon les structures (pont en béton, pont mixte, pont métallique).

Pour les exemples du présent document, on a repris, de ce règlement une plage moyenne de variation de :

$$\Delta T_N = 60^\circ + 20^\circ = 80^\circ \text{ C}$$

(en supposant que la température de pose des appareils d'appui est connue, ce qui limite la marge de sécurité à $\pm 10^\circ$ au lieu de $\pm 20^\circ$). Il s'agit d'une moyenne, la plage de référence de température pouvant varier entre 54 et 77° C (hors marge de 20°), selon le type de tablier (pont dalle, pont mixte, pont caisson).

Pour le gradient thermique, on a utilisé le gradient dit "linéaire" de l'Eurocode. Il comporte un gradient positif (classique dans les règlements français) et un gradient négatif, le hourdis supérieur étant plus froid que la fibre inférieure. Les valeurs dépendent, là encore, des structures mais aussi de l'épaisseur du revêtement. Pour un complexe étanchéité-revêtement d'épaisseur classique de 10 cm, les valeurs du gradient linéaire ΔT_M sont les suivantes :

- groupe 2 - ponts mixtes	+ 10,5° - 18°
- groupe 3 - caisson béton	+ 7° - 5°
- groupe 3 - pont dalle ou à poutres	+ 10,5° - 8°

Enfin, les effets thermiques comportent deux combinaisons d'actions de base :

$$T = \Delta T_N + 0,75 \Delta T_M \quad \text{et} \quad \Delta T_M + 0,35 \Delta T_N$$

A2.1.3 - Vent

L'action du vent est extrêmement variable. Le document de référence est : ENV 1991 - partie 2-4 et partie 3. On considère une valeur caractéristique du vent en l'absence de circulation W_k , et une valeur compatible avec la circulation W_n^* .

On pourra simplifier les calculs dans une première phase en reprenant les valeurs du fascicule 61, titre II, c'est à dire une charge de 2 000 N/m² sur toute la surface du pont. Avec cette valeur, on est, pour la plupart des ouvrages habituels (utilisant des appareils d'appui en caoutchouc fretté), en sécurité par rapport au calcul selon l'Eurocode.

A2.2 - COMBINAISONS D'ACTIONS

Les appareils d'appui en caoutchouc fretté étant calculés à l'ELS, ce sont les combinaisons caractéristiques qui sont les seules à envisager.

La formulation générale des combinaisons caractéristiques est la suivante :

$$\sum G_k + Q_{k1} + \sum_{i>1} \psi_{0i} Q_{ki}$$

Pour les ponts, l'Eurocode 1 considère que le vent et la température sont exclusifs l'un de l'autre. On ne peut donc les prendre en compte simultanément lorsqu'ils sont des actions d'accompagnement.

Avec les coefficients du tableau C.2 de l'ENV 1991-3, on obtient les combinaisons suivantes :

action de base	Combinaisons RARES
<i>Charges routières</i> (actions verticales)	G + Q _R + 0,6 T G + Q _R + 0,3 W _k
(actions horizontales)	G + (0,75 Q _R) V + (Q _R) H + 0,3 W _k G + (0,75 Q _R) V + (Q _R) H + 0,6 T
<i>Température</i>	G + T + 0,75 Q _R
<i>Vent</i>	G + W _k

ANNEXE 3

TABLEAU DES APPAREILS D'APPUI PREVUS PAR LA prEN 1337.3

Les appareils de taille conforme au tableau de la norme prEN 1337.3, de forme rectangulaire sont les suivants :

Dimensions en mm	Epaisseur totale		Epaisseur de caoutchouc		Feuillet	Frette	Nombre de couches de caoutchouc	
	a x b	Min	Max	Min			Max	Min
100 x 150 100 x 200	30	41	16	24	8	3	2	3
150 x 200 150 x 250 150 x 300	30	52	16	32	8	3	2	4
200 x 250 200 x 300 200 x 350 200 x 400	41	74	24	48	8	3	3	6
250 x 300 250 x 400	41	85	24	56	8	3	3	7
300 x 400 300 x 500 300 x 600	57	105	36	72	12	4	3	6
350 x 450	57	121	36	84	12	4	3	7
400 x 500 400 x 600	73	137	48	96	12	4	4	8
450 x 600	73	153	48	108	12	4	4	9
500 x 600	73	169	48	120	12	4	4	10
600 x 600 600 x 700	94	199	64	144	16	5	4	9
700 x 700 700 x 800	94	220	64	160	16	5	4	10
800 x 800	110	285	80	200	20	5	4	10
900 x 900	110	285	80	220	20	5	4	11

ANNEXE 4

**DURABILITE DES APPAREILS D'APPUI EN CAOUTCHOUC FRETTE
AVEC PLAN DE GLISSEMENT**

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

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

A4.1 - GRANDEUR CARACTERISTIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UN APPAREIL D'APPUI GLISSANT

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

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

A4.2 - DISPOSITIONS A PRENDRE AU STADE DE LA CONCEPTION

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

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

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

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

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

A4.3 - DISPOSITIONS A PRENDRE AU STADE DE LA FABRICATION

Seuls les appareils d'appui de type A ou C de la Norme XP T 47.815 (D ou E de la prEN 1337.3) peuvent s'accommoder de l'ajout de plaque de glissement.

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

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

A4.4 - DISPOSITIONS A PRENDRE DANS LE CADRE DE LA SURVEILLANCE

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

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

A4.5 - CONCLUSION

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

ANNEXE 5

AIDE A LA REDACTION DES CCTP

Les propositions d'articles contenues dans cette annexe portent sur des aspects techniques. Leur application devra cependant tenir compte des règles définies dans le Code des Marchés publics, notamment pour ce qui touche aux procédures d'équivalence dans le cadre de la réglementation européenne. On consultera, plus particulièrement, le projet de Recommandation N° T1-99 "aux Maîtres d'ouvrages publics relative à l'utilisation des normes et des certifications dans les spécification et à l'appréciation des équivalences".

Afin de permettre une rédaction homogène des CCTP, nous proposons, dans cette annexe, des exemples de clauses à intégrer dans les CCTP.

1 - EXEMPLES DE CLAUSES A INTEGRER DANS LE CHAPITRE "QUALITE DES MATERIAUX"

ARTICLE APPLICABLE DANS LE CADRE DE LA NORMALISATION ACTUELLE.

Article du guide concerné	Exemple de clause	Commentaires
Chapitre 5	Les appareils d'appui en caoutchouc fretté sont conformes à la norme expérimentale XP T 47.815 de Novembre 1993 (ou une date plus récente) ou à toutes autres normes applicables en France en vertu d'accords internationaux.	
	DANS LE CAS OU LE PRODUIT ENTRE DANS LE CADRE DE LA MARQUE NF :	
	Conformément à l'article 23.1 du CCAGT, la qualité de ces appareils d'appui est attestée par la certification "NF Appareils d'appui."	Dans le cadre du SOPAQ, cette exigence du CCTP en cas de non production de cette certification conformément à l'article 23.1, deuxième alinéa du CCAGT, l'entrepreneur doit apporter la preuve que ses matériaux sont conformes aux prescriptions de la norme XP T 47.815.
		Il appartient au Maître d'Oeuvre de mettre en place son contrôle externe. Celui-ci sera très simplifié dans le cadre de produit certifié NF.

DANS LE CAS D'UTILISATION DE PRODUITS SORTANT DU CADRE DE LA PROCEDURE DE CERTIFICATION PAR LA MARQUE NF APPAREILS D'APPUI (DIMENSIONS, TYPE, ETC.)

Art 5.2.3.2	Dans le cas où le produit est issu d'une chaîne fabricant des produits à la marque NF, l'entrepreneur fournira une attestation de conformité du fabricant libellé sous la forme suivante :	
	<i>"Le fabricant atteste que les appareils d'appui respectent les spécifications techniques de la norme XP T 47.815 à l'exception de leurs caractéristiques dimensionnelles et que l'attestation porte sur l'existence et l'application d'un PAQ."</i>	
	Dans le cas où le produit n'est pas issu d'une chaîne fabriquant des produits ayant la marque NF, l'entrepreneur sera tenu de fournir les résultats des essais spécifiques soit conformes à la norme soit selon les spécifications suivantes.	Compléter les spécifications selon les exigences particulières que l'on souhaite sur l'ouvrage, sinon se limiter à la conformité à la norme XP T 47.815.

ARTICLE DANS LE CAS D'UTILISATION D'APPAREILS D'APPUI ELASTOMERE FRETTE AVEC PLAN DE GLISSEMENT

§ A4.3	Les appareils d'appui avec plan de glissement comporteront des alvéoles dans
--------	---

le PTFE avec une lubrification et une protection appropriée du plan de glissement.

ARTICLE A INTRODUIRE A LA MISE EN APPLICATION DE LA NORME EN 1337.3

§ 2.2.2 La concentration d'ozone prévu pour le test de tenue de l'appareil d'appui à l'ozone est de 50 pphm

2 - EXEMPLES DE CLAUSES A INTEGRER DANS LE CHAPITRE "PRINCIPE DE CALCUL"

Ces clauses, issues de l'interprétation de la norme pr EN 1337.3, sont à utiliser dès maintenant en l'absence d'autres prescriptions existantes à ce jour.

§ 3.3.1 Conformément au paragraphe 5.3.3 de la norme pr EN 1337.3, tous les appareils d'appui devront répondre aux prescriptions de ce paragraphe 5.3.3. Ces prescriptions sont rappelées dans le paragraphe 3.3.1 du présent guide

Ainsi, les appareils d'appui de taille normalisée au sens de la norme pr EN 1337-3 devront subir les mêmes vérifications que celles prévues par la norme pour les autres types d'appareils d'appui.

§ 3.4.1.1 Pour le calcul de la limitation de la distorsion, K_L est un coefficient égal à ... Cette particularité, si elle est prise en compte, doit être spécifiée dans le CCTP.

On prendra

$K_L = 1,00$ dans le cas général.

$K_L = 1,5$ dans le cas des ouvrages ferroviaires et des ouvrages routiers fortement sollicités.

§ 3.4.1.3 Les rotations α_a et α_b doivent inclure les défauts de pose d'une valeur égale à :

Ceux-ci dépendent beaucoup du soin apporté à la mise en oeuvre.

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

La norme pr EN 1337.3 (§ 7.1.3) n'est pas claire sur les valeurs à adopter pour les défauts de pose, ni sur la façon de les prendre en compte. Les valeurs suivantes sont donc proposées :

- 0,003 radian dans le cas :
 - * d'un tablier coulé en place directement sur l'appareil d'appui,
 - * d'un appareil d'appui fixé sous un élément préfabriqué, descendu sur bain de mortier, ou maté par dessous ou par dessus,
 - * de bossages préfabriqués ;
- 0,010 radian pour les appareils d'appui posés directement sous une structure préfabriquée.

BIBLIOGRAPHIE

Environnement des appareils d'appui en élastomère fretté. Recueil des règles de l'art. SETRA/LCPC. 10/1978. Référence F 7810.

Les appareils d'appui à pot de caoutchouc. Guide provisoire. SETRA. 09/1999.

Appareils d'appui en caoutchouc. Documents scientifiques et techniques. AFPC. 07/1994.

Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Seconde partie : Fascicule 13 "appareils d'appui". SETRA/LCPC. En préparation.

Normes

Série Appareils d'appui en caoutchouc :

- FD T 47.801 - Généralités et terminologie
- XP T 47.802 - Détermination du module de cisaillement
- XP T 47.803 - Détermination de l'adhérence en cisaillement
- XP T 47.804 - Essai de compression
- XP T 47.805 - Essai de fatigue dynamique en compression répétée
- XP T 47.806 - Détermination du fluage en compression
- XP T 47.807 - Détermination de la relaxation de contrainte en cisaillement.
- XP T 47.808 - Essai de comportement statique sous un angle de rotation imposé
- XP T 47.810 - Détermination de la capacité de rotation
- XP T 47.811 - Détermination de la condition de non-glissement
- XP T 47.812 - Détermination de la résistance à l'ozone
- XP T 47.813 - Détermination de la résistance au brouillard salin
- XP T 47.814 - Détermination de la dureté apparente Shore A au moyen d'un duromètre de poche
- XP T 47.815 - Spécifications

pr EN 1337.1 - Règles générales de conception et de calcul

pr EN 1337.2 - Eléments glissants

pr EN 1337.3 - Appareils d'appui en élastomère

Eurocode 1 Partie 3 (ENV 1991 Partie 3) : Actions dues au trafic sur les ponts et le DAN (Document d'Application Nationale) de cet Eurocode.

BAEL 91

Bibliographie spécifique à l'annexe 1

- Loi n°87-565 du 22 Juillet 1987 relative à (...) la prévention des risques majeurs.
- Décret n°91-461 du 14 Mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique.
- Arrêté du 15 Septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la catégorie dite « à risque normal ».
- Guide AFPS 92 pour la protection parasismique des Ponts.
- Eurocode 8 (ENV 1998 Partie 2) - Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme - Partie 2 : Ponts et son DAN (Document d'Application Nationale).

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

Imprimerie de Montligeon
Dépot légal : Septembre 2000 - N° d'imprimeur : 20029
ISBN 2-11-091779-2

© 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 en caoutchouc fretté en vue d'une utilisation sur les ponts, viaducs et les structures similaires.

Ce document comprend essentiellement les éléments suivants :

- une description sommaire des différents types d'appareils d'appui en caoutchouc fretté et des éventuels équipements particuliers qui lui sont liés ;
- les principaux textes réglementaires ou normatifs de base ;
- les critères de dimensionnement sur la base des projets de textes normatifs préparés par le CEN (Comité Européen de Normalisation) ;
- le principe des contrôles sur la base de la certification par la marque NF-Appareils d'appui ;
- une méthodologie de calcul dans un projet de pont avec des exemples d'application ;
- enfin, il est complété par une série d'annexes traitant du dimensionnement de ce type d'appareils d'appui dans les zones sismiques, de la durabilité des appareils d'appui en caoutchouc fretté complétés par un plan de glissement et d'exemples de rédactions d'articles à introduire dans les CCTP.

Ce guide est provisoire dans l'attente de la publication des normes NF EN 1337 (parties 1, 2 et 3) 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 reinforced rubber bearings for use on bridges, viaducts and similar structures.

This documents contains the following main information:

- *a summary description of the different types of reinforced rubber bearings and any specific equipment used with them ;*
- *the main basic regulatory or normative texts ;*
- *design criteria based on draft standards prepared by CEN (European Committee for Standardization) ;*
- *the principle of inspections based on NF mark certification for bearings ;*
- *a designing methodology in a bridge project with examples of applications ;*
- *completed by a series of annexes on the designing of this type of bearing in seismic zones, the durability of reinforced rubber bearings with a plan of sliding of the bearings and examples of how to draft articles to be introduced into end performance specifications.*

This is a provisional guide pending publication of standards NF EN 1337 (parts 1, 2 and 3) 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 0032
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 : 90 F



Ministère
de l'Équipement,
des Transports
et du Logement



Service d'Études
Techniques
des Routes
et Autoroutes

Affaire suivie par :
M. FRAGNET
☎ 01.46.11.32.13
☎ 01.46.11.33.52
✉ michel.fragnet@setra.fr

MISOA
DATE D'ARRIVÉE COURRIER

22 NOV. 2000

N° D'ENREGI

2951

Bagneux, le 08 novembre 2000

N/réf. : CTOA/CEOA-2000. 503

V/réf :

Objet : Publication de deux documents "Appareils d'appui en caoutchouc fretté" et "Appareils d'appui à pot de caoutchouc"

P.J. : Une liste de diffusion et le document

Je vous adresse deux nouveaux guides techniques traitant des appareils d'appui pour les ponts, viaducs, etc.

Le premier est entièrement nouveau et s'intitule "guide sur l'utilisation des appareils d'appui à pot".

Le second intitulé "guide sur l'utilisation des appareils d'appui en caoutchouc fretté".

L'objectif de ces deux guides techniques est de tenir compte de l'évolution technique des produits et, surtout, de la normalisation tant française qu'europpéenne. En effet, les appareils d'appui concernés par ces deux guides font l'objet de projets de normes NF EN dont la rédaction est pratiquement en phase finale d'élaboration mais encore sujets à discussions techniques sur un certain nombre de points parfois importants.

Donc, même si la publication de ces normes NF EN n'est pas encore proche, nous avons souhaité préparer des guides qui permettent aux projeteurs de disposer des outils pour calculer les ouvrages comportant ces appareils d'appui en conformité avec soit les normes NF actuellement en vigueur pour les appareils d'appui en caoutchouc fretté, soit avec le projet de norme EN pour les appareils d'appui à pot de caoutchouc puisque rien dans la normalisation ou la réglementation française n'existait à ce jour. Leur publication permettra aux utilisateurs de commencer à se familiariser avec les nouvelles règles qui résultent de l'établissement de la normalisation européenne.

Ces deux guides remplacent le BT4 devenu obsolète de par son âge et l'évolution des techniques et de la réglementation.

Ces deux documents ont une forme provisoire dans l'attente de la publication des normes NF EN 1337 dont certaines n'existent que sous une forme de pr EN. Ils seront alors mis en révision pour être en accord avec le contenu de ces normes.

Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art

46, avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France - Tél. : 01 46 11 31 31 - Fax : 01 46 11 31 69

Ces guides ont pour objet d'expliciter les textes normatifs en vigueur au moment de la publication. Ils donnent les éléments d'appréciation par rapport à ces textes, notamment en précisant certaines spécifications importantes en cas d'utilisation pour un pont.

Ils comprennent les éléments suivants :

- une description sommaire de ce type de produit et des éventuels équipements particuliers qui lui sont liés ;
 - les principaux textes réglementaires ou normatifs de base ;
 - les critères de dimensionnement que l'on trouve dans les projets de normes EN ;
 - le principe des contrôles de la qualité (marque NF-Appareils d'appui, par exemple) ;
 - une méthodologie de calcul dans un projet de pont avec des exemples d'application ;
- Enfin, il est complété par une série d'annexes avec, notamment des exemples de rédactions d'articles à introduire dans les CCTP, des éléments pour le dimensionnement d'appareils d'appui en caoutchouc fretté dans les zones sismiques, sur la base des nouvelles normes parasismiques, etc.

Je vous prie de noter que ces guides comportent un renvoi à des programmes vérificateurs (NEOP et POT) qui sont en cours de mise au point et dont la diffusion est indépendante de celle du guide.

Des exemplaires supplémentaires de ces documents peuvent être obtenus auprès du bureau de vente des publications du SETRA (Tél. : 01.46.11.31.53, Fax. 01 46 11 33 55).

. Le document "Appareils d'appui en caoutchouc fretté" est disponible sous la référence F0032 au prix de 90 F.

. Le document "Appareils d'appui à pot de caoutchouc" est disponible sous la référence F0033 au prix de 75 F.

L'Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées
Chef du CTOA
H. ABEL MICHEL

