

Calfeutrement des joints dans les TP

Généralités

par **Philippe COGNARD**

Expert auprès des tribunaux

Ancien Directeur Marketing de la société ATO FINDLEY

1. Différents mouvements des ouvrages et des joints	C 5 460 - 2
2. Calcul et dimensionnement des joints des chaussées en béton	— 3
2.1 Considérations générales, probabilités de mouvements.....	— 3
2.2 Calcul pratique et dimensionnement des joints	— 3
3. Caractéristiques des produits de calfeutrement	— 4
3.1 Caractéristiques de mise en œuvre.....	— 5
3.2 Caractéristiques mécaniques.....	— 6
3.3 Caractéristiques physiques, chimiques et de durabilité.....	— 8
4. Types de produits de calfeutrement	— 8
4.1 Mastics asphaltiques, bitumineux non modifiés et modifiés	— 8
4.2 Plastisols PVC/brai	— 8
4.3 Silicones	— 8
4.4 Polyuréthane/brai	— 8
4.5 Polysulfures/brai	— 9
4.6 Produits rigides : époxydes, époxy-polysulfures	— 9
4.7 Profilés élastomères	— 9
4.8 <i>Waterstops</i> ou bandes d'arrêt d'eau	— 9
4.9 Profilés et couvre joints métalliques et élastomères.....	— 9
4.10 Coulis et résines d'injection.....	— 9
5. Injections de résines	— 10
5.1 Types d'injection	— 10
5.2 Résines utilisées	— 10
5.3 Injections en fissures.....	— 10
5.4 Injections de zones creuses ou cavernueuses.....	— 11
5.5 Réinjections des câbles de précontrainte.....	— 11
6. Boulonnage de rochers	— 12
6.1 Principe.....	— 12
6.2 Types de matériaux de scellement utilisés.....	— 12
Pour en savoir plus	Doc. C 5462

Dans les travaux publics (TP), le calfeutrement des joints présente certaines analogies avec le bâtiment : mouvements du béton, identité de certains produits de calfeutrement et d'étanchéité, mais aussi des différences :

— nature des matériaux : seuls le béton et l'acier sont utilisés en travaux publics ;

— dimensions et poids des ouvrages ;

— problème de la stabilité des sols en travaux publics.

Lorsque des éléments, des produits et des techniques, sont communs au bâtiment et aux travaux publics, le lecteur se reportera à l'article « Calfeutrement des joints dans le bâtiment » [C 3 660] et suivants.

Cet article traite des mouvements des ouvrages à calfeutrer, du calcul et du dimensionnement des joints, de leurs caractéristiques et des différents types de produit existant.

Par ailleurs, comme le calfeutrement consiste à obturer des joints, donc des interstices, nous avons à la fin de cet article, inclus les injections dans des fissures, zones creuses ou cavernueuses et dans des câbles de précontrainte ainsi que le scellement lors du boulonnage de terrains.

Un deuxième article [C 5 461] traite des applications dans les travaux publics.

1. Différents mouvements des ouvrages et des joints

Les ouvrages de travaux publics sont essentiellement constitués de béton, d'aciers, avec différents revêtements de chaussées : liants hydrocarbonés principalement.

Le béton est un matériau vivant qui subit des déformations, d'une part lors de la prise du ciment (retrait), d'autre part pendant toute la durée de vie de l'ouvrage lorsqu'il subit différentes contraintes : variations dimensionnelles, déplacement et mouvements divers étudiés ci-après.

■ Variations dimensionnelles thermiques et hygrométriques, journalières et saisonnières

La variation de longueur en fonction de la température d'une structure sans contrainte est calculée par la formule :

avec L	longueur initiale de l'élément considéré,
α	coefficient de dilatation thermique qui est pour le béton de $1,0$ à $1,2 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ et pour les ouvrages entièrement métalliques de $1,1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,
$\Delta\theta$	variation de température ; les règles BAEL 83 [19] estiment que la plage de températures extrêmes en France va de -30°C à $+50^{\circ}\text{C}$, mais les relevés météo conduisent à des écarts maximaux annuels de température moindres, qui varient de 40 à 65°C selon les régions. Pour toutes précisions, le lecteur se référera au document 6, pages 7 à 11.

■ Déformations différées du béton : retrait et fluage

Le **retrait** dépend de l'âge du béton, de sa composition, du rapport E/C (E eau, C ciment), des formes et de l'épaisseur des pièces et des conditions climatiques. Il se traduit par un raccourcissement de 2 à 3×10^{-4} en France.

Le **fluage** est la déformation différée du béton sous charge fixe indéfiniment appliquée.

■ Action des charges d'exploitation

Elles provoquent :

- des mouvements horizontaux, par exemple pour les ponts sous l'effet du freinage, du vent et par des rotations des sections d'about, la mise en eau des barrages, des réservoirs ou des canalisations, etc. ;
- des battements verticaux des dalles routières sous l'effet du trafic lourd.

Toutes les structures sont déformables et les matériaux sont caractérisés par un module de déformation :

- pour le béton $E = 10\ 000$ à $35\ 000$ MPa selon l'âge du béton, la durée d'application ;
- pour l'acier $E = 210\ 000$ MPa ;

- pour le bois $E = 10\ 000$ à $15\ 000$ MPa en compression axiale selon la nature du bois.

■ Tassement des sols

Ils concernent tous types d'ouvrages, routes, ponts, tunnels.

■ **Mouvements anormaux de la structure**, par exemple pour les ponts : rotation de dalle de transition ou de culée et tassements des appareils d'appui, inondations pour les chaussées, tremblements de terre...

Le concepteur des joints devra donc tenir compte de tous ces mouvements combinés, qui se font dans les trois axes de l'espace.

Nécessité des joints dans les ouvrages en béton

Pour faire face aux déformations auxquelles est soumis le béton, il convient donc de ménager des joints et de s'assurer de leur fonctionnement tout au long de la vie de l'ouvrage.

Cela ne peut être obtenu qu'en prévenant l'introduction dans le joint d'éléments rigides susceptibles d'entraver son mouvement : graviers, par exemple. Ces derniers occasionnent en effet le blocage du joint et créent une zone de rétention préférentielle exposée au gel.

Pour pallier ce problème, il convient donc de calfeutrer le joint grâce à un matériau souple, ou à un système de jointoiment dont l'adhérence au support et l'élasticité sont adaptées aux mouvements prévisibles du joint. Tous les joints doivent être garnis.

Le choix du système de calfeutrement est de plus lié aux diverses fonctions que le joint doit être capable d'assurer, par exemple :

- l'étanchéité à l'eau ;
- la résistance chimique (égouts, bassins de décantation) ;
- la continuité de la surface de roulement (dans le cas des chaussées, la surface doit être unie) ;
- la très forte déformabilité (cas du joint périmétral des barrages en enrochement à masque en béton, par exemple).

■ Principaux types de joints

Les principaux types de joints rencontrés dans les ouvrages sont les suivants :

- **joints de retrait** : ils préviennent la fissuration du béton lors de son durcissement et de son retrait dans le temps ;

- **joints de dilatation** : ils permettent le libre mouvement des éléments vis-à-vis des variations de la température ;

- **joints de construction** : ils correspondent aux reprises de bétonnage d'un béton frais sur un béton durci ;

- **joints de rupture ou de tassement** : ils correspondent à la jonction d'ouvrages chargés inégalement pouvant entraîner des tassements différentiels du sol.

2. Calcul et dimensionnement des joints des chaussées en béton

2.1 Considérations générales, probabilités de mouvements

Les dalles routières sont en contact au-dessus avec l'air ambiant dont la température varie, et au-dessous avec la fondation et le sol dont la température est différente et fluctue moins.

Par ailleurs, la friction sur le support réduit les possibilités de mouvement thermique.

Enfin, on ne peut pas calculer chaque joint de dalle individuellement et on se borne donc à calculer les mouvements moyens.

Exemple : si un revêtement de chaussée comporte 100 joints transversaux au km, équidistants de 10 m, le joint n° 69 peut être fixe, pour diverses raisons ; il en résultera que les joints 68 et 70 devront s'accommoder de la fixité du joint 69, et on peut penser que les autres joints auront eux aussi des variations dimensionnelles plus ou moins aléatoires.

Si on mesure donc les largeurs de tous ces joints en hiver puis en été, on trouvera donc des valeurs qui iront de 0 jusqu'au double de la valeur moyenne, voire davantage.

On peut donc penser que la variation dimensionnelle des joints suivra une courbe normale de Gauss.

Si la largeur minimale du joint est de $L_{\min} = 10$ mm, étant donné une variation dimensionnelle moyenne ΔL de 4 mm avec une déviation standard S de 1,3 mm, on cherche la limite maximale ΔL_{\max} telle que la probabilité d'expansion au-delà de cette valeur soit par exemple de 5 %.

Les tables de probabilités donnent alors $\Delta L_{\max} = 5,8$ mm, pour laquelle 5 % des joints bougeront de plus de 5,8 mm.

Une recherche similaire montre que 1 joint sur 100 bougera de plus de 7 mm, et 1 joint sur 1 000 de plus de 7,9 mm.

Si on exigeait alors que 999 joints sur 1 000 soient parfaitement scellés et étanches, il faudrait un mastic de jointoiment qui supporte un allongement de 10 mm jusqu'à $10 + 7,9 = 17,9$ mm, soit 79 % d'allongement, ce qui est beaucoup trop exigeant avec les meilleurs mastics du marché.

Il faudra donc être moins exigeant et par exemple demander un joint qui ne supporte que 5,8 mm d'allongement, soit 60 % d'allongement, ce qui est déjà à peine possible avec les meilleurs mastics (élastomères silicones), et cela entraînera que 5 % des joints casseront. De tels allongements sont impossibles avec les mastics bitumineux coulés à chaud, utilisés traditionnellement pour les joints routiers.

Une autre solution est d'élargir la largeur initiale du joint par exemple en la portant à 20 mm : l'allongement de 5,8 mm, soit 29 %, sera alors plus tolérable, par exemple avec des mastics élastomères, et donc avec 95 joints sur 100.

L'analyse précédente est simplifiée car en réalité, comme nous l'avons vu, les joints subissent des variations dimensionnelles dans les trois dimensions).

2.2 Calcul pratique et dimensionnement des joints

2.2.1 Calcul à partir de données expérimentales

Examinons maintenant les abaques des figures 1 et 2 [8].

Dans la figure 1, on a considéré que les facteurs les plus importants à considérer sont la largeur du joint, sa variation dans le temps et le type de mastic de calfeutrement. Les variations de largeur de tels joints ont été mesurées expérimentalement sur un grand nombre d'ouvrages similaires sur une longue période, et on a calculé leur moyenne et leur déviation standard.

Supposons que la moyenne des variations dimensionnelles des joints pour des dalles de chaussées de 12 m de long soit 3,75 mm sur une année et la déviation standard de 0,13 mm comme ci-avant (§ 2.1).

Si le joint entre dalles est de 10 mm, nous avons vu que le mastic devra supporter une extension de 60 % ou plus, comme le montre la figure 1, ce qui est trop (si le joint est de 25 mm, le mastic ne devra supporter qu'une extension de 24 %, ce qui est possible avec des mastics élastomères ou plastiques de bonne qualité).

On peut calculer par d'autres méthodes alors qu'avec un rapport profondeur/largeur de 1, les déformations de la surface du mastic seraient de 70 %, pour une extension de 60 %.

Il est évident qu'aucun produit de calfeutrement de type bitumineux coulé à chaud ne supportera de telles déformations. Nous verrons au § 4 qu'ils ne supportent que 5 à 15 % d'élongation maximale de service.

Les figures 1 et 2 nous montrent alors quatre classes de produits de calfeutrement qui ont été distinguées par le raisonnement suivant (figure 3) :

- si la largeur du joint est élevée par exemple supérieure à 50 mm, l'extension du joint est inférieure à 10 %, la déformation de la surface du mastic en tension sera approximativement la même que l'extension du joint. Le mastic sera peu déformé et l'expérimentation indique que de nombreux mastics donneront un bon joint, s'ils ont une bonne adhérence sur les lèvres. Les mastics de **classe I** coulés à chaud bitumineux conviendront ;

- si l'extension du joint atteint 30 %, la déformation de surface, pour un joint de même profondeur que sa largeur sera de 50 %. D'après l'expérimentation, cela apparaît comme une limite pour les mastics de **classe II** présentant une bonne adhérence sur les lèvres, une bonne reprise élastique et une élongation maximale de service de type élastomères. À noter aussi que dans ce cas, des pollutions diverses (cailloux, eau) s'accumuleront dans la cuvette formée au-dessus du mastic en extension, ce qui pourra produire des désordres, avant même d'atteindre les 50 % ;

- les joints élastomères comprimés de la **classe III** (figure 4) sont intéressants quand on prévoit des mouvements importants : la figure 1 montre une zone très intéressante pour eux entre 30 et 70 % d'extension. La limite supérieure vient du fait qu'ils contiennent un maximum de 70 % de vides et ne peuvent donc pas subir de variations dimensionnelles supérieures à 70 % environ ;

- la **classe IV** est hypothétique : elle correspond à des mastics à hautes performances qui supportent sans problèmes des extensions très importantes, tels les silicones ou polyuréthanes, mais qui sont beaucoup moins utilisés en travaux publics que les asphaltes modifiés coulés à chaud, car ils sont beaucoup plus onéreux, surtout pour des joints très larges, donc guère acceptables sur le plan économique. Ils ne représentent actuellement que 5 % des joints routiers.

De plus, nous avons vu pour le bâtiment (cf. [C 3 660] et suivants) que même si les très bons mastics élastomères (silicone ou PU) supportent 200 % d'allongement à la rupture, en pratique on ne les fait travailler qu'à ± 25 % ou ± 40 % afin de se ménager un coefficient de sécurité.

2.2.2 Calcul à partir du coefficient de dilatation

Dans le cas où on ne dispose pas d'informations sur les mouvements moyens des joints et sur la déviation standard, on peut cependant les calculer à partir des **coefficients de dilatation**. L'aba-

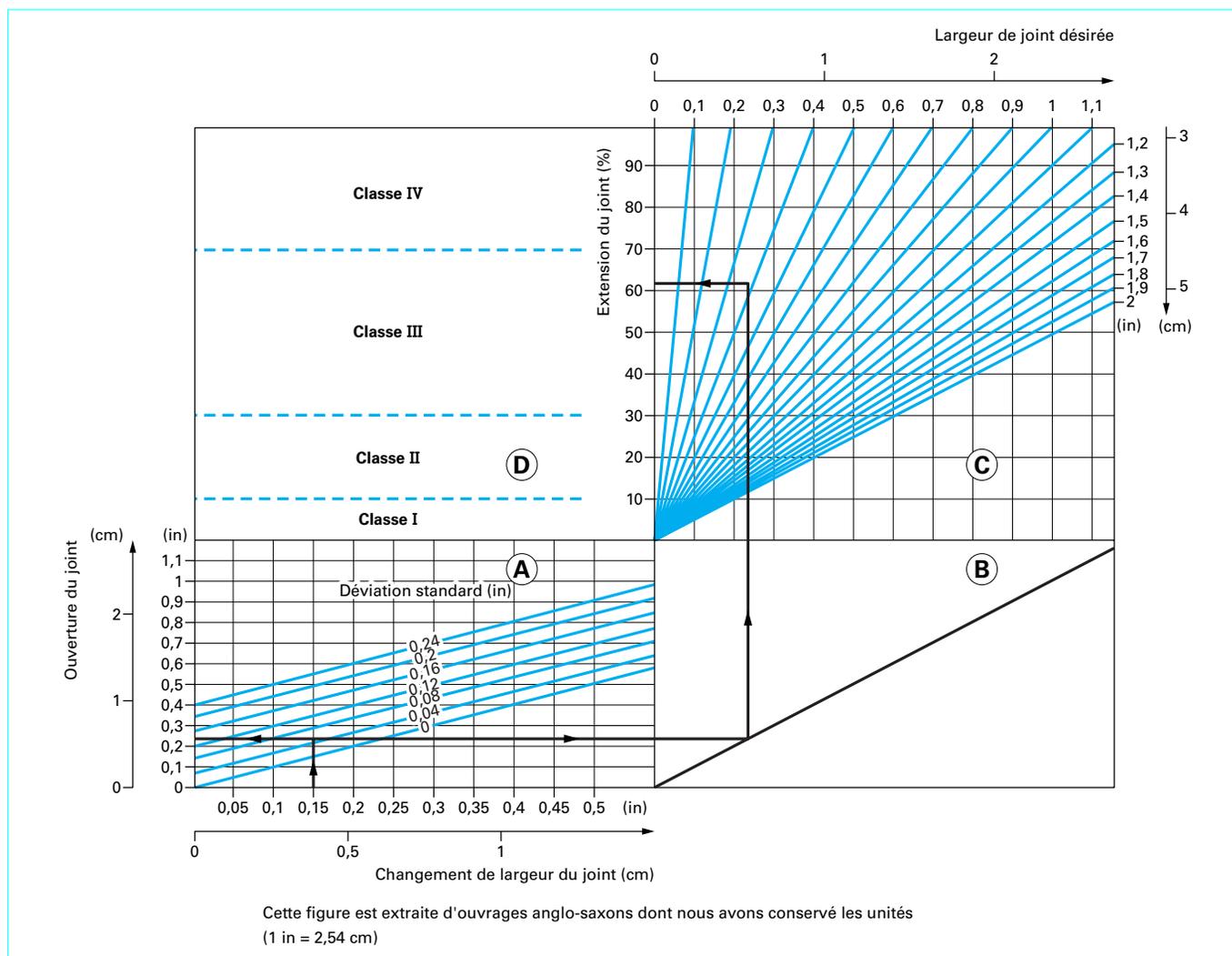


Figure 1 – Dimensionnement et extension du joint basé sur une probabilité de 95 % [8]

que de la figure 2 a été ainsi calculée, avec les quatre classes de mastics considérées ci-dessus.

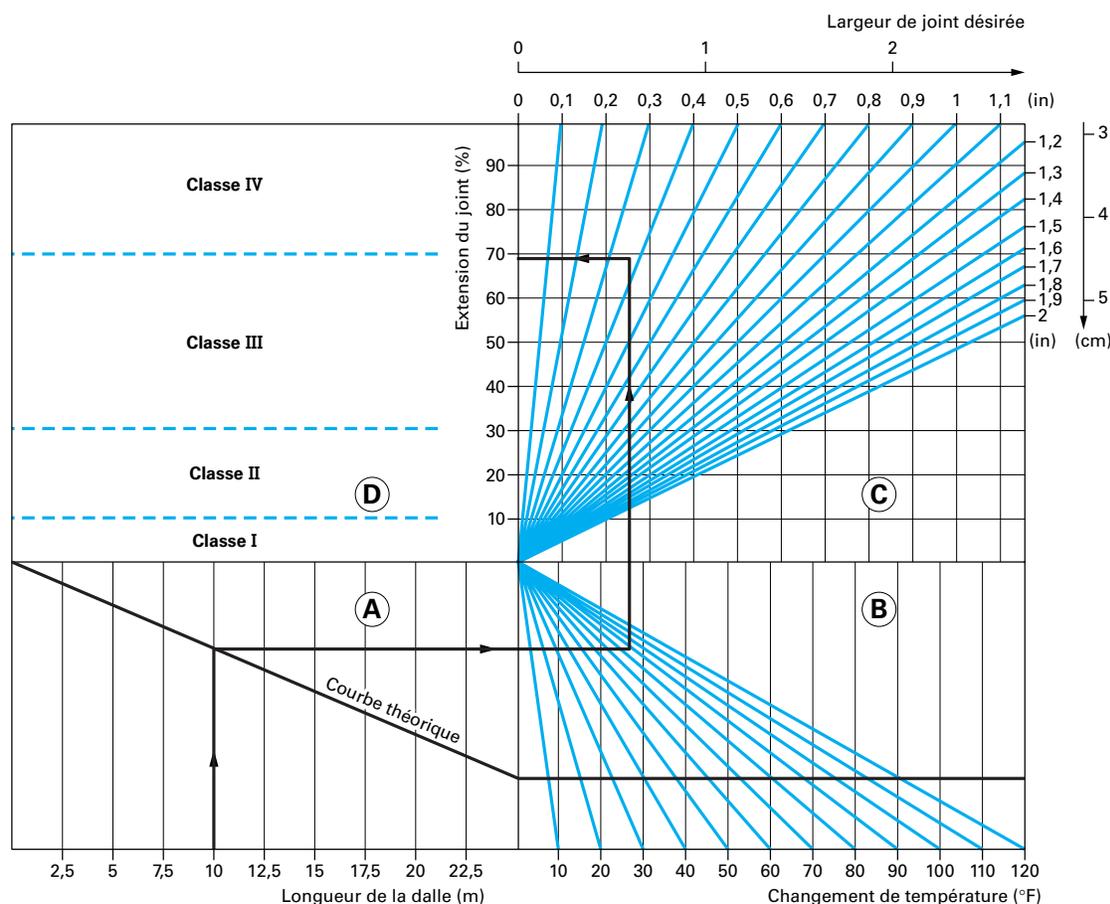
Exemple : pour une dalle béton de 10 m de longueur, avec un coefficient de dilatation du béton $\alpha = 0,6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{F}$ soit $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ et une différence de température maximale entre été et hiver de 90 °F soit 50 °C, si on désire avoir des joints de 0,375 inches soit 10 mm environ, cela entraînera un allongement maximal de 69 %.

Pour limiter les efforts de traction sur les produits de calfeutrement, il est important que ces produits n'adhèrent que sur les surfaces latérales du joint. On utilise pour cela un **fond de joint** en matériau compressible, de diamètre supérieur à la largeur du joint, qui empêche le mastic d'adhérer sur le troisième côté et qui limite donc l'allongement relatif comme indiqué sur la figure 5.

Pour tous détails sur le dimensionnement des joints béton/béton, nous prions le lecteur de se reporter aux articles [C 3 660] et suivants réf. [21] : *Calfeutrement des joints dans le bâtiment*. Le lecteur y trouvera également une discussion sur la forme des joints, la localisation des contraintes et les règles concernant le rapport profondeur/largeur qui en découle. Nous ne repreneons donc pas ici toutes ces règles de dimensionnement. Le lecteur y trouvera également des explications sur le rôle des fonds de joints et sur leur nature.

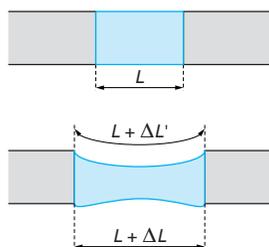
3. Caractéristiques des produits de calfeutrement

Nous donnons ci-après la liste des caractéristiques qui sont utiles à connaître pour les produits de calfeutrement destinés aux travaux publics et quelques définitions.



Cette figure est extraite d'ouvrages anglo-saxons [8] dont nous avons conservé les unités
 (1 in = 2,54 cm ; $\Delta T_K = \frac{5}{9} \Delta \theta_{oF}$)

Figure 2 – Méthode graphique simplifiée pour déterminer l'extension du joint dans des dalles béton de chaussée [8]



L largeur du joint
 $\Delta L'$ déformation de la surface du mastic en tension
 ΔL extension du mastic

Figure 3 – Déformation lors de l'extension du mastic

3.1 Caractéristiques de mise en œuvre

■ Matériaux sur lesquels adhérer

Dans les travaux publics, ce sont uniquement le béton et l'acier.

■ Préparation des surfaces

Les bétons doivent être débarrassés des pollutions, des parties non adhérentes (laitance du ciment...), des huiles de décoffrage...

Les aciers doivent aussi être débarrassés de la rouille, par greinillage ou grattage puis doivent être traités soit par traitement chimique, soit par des primaires en général à base de résines époxydes, afin d'augmenter l'adhérence des mastics d'étanchéité.

■ Température et humidité lors du travail

Il faut éviter le gel et l'humidité à la surface des matériaux qui empêcherait l'adhérence, et de plus il faut appliquer les produits de calfeutrement à des températures moyennes, de façon que le joint ait une largeur moyenne. En effet, si on les applique en été, lorsque les matériaux sont dilatés, le joint se trouve rétréci, et si on les applique en hiver le joint est élargi, donc dans ces deux cas le produit d'étanchéité sera ensuite trop sollicité soit en allongement soit en compression, éventuellement au-delà de ses possibilités.

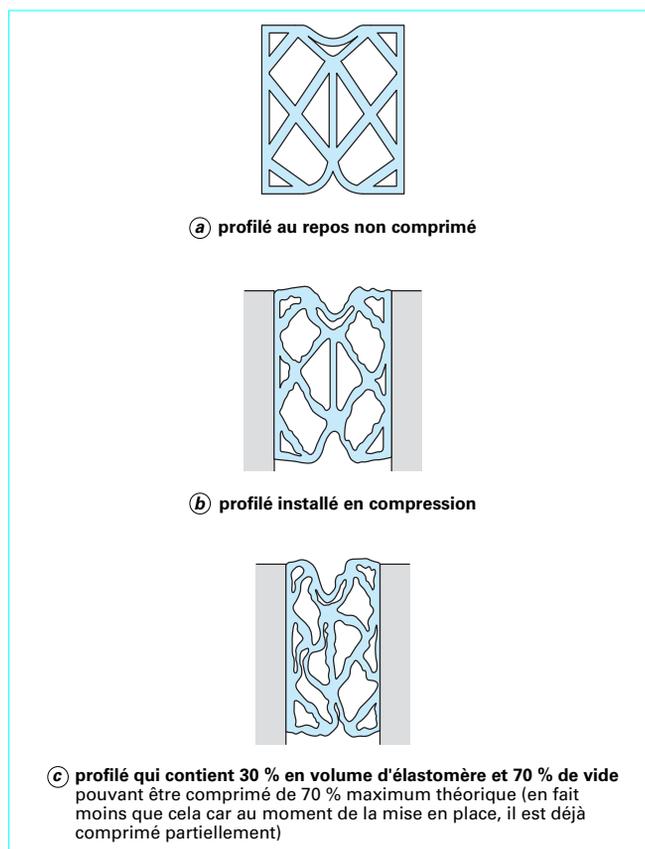


Figure 4 – Joints élastomères comprimés alvéolaires utilisés pour certains travaux publics

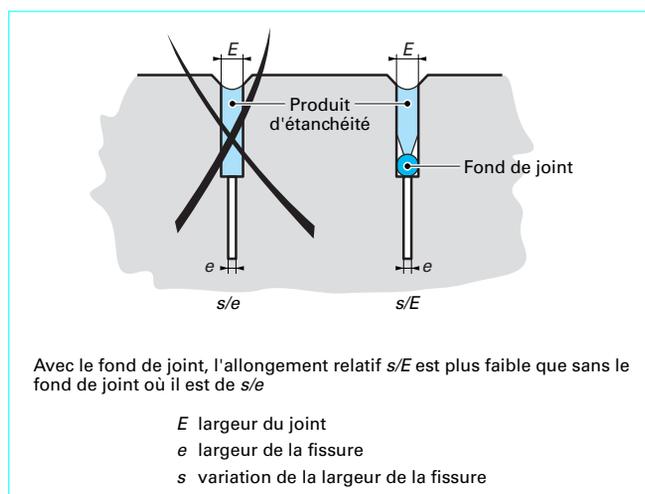


Figure 5 – Rôle du fond de joint

■ **Viscosité, résistance au coulage et extrudabilité**

Certains mastics sont appliqués sur surfaces verticales et doivent avoir une consistance adéquate pour ne pas couler. D'autres, appliqués sur les joints de sols, doivent au contraire être coulants, afin de bien pénétrer dans le joint.

■ **Mode de prise, durcissement**

Dans les travaux publics, un bon nombre de produits sont coulés à chaud (bitumineux, plastisols) et font leur prise par refroidissement. On doit donc aussi respecter leur température de fusion et d'application, en général située autour de 200 °C pour les mastics bitumineux. Les mastics élastomères (silicones, polyuréthane, polyuréthane/brai, thiokols/brais) font leur prise par réaction chimique de polymérisation entre les deux composants ou par réaction avec l'humidité de l'air dans le cas des mastics monocomposants.

■ **Largeur et section mini-maxi, consommation**

Les joints de travaux publics sont souvent appliqués en fortes sections. En effet, ils doivent parfois accommoder de variations dimensionnelles importantes, du fait que certaines structures sont de grandes dimensions. Les principaux mastics utilisés, les bitumineux, ne tolèrent que des faibles variations dimensionnelles et doivent donc être appliqués en fortes largeurs et profondeurs, de plusieurs centimètres au moins.

La consommation, par voie de conséquence, est souvent élevée et peut atteindre 500 à 1 000 g par mètre linéaire, ce qui conduit à utiliser de préférence des mastics bon marché au kilogramme, tels que les asphaltiques ou asphaltiques améliorés par ajouts d'élastomères. Les mastics performants (silicones, thiokols, polyuréthane) chers au kilogramme sont réservés à des joints étroits ou très exigeants au point de vue performances.

Nous verrons que, pour les ponts, qui nécessitent des joints très larges, on utilise soit des profilés élastomères larges, soit des systèmes mécaniques permettant des mouvements très importants de quelques centimètres ou davantage, car il n'est plus possible dans ce cas d'utiliser des mastics.

■ **Durée pratique d'utilisation DPU**, pour les produits à deux composants.

3.2 Caractéristiques mécaniques

■ **Adhésivité-cohésion sous traction maintenue, et après immersion et traitement thermique**

Ces tests sont des tests spécifiques des mastics de calfeutrement dans le bâtiment, mais ils peuvent être utilisés aussi pour les mastics de calfeutrement destinés aux routes et pistes d'aérodromes.

Il existe des normes spécifiques des TP :

- la norme NF P 98-282, qui mesure l'adhérence au support pour les produits d'étanchéité des ouvrages d'art ;
- la norme européenne en préparation 227065 qui permettra de mesurer l'adhésion et la cohésion après des essais d'extension et de compression en continu et des essais d'extension par paliers.

■ **Allongement à la rupture, module d'élasticité, reprise élastique**

La norme NF P 98-283 permet de mesurer la résistance et l'allongement lors d'un essai de traction.

Il faut bien distinguer l'allongement à la rupture, qui est par exemple de 200 à 250 % pour les mastics silicones ou polyuréthane, et l'élongation maximale de service (voir ci-après) qui est très inférieure (25 % pour les silicones) car il convient de prendre un coefficient de sécurité important compte tenu de la répétition des mouvements des intempéries et de la durée de vie, 10 à 15 ans au moins dans le cas des silicones.

La norme NF P 98-284 permet de mesurer la résistance à la fissuration provoquée.

■ **Fluage** (norme européenne 227065), **plasticité, relaxation des tensions**

Il est important de considérer le fluage car il permet aux produits plastiques de suivre les mouvements de retrait.

■ **Cycles traction-compression**

■ **Dureté, résistance à l'abrasion, à la déchirure**

Cela est important pour les joints de sols qui doivent résister au trafic automobile. La norme NF P 98-285 permet de mesurer la dureté Shore. La norme européenne en préparation 227065 concernera l'endommagement fonctionnel, à chaud et à froid, pour les routes et chaussées aéronautiques.

■ **Élongation maximale de service**

Il s'agit ici de l'élongation maximale admissible pour un service de longue durée.

Les produits de calfeutrement destinés aux TP peuvent être classés comme les produits utilisés dans le bâtiment en mastics plasti-

ques (asphaltiques et bitumineux) et mastics élastomères (silicones, polyuréthane).

Les mastics les plus utilisés en TP sont les asphaltiques et asphaltiques modifiés élastomères, qui sont dans ces deux cas des produits plastiques, à très faible capacité d'élongation (quelques pourcent en service continu) et qui présentent du fluage sous élongation.

■ **Normes spécifiques aux TP**

Les travaux publics ont leurs propres méthodes d'essais et normes, qui sont soit des normes américaines (normes fédérales SS-S, ASTM, AASHTO pour les routes) en raison de leur avance technologique, soit des normes françaises, allemandes (DIN) ou européennes.

De nombreuses normes européennes sont actuellement en préparation.

Nous avons recensé en [Doc. C. 5 462], toutes les normes existantes et le tableau 1 recense les spécifications américaines pour les produits de calfeutrement destinés aux chaussées en béton, de routes et aérodromes.

Tableau 1 – Spécifications américaines pour les mastics d'étanchéité pour chaussées en béton (routes, aérodromes)

Norme ASTM série D	Intitulé de la norme/objet	Norme fédérale SS-S-	Types de béton	Mise en œuvre	Résistance au fuel aviation	Résistance à la chaleur des gaz d'échappement	Composition des mastics
1190	Specification for hot poured joint sealant	164 et AASHTO M 173	BC	coulé à chaud	non	non	asphalte modifié élastomère
1850	Specification for cold applied joint sealant for concrete pavement	–	BC	à froid	non	non	asphalte modifié élastomère
1854	Standard specification for jet fuel resistant concrete joint sealer, hot poured elastic type	167	BC	coulé à chaud	oui	–	PVC/brai
3405	Specification for joint sealant, hot poured (pour produits coulés à chaud)	1401	BC, BB	coulé à chaud	non	–	asphalte modifié élastomère
3406	Specification for joint sealant, hot poured, elastomeric type for concrete pavements	–	BC	coulé à chaud	non	–	PVC/brai ou asphalte modifié élastomère
3569	Specification for joint sealant, hot applied, elastomeric, jet fuel resistant type for concrete pavements	–	BC	coulé à chaud	oui	–	PVC/brai
3581	Specification for joint sealant, hot applied, jet fuel resistant type, for concrete and tar concrete pavements	1614	BC	coulé à chaud	oui	non	PVC/brai
	Spécification pour les produits de calfeutrement 2 composants, élastomères, résistant au fuel aviation	200	BC	à froid	oui	oui	polyuréthane/ brai ou thiokol/ brai
2828	Specification for non bituminous inserts for contraction joints in concrete airfield pavements, sawable type	–	BC	préformé	non	–	profilés néoprène
5893	Specification for cold applied, single component chemically curing silicone joint sealant for Portland cement concrete pavement	–	BC	à froid	–	–	silicone mono-composant
5249	Specification for backer materials for use with cold and hot applied joint sealants in Portland cement concrete and asphalt joints (1)	–	–	–	–	–	–

(1) concerne les fonds de joints

3.3 Caractéristiques physiques, chimiques et de durabilité

■ Tenue aux cycles froid-chaueur

Les essais à basse température sont réalisés, en France à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ et non à $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ comme spécifié dans les normes américaines, pour tenir compte de nos conditions climatiques.

■ Résistance à la chaleur

Signalons ici le ramollissement important à la chaleur des produits bitumineux et asphaltiques, par exemple (norme NFT 66-008 pour la mesure du point de ramollissement, norme européenne 227064 pour la mesure du point de ramollissement bille-anneau).

De plus, la chaleur provoque la migration des produits à bas poids moléculaires (huiles) hors du mastic bitumineux, ce qui le rend à terme moins plastique ; la norme NF P 85-512 mesure la diffusion des constituants des mastics. Par ailleurs, les produits pour joints de pistes d'aéroports doivent résister au souffle chaud des réacteurs, et cela fait l'objet de la norme américaine fédérale SS-S 200.

■ Résistance à l'eau et à l'humidité

■ Tenue aux cycles gel-dégel

La méthode ASTM C 711-72 permet de mesurer la flexibilité à basse température des mastics élastomères.

■ Résistance aux solvants, essences (kérosène) et aux huiles

Cela est important pour les produits d'étanchéité destinés aux joints de pistes d'aéroports, et cela fait l'objet de plusieurs normes américaines que nous citons en détail pour les joints de pistes d'aviation en [C 5 461, § 2] et dans le tableau 1.

■ Résistance aux sels de déverglaçage

■ Résistance aux produits chimiques, pour les installations chimiques, les bassins de traitement des eaux et les égouts

■ Résistance à l'oxydation et aux UV

La méthode ASTM C 718-22 permet de tester la résistance aux UV des divers mastics de calfeutrement.

■ Durabilité et tenue au vieillissement

C'est un point capital : il existe diverses méthodes permettant de les évaluer, citées en [Doc. C 5 462], et nous indiquons dans le paragraphe 4, les durabilités prévisibles.

On considère que les mastics d'étanchéité sont efficaces :

- 5 ans pour les bitumineux et asphaltiques ;
- 10 à 20 ans pour les élastomères (silicones...).

Cette durabilité dépend de la qualité du produit, de sa mise en place, du trafic, des sollicitations et des variations climatiques.

Des avis techniques LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées) fournissent les résultats des essais relatifs aux propriétés prévues par les normes de la série NF P 98-280 : **essais d'élasticité, de poinçonnement et autres essais**. L'agrément du LCPC est délivré pour une période de 5 ans.

4. Types de produits de calfeutrement

Un petit nombre de produits (silicones, polyuréthanes) sont communs aux deux métiers TP et Bâtiment.

Nous donnons ci-après la liste des produits qui sont utilisés dans les TP, et nous étudions certains types qui ne sont utilisés que pour les TP (asphaltiques, bitumineux et plastisols coulés à chaud).

4.1 Mastics asphaltiques, bitumineux non modifiés et modifiés

Ce sont les mastics les plus utilisés dans les travaux publics, du fait de leur bas prix – environ $0,75\text{ €/kg}$ en 2002 pour un mastic asphaltique ou bitumineux et 1 €/kg pour un asphalte modifié élastomère, ce qui justifie leur utilisation en fortes sections.

Ils sont coulés à chaud, à partir de fondoirs, à $150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ et se solidifient en quelques minutes, par refroidissement.

Les élastomères ajoutés augmentent à la fois l'allongement possible et la durabilité, ainsi que le prix.

Ces mastics fluent à chaud à partir de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces quatre familles constituent ensemble environ 88 % de la consommation de joints routiers et aérodromes. À eux seuls les mastics asphaltiques modifiés élastomères en constituent 85 %.

Ces produits sont utilisés pour le calfeutrement de revêtements en béton hydraulique et en béton bitumineux : chaussées routières.

Les mastics asphaltiques-élastomères font l'objet des normes américaines ASTM D 3405 et norme fédérale SS-S 1401B. Ils ne résistent évidemment pas au kérosène ni au souffle chaud des réacteurs.

4.2 Plastisols PVC/brai

Ce sont des mélanges monocomposants, coulés à chaud, à environ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, de plastisols PVC (polychlorure de vinyle) et de brai.

Ils sont un peu plus chers ($1,5\text{ à }2\text{ €/kg}$) et plus performants que les asphaltés modifiés élastomères.

En particulier, ils résistent au kérosène, mais pas au souffle chaud des réacteurs.

Leur durabilité est de 10 ans environ. Ils satisfont à la norme américaine SS-S 1614. Ils supportent des élongations maximales de service de l'ordre de 10 à 15 %.

Aux USA, ils représentent 5 % du marché des mastics de calfeutrement pour les routes et pistes d'aéroports.

Ils sont utilisés pour les pistes aviation, les parkings, les gares routières.

4.3 Silicones

On utilise surtout des **silicones monocomposants**, faisant leur prise sous l'action de l'humidité de l'air, et à bas module.

Aux USA et en Europe, ils constituent près de 5 % du marché des joints routiers et aéronautiques, malgré leur prix élevé (4 €/kg) car ils ont une application facile, une excellente durabilité, une grande élongation et un bas module qui permettent de les utiliser sous une faible largeur, mais ils ne résistent pas très bien au kérosène qui peut provoquer leur gonflement.

Des **silicones à deux composants** tels le Dow Corning 902 RCS sont aussi utilisés pour les routes, ponts et pistes d'aéroports. Ils présentent de bonnes performances de service, mais un prix élevé (4 €/kg).

Grâce à leurs possibilités d'élongation importante (25 à 40 %), les silicones sont parfois utilisés pour les joints de ponts où les mastics base asphalte sont proscrits du fait de leur très faible élongation.

4.4 Polyuréthane/brai

Ce sont des mastics à base de polyuréthane modifié par ajout de brai pour en abaisser le prix et utilisé avec un durcisseur. Ils sont très performants, bien qu'à un prix acceptable 3 €/kg . Ils offrent une

bonne résistance au kérosène et au souffle chaud des réacteurs. Ils satisfont à la norme américaine fédérale SS-S 200 E. Leur marché est modeste : seulement 1 % du marché total des mastics routes et aérodromes, mais croît rapidement. Ils sont préférés pour les pistes d'aviation.

Ils supportent des élongations maximales de service de 10 à 15 % et des températures de services de - 35 à + 90 °C.

Les polyuréthanes purs sont encore très peu utilisés en travaux publics, car onéreux (6 €/kg).

4.5 Polysulfures/brai

Il s'agit d'un très petit marché. Les polysulfures à deux composants sont utilisés pour les pistes d'aviation, et les aires de stationnement d'avions, grâce à leur résistance au fuel aviation. Ils satisfont à la norme US fédérale SS-S 200 E. Leur prix moyen est de 6 €/kg.

Les autres mastics de calfeutrement cités pour le bâtiment (acryliques, butyles...) (cf. [C 3 660] et suivants, réf. [21]) ne sont jamais utilisés dans les travaux publics, en raison de certaines insuffisances (retrait au séchage, rapports performances/prix trop faibles...).

4.6 Produits rigides : époxydes, époxy-polysulfures

Ces produits de calfeutrement sont rigides et ne sont utilisés en travaux publics que pour :

- le collage des voussoirs préfabriqués de ponts et tunnels (cf. [C 5 461, § 3 et 5]) ;
- des coulis très fluides d'injection pour solidariser des plots de béton dans la construction de barrages ;
- des scellements de câbles ou barres d'acier dans le béton.

Ce sont des produits à deux composants durcissant à température ambiante, entre + 6 et + 35 °C. Leur prix est de 3 €/kg (pour des produits contenant des charges minérales).

4.7 Profilés élastomères

Lorsqu'on doit obturer des joints très larges (de 2 à 15 cm) et dont les profils sont bien définis, bien parallèles, on utilise des profilés en caoutchouc néoprène de différentes formes, tels que ceux montrés sur la figure 3 et la figure 6.

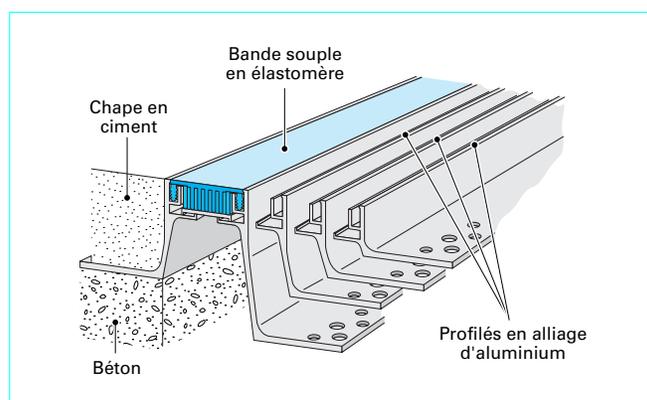


Figure 6 – Joint métal/élastomère GFT-50 de la société Couvraneuf

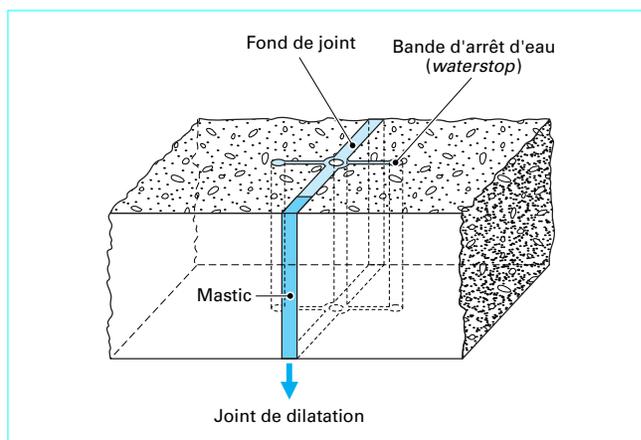


Figure 7 – Waterstop ou bandes d'arrêt d'eau en élastomère

Ces profilés sont utilisés par exemple pour les joints de ponts, de dalles préfabriquées, et nous les étudierons en détail en [C 5 461, § 3].

Ils satisfont par exemple à la norme ASTM D 3542.

Ils sont en général installés en compression entre les rives du joint et leur largeur doit être alors du double de la largeur moyenne du joint.

Ils peuvent être fixés sur les rives du joint avec un adhésif (à base de néoprène) et sont faciles à installer.

Cet adhésif, qui joue aussi le rôle de lubrifiant, pour faciliter la mise en place, pourra être testé selon la norme ASTM D 4070.

Ils sont souvent assez coûteux : de 10 € le mètre linéaire en 5 cm de large jusqu'à 60 € le mètre en 10 cm de large.

4.8 Waterstops ou bandes d'arrêt d'eau

Dans les grands ouvrages de travaux publics, on emploie des bandes d'arrêt d'eau en PVC ou autre élastomère (figure 7).

Ces bandes sont mises en place lors du coulage du béton : elles présentent des renflements sur les bords et un tube de section circulaire au centre. Les renflements sont destinés à assurer le calage dans la masse du béton et l'ovuide la souplesse, l'élasticité centrale. Le retrait ultérieur des deux parties jointes en béton met la bande en tension, ce qui assure alors l'étanchéité.

Ils seront étudiés en [C 5 461, § 4].

4.9 Profilés et couvre joints métalliques et élastomères

Ils seront étudiés en [C 5 461, § 3].

Ils sont aussi utilisés pour le calfeutrement de joints situés entre des dalles de très grandes dimensions (plus de 20 m), comme dans les grands bâtiments d'aéroports, les usines, les parkings (figures 6 et 7).

4.10 Coulis et résines d'injection

Ils sont utilisés pour différentes raisons ou causes :

- le tassement des sols et des fondations ;
- le retrait du béton ;

- les mouvements du gros œuvre, sous son poids ou sous séismes ;
- les erreurs de construction provoquant des cavités à l'intérieur des structures ;
- la disparition de profilés par vieillissement.

Il peut se produire des fissures, des vides ou cavités dans les ouvrages en béton, qu'il faut alors combler pour renforcer et étanchéfier l'ouvrage, mais qui peuvent être inaccessibles.

La solution est alors d'injecter un produit très fluide, ou coulis, qui pénétrera dans toutes les fissures et cavités et les bouchera lors de son durcissement ou de sa polymérisation.

Il existe plusieurs types de produits :

- les coulis de ciment : le ciment, très rigide après durcissement, ne permettra pas de mouvements relatifs ;
- les résines époxydes (deux composants) : également rigides après polymérisation/réticulation, elles ne permettront pas de mouvements mais donneront des adhérences très élevées sur béton, métaux, roche, ce qui permet de consolider l'ouvrage en le rendant à nouveau monolithique ;
- les résines polyuréthanes : selon les formulations, on peut obtenir alors des joints semi-rigides ou souples ou même des mousses de polyuréthane qui s'expanseront au contact de l'humidité contenue dans les matériaux ou dans les sols, bloquant alors complètement les cavités.

Nous étudierons ces techniques d'injection et de consolidation au paragraphe 5.

5. Injections de résines

5.1 Types d'injection

Des résines synthétiques sont utilisées en injection dans un certain nombre de cas :

- **injection en fissures** soit pour restituer aux structures fissurées leur monolithisme lorsque les fissures sont stabilisées, soit, dans le cas de fissures actives, pour les obturer et supprimer ainsi les fuites de liquides ;
- **injections de zones creuses ou cavernueuses**, nids de cailloux, défauts de bétonnage des structures en béton armé ou en béton précontraint, etc. ;
- **injections de gaines de précontrainte, de scellements** ;
- **injections entre éléments de béton préfabriqués** pour obtenir le monolithisme comme par exemple, l'injection de résine époxyde entre les voussoirs préfabriqués des tunnels, injection de coulis de ciment entre les plots d'un barrage.

5.2 Résines utilisées

Lorsqu'il s'agit d'injecter des fissures inertes ou des cavités plus ou moins importantes, on utilise en général des **résines époxydes** sans solvant, dont la viscosité, le temps de prise et la souplesse sont adaptés au problème à résoudre. Les résines époxydes sont en effet beaucoup plus « mouillantes » que l'eau, bien que plus visqueuses et cheminent par capillarité dans les interstices les plus fins. Nous citons en [Doc. C 5 462] différents fournisseurs.

S'il s'agit d'étanchéfier des fissures actives, on utilise des résines beaucoup plus souples, se gonflant sous l'effet de l'humidité :

- les polyuréthanes ;
- les acryliques.

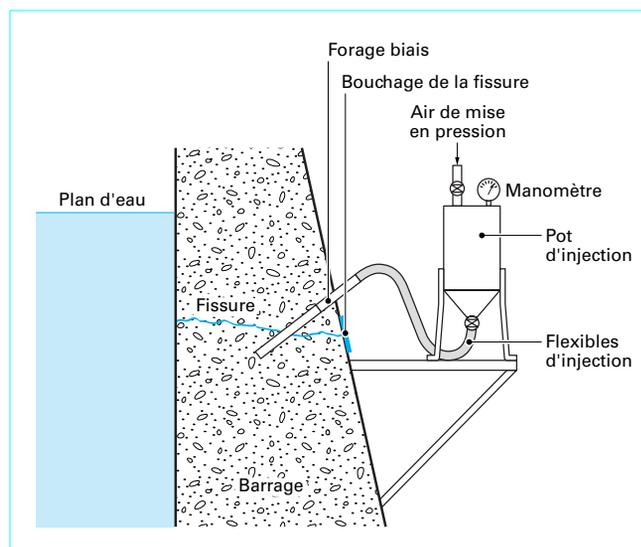


Figure 8 – Forage biais

Alors que les résines époxydes, rigides et très résistantes collent entre elles les diverses parties, les résines souples obturent, calfeutrent et étanchéfient.

5.3 Injections en fissures

5.3.1 Traitement des fissures inertes

Plusieurs techniques sont utilisées.

■ Forage biais (figure 8)

On injecte la résine sous pression dans le plan de la fissure ou de la reprise de bétonnage.

Cette technique est utilisée avec succès pour rendre étanches des reprises de bétonnage de barrages, des fissures de parois très épaisses, etc.

■ Forages multiples (figure 9)

On fore dans le plan de la fissure un certain nombre de trous dont l'espacement varie en fonction de la largeur de la fissure (de un trou par mètre pour les fissures supérieures ou égales à 1 mm à quatre trous par mètre pour les fissures de l'ordre de 0,3 mm).

Après nettoyage des trous à l'air comprimé pour chasser les poussières dues au forage, on introduit dans les trous des injecteurs de diamètre inférieur à celui des trous, que l'on scelle à la résine ou au ciment prompt (figure 10).

Fissures verticales (figure 9) : on commence à injecter à partir de l'injecteur le plus bas et en remontant de proche en proche, après obturation des injecteurs abandonnés.

Fissures en sous-faces (figure 11) : lorsque l'on a à injecter une dalle ou une poutre fissurée, il convient de disposer les injecteurs en sous-face, de façon à faire cheminer la résine du bas en haut, ce qui assure un remplissage parfait de la fissure.

5.3.2 Traitement des fissures actives

Dans de nombreux cas, il n'est pas souhaitable de restituer le monolithisme des structures fissurées, mais il convient au contraire de permettre leur jeu tout en assurant leur étanchéité.

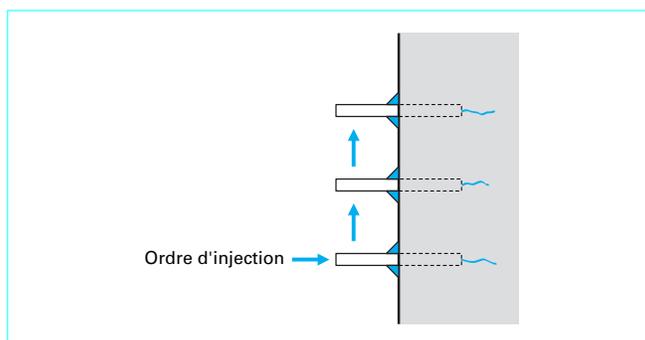


Figure 9 – Forages multiples pour fissures verticales

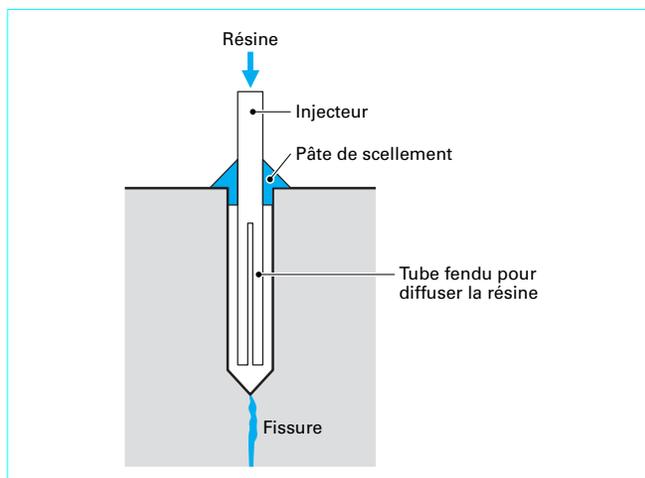


Figure 10 – Injecteur de forage

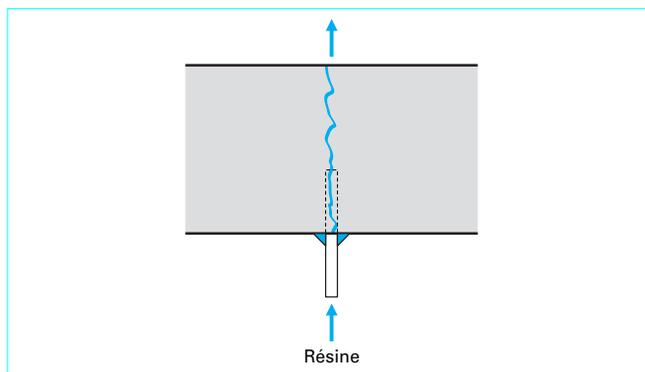


Figure 11 – Forage pour fissures en sous-faces

On utilise pour ce faire des résines polyuréthanes ou acryliques : ces dernières se présentent sous la forme de deux solutions aqueuses concentrées, à diluer dans l'eau avec addition éventuelle d'un accélérateur de prise.

Le gonflement en présence d'eau peut atteindre 100 %.

La technique de mise en œuvre est la suivante :

- les forages doivent être exécutés en biais de façon à recouper la fissure ou le joint de reprise de bétonnage ;
- la sonde d'injection est mise en place ;

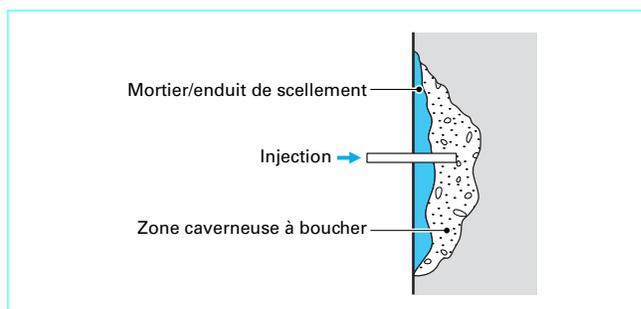


Figure 12 – Injection de zones creuses ou cavernueuses

– l'injection de la solution est effectuée à l'aide d'une pompe pneumatique dans les cas de gros débits ;

– pour les fissures ou joints très ouverts, il est nécessaire d'exécuter un cachetage par un mortier à prise rapide afin d'éviter le reflux de la solution injectée ;

– l'espacement des sondes d'injection dépend de la largeur de la fissure ou du joint de reprise et du débit de la solution injectée.

En règle générale, il faut un espacement moyen de 0,60 m sauf dans les cas de fissures très fines (ou microfissures) nécessitant une injection très lente de la solution.

Ce procédé a été utilisé dans de nombreux ouvrages souterrains de la région parisienne et de France sous des hauteurs d'eau variant entre 10 et 25 m.

5.4 Injections de zones creuses ou cavernueuses

Ce défaut est souvent le résultat de la mise en œuvre d'un béton de fluidité insuffisante ou de granulométrie incompatible avec un ferrailage très dense. Sa vibration peut être aussi insuffisante.

La méthode la plus usuelle consiste à disposer quelques tubulures d'injection dans les creux les plus profonds avant de procéder au ragréage à l'aide d'un mortier (hydraulique ou à liant résine).

On peut assimiler à cette catégorie de désordres les fissures très larges (supérieures ou égales à 3 mm) consécutives par exemple à un choc violent ou à des failles (tabliers de ponts heurtés par des véhicules trop hauts, séismes).

On injecte alors par gravité ou sous pression, à la pompe, un coulis de liant époxyde et de sable très fin, le sable occupant les vides à remplir tandis que l'excédent de résine chemine dans les fissures plus fines et colmate les zones poreuses (figure 12).

Ces mêmes techniques d'injection peuvent aussi être utilisées avec des coulis de ciment très fluide afin de bien pénétrer.

5.5 Réinjections des câbles de précontrainte

L'avantage dans ce type d'injection (figure 13) d'utiliser des coulis fluides de résines est triple :

- les résines sans solvant ne présentent pas de retrait lors de leur prise, d'où l'absence de fissures de retrait ;
- leur adhérence sur les parois et les câbles est considérable ;
- plus « mouillante » que l'eau, elles se propagent plus facilement par capillarité ; cela est particulièrement intéressant pour les gaines de précontrainte mal injectées, présentant des bouchons de ciment que seules les résines peuvent franchir.

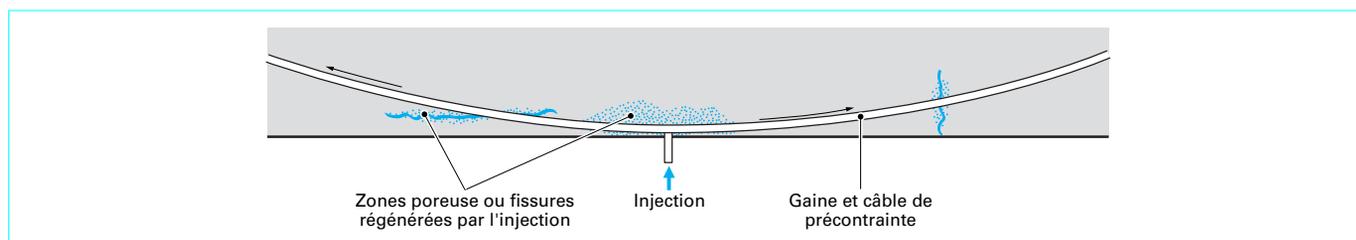


Figure 13 - Injection dans un câble de précontrainte

Leur remplissage ne peut être complet que si l'on parvient à chasser l'air emprisonné dans la gaine. Pour ce faire, on peut utiliser la technique du vide associée à celle de la pompe d'injection.

Le coût des résines époxydes d'injection est d'environ 6 €/kg pour une résine très fluide, mais ne contenant aucun solvant, donc à 100 % d'extrait sec.

6. Boulonnage de rochers

6.1 Principe

En travaux souterrains, on appelle boulonnage, le renforcement du terrain encaissant l'excavation au moyen de barres, généralement métalliques, de 1,50 à 5 m de longueur scellées dans le terrain et munies à leur extrémité visible d'une plaque d'appui et d'un écrou. Ces boulons sont passifs et permettent par exemple d'épingler des blocs de roches instables. Le front de taille est parfois conforté à l'aide de barres qui sont facilement détruites au fur et à mesure de l'avancement.

Le scellement des boulons d'ancrage est obtenu à l'aide de mortier de ciment ou de résine (cf. [C 5 565], réf. [23]).

6.2 Types de matériaux de scellement utilisés

■ **Mortiers de ciment** ; ils sont spécialement formulés pour avoir les propriétés suivantes :

- adhérences élevées sur le terrain et l'acier ;
- légère expansion lors du durcissement ;
- prise rapide (de quelques minutes à 1 heure maximum) afin de ne pas nécessiter un étaiyage trop long.

■ **Résines époxydes à deux composants** durcissant à froid ; avec ces produits qui adhèrent très fortement à la fois au terrain et à l'acier, on peut obtenir des résistances au cisaillement de 20 à 40 MPa et donc des résistances à l'arrachement énormes, proportionnelles aux dimensions des barres. De plus, les résines époxydes protègent les barres d'acier de la corrosion. Enfin, on peut espérer des durabilités de l'ordre de 30 à 50 ans.

■ **Scellements chimiques époxy-acrylates ou polyester** ; il s'agit d'ampoules en verre comprenant les deux composants séparés. Lors de la fixation des barres métalliques, les deux composants se trouvent en contact et sont mélangés par la rotation des barres (figure 14).

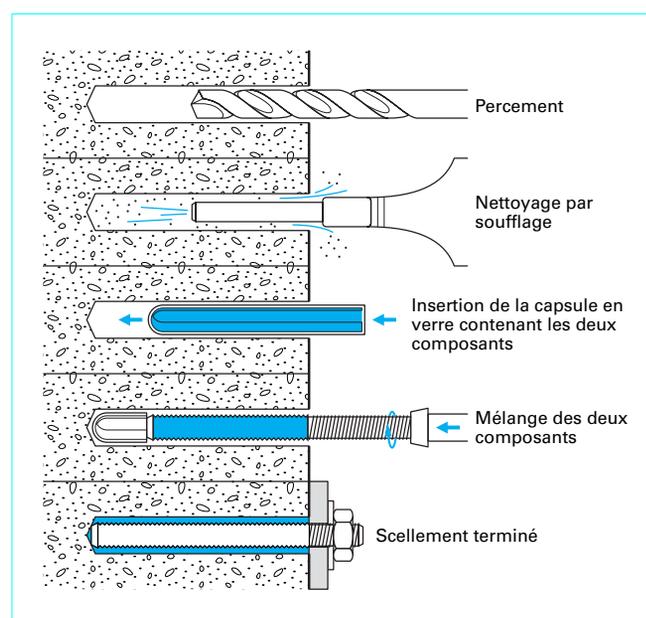


Figure 14 - Scellement d'une tige filetée (source SPIT)

Liste des mots clés

TP
 Joint
 Calfeutrement
 Mastic
 Asphaltique § 4.1
 Bitumineux § 4.1
 Plastisol § 4.2
 Brai § 4
 Silicone § 4.3
 Polyuréthane § 4.4
 Polysulfure § 4.5
 Élastomère § 4
 PVC § 4.2
 Asphalte § 4.1
 Résine § 5

Injection § 5
 Fissure § 5.3
 Forage § 5.3
 Époxyde § 4.6 § 5 § 6
 Boulonnage § 6

TP

Travaux Publics

PU

Polyuréthane

§ 4

DPU

Durée pratique d'utilisation

§ 3.1

AASHTO

American Association of State Highways and Transportation Officials

Tableau – 1

Situation de l'article

N° de traité : 25
 N° de rubrique : 40
 N° de sous-rubrique : 15
 N° de volume : < >
 N° de la fiche doc :