

3.7 HYDROFUGES ET MEMBRANES D'IMPERMÉABILISATION ¹

- On applique généralement des **systèmes d'imperméabilisation** pour **empêcher l'humidité et les sels fondants** de pénétrer dans le béton et l'eau de s'infiltrer dans les espaces sous-jacents par les fissures ou les joints.
- Pour qu'un système d'imperméabilisation soit efficace, il doit remplir ces fonctions tout en résistant aux **charges de services** et aux **produits chimiques**. Il doit offrir une surface sécuritaire (**antidérapante**), que celle-ci soit sèche ou mouillée.

3.7.1 Critères de rendement

3.7.1.1 Membranes d'imperméabilisation

- **Imperméabilisation**
 - Une membrane efficace doit empêcher l'absorption d'eau par la dalle.
- **Porosité**
 - Les membranes **poreuses** risquent, sous les **pressions des pneus** (ou autres) de laisser pénétrer l'eau.
 - Dans le cas de dalles **contaminée par les chlorure**, il est possible que ce type de membrane n'offre pas une protection suffisante contre la corrosion si le **taux d'humidité est suffisamment élevé**.
- **Colmatage des fissures**
 - Les membranes doivent pouvoir former une **barrière étanche** sur les **fissures** qui se forment dans les ouvrages.

¹ *Lignes directrices pour la conception, la construction, la réfection et l'entretien d'ouvrages de stationnements durables*, Travaux Publics et Services Gouvernementaux, Service d'architecture et de génie, Ottawa, Ontario, 1994, 211 p.

- Les fabricants prévoient généralement des **dispositions spéciales à l'endroit des fissures**. Les mesures particulières varient généralement en fonction de l'ouverture et de la répartition des fissures et en fonction du type de membrane utilisé.
- Idéalement la membrane doit conserver sa capacité à colmater les fissures **dans toute la gamme des températures**.
- **Elle ne devrait être appliquée qu'après la formation des fissures de retrait.**

- **Adhérence**

- La membrane doit **adhérer** suffisamment pour résister aux forces de **cisaillement** et aux forces de **traction** engendrées par les pressions de vapeur.

- **Résistance aux chocs**

- Une membrane doit être conçue pour résister à la circulation des **véhicules (voitures, chasse-neige)**.

- **Résistance aux rayons ultraviolet**

- **Souplesse par temps froid**

- Les membranes doivent conserver leur **souplesse** par temps froid pour protéger efficacement l'ouvrage à l'emplacement des **fissures** et résister aux **chocs**.

3.7.1.2 Hydrofuges

- **Imperméabilité**

- Un hydrofuge doit faire obstacle aux **infiltrations d'eau** et des **chlorures**.

- **Porosité**

- Un hydrofuge est poreux lorsqu'il permet l'évaporation de la vapeur d'eau et l'assèchement (**«respiration»**) du béton. Un béton qui peut **s'assécher sera plus résistant** et moins propice à la corrosion.

- **Résistance aux rayons ultraviolets**

- Les hydrofuges dits **«pénétrants»** sont **protégés** des rayons ultraviolets par le béton.

- **Pouvoir pénétrant**

- Le pouvoir pénétrant des hydrofuges influence leur **résistance aux ultraviolets et leur résistance à l'abrasion**.

- **Fini et résistance au dérapage de freinage**

- Certains hydrofuges ont un **fini inégal, brillant** ou collant qui peut être ou non acceptable.
- Les hydrofuges ne devraient pas réduire sensiblement la **résistance au freinage**.

- **Volatilité**

- Certains ingrédients actifs de l'hydrofuge peuvent s'évaporer si le produit est trop volatil. Il faut surveiller de près les **conditions d'application** pour réduire au minimum les pertes d'ingrédients actifs.

- **Résistance aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage dû aux sels fondants**

- Généralement, les hydrofuges poreux ou non poreux, peuvent **réduire la résistance du béton aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage. On doit donc éviter d'appliquer un hydrofuge sur un béton qui présente une faible résistance au gel.**

3.7.2 Matériaux

3.7.2.1 Membranes d'imperméabilisation

- Dans le cas des ouvrages de stationnement, un système d'imperméabilisation est généralement constitué d'une **membrane, recouverte ou non d'une chape d'usure**. Ces systèmes peuvent être regroupés en deux grandes catégories:

- Les systèmes à chape mince
- Les système à chape épaisse

n Les membranes

- Elles peuvent être appliquées à **l'état liquide** (à chaud ou à froid) ou sous forme de **feuilles** (adhésives ou collées au chalumeau) (Tab. 3.3).

Tab 3.3 - Principaux types de membranes d'imperméabilisation.

[tiré *Lignes directrices pour la conception, la construction, la réfection et l'entretien d'ouvrages de stationnements durables*, Travaux Publics et Services Gouvernementaux, Service d'architecture et de génie, Ottawa, Ontario, 1994, 211 p.].

	Membranes d'imperméabilisation				
Classification des systèmes	CHAPE MINCE	CHAPE ÉPAISSE			
Composition de la membrane	• Uréthane • Uréthane/époxyde • Néoprène	• Bitumineuse		• Bitumineuse • Uréthane	
Mode d'application	• Liquide à froid	• Liquide à chaud	• Liquide à chaud • En feuille à froid • En feuille au chalumeau	• Liquide à froid • Liquide à chaud • En feuille au chalumeau	• Liquide à froid • Liquide à chaud • En feuille au chalumeau
Chapes d'usure	• Époxyde • Uréthane	Liaisonnée Mastic	Liaisonnée Béton Asphalte	Non liaisonnée Béton Asphalte	Chape en béton non liaisonnée
Épaisseurs des membranes	1 à 2 mm	2 à 3 mm	1,5 à 3 mm	À froid- 1,6 mm En feuille au chalumeau - 3 mm Liq. à chaud - 5 mm	À froid- 1,6 mm En feuille au chalumeau - 3 mm Liq. à chaud - 5 mm
Épaisseurs des chapes	1 à 2 mm	15 à 20 mm	25 à 40 mm	75 mm (min)	75 mm (min)

n Les chapes minces

- Les systèmes à chape mince consistent ordinairement en une **membrane** d'imperméabilisation et une **chape d'usure**. Les chapes d'usure minces sont généralement **appliquées à froid à l'état liquide** pour former un système **d'environ 3 mm d'épaisseur**.
 - Les chapes d'usures minces peuvent être faites dans une vaste gamme de matériaux allant de **l'époxyde** semi-rigide à **l'uréthane souple**.

- **Principaux inconvénients:**

- Elles ne conviennent pas dans les endroits où le **déneigement** se fait au moyen de chasse-neige.
- Traitement spécial à l'emplacement des **joints de dilatation**.
- **Défauts de surface apparents**.
- **Usure** rapide dans les zones de forte circulation.
- Altération par les **rayons ultraviolets**.

- **Principaux avantages**

- **Détériorations de surfaces faciles à déceler**.
- **Surcharge** supplémentaire peut importante.
- **Dégagement** vertical peut affecté.
- Excellente surface de **traction** pour les pneus (granulats exposés).
- Plusieurs **teintes**.
- Application selon des **formes particulières**.

n **Les chapes épaisses**

- Les systèmes à chape épaisse comportent ordinairement une **membrane bitumineuse**, qui peut être appliquée à l'état **liquide** ou sous forme de **feuille**. Le plus souvent en **asphalte**, les chapes d'usure peuvent aussi être en béton. Ces système font généralement plus de **15 cm d'épaisseur** (Tab. 3.3).

- **Principaux inconvénients:**

- L'échappement des gaz de la chape et l'humidité peuvent causer la formation de **boursoflures** (surtout dans le cas des systèmes qui comportent une seule couche de bitume appliquée à l'état **liquide** sur moins de 2 mm d'épaisseur).
- Peu de résistance aux **attaques chimiques** (huiles, essence).
- Peuvent être **déplacées par les charges imposées** par les roues des véhicules (fonction de la stabilité de l'asphalte et de l'épaisseur de la membrane).

- Peuvent perdre de leur **adhérence** lorsque les pressions de **vapeur** dépassent le pouvoir adhérent.
- Difficile de déceler rapidement les **délaminations à la surface** de la dalle.
- Dans les applications extérieures, une surface noire tend à élever la température de la dalle, ce qui en accentue le mouvement thermique et favorise la fissuration.
- Il faut évaluer **l'incidence de ce système sur le dégagement vertical**.
- Peu de stabilité dans les pentes.
- **Surcharge supplémentaire plus importante.**
- **Principaux avantages**
 - Conviennent bien dans les endroits où le **déneigement** se fait au moyen de chasse-neige.
 - **Ne laissent pas transparaître les défauts de la surface.**
 - Ne nécessitent qu'un traitement peu coûteux à l'emplacement des joints.
 - Bonne surface de **traction** pour les pneus.

3.7.2.2 Hydrofuges

- On applique des hydrofuges et des enduits superficiels pour empêcher le béton **d'absorber de l'humidité** ou des **chlorures** dans des quantités qui pourraient entraîner la corrosion de l'acier d'armature.
- Les produits hydrofuges utilisés pour traiter les surfaces de béton peuvent être divisés en **deux grands groupes**:
 - Les hydrofuges pénétrants.
 - Les enduits superficiels.

- Les hydrofuges pénétrants sont **absorbés et réagissent avec le béton** pour conférer à la surface des propriétés hydrofuges. **Aucune pellicule n'est formée** (Fig 3.64).

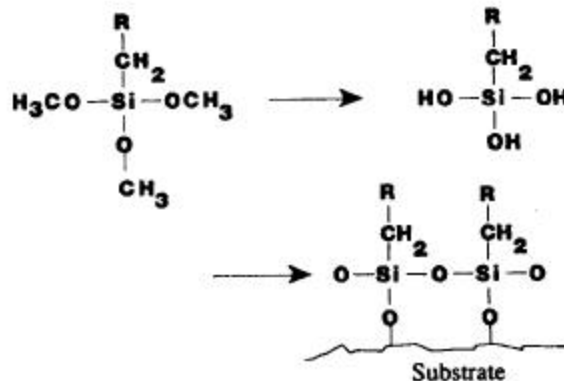


Fig 3.64 - Réactivité et structure moléculaire des siliconates, silanes et siloxanes)
[tiré de: McGettign, E. 1993, *Silicon-Based Weatherproofing Materials*, Repairing Concrete Bridges, ACI Seminars, Seminar Background Materials, SCM-27(93), Second Edition, p.164-168].

- Les pores du béton ne sont **pas obstrués**.
 - Le pouvoir imperméabilisant dépend des **propriétés du béton**.
 - Les fissures ne sont pas colmatées mais les **petites fissures** peuvent être imperméabilisées.
 - Les **fissures larges** doivent être colmatées au moyen d'un mastic souple.
- Les **enduits superficiels** sont des produits qui adhèrent à la surface du béton et **forment une pellicule**. Le pouvoir imperméabilisant du produit est généralement sans rapport avec les propriétés du béton, mais le produit n'est efficace que dans la mesure où il **adhère fermement** à la surface.
 - En général ces produits pénètrent de moins de 2 mm dans le béton.

n Les silanes (hydrofuge pénétrant)

- Les silanes alkyl-alkoxydes sont une famille de molécules **monomères** obtenues à partir de différents **groupes alkyls** liés par une molécule de **silicone**.
- Le **pouvoir imperméabilisant des silanes** procède d'une double réaction chimique entre l'hydrofuge et le béton.

- ° Les silanes réagissent avec l'eau contenue dans le béton pour former des **groupes silanols** (réaction en **milieu alcalin** - pH élevé).
- ° Les groupes silanols réagissent avec la silice (granulats) du béton pour former une **couche hydrophobe** sur les parois des pores internes du béton.
 - Molécule hydrofuge: hydrocarbure -> **groupe alkyl**.
 - Les groupes **silanols** permettent **d'ancrer** la molécule hydrofuge sur le substrat (surfaces internes du béton).
- On trouve sur le marché **différentes sortes** de silanes formés de divers groupes alkyls liés par une molécule de silice. **Ces produits n'agissent pas tous de la même manière** (Fig 3.65)

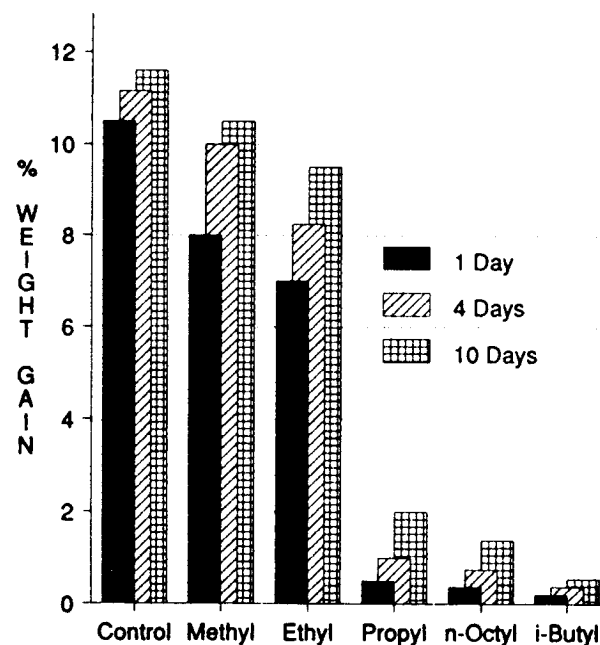


Fig 3.65 - Influence du type de groupe alkyl sur l'efficacité du pouvoir hydrofuge d'une silane.

[tiré de: McGettigan, E. 1993, *Silicon-Based Weatherproofing Materials*, Repairing Concrete Bridges, ACI Seminars, Seminar Background Materials, SCM-27(93), Second Edition, p.164-168].

- En général, plus la molécule du groupe alkyl est **volumineuse**, meilleur est le caractère **hydrofuge** de la silane.

- **Certains produits** produisent une pellicule hydrophobe qui **résiste mal en milieu alcalin** (même si cette alcalinité était nécessaire à la réaction initiale).
- Certaines silanes peuvent se polymériser si, au cours de l'application, ils entrent en contact avec **l'eau superficielle**. Ils **perdent alors leur pouvoir pénétrant** et ne peuvent réagir avec le béton.
- Les **molécules** de silane sont **très petites** et peuvent pénétrer même un béton très dense (10 à 15 Angströms) (on peut appliquer des couches supplémentaires si nécessaire).
 - Pénétration de **plus de 5 mm dans le béton** et jusqu'à **plus de 25 mm dans des éléments de maçonnerie**.
- Les **silanes sont volatils** et certains **ingrédients actifs peuvent s'évaporer** pendant l'application, en particulier si cette opération ne se déroule pas dans des conditions idéales (alcool iso-propyl, éthanol).
- Il existe maintenant des hydrofuges (silanes) en **solution aqueuse**, ce qui comporte moins de risques que les supports classiques à base d'alcool.

n Les siloxanes (hydrofuge pénétrant)

- Les **siloxanes oligomères** (alkyl-alkoxi-siloxanes) sont des silanes **partiellement hydrolysés** (c'est à dire ayant subi une réaction partielle avec l'eau).
 - Les siloxanes réagissent avec la silice contenue dans le béton pour former une couche hydrophobe.
 - Les molécules de siloxanes, étant oligomères plutôt que monomères, **elles sont plus grosses** que les molécules de silane (25 à 75 Angströms). Le produit ne peut donc pénétrer aussi profondément dans la surface et peut ne **pas être indiqué** dans la protection des **bétons denses**.
 - On ne peut pas traité au siloxane un béton préalablement traité au silane.

- Les **siloxanes** sont **plus sensibles à l'abrasion** car ils pénètrent moins profondément sous la surface soumise à l'usure (Fig 3.66).

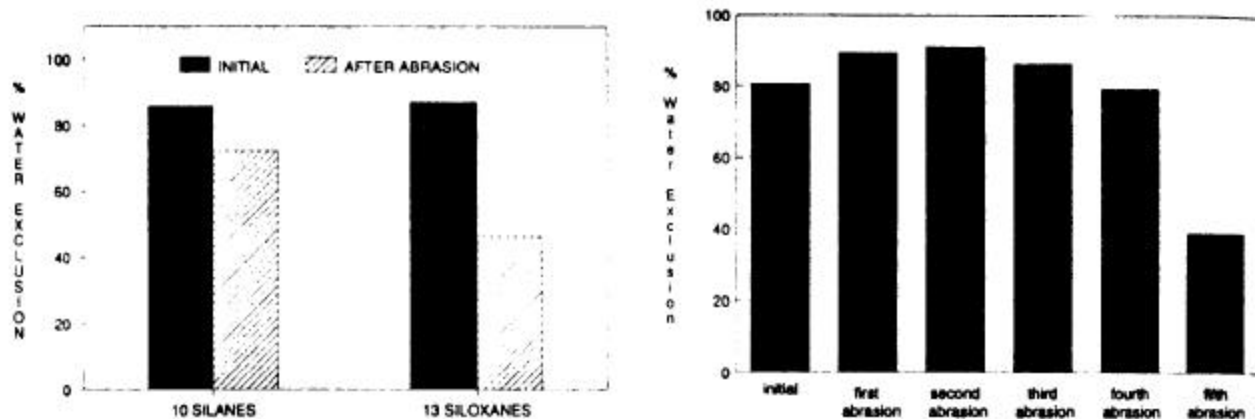


Fig 3.66 - Influence de l'abrasion sur la performance relative des silanes et des siloxanes.

[tiré de: McGettigan, E. 1993, *Silicon-Based Weatherproofing Materials*, Repairing Concrete Bridges, ACI Seminars, Seminar Background Materials, SCM-27(93), Second Edition, p.164-168].

- Les siloxanes étant **moins volatils** que les silanes, la perte d'ingrédients actifs est moins importante pendant l'application (solvants dérivés du pétrole).
 - C'est pourquoi les siloxanes contiennent généralement un **pourcentage moins élevé d'ingrédients actifs** que les silanes.
 - Les solvants à base de pétrole sont non miscibles dans l'eau, ce qui **diminue la pénétration** du produit dans les bétons plus humides.

n Huile de lin (hydrofuge pénétrant)

- L'huile de lin pénètre dans le béton, mais des essais ont montré que ce produit possède un **pouvoir imperméabilisant très limité** et n'empêche à peu près pas l'infiltration de chlorures ².

² Lignes directrices pour la conception, la construction, la réfection et l'entretien d'ouvrages de stationnements durables, Travaux Publics et Services Gouvernementaux, Service d'architecture et de génie, Ottawa, Ontario, 1994, 211 p.

- Elle fait **jaunir** les surfaces et se détériore sous l'effet des rayons UV.
- L'huile de lin peut réduire le rendement des silanes et des siloxanes.

n **Époxydes (hydrofuges pénétrants et enduits superficiels)**

- Certains époxydes sont des enduits pénétrant, d'autres des enduits superficiels.
- Les époxydes sont des produits à deux composants qui doivent être mélangés sur place et subir une polymérisation.
- Les époxydes ont des **propriétés extrêmement variables**.
 - Les **époxydes purs ont un excellent** pouvoir imperméabilisant.
 - Les époxydes renfermant des **polysulfures** donnent des résultats **médiocres**.
- Les époxydes tendent à **jaunir**.
- Ils laissent un **fini brillant** parfois irrégulier qui réduit la résistance au dérapage.
- Les époxydes **filmogènes** (qui forment un film en surface) perdent leur efficacité lorsqu'ils sont **usés par une circulation** intense
- Les coefficients de dilatation thermique sont beaucoup plus élevés que celui du béton (peut causer la **fissuration de la pellicule**).

n **Les acryliques (enduits superficiels)**

- Les résines acryliques sont des enduits superficiels qui offrent une bonne résistance au rayons UV et à l'humidité et qui adhèrent bien aux surfaces sèches.
- On ne doit pas les utiliser comme enduits superficiels dans les zones de forte circulation (**elles résistent mal à l'usure**).
- Ces produits **réduisent la résistance au dérapage**.

n Les uréthanes (enduits superficiels)

- Les enduits au polyuréthane sont des produits à un ou à deux composants.
- Ils laissent généralement un **fini brillant, qui tend à jaunir et à peler**.
- Ces produits sont **toxiques** car ils renferment des groupes isocyanates.

n Les silicates ("hydrofuges" pénétrants)

- Il fut un temps où l'on croyait que les silicates pénétraient dans le béton et réagissaient avec le calcaire libre pour former des sels insolubles qui colmataient les pores du béton (Fig 3.67 et Fig 3.68)

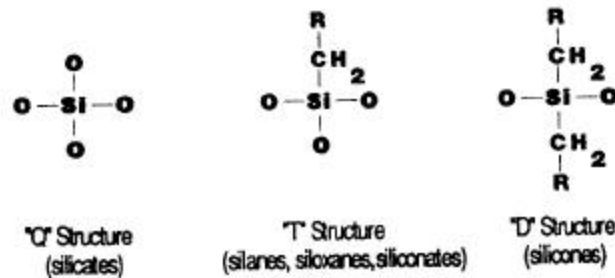


Fig 3.67 - Structure moléculaire des silicates, des siliconates - silanes - siloxanes et des silicones.

[tiré de: McGettigan, E. 1993, *Silicon-Based Weatherproofing Materials*, Repairing Concrete Bridges, ACI Seminars, Seminar Background Materials, SCM-27(93), Second Edition, p.164-168].

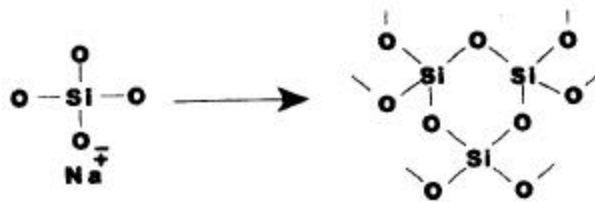


Fig 3.68 - Réactivité des silicates.

[tiré de: McGettigan, E. 1993, *Silicon-Based Weatherproofing Materials*, Repairing Concrete Bridges, ACI Seminars, Seminar Background Materials, SCM-27(93), Second Edition, p.164-168].

- Ces produits possèdent un **pouvoir imperméabilisant négligeable** et ne repoussent que faiblement les chlorures.

n Les silicones (enduits superficiels)

- Le silicone est un hydrofuge polymère inorganique à base de silicium et d'oxygène que l'on appelle aussi polysiloxane (Fig 3.69).

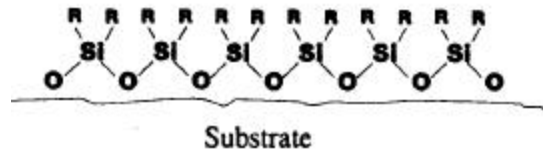


Fig 3.69 - Structure moléculaire des silicones (non adhérente).

[tiré de: McGettigan, E. 1993, *Silicon-Based Weatherproofing Materials*, Repairing Concrete Bridges, ACI Seminars, Seminar Background Materials, SCM-27(93), Second Edition, p.164-168].

- La pellicule superficielle formée par ce produit se dégrade sous l'action des **rayons UV** et résiste mal à une **baisse de l'alcalinité** et à l'**usure** (pellicule non-adhérente).
- Leur usage sur la béton est **déconseillé**.

n Les alkydes (enduits superficiels)

- Les résines alkydes affichent une **faible résistance aux alcalis** et tendent à **jaunir** avec le temps.
- Il n'est généralement **pas recommandé** de les appliquer sur le béton.

3.7.3 Méthodes d'application

3.7.3.1 Les membranes

- **Un produit mal appliqué ne donnera jamais de bons résultats.** Il est essentiel de se conformer rigoureusement aux méthodes d'application recommandées pour chaque type de membrane.
- Quelques exigences générales:
 - **Teneur en humidité** - Il faut généralement prévoir une cure de 14 à 28 jours avant d'appliquer une membrane. Le taux d'humidité est

important mais rare sont les fabricants qui indiquent les taux acceptables (difficile à mesurer).

- **Préparation de la surface** - La surface doit être solide, propre et exempte de poussière d'huile, de graisse, de produits de cure, d'agents de démoulage, etc.
 - Décapage au jet d'eau à haute pression, ponçage, meulage.
- **Température** - On ne doit pas poser une membrane à moins de 5 °C. En deçà de cette température, l'humidité qui pourrait avoir gelé à l'intérieur du béton peut, en dégelant, nuire à la bonne adhérence de la membrane.
- **Mélange du produit** - Dans le cas des membranes à plusieurs composants, il est essentiel de mélanger parfaitement les matériaux pour obtenir un système uniforme.
- **Méthodes d'application** - Pulvérisation, raclette, rouleau, truelle. Il est important de suivre les recommandations du fabricant.
- **Contrôle de l'épaisseur** - On doit contrôler le taux d'application. On peut vérifier l'épaisseur obtenue au moyen d'une jauge d'épaisseur de pellicule liquide. La plupart des échantillons sont mesurés à l'aide d'un micromètre, une fois la cure terminée.
- **Traitement de fissures** - Le traitement de fissures est généralement indiqué par le fabricant de la membrane. On doit souvent renforcer la membrane à l'emplacement de la fissure (surépaisseur de membrane ou tissu de renfort) (Fig 3.70).

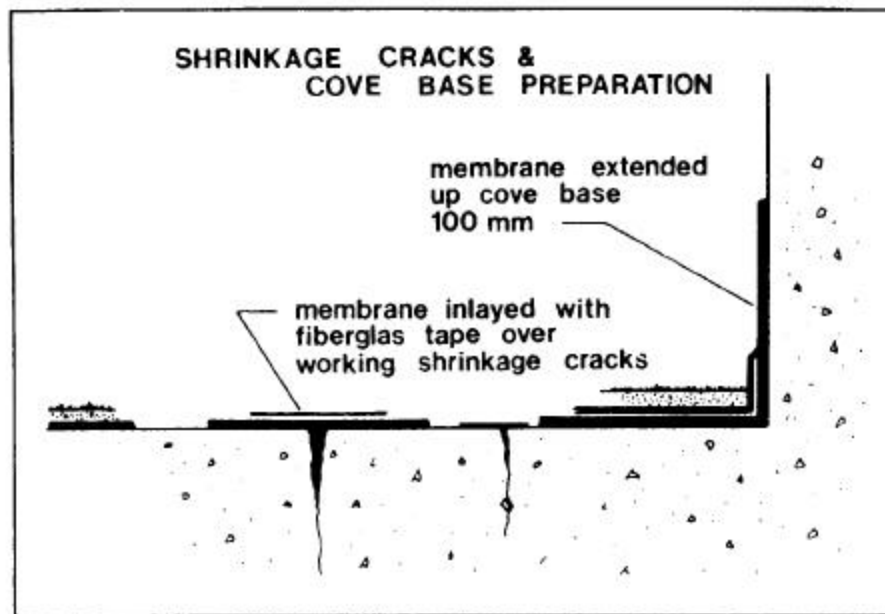


Fig 3.70 - Quelques principes généraux d'application des membranes.
[tiré de Mailvaganam, N. P. *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, USA, 473 p.].

- ° **Conception des détails** - Il faut accorder une attention particulière à la pose de la membrane aux extrémités, à l'emplacement des murs, des colonnes, aux endroits où le matériau doit être rabattu. Consulter le fabricant pour connaître les méthodes recommandées.

3.7.3.2 Les hydrofuges

- La mise en place d'un hydrofuge doit faire l'objet d'une **étroite surveillance**.
- La **préparation de surface** est un **facteur critique** du rendement d'un hydrofuge.
 - ° Il faut débarrasser la surface de **toute trace d'huile** et de produits de cure.
 - ° Il faut éliminer les zones altérées.
 - ° Effectuer un **bon lavage à l'eau** pour débarrasser la surface des poussières et des débris.
 - ° Appliquer le produit sur un béton préalablement **séché**.

- L'application par **grand vent** peut entraîner une perte importante des ingrédients actifs (surtout dans le cas des silanes).
- L'application du produit sur une **surface mouillée** peut produire une imperméabilisation imparfaite (surtout dans le cas des siloxanes).
- Il faut contrôler la qualité du produit en mesurant périodiquement la **teneur en solides** du produit livré.
- Il faut vérifier le **taux d'application** et l'augmenter aux endroits où le béton est plus poreux.
- Certains chercheurs recommandent de vaporiser de l'eau sur les surfaces traitées au silane (après l'application!) pour en faciliter l'hydrolyse après pénétration.
- **La surface d'un béton ancien peut avoir un pH plus faible (carbonatation) qui peut empêcher les hydrofuges de réagir avec le béton.**
 - Il existe des **catalyseurs** (solution d'hydroxyde alcaline) qui, ajoutés à l'hydrofuge, élèvera localement le pH du béton pour faciliter la réaction finale.
- Attention à la sédimentation dans les contenants
- Il faut **colmater les fissures**. L'application doit se faire uniquement sur la partie supérieure de la dalle (le colmatage de la sous-face peut emprisonner l'eau dans la dalle, ce qui amplifie les problèmes de corrosion)
- L'entrepreneur doit posséder **l'expérience nécessaire** pour déterminer les conditions ambiantes optimales pour l'application du produit.

3.7.4 Critères de sélection d'un système d'imperméabilisation

- Plusieurs facteurs doivent être considérés au moment de choisir un système d'imperméabilisation.
 - Dans les nouveaux ouvrages de stationnement non précontraints ou précontraints en post-tension, le **Code national du bâtiment exige la mise en place d'une membrane** d'imperméabilisation.

- Dans les anciens ouvrages, il faut tenir compte du **niveau de contamination** antérieur par les chlorures, de la vitesse de corrosion, des **conditions d'exposition**, des limites de **charges** et des limites **d'encombrement vertical**.
- Les éléments anciens qui présentent un taux de contamination par les chlorures très élevé peuvent être fortement délaminés et subir une corrosion continue. **Si les travaux de réparation visent à réparer toutes les zones délaminées** et tout l'acier corrodé, il est **conseillé de protéger la dalle au moyen d'une membrane afin d'empêcher une nouvelle contamination**.
- Les hydrofuges contribuent à ralentir la pénétration de l'eau et, par conséquent, à ralentir la pénétration des chlorures.
 - **Lorsque les dalles subissent une corrosion active mais présentent un faible taux de délamination, on devrait se contenter de réparer le béton délaminé, d'appliquer un hydrofuge et de sceller les fissures qui fuient** ³.
 - Lorsque que le taux d'humidité dans la dalle devient suffisamment faible, on peut alors appliquer une membrane.
- Dans certains cas, il n'est **pas recommandé** de mettre en place une membrane sur une dalle **fortement contaminée** par les chlorures et présentant une forte activité de corrosion.
 - **Comme le processus de corrosion n'est pas interrompu, les réparations effectuées ultérieurement peuvent coûter très cher car il faut alors refaire la membrane.**
- Dans le cas des hydrofuges, plus le pourcentage de solides est élevé, plus le produit donnera de meilleurs résultats.
- Le taux d'application des hydrofuges est variable en fonction des propriétés du béton à traiter.

³ *Lignes directrices pour la conception, la construction, la réparation et l'entretien d'ouvrages de stationnements durables*, Travaux Publics et Services Gouvernementaux, Service d'architecture et de génie, Ottawa, Ontario, 1994, 211 p.

- **Béton très dense** - Utiliser un produit de faible viscosité et de faible taille moléculaire (silane par exemple).
- **Béton poreux** - Utiliser un produit de viscosité élevé et de forte taille moléculaire (siloxane par exemple). Un produit de faible viscosité pourrait subir une diffusion excessive.
- Les **enduits superficiels** (hydrofuges non pénétrants) peuvent être appliqués sur des surfaces verticales qui ne sont pas exposées à l'abrasion, mais **non sur des surfaces d'usure**.
- Il n'est pas recommandé d'appliquer une membrane étanche (enduit superficiel) sur une surface de béton dont l'autre face est en contact avec une source constante d'humidité (un sol saturé par exemple).
 - Dans ce cas la migration d'humidité pourra être bloquée par le produit. La condensation de l'eau derrière le produit accélérera la dégradation et pourra provoquer la décohésion complète du produit (surtout en présence de cycles de gel-dégel) (Fig 3.71 et 3.72).

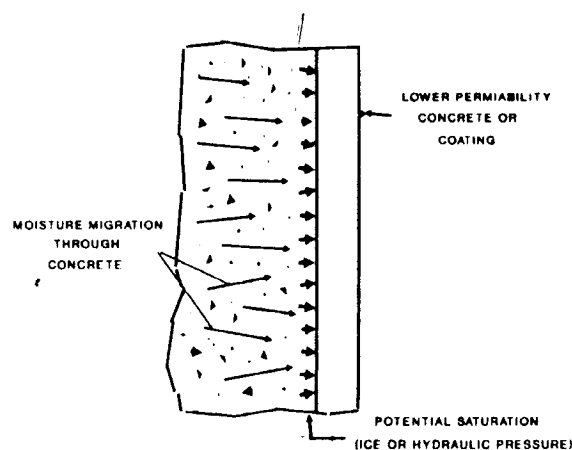


Fig 3.71 - Barrière d'étanchéité sur une surface de béton en contact avec une source d'humidité.

[tiré de: Schrader, E.K.. 1993, *Mistakes, Misconceptions, and Controversial Issues Concerning Concrete and concrete Repair*, Repairing Concrete Bridges, ACI Seminars, Seminar Background Materials, SCM-27(93), Second Edition, p.276-281].

3.8 SCCELLEMENT DES FISSURES ⁴

3.8.1 Les principaux types de fissures

- La **plupart** des structures de béton présentent des fissures.
- En général, un élément structural en correctement armé ne devrait présenter que des fissures dont l'ouverture est inférieure à **0,3 mm**.
- On doit limiter davantage l'ouverture des fissures si la structure est exposée à un **environnement particulièrement sévère** (moins de 0,1 mm en présence de cycles de mouillage séchage, en milieu industriel, ou en milieu marin).
- **Esthétiquement parlant** on peut tolérer des fissures dont l'ouverture est inférieure à environ 0,3 mm.
- Les fissures peuvent devenir **problématiques** dans les cas suivants:
 - Elles sont **esthétiquement** inacceptables
 - Elles compromettent l'**étanchéité** de la structure.
 - Elles compromettent la **durabilité** de la structure
 - Elles compromettent la **capacité structurale** de l'élément.
- On regroupe généralement les fissures en **trois grandes catégories**.

n Les fissures dormantes (ou inactives).

- Des fissures dormantes peuvent être causées par le **retrait**. Après un certain temps, ce type de fissure parvient à un **état stable** (nombre et ouverture des fissures).
- On peut colmater ces fissures avec un matériau de réparation **rigide**.

n Les fissures actives

- Les fissures actives ont une **ouverture variable** (cycles de chargement, cycles de température).

⁴ Trudel, P. 1995, *La réparation des fissures dans les ouvrages en béton de ciment*, Travail de synthèse, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 18 p.

- ° On doit donc utiliser un matériau de remplissage suffisamment **souple** pour permettre le mouvement et éviter la rupture de l'élément en un autre endroit (Fig 3.73).

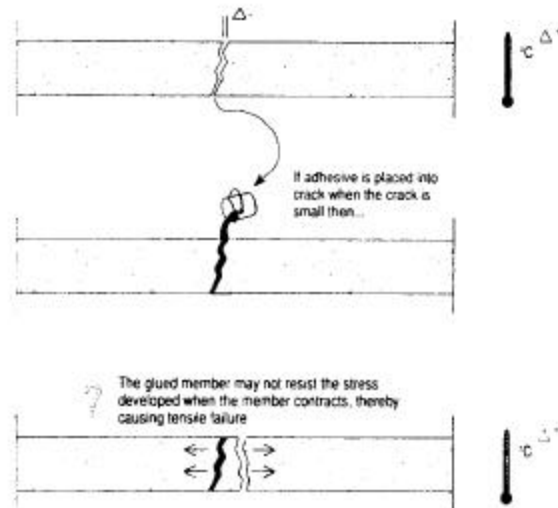


Fig 3.73 - Rupture d'un élément suite au colmatage d'une fissure active à l'aide d'un produit de réparation trop rigide.

[tiré de: Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.].

n Les fissures évolutives.

- ° Les fissures évolutives ont comme particularité que leur **ouverture progresse constamment**, tant que les phénomènes qui les ont engendrées sont toujours présents.
 - Tassement des sols.
 - corrosion des aciers d'armature.
 - Réactions alcalis-granulats
- ° On ne doit pas réparer une fissure évolutive sans préalablement avoir tenté **d'éliminer les problèmes à la source de cette fissuration**.
- Pour choisir une **méthode efficace de réparation** d'une fissure, on doit aussi prendre en compte de **certaines conditions particulières**:
 - ° Humidité.
 - ° Environnement marin - réparation sous l'eau.
 - ° On ne peut pas utiliser des techniques de remplissage par gravité pour colmater des murs ou des plafonds fissurés.

- Le choix d'une **méthode de réparation appropriée** doit prendre en compte ou une plusieurs des aspects suivants:
 - Capacité à bloquer la pénétration des contaminants, des ions chlore et des gaz.
 - Capacité à restaurer la capacité structurale d'un élément.
 - Durabilité de la réparation.
 - Considérations d'ordre esthétique.

3.8.2 Méthodes de réparation

- Il existe de nombreuses méthodes de réparation des fissures. Certaines méthodes sont plus spécifiquement conçues pour réparer les **fissures actives**. D'autres sont mieux adaptées pour réparer les **fissures dormantes**. Certaines méthodes permettent de restaurer la **capacité structurale** de l'élément. Il existe aussi des méthodes permettant de rétablir **l'étanchéité de la structure**.
- Les principales méthodes:
 - Injection de résine
 - Évidage et calfeutrage
 - Scellement flexible
 - Injection (grouting)
 - Scellement par gravité
 - Calfeutrage par forage et blocage (Drilling and plugging)
 - Agrafages (Stiching)
 - Couche de revêtement (Overlays)
- Pour choisir les techniques de réparation s'appliquant à un cas particulier, on doit utiliser les informations recueillies dans la campagne d'évaluation afin de vérifier les points suivants:
 - **L'intégrité structurale** de l'ouvrage.
 - La présence de **fuites** dans les fissures.
 - Le type de fissures (**isolées ou en réseau**)
 - L'activité des fissures (**actives ou dormante**)

- On détermine si la fissuration est active à l'aide d'un **indicateur de mouvement** (fissuromètre). Une fissure est considérée inactive lorsque ses mouvements sont nuls ou très faibles.

n Injection de résine

- On utilise généralement des **résines époxy** en raison de leur grande résistance à la compression et de leur grande résistance aux attaques chimiques.
 - Les résines **époxy** sont trop rigides pour être utilisée pour colmater des **fissures actives ou évolutives**.
- Cette technique est surtout utilisée pour rétablir **l'intégrité structurale** ou l'étanchéité des ouvrages comportant des **fissures stabilisées**.
- La technique consiste à pratiquer des **orifices à intervalles réguliers** (15 à 30 cm) le long de la fissure (Fig 3.74 et 3.75).

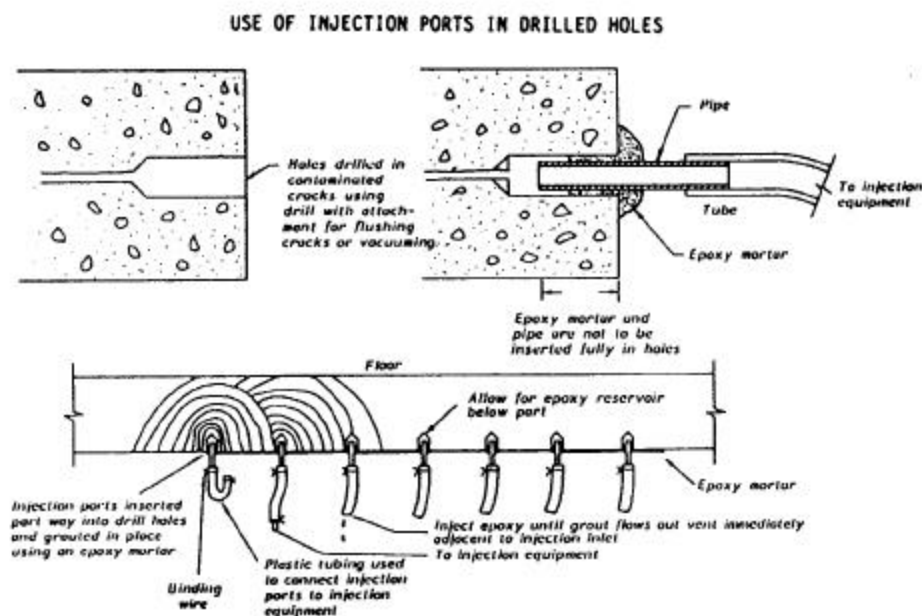


Fig 3.74 - Technique d'injection de résine.

[tiré de: Mailvaganam, N. P. *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, USA, 473 p.].

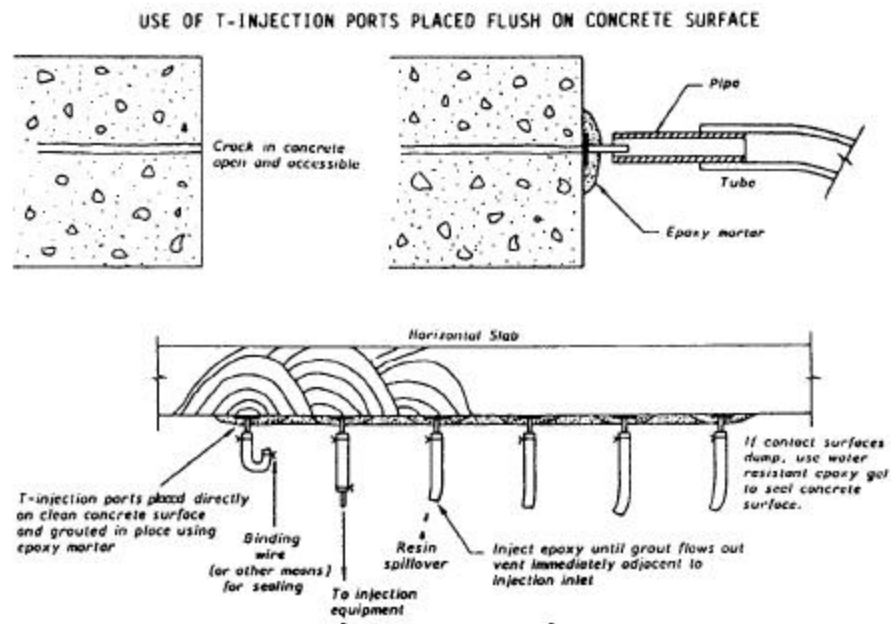


Fig 3.75 - Technique d'injection de résine.

[tiré de: Mailvaganam, N. P. *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, USA, 473 p.].

- ° La résine est injectée sous pression à l'aide de valves fixées dans les orifices.
- ° Les valves sont utilisées tour à tour.
- ° La pression d'injection est maintenue un certain temps pour forcer la résine à pénétrer dans les zones les plus étroites des fissures (environ 0,05 mm).
- En général, cette technique de réparation **ne peut pas être utilisée** lorsque les fuites sont telles qu'il est **impossible d'assécher les fissures**.
 - ° L'eau peut réduire les propriétés structurantes des certaines résines.
 - ° **Certaines résines époxy peuvent néanmoins être utilisées en présence d'eau dans les fissures.**
 - ° Une main-d'oeuvre qualifiée est requise.

n Évidage et calfeutrage

- Cette technique est **la plus simple et la plus courante** pour le colmatage des fissures.
 - Pas de main-d'oeuvre spécialisée
 - Peut être utilisée pour les fissures isolées et les **réseaux de fissures**
- La technique consiste à **élargir l'ouverture de la fissure** pour permettre à un matériau calfeutrant de pénétrer (Fig 3.76).

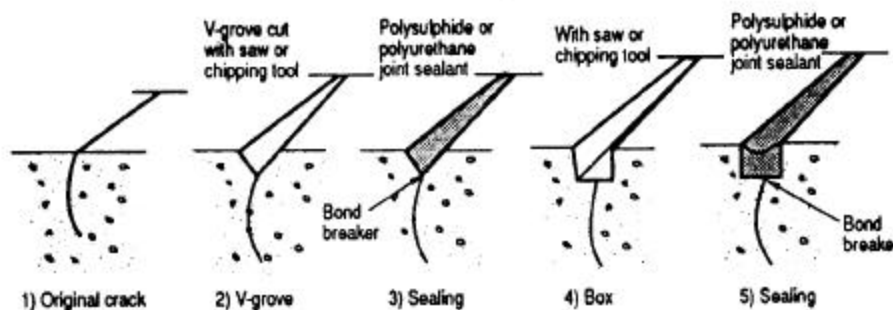


Fig 3.76 - Réparation d'une fissure par évidage et calfeutrage.

[tiré de: Mailvaganam, N. P. *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, USA, 473 p.].

- **Ce traitement convient pour les fissures stabilisées qui n'affectent pas l'intégrité de l'ouvrage.**
- Le matériau calfeutrant bloque la pénétration des liquides, des gaz et des autres contaminants (ions chlore).
- Ne permet pas toujours de réparer les fissures soumises à de fortes **pressions hydrostatiques**.
- Cette technique est plus appropriée pour les **surfaces horizontales** (planchers, chaussées).
- Principaux matériaux de remplissage:
 - Mortiers polymères
 - Matériaux bitumineux
 - Les résines époxy (les plus souvent utilisées)

n Scellement flexible

- Cette technique de colmatage consiste à convertir une fissure active en un joint lui permettant de s'ouvrir et de se fermer librement.
- Cette méthode ressemble beaucoup à la technique d'évidage et de calfeutrage
- La technique consiste à effectuer un trait de scie le long de la fissure pour ensuite colmater l'ouverture ainsi réalisée (Fig 3.77)

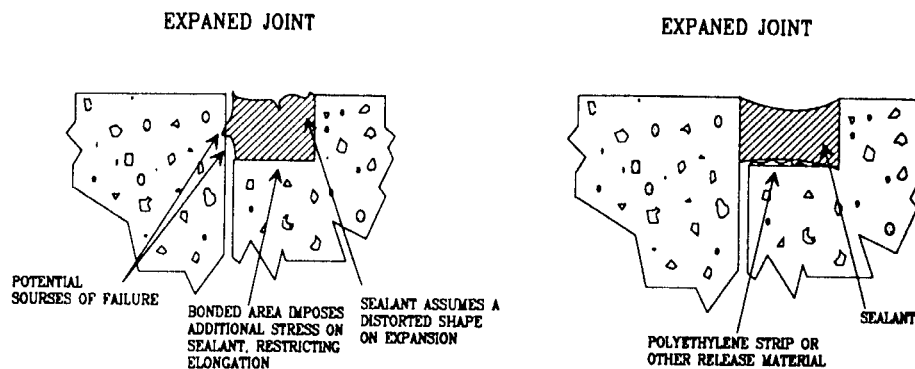


Fig 3.77 - Technique d'évidage et de colmatage.

[tiré de: Mailvaganam, N. P. *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, USA, 473 p.].

- Le choix du matériau de remplissage et la largeur du trait de scie dépendent principalement de l'ampleur du mouvement de la fissure.
 - On doit appliquer ou insérer un **matériau de désolidarisation** dans le fond de la fissure pour permettre au matériau de remplissage de se **déformer plus librement** et pour diminuer la **contrainte de traction** engendrée dans le matériau de remplissage (Fig 3.78).

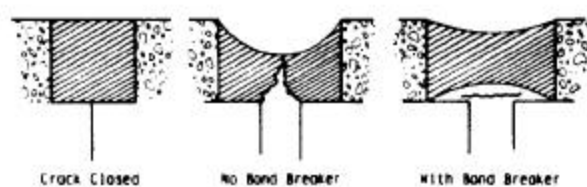


Fig 3.78 - Influence du matériau de désolidarisation.

[tiré de: Manual of Concrete Practice, Causes-evaluation and repair of cracks, Committee 224.1R-15].

- La **température d'installation** et des éléments de béton peut jouer un rôle important sur la performance du matériau de remplissage (comme dans le cas des dalles d'autoroute) (Fig 3.79).

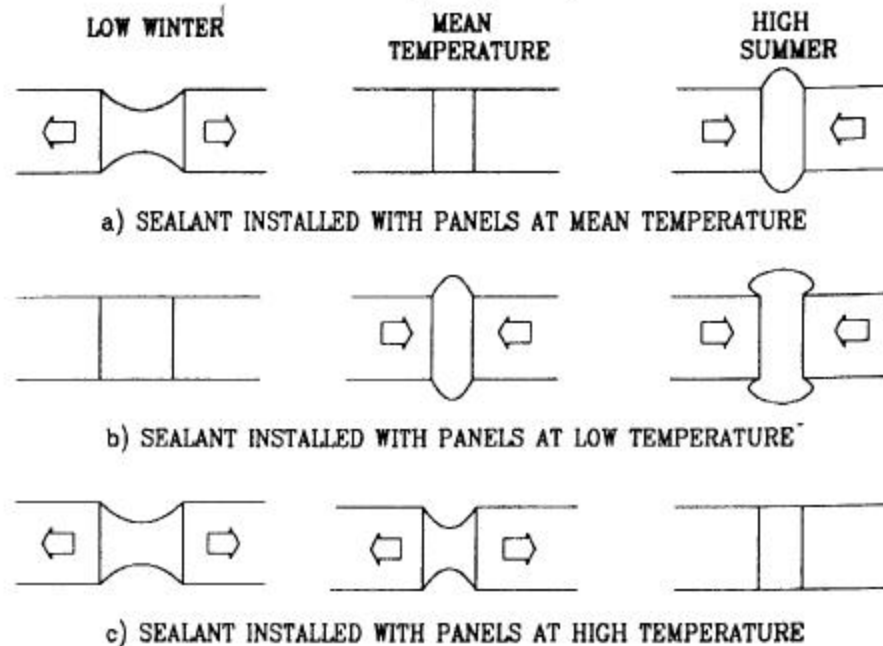


Fig 3.79 - Influence de la température lors de la mise en place d'un matériau de remplissage.

[tiré de: Mailvaganam, N. P. *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, USA, 473 p.].

- La **géométrie du volume à remplir** exerce une grande influence sur l'étirement maximum du matériau de remplissage (Fig 3.80)

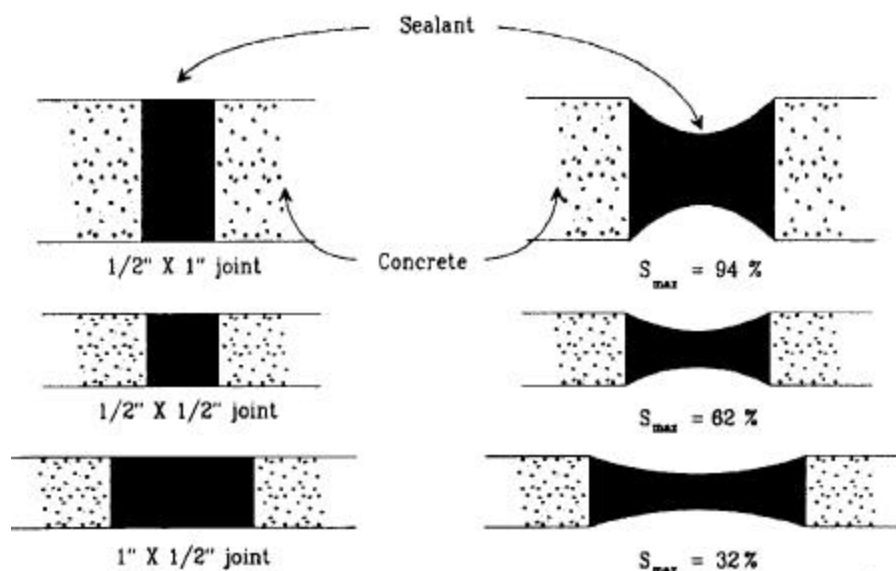


Fig 3.80 - Influence de la géométrie du volume à remplir sur l'étirement maximum du matériau de remplissage.

n Injection

- Cette technique est généralement utilisée pour **étanchéiser les ouvrages** et elle **ne permet généralement pas d'augmenter la résistance en traction de l'ouvrage**.
- **Injection de ciment Portland**
 - Permet de colmater les **fissures stabilisées** (barrage poids, fondation en roc) par injection de ciment Portland.
 - On doit porter une attention particulière à la formulation du coulis ou du mortier. Selon la largeur des fissures on doit ajuster la teneur en sable du mortier ou utiliser des coulis.
- **Injection de polymères**
 - Utilisée pour réparer des fissures stabilisées dans des ouvrages hydrauliques.
 - Polymères à base d'uréthane ou d'acrylamides
 - Faible viscosité
 - Ils précipitent lorsqu'ils sont en contact avec l'eau
 - Cette technique est appropriée lorsqu'il est impossible d'assécher les fissures.
 - Nécessite une main-d'oeuvre qualifiée.

n Scellement par gravité

- Les fissures **plus petites que 0,01 mm** peuvent être scellées par des résines ou des monomères de très basse viscosité.
 - Plus la viscosité est basse, plus le scellement est efficace pour les fissures étroites.
- Cette technique **ne permet généralement pas de rétablir l'intégrité structurale** de l'élément.

° Colmatage de la partie supérieure de la fissure pour diminuer la perméabilité.

- Application sur la surface à l'aide d'un balai ou d'un rouleau.
- Peut convenir pour réparer un réseau localisé de fissures.
- **On doit pouvoir enlever le surplus de matériau après pénétration et polymérisation dans les fissures.**

n Forage et blocage

- Cette technique consiste à **forer un trou dans le sens de la longueur** de la fissure et à introduire une **clé de béton ou de mortier** préfabriquée enduite de bitume (Fig 3.81).

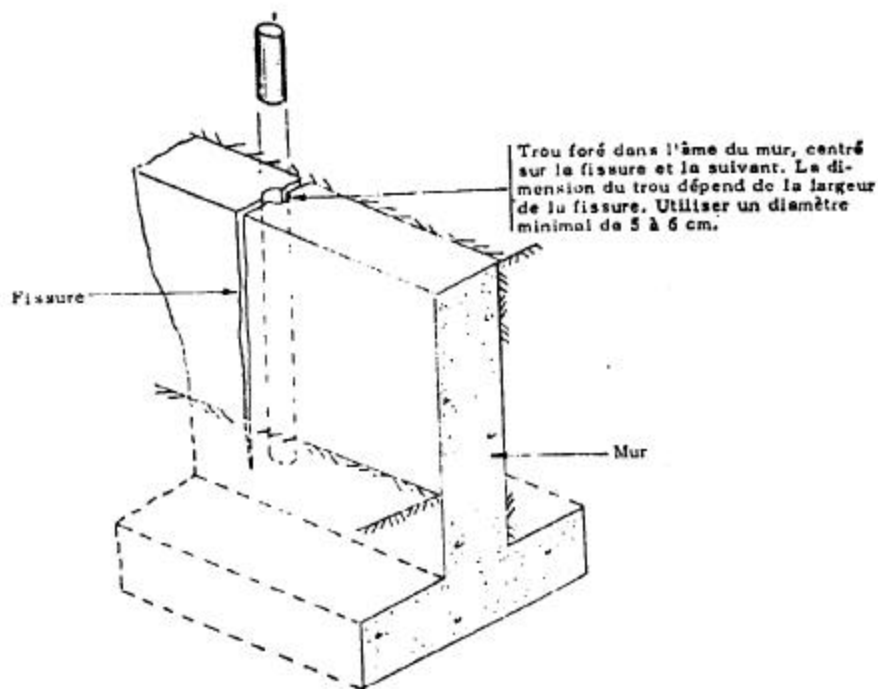


Fig 3.81 - Principe de la technique de forage et blocage.

[tiré de: Johnson, S.M. *Dégradation, entretien et réparation des ouvrages de génie civil*, Editions Eyrolles, Paris, France, 1969, 440 p..]

- ° Le bitume sert **diminuer l'adhérence** entre les parois du trou et la clé pour éviter que celle-ci soit endommagée par les mouvements de la fissure.

- ° Cette technique n'est utilisable que lorsque la **fissure est relativement rectiligne et accessible par une de ses extrémités** (retrait de séchage, écarts thermiques dans les murs).
- ° Lorsque le transfert de charge n'est pas requis, il est préférable de remplir le trou de bitume au lieu d'utiliser le béton.

n Agrafage

- On peut **restaurer la capacité structurale** d'un élément de béton fissuré en utilisant des agrafes (Fig 3.82).

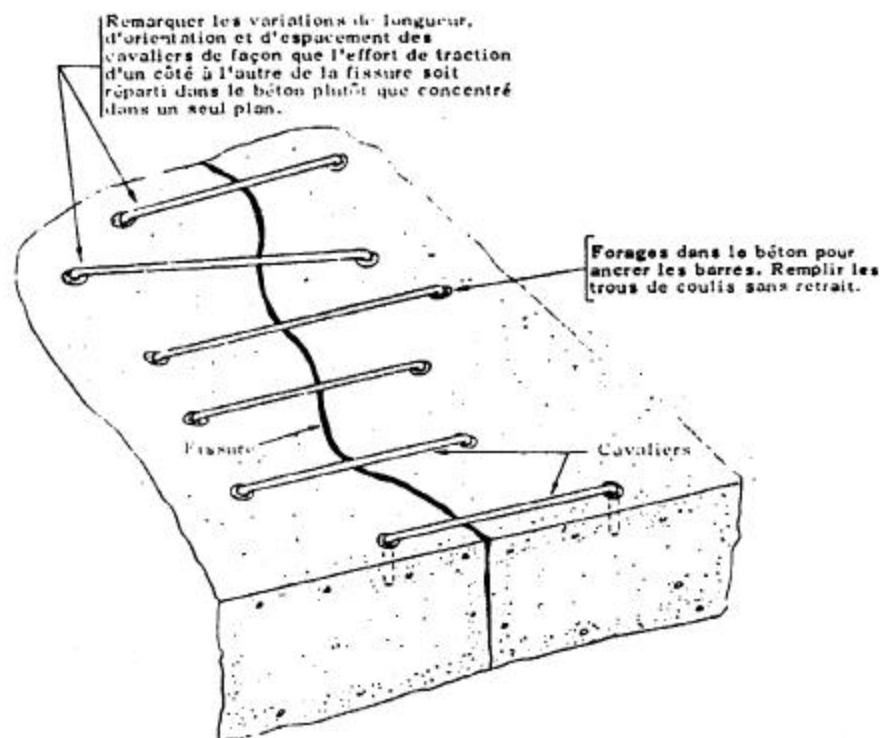


Fig 3.82 - Principe de la technique d'agrafage.

[tiré de: Johnson, S.M. *Dégradation, entretien et réparation des ouvrages de génie civil*, Editions Eyrolles, Paris, France, 1969, 440 p..

- Cette technique consiste à percer des trous de part et d'autre de la fissure et d'y ancrer les agrafes en injectant préalablement dans les trous de la résine à base d'époxy.
 - ° Ne permet **pas de refermer** les fissures
 - ° Permet **d'éliminer le mouvement** des fissures

- **N'assure pas l'étanchéité de la fissure**

- Si nécessaire, on doit étanchéiser la fissure **avant** l'agrafage.

- **Il faut s'assurer que l'arrêt du mouvement de la fissure ne causera pas de dommage ailleurs dans la structure.**

- Les agrafes doivent être de **longueurs différentes**, elles doivent avoir des **orientations différentes** et elles doivent être **disposées de manière à ce que l'effet transmis d'un coté à l'autre de la fissure ne s'exerce pas dans un seul plan.**

- On doit **rapprocher les agrafes aux extrémités** des fissures.

- On doit **percer des trous aux extrémités** des fissures pour en stopper la progression.

n **Couche de revêtement**

- Les couches de revêtement sont très utiles pour réparer des dalles comportant une **fissuration en réseaux**.

- Une série de réparations superficielles peut devenir très coûteuse.

- Les fissures stabilisées peuvent être colmatées en appliquant un béton au latex, un mortier au latex, un béton polymère, etc.

- Souvent, les fissures dans les dalles **sont actives** (changements de température et d'humidité). Dans ce cas **il faut éviter d'utiliser une couche de revêtement adhérente qui favorisera la réflexion des fissures.**

- Utiliser une couche de **désolidarisation** (sable, polyéthylène, etc).

- **Cette technique n'est pas appropriée pour réparer les fissures progressives (réactions alcalis-granulats).**

- L'ouverture progressive des fissures fera éventuellement fissurer la couche de réparation.

3.8.3 Sélection d'une méthode de réparation de fissures

- Sur la base de l'information recueillie lors de la campagne d'évaluation, une ou plusieurs techniques de réparation peuvent être choisies pour rencontrer **un ou plusieurs de ces objectifs**:
 - Rétablir ou augmenter la résistance à la traction
 - Rétablir ou augmenter la rigidité
 - Augmenter l'étanchéité
 - Prévenir le développement d'un environnement corrosif
 - Améliorer la durabilité de l'ouvrage
 - Améliorer l'apparence de l'ouvrage
 - Améliorer la performance de l'ouvrage
- Pour obtenir une réparation durable, il faut porter une attention particulière à la **cause de la fissuration**.
- Pour sectionner la technique la plus appropriée, il est conseillé d'effectuer une **analyse économique** des alternatives, d'évaluer la **durabilité** des différents matériaux de réparation, de **déterminer la main-d'oeuvre** requise et les **équipements disponibles**, d'évaluer la **durée de vie** de la réparation et de prendre en compte l'**apparence** de la réparation.

3.8.3.1 Fissures actives (Tab. 3.4)

- Il faut déterminer si les fissures se présentent en réseaux ou si elles sont isolées.
- Il faut déterminer si la résistance en traction doit être rétablie.
 - **La fissuration en réseaux est rarement corrélée avec un dépassement de la résistance en traction du béton. Il peut ne pas être utile de renforcer la structure.**
 - Scellement par gravité ou par chape non-adhérente
- **Lorsque la fissure est isolée et active, rétablir la résistance à la traction dans la partie fissurée revient à déplacer le problème et faire fissurer une autre partie de l'ouvrage.**
 - Il est avantageux de réétudier la distribution des contraintes et **d'installer un joint de dilatation dans la structure à l'endroit de la fissure ou à proximité.**

- Si la présence d'une fissure ne crée pas de contraintes importantes ailleurs dans la structure, il peut être préférable de simplement la colmater avec un matériau extensible.

Tab 3.4 - Réparation des fissures actives.

[tiré de: Trudel, P. 1995, *La réparation des fissures dans les ouvrages en béton de ciment*, Travail de synthèse, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 18 p.].

FISSURES ACTIVES			
Réseau de fissures		Fissures Isolées	
Renforcer	Ne pas renforcer	Renforcer	Ne pas renforcer
Le cas est peu susceptible de se produire.	1. Couche de revêtement. 2. scellement par gravité.	1. Réétudier la distribution des contraintes et installer un joint de dilatation. 2. Agrafes. 3. Ajout d'armatures. 4. Forage et blocage.	2. Scellement flexible. 2. forage et blocage.

3.8.3.2 Fissures stabilisées (Tab. 3.5)

- Il faut déterminer si les fissures sont isolées ou en réseaux.
- Il faut aussi déterminer s'il est nécessaire de rétablir la résistance en traction du béton.
 - Les fissures en réseaux ne sont généralement pas dues à des contraintes excessives. Il peut donc être inutile de renforcer l'ouvrage.

Tab 3.5 - Réparation des fissures actives.

[tiré de: Trudel, P. 1995, *La réparation des fissures dans les ouvrages en béton de ciment*, Travail de synthèse, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 18 p.].

FISSURES STABILISÉES		
Réseau de fissures (réparation non-structurale)		
Pas d'eau	Un peu d'eau	Beaucoup d'eau
1. Évidage 2. Couche de revêtement 3. Cicatrisation	1. Évidage 2. Couche de revêtement 3. Cicatrisation	1. Couche de revêtement
Fissures isolées (réparation non-structurale)		
Pas d'eau	Un peu d'eau	Beaucoup d'eau
1. Évidage 2. Injection de ciment portland ou de polymères 3. Cicatrisation 4. Collages par résines 5. Scellement par gravité	1. Évidage 2. Injection de ciment Portland ou de polymères 3. Cicatrisation 4. Collages par résines	1. Évidage
Fissures isolées (réparation structurale)		
Pas d'eau	Un peu d'eau	Beaucoup d'eau
1. Agrafages 2. Cicatrisation 3. Collages par résines 4. Ajout d'armatures	1. Agrafages et époxy 2. Cicatrisation 3. Collages par résines 4. Ajout d'armatures et époxy	1. Ajout d'armatures et époxy 2. Agrafages et époxy