

Utilisation *in situ* des polymères liquides dans le génie civil

par **Gérard HÉMOND**

*Ingénieur-Chimiste Expert UTC/CEB (Union des Ingénieurs-Architectes et Techniciens de la Construction/Collège des Experts en Bâtiment)
Directeur de SOLEM Expertises SA*

1. Généralités.....	C 5 435 - 2
2. Polymères utilisés.....	— 2
2.1 Définitions	— 2
2.2 Polymères appliqués sur site.....	— 2
2.3 Notions de base sur les mécanismes des polymères (performances, avantages et inconvénients)	— 3
2.3.1 Système époxyde (ou époxydique)	— 3
2.3.2 Système polyuréthane	— 3
2.3.3 Système polyester	— 4
2.3.4 Système caoutchouc polysulfure	— 4
2.3.5 Système silicone	— 4
2.3.6 Système acrylique	— 4
3. Différents emplois	— 4
3.1 Travaux neufs.....	— 4
3.1.1 Ponts	— 4
3.1.2 Ponts en béton précontraint	— 5
3.1.3 Barrages. Étanchéité.....	— 5
3.1.4 Tunnels	— 5
3.1.5 Grands ouvrages standards (parkings, locaux techniques).....	— 6
3.2 Réparations. Renforcements	— 6
3.2.1 Fissures.....	— 7
3.2.2 Épaufrures et ébréchures.....	— 7
3.2.3 Collage de béton frais sur béton durci.....	— 7
3.2.4 Collage d'éléments en béton	— 7
3.2.5 Renforcement par collage d'armatures	— 8
4. Avenir de ces technologies	— 8
4.1 Au niveau des formules	— 8
4.2 Au niveau des applicateurs.....	— 8
Pour en savoir plus.....	Doc. C 5 435

Pour le lecteur habitué aux techniques du génie civil, le terme **polymère** signifie (très souvent) produits de type **époxyde, polyuréthane, polyester**, etc. En réalité, on regroupe sous ce terme l'ensemble des produits dont les matières premières de base sont constituées de polymères, au sens chimique du terme. La consommation européenne de ces produits (au niveau des matières premières) est de l'ordre de 10 000 à 50 000 t/an selon les familles de produits. Il faut encore ajouter que des produits industriels à base de polymères préfabriqués en usine sont, aujourd'hui, très utilisés dans le génie civil (le plus important : la feuille de PVC) mais ce domaine nécessiterait un chapitre spécifique.

L'utilisation, dans le génie civil, de tous ces polymères, est relativement récente par rapport à l'origine du béton. Les premières grandes applications ont été réalisées dans le début des années 60, dans le cadre de réparations et/ou de remises en état, avant d'être envisagées en travaux neufs. Il faut préciser que ces applications de polymères réels (formulations entièrement composées de produits de synthèse) avaient été précédées par des emplois de produits naturels (goudron de houille, bitumes, etc.) dopés et/ou améliorés avec des polymères de synthèse.

1. Généralités

S'il est évident que le béton représente le meilleur matériau de construction, sur le plan du rapport prix/performance, il est non moins certain que l'on ne peut pas le laisser tel qu'il a été construit sans courir le risque de le voir se dégrader avec le temps. Cela est d'autant plus nécessaire, en fonction des études récentes, que cette dégradation est plus rapide aujourd'hui qu'il y a 15 ou 20 ans et, *a fortiori*, qu'il y a 50 ans.

Cette **dégradation** est due, dans la plupart des cas, à l'action d'un (de deux ou de trois) des phénomènes suivants :

- **carbonatation du béton**, qui transforme celui-ci, par la réaction de modification de la chaux du ciment $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, en carbonate de calcium $[\text{CO}_3\text{Ca}]$. Cette modification amène un changement de pH (de 10,5-11 à 9) qui ne protège plus les armatures du béton armé de la corrosion (la passivation des aciers, par l'alcalinité du béton, fonctionne entre pH 9,5 et 14) ;

- **réaction alcali-granulat** (article *Alcali-réaction dans le béton. Mécanisme, pathologie et prévention* [C 2 252] dans ce traité), dont l'origine est l'absence de granulats roulés. On utilise actuellement beaucoup, voire totalement, des granulats concassés pour fabriquer du béton. Autrefois, on utilisait des agrégats roulés. Ceux-ci avaient eu le temps de perdre leurs sels (en fait leurs ions) alcalins, alors que, pour les agrégats concassés, ce traitement, dû au temps, n'a pas eu lieu. Cet état provoque, de façon efficace bien que lente, une réaction entre les ions alcalins des agrégats et certaines formes de silice générant des gels expansifs, d'où destruction localisée du béton ;

- **action de délavage**, engendrée par l'eau de pluie (toujours acide) sous ses diverses formes : petites pluies très dissolvantes, gros orages avec probablement des phénomènes électriques, neige pouvant se transformer en glace, etc.

La vitesse de ces réactions (séparées ou conjuguées) est fonction de :

- la qualité du béton (vitesse rapide si le béton est de qualité médiocre, donc de résistance à la compression et de résistance à la traction/flexion faibles) ;
- son étanchéité (nids de graviers, fissures, etc.) ;
- l'épaisseur de recouvrement des armatures (minimum 2 à 3 cm ou $e > 1,8 D$; article *Durabilité et pathologie du béton* [C 2 250] dans ce traité) ;
- la protection contre les conditions météorologiques extérieures.

C'est donc cet ensemble de paramètres qui doit être pris en compte, au niveau de la physico-chimie des matériaux, pour définir correctement l'emploi des polymères dans le génie civil.

Avant de donner des précisions sur des polymères et leurs applications, il faut introduire deux notions absolument fondamentales :

- ce ne sont pas les polymères utilisés, malgré le niveau très élevé de leurs performances, qui résoudront les faiblesses de certains supports en béton armé ;
- c'est l'ensemble support conforme + formulation du polymère adaptée qui permettra d'obtenir un bon résultat. De plus, cette définition n'est valable que dans la mesure où l'application

de la formule adaptée sera réalisée dans les règles définies par le formulateur, qui doivent être en conformité avec les exigences des règlements en vigueur tels : DTU (Document Technique Unifié) ou STER (Service Technique d'Étude des Routes).

C'est donc un **support conforme** + une **formulation adaptée** + une **bonne application** (définie par les fiches techniques des fournisseurs) qui engendreront le bon résultat global.

Ces précisions sont nécessaires, aujourd'hui, où de nombreuses sociétés se sont intitulées applicateurs, alors que leur niveau de compétences est relatif. Il serait bon de suivre, dans ce domaine, les contraintes de qualifications des entreprises prévues par les grandes administrations françaises (par exemple SNCF, Ponts et Chaussées).

2. Polymères utilisés

2.1 Définitions

Un polymère organique (il existe des polymères minéraux) est un composé macromoléculaire résultant de « soudures » effectuées par ouverture de doubles ou triples liaisons (généralement carbone-carbone) sous l'influence de divers facteurs (catalyseurs/accélérateurs, pression, température, etc.).

La réaction de formation sur site du (ou des) polymère(s) est la polymérisation. Cette polymérisation peut se subdiviser en polyaddition (polymérisation par addition entre deux composés, sans élimination de produits annexes) ou en polycondensation (réaction entre les fonctions chimiques existantes avec élimination de composés, dont le plus courant est l'eau).

Par ailleurs, il faut préciser que les composants, une fois polymérisés, présentent des performances et des caractéristiques qui sont la conséquence directe de la structure moléculaire que l'on a réussi à obtenir. Cela signifie que la maîtrise des paramètres de polymérisation (choix des composants réactifs, température de mise en œuvre et qualité du mélange des deux composants) amènera au résultat escompté.

2.2 Polymères appliqués sur site

Les polymères utilisés, appliqués sur site (en excluant des matériaux préfabriqués), rentrent dans une des catégories ci-après :

- époxydique (réaction entre un époxyde et une amine) ;
- polyuréthane (réaction entre un polyol et un isocyanate) ;
- polyester (réaction de polycondensation avec catalyseur et accélérateur) ;
- caoutchouc polysulfure (Thiokol®) ;
- silicone ;
- acrylique sous ses différentes formes.

Il y a quelques applications avec d'autres polymères, mais les expériences sont trop récentes pour être significatives.

2.3 Notions de base sur les mécanismes des polymères (performances, avantages et inconvénients)

2.3.1 Système époxyde (ou époxydique)

Nota : pour plus de détails, et pour les schémas de réactions, on se reportera à l'article *Résines époxydes. Composants et propriétés EP* [A 3 465] du traité Plastiques et Composites.

Réaction entre un polymère de base contenant, en général, deux fonctions époxydes (mot d'origine grecque signifiant « entre oxygène ») avec un durcisseur.

Les résines de base les plus utilisées actuellement sont :

DGEBA : diglycidyléther du bisphénol A ;

DGEBF : diglycidyléther du bisphénol F.

Les viscosités de base de ces systèmes varient en fonction de la structure moléculaire de base et de la masse moléculaire de l'élément constitutif initial. Les résines DGEBF sont plus fluides que les résines DGEBA. Le mécanisme de polymérisation de la DGEBF engendre une meilleure résistance aux solvants et aux alcools, par exemple. Les formulations utilisées dans le bâtiment et le génie civil font aujourd'hui appel à ces mélanges entre ces deux familles d'origine, dans le but d'obtenir les avantages de chacune des deux, ce qui a pour effet bénéfique de réduire leurs inconvénients respectifs.

Les durcisseurs sont des amines (en réalité des polyamines, sous différentes formes moléculaires) réagissant, en première phase, avec les groupes époxydes (ou oxyrane) puis, en seconde phase, avec les groupes hydroxyles (OH) situés sur la molécule de la résine de base.

La plus grande partie des formules utilisées dans le génie civil est à base de deux types de résines (ou trois au maximum). En revanche, les durcisseurs employés sont très nombreux (40 types de durcisseurs connus, sans parler des nombreuses références commerciales).

Les principales caractéristiques des systèmes époxydes polymérisés sont données dans le tableau 1.

Il ne faut pas oublier que ces systèmes sont mis en œuvre sur site et que, par voie de conséquence, il n'est pas possible de réaliser des « cuissons » des systèmes qui augmentent de façon sensible les performances (d'un facteur 2).

Nota : sur le plan du vocabulaire, il faut préciser qu'un système époxydique met en œuvre une résine époxydique avec un durcisseur amine et le réseau polymérisé obtenu est toujours appelé un **époxyde** alors qu'il n'y a plus (théoriquement) aucune fonction époxydique.

2.3.2 Système polyuréthane

Nota : pour plus de détails et pour les schémas de réaction, on se reportera à l'article *Polyuréthanes* [AM 3 425] du traité Plastiques et Composites.

Un système polyuréthane met en œuvre un polymère de base contenant des fonctions hydroxyles, appelé souvent **polyol**, avec un durcisseur contenant des fonctions isocyanates. En réalité, ces polyols sont soit des polyesters, soit des polyéthers.

Les produits de base (polyols) sont moins bien définis, sur le plan de leur structure chimique, que les autres polymères mais on maîtrise bien, aujourd'hui, les formes globales de ces polymères. Cela signifie que l'on peut décider l'emploi d'un polymère de base (en fonction d'une formulation particulière) présentant une structure linéaire, donnant à la forme polymérisée un réseau linéaire, l'utilisation d'un polymère de base de structure ramifiée engendrant un réseau polymérisé ramifié, voire tridimensionnel.

Tableau 1 – Caractéristiques des systèmes polymérisés

Performances/Propriétés	Époxydiques	Polyuréthannes	Polyesters
Durée pratique d'utilisation (DPU) (h à 20 °C)	1 à 2	1 à 1,5	1 à 1,5
Temps de polymérisation complète (j à 20 °C)	5 à 6	4 à 5	3
Résistance à la compression (MPa)	70 à 90	5 à 50	25 à 80
Résistance à la traction (MPa)	45 à 70	10 à 30	35 à 80
Allongement à la rupture ..... (%)	.....	1 à 100	≈ 1
Module d'Young (MPa)	3 500 à 10 000	15 à 700	2 000 à 5 000
Résistance à la fissure nouvelle (mm)	.....	1,5 à 20 °C 0,4 à - 10 °C	.....
Température de fléchissement sous charge (°C)	40 à 65 selon formule	.....	.....
Résistance au choc thermique accidentel (°C)	200	200 à 220	180
Température minimale d'application (°C)	5 à 10	0	5
Autoaccélération de la réaction.....	OUI Oblige à réfléchir aux emballages	NON Pas de problème pour les emballages sauf ceux liés à la DPU	OUI Oblige à réfléchir aux emballages
Application sur support humide	OUI avec formule spéciale	NON (primaire spécial époxyde)	Peu recommandé
Résistance à l'abrasion : indice de Taber .....	.....	0,7 à 0,9	2,8 à 4
Réparation/reprise.....	Possible mais délicate sur le plan de la préparation de surface	OUI avec préparation de surface	Difficile, nécessite un traitement spécial

La conséquence immédiate de ce principe se situe au niveau des performances des produits (tableau 1). Un produit polymérisé linéaire sera plus souple qu'un produit très ramifié.

Nota : sur le plan du vocabulaire, il faut préciser que les produits de base appelés polyuréthanes (alors qu'ils se sont pas encore présents) mettent en œuvre un polyol avec un durcisseur isocyanate et le réseau polymérisé obtenu est appelé logiquement un **polyuréthane**.

2.3.3 Système polyester

Nota : pour plus de détails et pour les schémas de réaction, on se reportera à l'article *Polyesters insaturés UP* [A 3 445] du traité Plastiques et Composites.

Il s'agit d'un système à deux phases permettant d'aboutir à la mise en œuvre sur le chantier de la résine pâteuse obtenue lors de la réaction initiale.

Cette réaction initiale correspond à une réaction de condensation d'un anhydride insaturé (souvent le maléique) sur un dialcool. En fin de réaction, toutes les doubles liaisons du polyester sont intactes. La polymérisation (qui est une polycondensation) consiste à faire réagir les doubles liaisons qui doivent être initiées par un catalyseur (peroxydes organiques symétriques) et un accélérateur (sels de cobalt ou composés aminés et/ou soufrés). Vu le temps de réaction, on peut aisément incorporer des fibres de renforcement permettant ainsi d'augmenter les principales performances mécaniques.

C'est, de très loin, la technique la plus utilisée dans le bâtiment.

Les principales caractéristiques des polyesters polymérisés sont données dans le tableau 1.

2.3.4 Système caoutchouc polysulfure

Sauf application particulière (adjonction dans les systèmes époxyde pour colle à béton), cette famille de polymères est utilisée essentiellement pour des mastics dont la plus importante caractéristique est un comportement principalement plastique. Les mastics à base de caoutchouc polysulfure (dont le nom le plus connu est celui de la marque américaine Thiokol®) se présentent sous forme de un ou deux composants. Ils nécessitent, de façon quasi générale, l'application d'un primaire sur les supports courants. Ils sont utilisés soit sous forme pâteuse (pour les joints verticaux), soit sous forme coulable (pour les joints au sol) avec, dans ce cas (souvent), une adjonction de brai (article *Calfeutrement des joints dans les travaux publics* [C 5 460] de ce traité). Leur comportement dans le temps est, dans la grande majorité des cas, excellent.

2.3.5 Système silicone

Nota : on se reportera à l'article *Silicones SI* [A 3 475] du traité Plastiques et Composites.

Son seul véritable emploi est celui du joint.

Provenant de la grande idée des années 60 (la chimie des silicones devant théoriquement remplacer celle du carbone, ce qui ne se fera pas), les polymères silicones sont composés d'un enchaînement d'atomes de carbone, d'oxygène et de silicium. Certaines ramifications peuvent exister sur cet enchaînement. Selon la nature chimique des éléments des ramifications, on peut obtenir des produits acides, neutres ou alcalins.

En général, les polymères silicones n'ont pas besoin de primaires pour les surfaces de nature chimique voisine de la leur (verre, surfaces vitrifiées, etc.). En revanche, ceux-ci sont nécessaires sur les autres supports.

2.3.6 Système acrylique

Ces polymères peuvent être utilisés sous deux formes différentes : émulsion ou solution.

Les premières applications furent en émulsion, que ce soit pour la fabrication de mastics (dont les premiers ne furent que plastiques et récemment élastiques) ou pour des formulations de peinture extérieure présentant d'excellentes caractéristiques de vieillissement aux conditions climatiques extérieures (article *Travaux de peinture* [C 3 690] dans ce traité).

Toutefois, les versions en émulsion (donc contenant de l'eau) sont sensibles aux précipitations pendant un temps plus ou moins long après leur application.

Les versions en solution sont essentiellement utilisées dans des formulations pour peinture (de qualité) d'ouvrage d'art, par exemple.

3. Différents emplois

3.1 Travaux neufs

3.1.1 Ponts

Ce domaine a été celui du développement de mélanges initiaux composés de produits naturels (essentiellement le brai) auxquels on additionnait des polymères de type époxyde ou polyuréthane. Les valeurs demandées par les maîtres d'ouvrages, pour définir les performances de ces systèmes, étaient celles des produits naturels utilisés antérieurement. Lorsque les polymères furent utilisés, seul le niveau de performances (entre autres adhérence et souplesse) fut identique à celui des produits naturels modifiés. À partir de 1975, les organismes de contrôle augmentèrent le niveau de ces valeurs pour qu'elles soient plus appropriées par rapport aux propriétés réelles des formules mises en application.

Aujourd'hui, les ponts dépendent, dans la très grande majorité des cas, de l'administration des Ponts et Chaussées, qui a rédigé un document (STER 88) remis à jour de façon régulière et dans lequel sont définis tous les types d'étanchéité.

Dans ce domaine, les polymères utilisés sont :

- les époxydes et les polyuréthanes, dans les formules contenant des bitumes ou des brais. Ils sont nommés **brai-époxyde** ou **brai-polyuréthane** ;
- les **polyuréthanes seuls**, formulés (**sans solvant**) sous forme de deux composants contenant les polymères de base (polyol et isocyanate) additionnés de charges minérales, agents de formulation et pigments permettant d'obtenir des produits colorés dont les caractéristiques sont données dans le tableau 1, et dont les principales sont :

- adhérence au béton (en cas de tests, on doit arracher la couche superficielle du béton),
- allongement à la rupture (de l'ordre de 75 à 100 %),
- résistance à la fissure : de 1 mm à 20 °C et 0,3 mm à - 10 °C,
- résistance au choc thermique : 200 °C (pour supporter un enrobé routier mis en place à 160-180 °C).

Ces produits sont couverts par des systèmes de garantie décennale ;

- les **polyuréthanes deux composants, en phase solvant**, employés en tant que peinture d'ouvrage d'art. Ils présentent des caractéristiques excellentes de résistance aux intempéries et de vieillissement aux rayonnements ultraviolets. C'est également dans ce domaine que l'on trouve les meilleures formules de revêtement résistant aux graffitis. Les épaisseurs finies, sèches, sont de l'ordre de 250 à 300 µm.

3.1.2 Ponts en béton précontraint

Dans ce cas particulier, le problème de l'**étanchéité** doit être séparé du problème traité dans le paragraphe précédent car, si l'étanchéité globale est requise, les contraintes de service et l'environnement sont différents : il faut donc prévoir l'étanchéité, comme pour un pont normal, mais les solutions envisagées doivent tenir compte de la technique de montage et de réalisation (entre autre le problème des joints et celui du collage des voussoirs). Il est évident, vu la nature des mouvements que doit supporter un tablier de pont en béton précontraint, que l'étanchéité devra présenter des caractéristiques de souplesse les plus élevées possible (les documents officiels de réglementation prévoient des caractéristiques particulières pour ces types de tabliers de ponts).

Par ailleurs, les **voussoirs** (éléments unitaires du pont) sont reliés entre eux par les pièces mécaniques de rappel, les câbles de précontrainte, mais également par **collage** à l'aide de colle époxyde dont le niveau de performance se situe dans la partie haute des valeurs indiquées dans le tableau 1.

Les **têtes de câbles**, composées des pièces de blocage et des extrémités des torons, peuvent être protégées contre la corrosion avec des systèmes époxydiques, sans solvant, en épaisseur supérieure à 1 mm (vu le relief des pièces), et ce en lieu et place de la graisse épaisse utilisée habituellement.

On peut encore citer la **protection contre la corrosion** des torons proprement dits (assemblage en nombre impair de fils de 4 mm de diamètre). Une expérience intéressante avait été tentée en 1976/1977 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et la Direction Départementale de l'Équipement Paris-Ouest pour la protection par un polymère liquide appliqué avant la mise en place des câbles. Les essais de contrôle avaient débouché sur un succès total (après 2 années de tests de corrosion intensive). Toutefois, il fallut attendre 1991 pour qu'une grande entreprise (d'origine suisse), fournisseur de produits pour le bâtiment, propose sur le marché des fers d'armature et des câbles protégés par des résines époxydiques, appliquées industriellement en atelier.

Au niveau des **joints de dilatation**, on rencontre également, bien que cela soit en diminution, l'utilisation de caoutchouc polysulfure (Thiokol®). On préfère les joints de tabliers de pont préfabriqués et il n'y a plus qu'une opération mécanique de montage à réaliser. Cela est dû essentiellement au problème de la qualification de la main-d'œuvre évoqué au paragraphe 1.

3.1.3 Barrages. Étanchéité

Ce domaine, en France, à de très rares exceptions près, dépend d'Électricité de France (EDF) pour les barrages hydroélectriques et des Directions Départementales de l'Agriculture pour les barrages réservoirs d'eau.

EDF a été, dès le début des applications, très intéressée par l'emploi des polymères liquides pour assurer l'**étanchéité du parement amont des barrages**.

Dans la grande majorité des cas, les travaux d'étanchéité furent réalisés avec des systèmes polyuréthanes deux composants sans solvant. Au cours des dix dernières années, il fut ajouté à ce traitement d'étanchéité une finition polyuréthane (modifiée) présentant une excellente résistance aux rayonnements ultraviolets.

La nécessité du **niveau de performances des produits** envisagés et la **compétence technique** conjointe du fournisseur et de l'applicateur sont indissociables car :

- les revêtements amont des barrages peuvent subir des chocs thermiques (été/hiver) de l'ordre de 100 °C ;
- les revêtements peuvent subir le raclage dû à la glace ;
- on ne dispose que de peu de temps (quelques mois) pour réaliser les travaux ;

— les conditions météorologiques des sites de montagne peuvent être sévères ;

- les accès aux ouvrages ne sont pas toujours aisés ;
- les eaux de montagne sont beaucoup plus agressives que les eaux naturelles de pluies que l'on rencontre dans les ouvrages de génie civil ordinaires et sont souvent très pures, donc très dissolvantes.

Il faut également résoudre le problème de l'**étanchéité des joints de dilatation** entre plots qui supportent les mêmes conditions thermiques et physiques que le revêtement proprement dit. Dans la plupart des cas, les joints sont réalisés en caoutchouc polysulfure.

Sauf cas exceptionnel, ces travaux d'étanchéité sont entrepris lors des révisions décennales. Seuls les grands barrages récents (Amérique du Sud - Afrique) ont reçu l'application de polymères en étanchéité et de joints sur ouvrages neufs.

Cela signifie que les surfaces des parements de barrages rentrent dans le cas des remises en états.

Quelques autres parties d'ouvrages hydrauliques ont fait l'objet d'application de polymères liquides sur place :

- les **déversoirs**, où le revêtement (en général polyuréthane) doit, en plus d'être étanche, résister à l'abrasion due au passage de l'eau (à grande vitesse) contenant des matériaux solides ;
- les **parties intérieures des galeries hydrauliques**, qui peuvent être revêtues de systèmes polyuréthanes dont l'étanchéité (avec les normes les plus rigoureuses) est la caractéristique principale demandée.

3.1.4 Tunnels

3.1.4.1 Cloutage

Lorsque l'on intervient dans les techniques de construction de tunnels, on s'aperçoit qu'avant d'entreprendre l'étanchéité (élément extrêmement important), il y a une utilisation courante (car ancienne) de polymères.

Il s'agit de la technique de cloutage permettant de sceller les barres (de plus ou moins grandes longueurs) destinées à serrer les terrains, après le creusement et aux fins de stabiliser les voûtes (article *Murs de soutènement* [C 244] dans ce traité).

De façon pratiquement systématique, on utilise des résines polyesters, présentées en cartouche (carton, verre ou plastique) dont la vitesse de prise est très courte (10 à 15 min).

3.1.4.2 Ancrage

Dans le même ordre d'idée, toutes les fixations nécessaires dans un tunnel (panneaux, linges électriques, caténaires pour chemin de fer, etc.) étaient réalisées avec des ampoules d'ancrages à base, également, de résines polyesters.

Au début des années 80, ces produits furent interdits (pour les scellements) en raison de rupture d'adhérence consécutive, semblait-il, à des réactions chimiques de saponification entre le polymère et le béton.

Après une période d'études et de tests, on obtint des ancrages (jusqu'à 24 mm de diamètre et 150 mm de longueur) à base de résine époxydique dont la vitesse de prise et les caractéristiques étaient jugées excellentes.

Il existe une procédure d'essais officielle sur ces produits.

3.1.4.3 Mortiers de calages

Il ne s'agit pas d'une application représentant des tonnages importants, mais d'une nécessité non négligeable. La fixation des machines de ventilation, par exemple, dans les centrales du même

nom, doit répondre à des impératifs de précision que ces mortiers de calages ont grandement facilité. Presque toujours, il s'agit de formules (très chargées) de polymère époxydique à deux composants.

Il existe une procédure d'essais officielle sur ces produits.

3.1.4.4 Étanchéité

Face à de tels ouvrages, on ne peut envisager que deux options possibles pour l'étanchéité : intrados ou extrados. Dans le cadre de ce chapitre, il ne sera crédit que le système intrados dont le schéma de principe est donné figure 1.

En travaux neufs, l'étanchéité d'un tunnel ne peut se concevoir, correctement, qu'au niveau de l'étude initiale. En effet, trop de paramètres concernant les eaux, la nature du terrain, mais aussi la conception proprement dite de la paroi ont une importance pour que l'étanchéité ne puisse être programmée qu'en fin de travaux.

Dans le cas de l'étanchéité intrados, le revêtement polymère va subir les effets de la sous-pression d'eau qui aura traversé le terrain puis le béton de la voûte. On se retrouve donc dans le cas du cuvelage (§ 3.1.5), mais les hauteurs d'eau sont souvent considérables (plusieurs centaines de mètres).

C'est pour cette raison que le choix de la technique d'étanchéité intrados doit être accompagnée de mesures physiques particulières pour décharger une grande part de la pression d'eau entre les parois et le béton (plaques drainantes par exemple).

On choisira les polyuréthanes dont les performances sont indiquées dans le tableau 1 (la résistance au rayonnement ultraviolet n'intervenant pas ici).

La réalisation des joints de dilatation sera envisagée de façon très précise. Ils devront être conçus dès le début du projet.

L'eau circulant derrière les joints devra être collectée en bas de pieds droits. Si nécessaire, on prévoira un matériau d'isolation thermique évitant que l'eau circulant ne puisse geler dans les conduits de circulation.

Il n'y a pas de joints à base de caoutchouc polysulfure, même parfaitement réalisés, qui résistent à plusieurs MPa de sous-pression.

C'est donc un ensemble drainage du joint + joint bien réalisé qui sera mis en œuvre pour obtenir un joint de dilatation conforme et durable.

Il reste à préciser une règle fondamentale : **la largeur du joint doit être au moins égale à deux fois son épaisseur.**

Le plus important, dans le cas des tunnels, est le choix initial du type d'étanchéité. Ce choix est la conséquence de la conjugaison des paramètres techniques incontournables et des conditions administratives et financières de gestion d'un projet. Ce choix va conditionner les autres applications de polymères pour l'ensemble des travaux et des aménagements.

Nota : les travaux d'étanchéité extrados envisagent l'étanchéité réalisée contre le terrain (une fois celui-ci mis à des formes adoucies) par une feuille d'étanchéité (très souvent du PVC) sur laquelle viendra se plaquer le béton coffré (à l'aide des systèmes de coffrages roulants). Dans ce cas, le système d'étanchéité sera logiquement le premier en contact avec l'eau du terrain qui ne devra pas (théoriquement) circuler jusqu'au béton. Dans cette technologie, les joints sont à traiter avec autant de soin que dans la solution intrados.

Il existe une procédure d'essais officielle sur tous ces produits.

3.1.5 Grands ouvrages standards (parkings, locaux techniques)

Tous ces ouvrages sont en sous-sol et, dans la quasi-totalité des cas, positionnés dans les nappes de ruissellement ou phréatiques.

Les technologies actuelles de construction permettent de réaliser des parois moulées (article *Parois moulées. Ancrages* [C 252] dans ce traité) de grandes profondeurs, mais il devient impératif (vu les emplois et les coûts) que ces locaux soient secs.

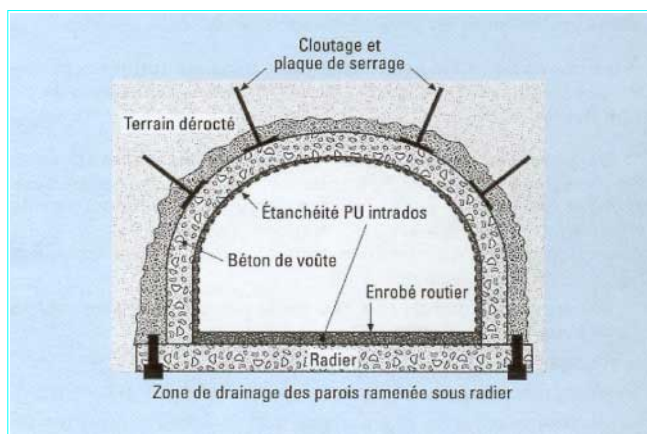


Figure 1 – Système d'étanchéité intrados

C'est pour ces raisons essentielles que la technique du **cuvelage** (obligatoirement intrados) a été développée. L'étanchéité de parois moulées peut être réalisée par des techniques à base de ciments modifiés, par exemple ; toutefois, l'utilisation des polymères (plus légère sur le plan du chantier) a vu ses applications croître depuis 1965/1968 (dates des premiers chantiers), par le fait qu'elle coûte sensiblement le même prix que les techniques plus anciennes (si l'on tient compte de toutes les sujétions).

De plus, le niveau de performances (quant à la résistance en sous-pression), tant au stade des essais par des laboratoires officiels que de la mise en œuvre sur chantier, permet de dire que la valeur considérée comme normale est de l'ordre de 1,3 à 1,5 MPa (soit 130 à 150 mCE).

Enfin, la technique de cuvelage permet un revêtement coloré, ce qui, sur le plan esthétique, n'est pas forcément négligeable.

Les formules utilisées dans ce type d'application sont, pratiquement à 100 %, des polyuréthanes deux composants sans solvant (avec leurs produits annexes tels les bouche-pores).

Il n'est pas excessif de dire qu'à ce jour on peut citer, en France, une utilisation globale de cette technique sur plus de 25 000 000 m².

3.2 Réparations. Renforcements

N'entrent dans ce paragraphe que les applications spécifiques qui ne nécessitent pas de revenir totalement au support (dans la grande majorité des cas : le béton).

En effet, les grandes opérations de réparations ne peuvent se concevoir qu'en éliminant le (ou les) revêtement(s) existant(s). On se retrouve alors au niveau des opérations et des solutions techniques envisagées dans les travaux neufs.

Les principaux domaines des réparations sont :

- les fissures ;
- les épaufrures et les ébréchures ;
- le collage de béton frais sur béton durci ;
- le collage d'éléments en béton ;
- le renforcement par collages d'armatures.

La plupart des applications de réparations doivent être pratiquées avec des produits ayant passé avec succès les tests de performances et d'évaluation définis par une procédure dite « procédure commune d'essais » définie par les administrations des Ponts et Chaussées, SNCF, EDF, RATP, etc.

3.2.1 Fissures

Se répartissant entre fissures actives et passives, elles doivent être contrôlées et analysées quant à leur origine, leur mouvement, leur amplitude, les performances globales de l'ensemble à réparer, avant de définir quel produit doit être utilisé pour procéder à la réparation.

Cette réparation a pour but de :

- rétablir la cohésion du béton et son monolithisme ;
- rétablir l'étanchéité de l'élément ;
- assurer (ou renforcer) l'enrobage des éléments pouvant se corroder.

La technique générale de **traitement des fissures** est sensiblement la même, quels que soient les polymères utilisés. Le processus peut se résumer aux actions suivantes :

- dégagement des fissures ;
- mise en place des injecteurs ;
- obturation de la fissure entre les injecteurs ;
- injection proprement dite ;
- travaux de finition.

Dans pratiquement toutes les applications, les **formules de polymères**, qu'ils soient époxyde, polyuréthanne ou polyester, doivent avoir sensiblement les mêmes **caractéristiques** :

- la viscosité doit être la plus basse possible afin d'assurer la meilleure circulation dans la fissure avec de faibles pressions (maximum 0,1 MPa) ; cette faible viscosité ne peut pas être obtenue par l'adjonction de solvant dont l'évaporation est néfaste aux performances ;
- la formule présentera la meilleure mouillabilité possible ;
- si l'on envisage d'incorporer des charges, il est indispensable que la granulométrie de celles-ci n'excède pas 1/10 de la largeur moyenne de la fissure. Cette possibilité n'est utilisable que dans le cas de fissures de l'ordre de 2 mm de largeur ;
- dans le cas de fissures humides, on doit envisager des formules avec un léger coefficient d'expansion et adhérentes en milieu humide.

La plus grande partie des applications se fait avec des formules époxydiques, non chargées et très fluides (bien que sans solvant) et dont la viscosité dynamique est de l'ordre de 250 à 400 mPa · s.

3.2.2 Épaufrures et ébréchures

Par définition, il s'agit des éclats de plus ou moins grande taille qui risquent de permettre (ou d'accélérer) l'évolution vers la dégradation des bétons.

Cette technique prévoit l'utilisation des polymères qui sont livrés en trois composants (résine, durcisseur, charges). Cette répartition est nécessaire car on ne peut pas décider à l'avance de la qualité et de la granulométrie nécessaire pour les réparations.

La pratique se fait de la façon suivante :

- retour au béton sain ;
- mise en place du primaire d'adhérence (indispensable) ;
- mise en place du coffrage souvent utile (surtout en sous-face), mais dont les éléments auront été rendus antiadhérents par un dérivé des cires de polyéthylène ;
- mise en place du mortier préparé quelques instants auparavant.

De façon courante (80 %), on utilise des mortiers de résine époxydique dont le taux de liant est de l'ordre de 15 %.

Dans les 20 % restants, on rencontre, selon les applications, des polymères polyesters (cas des problèmes à forte corrosion) et des polymères polyuréthanes (nécessité d'avoir un mortier souple qui sera recouvert par un revêtement souple de la même famille chimique).

3.2.3 Collage de béton frais sur béton durci

Trois applications :

- réparations exigeant la mise en place d'un nouveau béton pour remplacer un béton ancien dégradé ;
- augmentation des caractéristiques d'un élément en béton par l'adjonction d'une nouvelle épaisseur de béton sur le béton ancien sain existant ;
- reprises de bétonnage (béton frais au contact d'un béton ancien, même si celui-ci n'a que quelques jours) en vue d'assurer la jonction parfaite entre les éléments construits.

Il existe plusieurs **types de colles à béton** :

- les polymères en émulsion présentés en une formulation épaisse (souvent chargée) et devant être appliqués quelques instants avant le bétonnage. Toutefois ces formules présentent les inconvénients connus des produits sous forme d'émulsion, à savoir qu'une mise en œuvre « brutale » (ce qui est le cas lors des bétonnages) peut provoquer un délavage plus ou moins important ;
- les époxydes deux composants, modifiés par des polymères dont le principal a souvent été un caoutchouc polysulfure. Dans ce type de formulation, on utilise des résines époxydiques spéciales (épaisses) dont la possibilité de réagir en présence d'un milieu humide (alcalin) est notoire. Elles seront appliquées dans le délai prévu (temps ouvert) permettant au béton frais de bien adhérer à la colle, donc au béton ancien.

D'une façon générale, on considère que les formules époxydiques sont très supérieures à toutes les autres solutions envisagées.

3.2.4 Collage d'éléments en béton

Assurer la continuité des structures en béton à partir d'éléments préfabriqués permet de réduire sensiblement les délais de construction des ouvrages de génie civil.

Actuellement, seules les formules époxydiques, sans solvant, sont utilisées pour cette technologie. Les produits utilisés doivent être composés avec des polymères de base dont le comportement dans le temps a été très soigneusement vérifié.

Applicables à la spatule (ou à la rigueur au gant), les épaisseurs sont de l'ordre de 2 mm.

Les **performances courantes (et nécessaires)** sont :

■ sur le produit formulé

- durée pratique d'utilisation :
 - 50 min à 5 °C,
 - 20 min à 20 °C ;
- temps ouvert :
 - 90 min à 5 °C,
 - 60 min à 20 °C.

■ sur le produit durci

- résistance en traction/flexion :
 - 30 MPa à 14 j à 5 °C,
 - 35 MPa à 24 h à 20 °C,
 - 60 MPa à 7 j à 20 °C ;
- résistance en compression :
 - > 20 MPa à 24 h à 5 °C,
 - > 60 MPa à 14 j à 5 °C,
 - > 70 MPa à 24 h à 20 °C ;
- module d'Young :
 - 6 à 7 GPa à 7 j à 20 °C ;
- résistance au cisaillement :
 - > 5 MPa à 24 h à 20 °C.

3.2.5 Renforcement par collage d'armatures

Inventée par le Professeur Robert L'Hermite, cette technique permet de rétablir (ou d'augmenter) la portance initiale d'une structure de béton armé.

Il s'agit de coller des tôles d'acier d'une (ou plusieurs) épaisseur de 5 mm sur le béton, et ce à l'aide de colle à base de résine époxydique dont les performances sont définies par les exigences du calcul théorique effectué par l'inventeur.

Dans ce cas particulier, le savoir-faire technique (calculs précis) et pratique (technologie de mise en œuvre) doit être au plus haut niveau, car si cette technique est connue depuis environ 25 ans, elle nécessite un soin tout particulier pour obtenir (avec toute la sécurité voulue) les performances souhaitées. Il ne faut pas oublier que l'on opère au niveau des structures.

4. Avenir de ces technologies

4.1 Au niveau des formules

La conversation qui existe entre les fournisseurs de matières premières, les formulateurs et les maîtres d'ouvrages (ou les maîtres d'ouvrages délégués) génère assez souvent une discussion circulaire dont l'essentiel peut se résumer par :

- le **maître d'ouvrage** souhaite avoir des produits ayant des performances meilleures et plus spécifiquement adaptés aux applications dont il a besoin ;

- les **formulateurs** demandent que soient définis, avec précision, les besoins afin de créer les formules adaptées ;

- les **fournisseurs** ne peuvent fabriquer des matières premières en petites quantités, car les prix en seraient trop élevés. Il faut donc prendre les produits existants et concevoir à partir de ce qui existe sur le marché.

Depuis quelques années, un dialogue constructif s'est instauré entre eux.

4.2 Au niveau des applicateurs

Il est nécessaire de constater qu'au début des applications de polymères formulés il y eut de nombreuses erreurs commises, consécutives à un manque de connaissance et/ou à des technologies non encore bien définies.

Ces erreurs peuvent se regrouper en deux catégories :

- celles dues à un manque de connaissances des données techniques au niveau de l'application (durée de vie en pot, temps de polymérisation, mauvais mélanges des deux composants et mauvaise préparation du support) ;

- celles liées à une analyse insuffisante des performances requises ou des conditions de service, qui engendra de façon courante des ruptures de matériaux mis en œuvre.

Aujourd'hui, les entreprises d'application se doivent d'obtenir une qualification (OPQCB) qui les oblige à former leur personnel, et à avoir une connaissance pratique des produits utilisés.

Il n'en reste pas moins vrai que de nombreux efforts sont encore à faire pour que le sérieux de tous les instants soit la réalité des chantiers réalisés.

Utilisation *in situ* des polymères liquides dans le génie civil

par **Gérard HÉMOND**

Ingénieur-Chimiste Expert UTC/CEB (Union des Ingénieurs-Architectes et Techniciens de la Construction)/Collège des Experts en Bâtiment
Directeur de SOLEM Expertises SA

Bibliographie

La liste des ouvrages susceptibles de donner des informations sur l'emploi des polymères dans le génie civil est considérable et représente, aujourd'hui, plusieurs centaines de titres, pour ne citer que ceux parus dans les dix dernières années.

D'une façon relativement courante, un pourcentage de l'ordre de 70 % de ces ouvrages a été rédigé par les responsables tant techniques que

commerciaux des entreprises dont l'activité essentielle est l'emploi des polymères dans les domaines du génie civil et de la construction.

De façon à ne pas entacher la crédibilité des références citées, nous avons fait en sorte de ne citer que des documents généraux.

KURZ (W.), MERCIER (J.P.) et ZAMBELLI (G.). – *Traité des matériaux*. Tome 1. *Introduction à la science des matériaux*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1987).

MERCIER (J.P.) et MARÉCHAL (E.). – *Traité des matériaux*. Tome 13. *Chimie des polymères*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1993). *Assemblage, renforcement, restauration et entretien des structures à l'aide de liants résineux réactifs*. Séminaire belge à l'Institut du Génie Civil à Liège, 18 nov. 1980.

Matières plastiques dans la construction et la maintenance des structures industrielles et de leurs équipements. Journées d'Études belges, Université de Liège, 30 nov. 1982.

Recommandations sur l'étanchéité des ouvrages en souterrain (Groupe de travail n° 9 de l'AFTES). Tunnels et Ouvrages souterrains. Numéro spécial, nov. 1984.

Recommandations sur les réparations d'étanchéité en souterrain (Groupe de travail n° 9 de l'AFTES). Tunnels et Ouvrages souterrains. Numéro 82, août 1987.

Choix et application des produits de réparation des ouvrages en béton. Guide pratique du LCPC (1977).

Adhesion between polymer and concrete. Chapman et Hall. Londres (1990).