

Réparation des ouvrages en béton armé

Partie 2 : Compatibilité et performances

Reinforced concrete repair

Part 2 : Compatibility and performance

par **Luc COURARD**

Professeur, PhD, Ingénieur civil des constructions

GeMMe - Laboratoire des Matériaux de Construction, Université de Liège, Liège, Belgique

et **Benoît BISSONNETTE**

Professeur titulaire, PhD, Ingénieur

Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval, Québec, Canada

Résumé

La réparation des bétons nécessite non seulement une bonne connaissance du support à réparer, des matériaux de réparation et de l'environnement dans lequel ils vont être mis en œuvre, mais aussi une compréhension des mécanismes à la base de l'adhésion. Les compatibilités dimensionnelle, électrochimique, chimique et porosimétrique (perméabilité) sont les clés de la réussite et de la durabilité de la réparation. Sur la base de l'analyse du patrimoine en béton armé et des stratégies d'intervention possible, l'accent a été placé dans la première partie sur l'étude des effets et des causes des principaux défauts de surface observés. Une fois la condition du béton en place adéquatement évaluée (Partie 1), la préparation de la surface avant réparation, sa propreté ou encore sa rugosité sont des conditions essentielles au développement de l'adhérence et de l'accrochage du produit de réparation, garantissant ainsi la durabilité de l'intervention.

Abstract

Repair of concrete not only requires knowledge of the support to repair, repair and materials environmental conditions in which they will be implemented, but also an understanding of the mechanisms underlying adhesion. Dimensional, electrochemical, chemical and porosity (permeability) compatibilities are the key to the success and durability of the repair. Based on the analysis of the patrimonial heritage in reinforced concrete and possible intervention strategies, emphasis was put in the first part on the effects and causes of the most prevalent surface defects. Beyond the requirement for a proper condition assessment (Part 1), adequate preparation, cleanliness and roughness are essential characteristics for the development of adhesion and the bonding of the repair product, thereby ensuring the durability of the intervention.

Mots-clés / Keywords :

	français	anglais
Technologies impliquées	Adhérence, réparation	<i>Adhesion, repair</i>
Domaines d'application	Bâtiments et travaux publics	<i>Buildings and civil engineering</i>
Type d'article	Etat de l'art	<i>State of the art</i>
Description du contenu	Béton, dégradations, réparation	<i>Concrete, degradations, repair</i>

Table des matières

1	<i>Principes fondamentaux: adhérence et compatibilité</i>	3
2	<i>Compatibilité des matériaux liés</i>	7
2.1	Compatibilité déformationnelle	8
2.2	Compatibilité des perméabilités	13
2.3	Compatibilités chimique et électrochimique	13
3	<i>Matériaux de réparation pour le béton</i>	15
3.1	Mortiers à base de ciment modifiés ou non par des polymères	15
3.2	Mortiers à base de résine époxy	24
3.3	Choix entre matériaux de réparation cimentaires et polymères	25
3.4	Mortiers à retrait compensé	25
4	<i>Préparation des surfaces</i>	26
4.1	Utilisation du marteau-piqueur	27
4.2	Hydro-démolition	28
4.3	Sablage et grenailage	30
4.4	Précautions	31
5	<i>Protection contre la corrosion</i>	32
5.1	Reconstitution de la couche d'enrobage	32
5.2	Protection additionnelle de l'armature	32
6	<i>Techniques de mise en œuvre pour la réparation des épaufrures</i>	35
6.1	Considérations de base	35
6.2	Application à la truelle	36
6.3	Application par consolidation à sec	36
6.4	Mise en place par gravité dans des coffrages	37
6.5	Mise en place par pompage et pressurisation des coffrages	38
6.6	Mise en place avec granulats pré-placés	38
6.7	Mise en place par projection	39
7	<i>Contrôle qualité</i>	40
7.1	Contrôle pendant la mise en œuvre	41
7.2	Contrôle après l'intervention	41
8	<i>Recommandations</i>	42
8.1	Investigations et diagnostic	42
8.2	Préparation de surface	43
8.3	Sélection, application et maturation du système de réparation	43
8.4	Contrôle de la qualité	46
	<i>Conclusion</i>	46
	<i>Remerciements</i>	46

Introduction

La réparation des ouvrages d'art, bâtiments, routes, etc. en béton armé est une opération qui devient maintenant habituelle. Le béton reste un matériau performant et durable, mais l'explosion de la construction au sortir de la seconde guerre mondiale a été telle que le nombre d'infrastructures et de bâtiments dégradés nécessitant aujourd'hui une intervention augmente de façon exponentielle.

A l'interface entre la science et l'ingénierie des matériaux, les systèmes et techniques de réparation doivent être choisis dans une optique à court terme – il faut rendre à un ouvrage ses capacités originelles – mais aussi à plus long terme car il s'agit de lui assurer une nouvelle vie.

La compatibilité des produits de réparation vis-à-vis du béton ancien constitue une condition indispensable pour la qualité et la durabilité des réparations, lesquelles se mesurent notamment par l'adhérence à long terme du nouveau matériau sur l'ancien béton. Le succès avec lequel il sera possible de rencontrer les différentes exigences de compatibilité dépend de plusieurs facteurs : le choix du matériau, les opérations de préparation du support, la technique de mise en place et les opérations de contrôle de la qualité.

réparation : opération de remise en état d'un élément ou d'un ouvrage dégradé,

restauration : opération de rétablissement de l'ouvrage à son état originel, avant sa mise en service,

renforcement : ensemble des travaux visant à préparer l'ouvrage à une exploitation plus intensive en tenant compte des sollicitations mécaniques, thermiques ou chimiques. Chacune de ces sollicitations peut prendre un caractère permanent ou non, de courte ou de longue durée, statique ou dynamique.

1 Principes fondamentaux: adhérence et compatibilité

L'une des préoccupations premières de l'ingénieur lorsqu'il conçoit la réparation d'un ouvrage béton est l'optimisation de l'adhésion générée entre le matériau d'apport et le béton d'origine, surtout en ce qui a trait à la durabilité de l'adhésion. Cela implique une bonne connaissance des forces qui interviennent lorsqu'un contact se produit entre deux phases. Et ces forces se réduisent finalement (à l'exception des forces purement mécaniques qui ressortent d'une étude macroscopique) à des interactions moléculaires, de nature physico-chimique [1].

Les mécanismes d'adhésion pouvant se développer entre deux phases (Fig. 1) sont classés en deux catégories :

- effets de l'interpénétration mécanique;
- adhésion spécifique.

L'adhésion spécifique est généralement interprétée en termes de :

- forces intermoléculaires (physique);
- approche thermodynamique;
- liaisons chimiques.

L'idée du modèle d'adhésion mécanique est que l'adhésif liquide pénètre dans les pores à la surface de la phase solide, l'adhérence étant assurée après maturation par l'effet d'interpénétration mécanique [2]. D'autre part, la préparation de surface, en générant différents profils de surface plus ou moins rugueux (Fig. 2), va permettre

également un meilleur accrochage de la couche d'apport : on parle dans ce cas d'interpénétration mécanique à l'échelle millimétrique ou centimétrique.

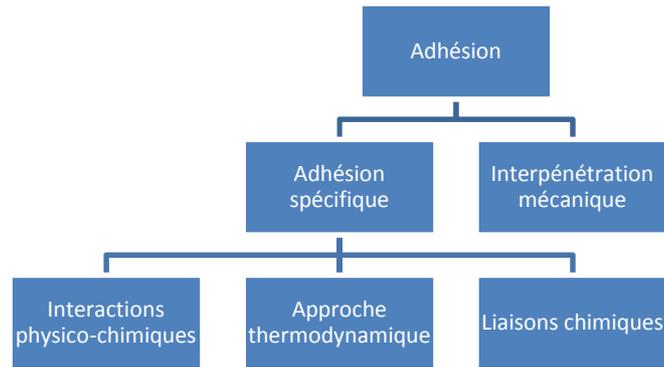
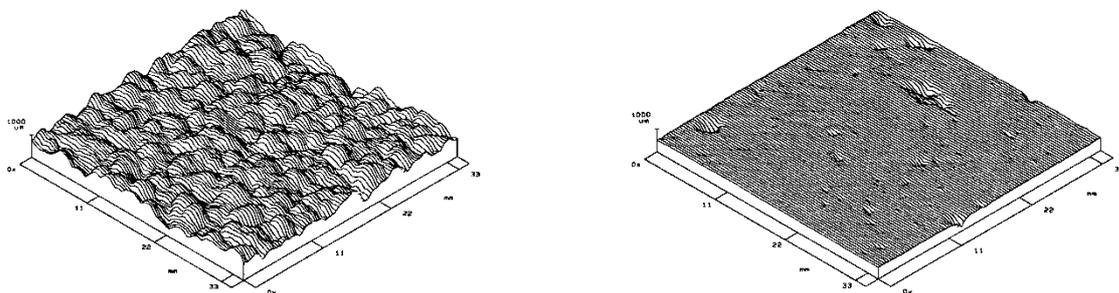


Figure 1 – Théorie générale sur les mécanismes d'adhésion.



a) Surface de béton après sablage.

b) Surface de béton après polissage.

Figure 2 – Exemples de caractérisation de la rugosité de surfaces en béton par profilométrie optique de type *Moiré*.

Néanmoins, l'interpénétration mécanique dans le domaine des rugosités mesurables (échelle microscopique) ne permet pas d'expliquer les mesures d'adhésion élevées enregistrées sur des plaques de verre ne présentant pratiquement aucune porosité ou sur des interfaces résine époxy/granulats présentant la même rugosité moyenne (Fig. 3) : la nature chimique des surfaces en présence, même lisses, suffit dans ce cas à expliquer l'adhérence.

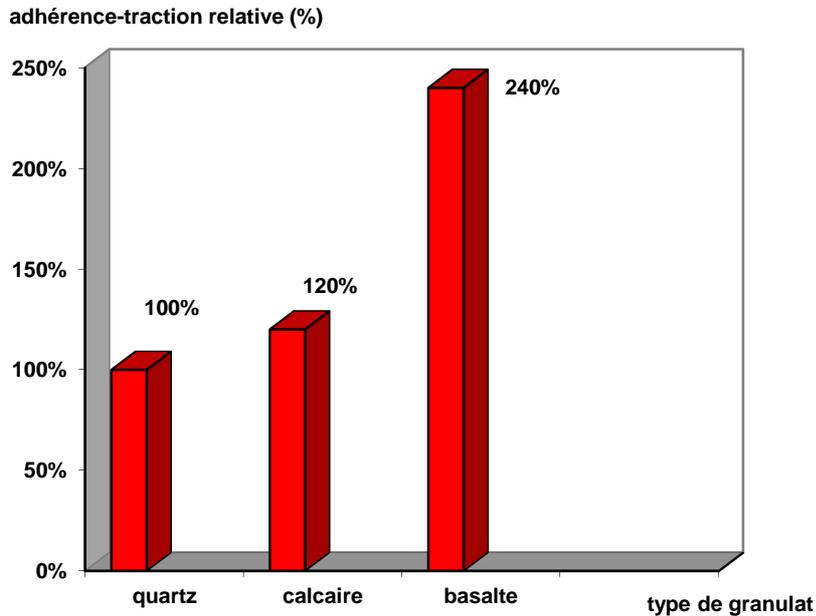


Figure 3 – Adhérence-traction relative, entre un revêtement époxy et différents granulats [3].

L'interpénétration mécanique joue un rôle important dans le mécanisme d'ancrage mécanique. L'accroissement de la surface spécifique ajoute à cet effet favorable en augmentant le nombre de sites potentiels d'interaction entre substrat et adhésif [4]. Enfin, la porosité du support en surface doit permettre une meilleure pénétration de l'adhésif à l'intérieur du béton (par succion capillaire par exemple) et permettre la création éventuelle d'ancrages chimiques. Nous voulons parler ici d'une rugosité qui ne peut être mesurée que par appréciation du réseau poreux du matériau en surface, au moyen des techniques de porosimétrie au mercure ou par analyse d'images sur lames minces.

Cette interpénétration mécanique et les interactions potentielles entre support et produit d'apport ne sont possibles que si le contact est effectif [5]. La qualité du contact est régie par la mouillabilité de la surface solide par le liquide appliqué. Le support en béton – solide – réparé ou revêtu par un matériau d'apport – liquide – définit un couple interactif spécifique.

La mouillabilité exprime la facilité avec laquelle le liquide va s'étaler sur la surface solide [6]. La relation entre l'angle de contact, qui permet d'apprécier la mouillabilité, et les énergies libres de surface des phases solides, liquides et vapeurs, est définie par la loi de YOUNG-DUPRE (Fig. 4).

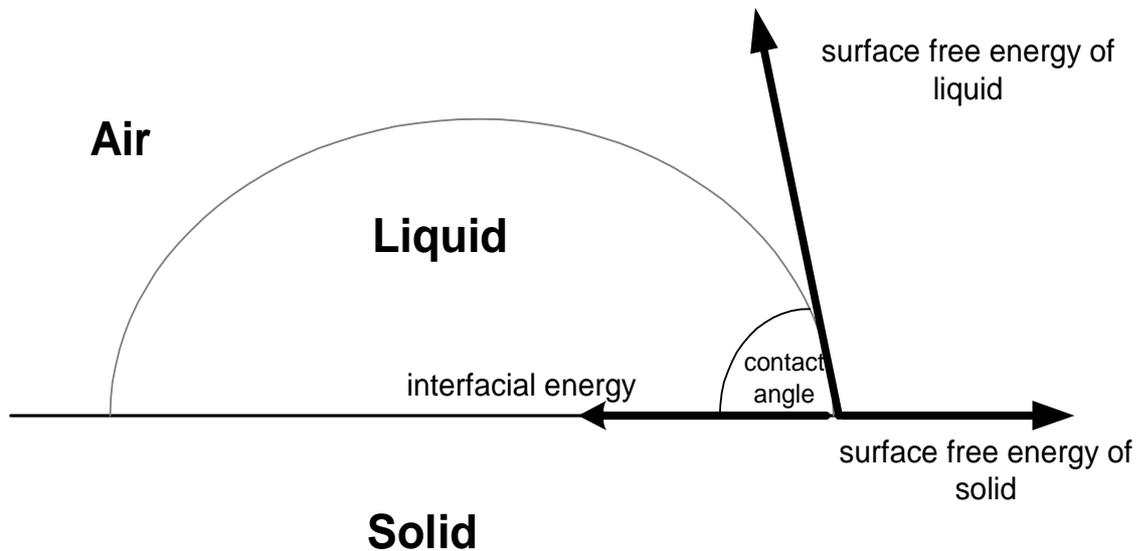


Figure 4 – Illustration du phénomène de mouillabilité d’une surface solide par un liquide, tel que décrit par la loi de Young-Dupré.

Silfwerbrand [7] a clairement mis en évidence l’influence de 5 conditions à la base de l’adhérence de revêtements sur un béton support :

- méthode de préparation de la surface en béton;
- absence de laitance;
- propreté du support;
- compaction du matériau d’apport; et
- méthode de cure du revêtement.

Les concepts définis ci-dessus rencontrent pleinement ces exigences technologiques: le contact, à la base du développement de l’adhérence, n’est possible que si le support est propre, sans couche de laitance, suffisamment rugueux et que le produit de réparation est mis en œuvre correctement.

L’émergence d’une véritable ingénierie de la réparation des ouvrages en béton a conduit au concept général de compatibilité [8], sur la base duquel ont été identifiés les principaux facteurs d’influence à considérer pour mettre en œuvre les conditions optimales de réparation (Fig. 5).

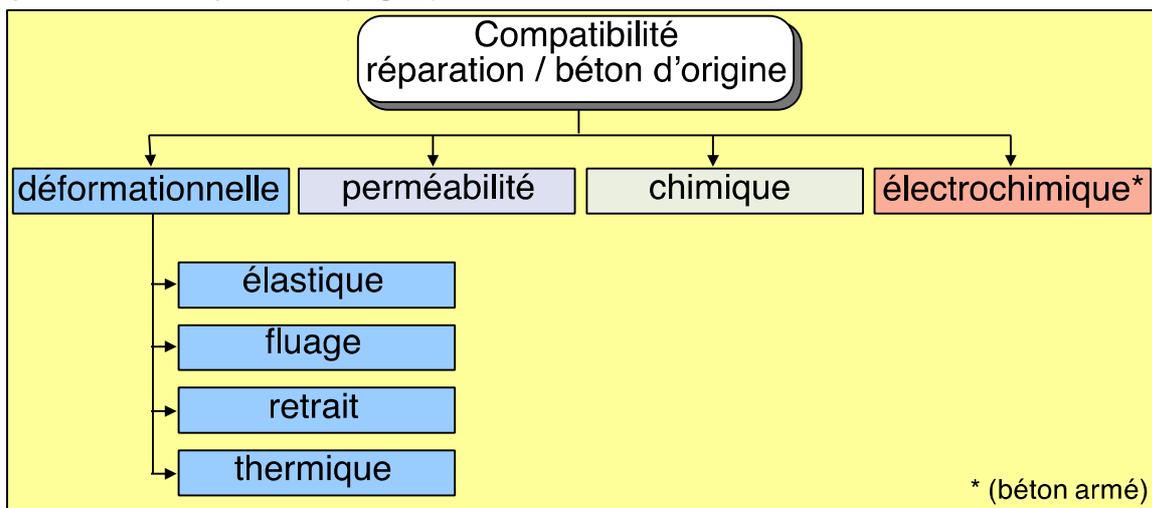


Figure 5 – Facteurs influençant la compatibilité d’une réparation en béton (d’après [8]).

Pour être « compatibles », les matériaux de réparation doivent être formulés afin de répondre à diverses exigences.

Les matériaux doivent d'abord permettre de rétablir la continuité du béton. Dans ce but, les caractéristiques suivantes sont demandées :

- adhérer à la surface du béton, de manière à pouvoir participer à la transmission des efforts à l'ensemble de la structure de l'ouvrage;
- présenter des résistances mécaniques (compression, traction, flexion) suffisantes, comparables ou supérieures à celles du béton;
- présenter un module d'élasticité similaire à celui du béton; ceci est impératif si le mortier de réparation doit contribuer activement à la stabilité mécanique de l'ensemble (cas de réparations effectuées sur des éléments dont la section a été fortement réduite); au cas où le ragréage est moins sollicité mécaniquement, on peut s'accommoder de valeurs de module d'Young (E) inférieures, ce qui accroît leur déformabilité et contribue à un meilleur comportement sous d'éventuels mouvements du support.

Les matériaux doivent par ailleurs être au moins aussi durables que le béton support. Cette durabilité s'applique :

- au matériau de réparation lui-même, par ses caractéristiques intrinsèques (résistance aux cycles de gel-dégel, aux sels de déverglaçage, aux chocs thermiques, aux influences de l'eau et des solutions aqueuses, à l'alcali-réaction);
- à l'interface du matériau de réparation avec le support béton; cette interface doit donc résister aux actions des eaux diffusant du matériau de réparation, du béton support ou s'infiltrant directement par l'interface; la préservation des caractéristiques de l'interface suppose fréquemment que les transports d'humidité sous forme de vapeur ou de liquide dans le béton ne soient pas trop perturbés.

Le composite formé doit résister aux variations dimensionnelles de ses composants, induites par des changements de température ou des changements de degré hygrométrique. Il faut donc que les coefficients de dilatation thermiques ou par absorption d'eau ne soient pas trop différents.

Enfin, le produit doit pouvoir être aisément mis en œuvre et ses caractéristiques ne doivent pas être altérées par les conditions hygrothermiques extrêmes de mise en œuvre.

2 Compatibilité des matériaux liés

La compatibilité entre les deux matériaux est donc une condition qui apparaît essentielle à l'obtention d'une réparation durable. Cette notion est cependant souvent peu ou mal connue des concepteurs.

Les ingénieurs commencent à peine à prendre conscience du fait que la résistance en compression du béton n'est pas le seul critère devant guider leur conception. Si cela est vrai dans le cas d'un ouvrage à construire, cela l'est d'autant plus dans le cas d'un ouvrage à réparer. Un nombre considérable de réparations qui se détériorent prématurément en raison du séchage, du gel, des réactions alcalis-granulats, etc. est attribuable à la trop grande importance accordée à la résistance au détriment de la durabilité. Généralement, dans le cas des réparations, la résistance n'est pas un facteur déterminant et l'accent doit être plutôt mis sur la compatibilité entre le matériau d'apport et le substrat. La durabilité et la bonne tenue de l'ensemble est directement tributaire de cette compatibilité.

Il est nécessaire ici de clarifier ce que sous-tend, de façon globale, la notion de compatibilité évoquée jusqu'à maintenant. Une affinité des propriétés physiques et chimiques entre le matériau de réparation et le substrat est nécessaire pour s'assurer que la réparation se comporte adéquatement sous l'effet des contraintes induites par les variations dimensionnelles et par divers phénomènes physiques et/ou chimiques, et ce, dans un environnement donné et pour une durée de vie anticipée. On peut distinguer quatre types de compatibilité (Fig. 5) : compatibilité déformationnelle, compatibilité des perméabilités, compatibilités chimique et électrochimiques.

2.1 Compatibilité déformationnelle

Les propriétés dont dépend la compatibilité déformationnelle sont le module élastique, le fluage, le retrait et les déformations thermiques (Fig. 5). En effet, le béton de ciment se déforme non seulement sous l'action de charges externes, mais aussi en fonction des conditions hydriques et thermiques environnantes. On peut donc diviser les composantes déformationnelles en deux groupes : les déformations viscoélastiques et les changements volumétriques.

2.1.1 Déformations viscoélastiques

Les matériaux cimentaires sous contrainte ont un comportement viscoélastique. Lors de l'application d'une contrainte, le matériau subit une déformation instantanée qu'on appelle **déformation élastique**. Si la contrainte est maintenue, la déformation s'accroît avec le temps. Le **fluage** est, par définition, la déformation différée que subit le matériau au-delà de la déformation instantanée.

2.1.1.1 Module élastique

La disparité des modules élastiques de la réparation et du béton d'origine modifie sensiblement la distribution des contraintes dans l'ouvrage réparé. Les schémas de la Figure 6 illustrent l'influence de la rigidité relative des deux matériaux sur le profil des contraintes de flexion (hypothèses sous-jacentes : validité de la loi de Navier et adhérence parfaite entre la réparation et le support).

On remarque, sur cette figure, qu'une différence entre les modules induit une discontinuité dans le profil des contraintes normales au niveau du plan de collage. Ce «saut» localisé est souvent interprété, à tort, comme une concentration de contraintes. Dans le domaine des petites déformations, l'élément obéit à la loi de Navier-Bernoulli (planéité des sections) et, conséquemment, les contraintes normales varient brusquement de part et d'autre de l'interface séparant deux matériaux de rigidités différentes. Il ne s'agit pas d'une concentration de contraintes, mais d'une variation subite pour satisfaire à la compatibilité des déformations. De même, contrairement à ce que prétendent certains auteurs, une différence de rigidité entre les matériaux liés n'a pas comme effet d'accroître le cisaillement au niveau du joint réparation/béton d'origine. Le profil des contraintes de cisaillement se trouve certes modifié, mais l'interface ne se voit pas plus particulièrement sollicitée.

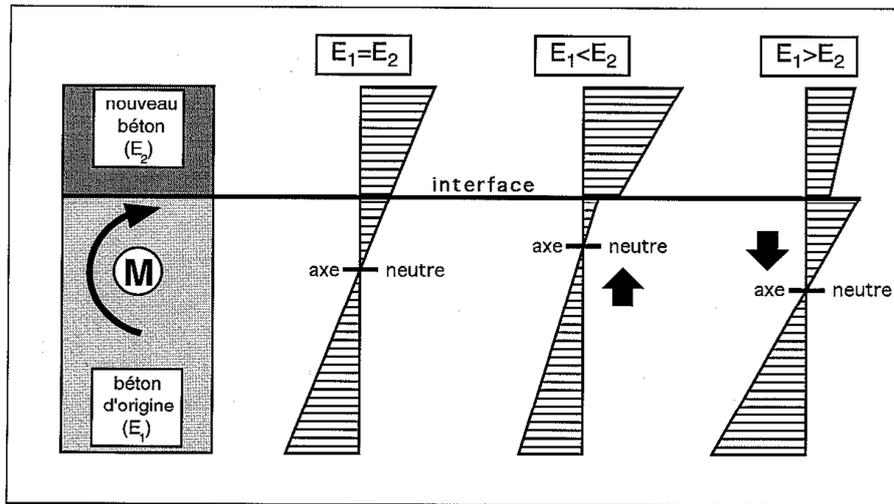


Figure 6 – Influence de la rigidité relative matériau de réparation/béton d'origine sur la répartition des contraintes normales de flexion dans un élément réparé.

Si le module d'élasticité du matériau de réparation est plus élevé que celui du support, cela a pour effet de relever le niveau de l'axe neutre et d'accroître la proportion des efforts flexionnels transmise par la réparation. À l'inverse, un matériau de réparation moins rigide que le béton original entraîne un abaissement de l'axe neutre et des contraintes moins élevées dans le resurfaçage.

Il peut donc sembler approprié, sur la base du constat précédent, d'utiliser un matériau de réparation moins rigide que le béton d'origine. On ne peut cependant, pour les matériaux cimentaires, considérer l'influence du module élastique en négligeant la résistance en traction. En effet, ce n'est pas l'intensité de la contrainte absolue qui est importante en soi, mais bien le niveau de contrainte relatif (rapport contrainte/résistance), qui définit la réserve de résistance avant l'initiation de la fissuration. Or, un béton dont le module élastique est plus élevé possède généralement une résistance mécanique, en traction comme en compression, plus élevée. La compatibilité élastique entre deux matériaux doit donc être analysée en considérant le couple module élastique/résistance en traction.

2.1.1.2 Fluage

Cette propriété du béton de ciment peut se révéler nuisible ou tout à fait souhaitable selon le type d'ouvrage considéré [9]. Dans le cas d'applications structurales (constructions neuves ou réfections), le fluage doit être très bien contrôlé et minimisé, car il peut en découler des désordres importants : chutes d'appuis, flèches excessives, pertes de précontrainte, etc.

Par contre, dans le cas de travaux de réfection superficiels, le fluage peut s'avérer bénéfique en soulageant les contraintes induites non seulement par les charges externes, mais surtout par les changements volumétriques (hydriques, thermiques) gênés. La déformation élastique ultime du béton en traction (typiquement de l'ordre de $100 \text{ à } 125 \times 10^{-6}$) est relativement faible par rapport au retrait et aux mouvements thermiques. Cela tend à renforcer la thèse selon laquelle le fluage est un facteur déterminant de la durabilité d'un recouvrement mince.

Il est important de mentionner que la compatibilité, en ce qui a trait au fluage, ne signifie nullement une similitude du comportement déformationnel différé entre le matériau de réparation et le béton d'origine. Le fluage est en soi une propriété qui accroît la compatibilité du matériau de réparation avec son support en lui permettant, à un degré plus ou moins grand, de s'adapter aux conditions de retenues et d'exposition auxquelles il est soumis.

2.1.2 Changements volumétriques

Les matériaux cimentaires sont sensibles, du point de vue déformationnel, aux conditions environnementales auxquelles ils sont exposés. Il existe deux types de changements volumétriques indépendants de l'action d'une charge externe, soit le retrait de séchage et les déformations thermiques.

2.1.2.1 Retrait

Le retrait de séchage est généralement l'aspect le plus critique à l'égard de la compatibilité déformationnelle d'une réparation. Malheureusement, cette propriété demeure mal connue, en particulier de la part des concepteurs. Le retrait de séchage est cette contraction que subit le béton lorsque son contenu en eau s'évapore vers l'extérieur, en réponse à un déséquilibre d'humidité relative (H.R.) avec le milieu ambiant ($H.R._{\text{béton}} > H.R._{\text{air}}$).

Le matériau de réparation, saturé lors de sa mise en place, tend à se contracter sous l'action progressive du séchage, alors que, généralement, le substrat se trouve dans un état d'équilibre hydrique et a atteint une certaine stabilité dimensionnelle. En raison des conditions de retenue prévalant au joint, le retrait de la couche de réparation ne se produit pas librement. Ces conditions de retrait restreint entraînent l'apparition de contraintes de traction dans la couche de réparation et, éventuellement, ces contraintes peuvent excéder la résistance du matériau et induire de la fissuration.

En plus des conditions de retenue existant à l'interface, le retrait se voit partiellement empêché du fait que la déformation ne se manifeste pas de façon uniforme sur l'épaisseur du matériau de réparation. Comme l'illustre la Figure 7, la perte en eau se produit à la surface et un gradient d'humidité transitoire s'installe dans la couche de réparation jusqu'à ce que l'équilibre hygrométrique soit atteint (l'humidité relative varie seulement dans la direction perpendiculaire à l'axe longitudinal de la réparation). Le matériau est donc soumis à un retrait différentiel et, comme le gradient d'humidité est non linéaire, des contraintes sont générées; les couches superficielles sont tendues alors que le cœur est comprimé.

Divers types de désordres peuvent découler de cet état global de retrait empêché suivant la géométrie de la réparation, l'amplitude et la cinétique du retrait, la rigidité du support, etc. Sprinkel [10], qui a étudié les resurfaçages minces à base de polymères, a répertorié trois types de dégradation pouvant résulter d'une incompatibilité thermique. Les désordres associés au retrait empêché, illustrés sur les schémas de la Figure 8 (a) à (c), sont analogues.

- **Désolidarisation de la réparation à l'interface.** Ce type de désordre peut survenir lorsque la préparation de surface est de mauvaise qualité et/ou que la résistance en cisaillement du béton d'origine et la résistance en traction de la réparation sont élevées. L'interface est incapable de transmettre les efforts internes induits par la contraction du matériau de réparation et le resurfaçage se désolidarise intégralement de son support.
- **Rupture par cisaillement dans le béton de support.** Une bonne adhérence alliée à une faible résistance en cisaillement du béton d'origine ou une fissuration préalable de ce dernier constituent des conditions propices à ce type de détérioration. Le cisaillement dans le support entraîne la délamination de la couche de réparation avec une couche superficielle du béton d'origine lui demeurant solidaire.
- **Fissuration du recouvrement perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'élément (entre les joints).** Ce type de dégradation est susceptible de se produire lorsque les résistances au cisaillement du joint et de la base sont élevées et/ou que le module d'élasticité du matériau de réparation est élevé et/ou que la résistance en traction de ce dernier est faible. La progression de la

fissuration atténuée significativement l'efficacité du resurfaçage en facilitant la migration de l'eau, des chlorures et autres agents agressifs.

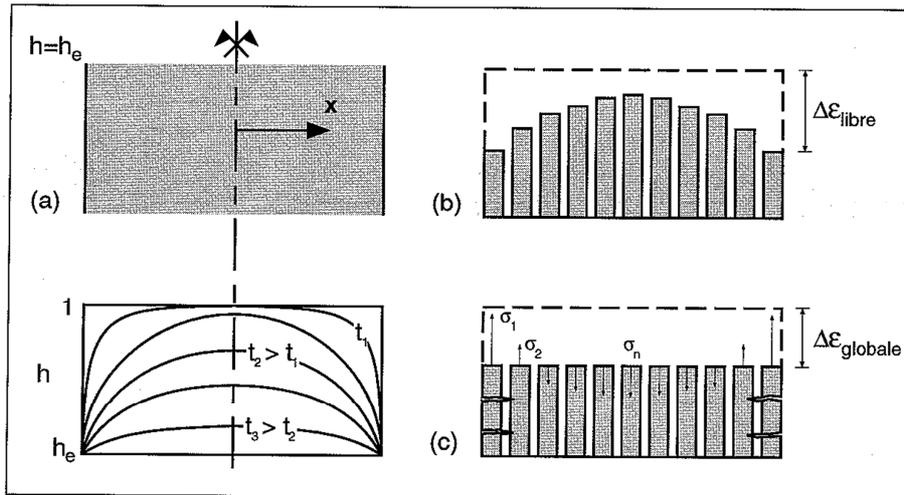


Figure 7 – Dessiccation d'un élément symétrique en béton exposé à une humidité extérieure h_e : (a) profils d'humidité en fonction du temps; (b) retrait libre des couches élémentaires pour un profil d'humidité donné; (c) retrait global, contraintes induites et fissuration de peau en résultant (d'après [9]).

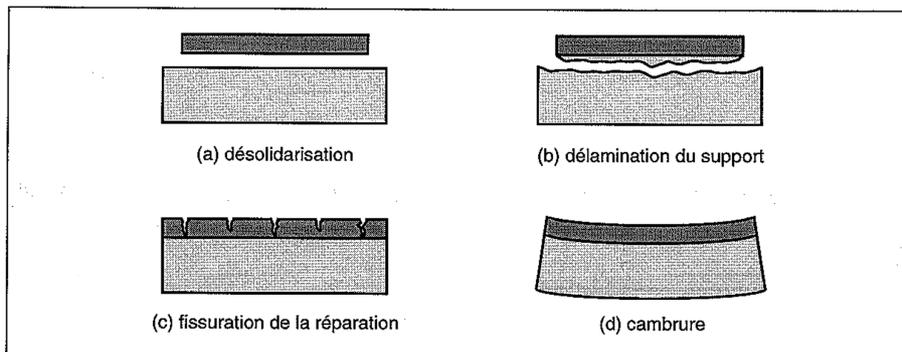


Figure 8 – Schéma simplifié des effets potentiels du retrait (ou des déformations thermiques) sur une réparation mince.

Une réparation dont les composantes sont suffisamment compatibles pour en assurer la bonne tenue subit, en raison de la contraction du resurfaçage, une cambrure (Fig. 8 (d)). Dans le cas d'un resurfaçage horizontal, l'intensité de la cambrure est maximale aux extrémités libres de l'élément et diminue au fur et à mesure qu'on s'en éloigne sous l'effet du poids propre.

Le retrait de séchage est, en raison principalement de la faible résistance en traction inhérente au matériau, l'une des propriétés les plus désavantageuses du béton de ciment [11]. Bien qu'on puisse, en faisant varier certains paramètres de composition, en influencer l'amplitude, le retrait, qui se situe typiquement entre 400 et 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$, demeure inévitable. La déformation élastique ultime du béton est généralement inférieure à 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ et on pourrait donc être tenté de conclure qu'un resurfaçage mince en béton de ciment se détériorera inévitablement à court ou moyen terme. Cette hypothèse simpliste néglige cependant un phénomène fondamental : les efforts internes induits par les variations volumétriques sont en partie relaxés par fluage. La compatibilité déformationnelle doit donc être considérée de façon globale, sur la base du bilan déformationnel effectif, et non en analysant isolément chacune des composantes. Pour des informations plus détaillées relativement aux

phénomènes de retrait restreint et de fluage dans le béton, le lecteur pourra consulter des documents de référence publiés récemment [12, 13].

2.1.2.2 Déformations thermiques

La compatibilité thermique est une autre caractéristique déterminante d'une réparation, en particulier dans un climat caractérisé par d'importantes amplitudes de température. Les problèmes associés aux changements volumétriques d'origine thermique peuvent découler d'une différence de comportement ou de la présence d'un gradient de température dans l'ouvrage.

Un écart significatif entre les coefficients de dilatation thermique du matériau de réparation et du béton d'origine engendre, sous sollicitation thermique, des contraintes internes dans la réparation, notamment à l'interface. L'intensité des contraintes dépend de la variation de température et de l'importance de l'écart entre les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux. Les désordres potentiels associés à une incompatibilité thermique sont similaires à ceux qui ont été identifiés précédemment pour le retrait (Fig. 8). La nature cyclique des sollicitations thermiques et le taux de variation de température sont deux facteurs pouvant accélérer le processus de dégradation.

Le coefficient de dilatation d'un béton ordinaire est largement tributaire de la nature du granulat. Lorsque le resurfaçage est réalisé avec un béton ordinaire, il est donc souhaitable d'utiliser un granulat de même nature que le granulat du béton à réparer ou, à tout le moins, possédant des propriétés thermiques similaires. Le cas des bétons polymères est souvent plus problématique, car leur comportement thermique peut différer sensiblement de celui du béton conventionnel.

Indépendamment de la compatibilité thermique des matériaux liés, les gradients de température qui existent dans l'élément à certaines périodes de l'année peuvent en soi se révéler très défavorables. Par exemple, en hiver, lors de périodes de redoux, la température à la surface d'une dalle peut atteindre 15 °C alors que la base est à -5 °C. Au même titre qu'un gradient hydrique, un gradient de température induit des contraintes internes dans le matériau puisque la déformation de chaque couche élémentaire ne peut se produire librement (Fig. 7).

Dans le cas des réparations minces, la chaleur d'hydratation ne constitue pas un problème, car elle est dissipée assez rapidement. En effet, dans une pièce de béton de 500 mm ou moins d'épaisseur, la vitesse de dégagement de la chaleur d'hydratation et la vitesse de diffusion de celle-ci vers le milieu ambiant sont comparables [14]. Lorsque l'épaisseur de l'élément est inférieure à environ 300 mm, les fissures d'origine thermique (associées à la réaction d'hydratation du ciment) sont virtuellement inexistantes, ce qui signifie que les contraintes internes générées sont très faibles.

À ce sujet, il est intéressant d'ouvrir une parenthèse au sujet de la différence fondamentale qui existe, du point de vue hydrique et thermique, selon que les dimensions de l'élément sont petites ou importantes. Pour un ouvrage dont la plus petite dimension est inférieure à 300 mm, les contraintes induites par le dégagement de la chaleur d'hydratation sont peu élevées et rapidement dissipées. En revanche, le séchage atteint, à plus ou moins longue échéance, le cœur de l'élément et le gradient interne d'humidité peut générer des contraintes suffisantes pour en provoquer la fissuration.

Dans le cas d'un béton de masse, le problème est inversé. Lorsque la plus petite dimension d'une pièce excède environ 500 mm, la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation du ciment entraîne une élévation sensible de la température du matériau pouvant atteindre plus de 50 °C par rapport à la température initiale [14]. La prise se produit alors à chaud et, lors du refroidissement, la contraction du matériau est gênée d'une part, au niveau des reprises de bétonnage, par les zones adjacentes

plus rigides et, d'autre part, en raison du gradient de température existant au moment de la prise. Cette contraction gênée induit un état de contraintes et, pour une épaisseur excédant approximativement 800 mm, la fissuration est généralement inévitable. À l'opposé, le séchage affecte peu les éléments massifs. Un gradient d'humidité important affecte nécessairement les premiers centimètres et peut entraîner une fissuration de peau, mais, en raison de la lenteur du phénomène de diffusion, l'humidité relative au-delà de cette zone peut demeurer très élevée (> 90 %) pendant une période outrepassant la durée de vie utile de l'ouvrage.

2.2 Compatibilité des perméabilités

L'objectif d'un resurfaçage consiste généralement à redonner à l'ouvrage endommagé une protection adéquate, particulièrement contre la pénétration d'agents agressifs. La perméabilité du matériau de réparation est, à ce titre, une propriété très importante.

Selon une règle de bonne pratique relativement répandue dans le domaine des réparations, il est souhaitable, voire essentiel, d'utiliser un matériau de réparation très peu perméable. Cependant, cela est souvent faux et, dans certains cas, cela peut même avoir pour effet d'accroître la dégradation de l'ouvrage [8]. Le recouvrement partiel d'un ouvrage détérioré par les sels fondants avec un matériau de très faible perméabilité (ex. béton modifié au latex) constitue un exemple typique de cette situation. Si la source de pénétration des sels et de l'humidité n'est pas complètement éliminée, les chlorures peuvent poursuivre leur migration dans le support vers l'acier d'armature et se trouvent emprisonnés par la couche superficielle «imperméable». Il peut en résulter une attaque encore plus sévère de l'acier et, conséquemment, accélérer et intensifier la détérioration de l'ouvrage.

Le recouvrement avec un matériau très étanche d'un ouvrage en contact permanent avec une source d'humidité, par exemple une dalle au sol, favorise la saturation du support. Cet état de saturation rend l'ouvrage vulnérable aux cycles de gel-dégel, d'autant plus si le réseau de bulles d'air du béton d'origine est inadéquat. De plus, l'interface entre le béton d'origine et un matériau de réparation très peu perméable constitue une barrière physique où l'eau peut s'accumuler et, lors du gel, le joint est susceptible d'éclater [15]. Selon eux, la différence de pression de vapeur de part et d'autre du joint est susceptible d'en provoquer la rupture et il serait avantageux d'utiliser un matériau imperméable à l'eau, mais non pare-vapeur. Il est possible, aussi, que la différence de perméabilité puisse engendrer, lors du gel, un gradient hydraulique très défavorable au niveau du joint [16].

Les problèmes reliés aux chlorures et au gel démontrent qu'il est inapproprié, dans bon nombre de situations, d'utiliser un matériau de réparation très étanche dont la perméabilité est incompatible avec celle du support. De plus, il est important de mentionner que les désordres pouvant en découler, tels la fissuration ou le décollement du recouvrement, annihilent la nature protectrice de la réparation. La fissuration peut en effet jouer un rôle plus important, face à la perméabilité et la durabilité, que la perméabilité intrinsèque du matériau de réparation.

Il apparaît clair que le critère de faible perméabilité, sans égard aux propriétés du béton d'origine, est à proscrire, à tout le moins en ce qui concerne les réfections de nature protectrices. Le choix d'un matériau de réparation doit être fondé non seulement sur sa durabilité inhérente, mais aussi sur sa compatibilité, du point de vue de la perméabilité, avec le béton d'origine.

2.3 Compatibilités chimique et électrochimique

Les compatibilités chimique et électrochimique sont deux autres aspects qui nécessitent d'être analysés dans la conception d'une réparation. Notons que le terme «compatibilité», en ce qui a trait aux problèmes de nature chimique et

électrochimique, n'est pas nécessairement approprié, mais on l'utilise tout de même à défaut d'une expression plus juste. La compatibilité signifie dans ces cas que les propriétés du matériau de réparation doivent être telles que l'intervention permette d'enrayer ou, du moins, stabiliser le (ou les) phénomène(s) à l'origine du problème.

2.3.1 Compatibilité chimique

Lors du choix d'un matériau de réparation, divers paramètres de composition ou propriétés exigent une attention plus particulière à l'égard de la compatibilité chimique, notamment la teneur en alcalins, la teneur en C_3A , la teneur en chlorures, etc. Cela est d'autant plus essentiel lorsque la détérioration de l'ouvrage est d'origine chimique.

Les paramètres critiques dépendent évidemment de la nature des détériorations subies par le béton à réparer. Par exemple, pour la réfection d'un ouvrage atteint de réactions alcalis-granulats, le contenu en alcalins du matériau de réparation doit être méticuleusement contrôlé. Lorsque les sulfates sont à l'origine des problèmes, un matériau à faible teneur en C_3A et autres aluminates doit être spécifié.

Ainsi, la compatibilité chimique d'une réparation présuppose une évaluation précise de la (ou des) cause(s) des désordres et une connaissance adéquate des interactions possibles entre le matériau de réparation et le béton original.

2.3.2 Compatibilité électrochimique

La corrosion de l'acier d'armature demeure l'une des principales sources de détérioration des structures en béton de ciment. L'aspect électrochimique doit donc être pris en compte dans tous les cas de réparation d'ouvrages en béton armé.

La corrosion de l'acier dans le béton est un phénomène électrochimique qui peut survenir lorsque des conditions différentielles «favorables» existent en des régions distinctes à la surface de l'acier : différences de pH, différences de concentrations en chlorures ou en oxygène, humidité ou température différentielle [8]. La fissuration du recouvrement de béton favorise la mise en place des conditions nécessaires à la création d'une pile de corrosion (Fig. 9) en facilitant le transport d'eau, d'oxygène et de chlorures vers l'acier. Ces zones où l'oxygène et l'eau ont accès à la surface des barres d'acier, même très localisées, constituent la cathode de la pile.

Le processus de corrosion peut être enrayeré en scellant la zone cathodique de façon à empêcher l'oxygène ou l'eau d'y accéder. Les deux substances sont essentielles à la réaction cathodique. Une autre solution consiste à assécher la pile à n'importe quel endroit entre l'anode et la cathode, l'eau étant nécessaire au transport des ions. Les mesures précédentes apparaissent simples en théorie, mais la réalité est tout autre. La corrosion de l'acier dans le béton est un phénomène extrêmement complexe impliquant plus d'un mécanisme. Entre autre, le rôle des chlorures dans le processus demeure nébuleux. La complexité du problème dans son ensemble se révèle par les contradictions qu'on retrouve dans littérature sur le sujet et qui peuvent parfois conduire le concepteur à préconiser des actions inappropriées [18]. Pour davantage d'information sur le sujet, le lecteur est invité à consulter une revue exhaustive produite récemment [19].

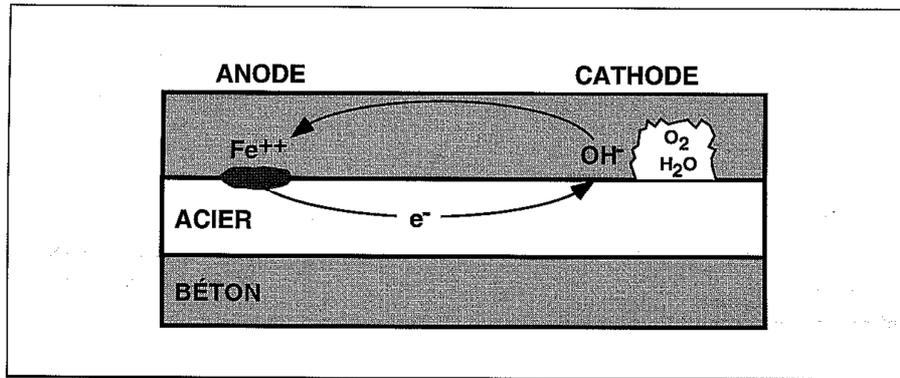


Figure 9 – Représentation d'une pile de corrosion dans le béton [17].

3 Matériaux de réparation pour le béton

Il existe une large variété de matériaux disponibles pour la réparation des ouvrages en béton, des matériaux cimentaires (CC) usuels s'apparentant au béton d'origine aux matériaux à base de polymères (PC), en passant par les matériaux cimentaires modifiés avec des polymères (PCC). Le choix entre un mortier ou un béton de l'une de ces catégories dépend de plusieurs facteurs, dont les conditions de mise en oeuvre, les conditions d'exposition et les conditions d'utilisation de l'ouvrage. La décision quant à elle d'opter pour un mortier ou un béton dépend essentiellement de la profondeur à réparer. De façon générale, on a avantage à opter pour le calibre de granulats le plus gros compatible avec la géométrie de la réparation, de manière à minimiser la quantité de pâte et/ou résine et réduire les risques de fissuration thermique et hygrométrique.

3.1 Mortiers à base de ciment modifiés ou non par des polymères

3.1.1 Introduction

Les mortiers et bétons ordinaires à base de ciment Portland (CC), d'eau et de granulats sont très souvent utilisés comme matériaux de réparation. Suivant les besoins du projet et spécificités de l'ouvrage à réparer, on utilisera des adjuvants (fluidifiants, agents viscosants, entraîneurs d'air, accélérateurs / retardateurs de prise, inhibiteurs de corrosion, réducteurs de retrait, etc.) et ajouts cimentaires (fillers calcaires, fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut-fourneau, pouzzolanes naturelles) pour obtenir ou améliorer certaines propriétés. Dans tous les cas, les bétons et mortiers doivent être conçus de manière à en maximiser la compatibilité avec le béton d'origine.

Dans les mortiers et bétons à base de ciment modifiés par des polymères (PCC), ces derniers sont normalement ajoutés au ciment à raison de 0,05 à 0,20 kg de polymère pur par kilogramme de ciment et cette quantité est généralement spécifiée par le rapport P/C :

$$P/C = \text{masse de polymère} / \text{masse de ciment}$$

Généralement, les polymères se présentent en dispersion ou en émulsion à 50 % en masse de polymère dans l'eau. De ce fait, si le rapport polymère/ciment est, par exemple, égal à 0,2, la dispersion sera introduite dans le mélange à raison de 0,4 kg de dispersion par kg de ciment. De plus, l'eau accompagnant le polymère pourra servir à l'hydratation du ciment et devra être prise en compte dans le calcul de la quantité d'eau de gâchage.

Les additifs de type polymère modifient les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques des bétons tandis que l'adjonction de fibres métalliques ou autres n'en

modifie que les caractéristiques mécaniques. De plus, les polymères améliorent la qualité des jonctions des mortiers et bétons frais avec les surfaces existantes et l'un de emplois les plus répandus des PCC est la réparation et le resurfaçage des bétons existants.

Il existe un grand nombre d'additifs polymériques, que l'on peut classer en trois catégories : latex, résines liquides et polymères solubles dans l'eau.

Les latex sont de loin les plus utilisés : c'est la raison pour laquelle nous développerons surtout leur description ci-après.

3.1.2 Mortiers de ciment de polymères – latex

3.1.2.1 Comportement général des latex

Les latex sont les adjuvants polymères les plus répandus pour les bétons (Fig. 10). Ils sont constitués d'une dispersion de particules de polymère dans de l'eau.

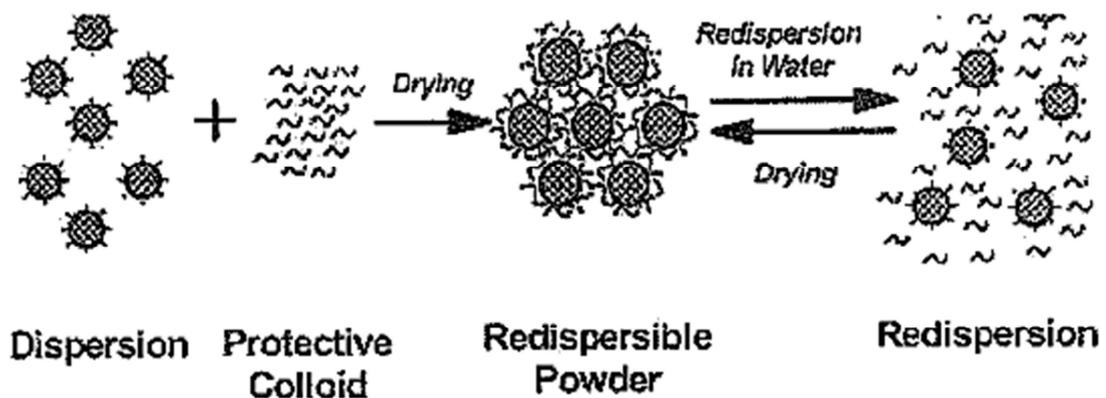


Figure 10 – Principes de stabilisation d'un latex.

Les polymères-latex sont en général des élastomères (caoutchouc) ou des thermoplastes amorphes (Fig. 11). Les taux de dispersion approchent habituellement 50%. Les latex sont produits par polymérisation dans l'eau d'une émulsion du monomère liquide.

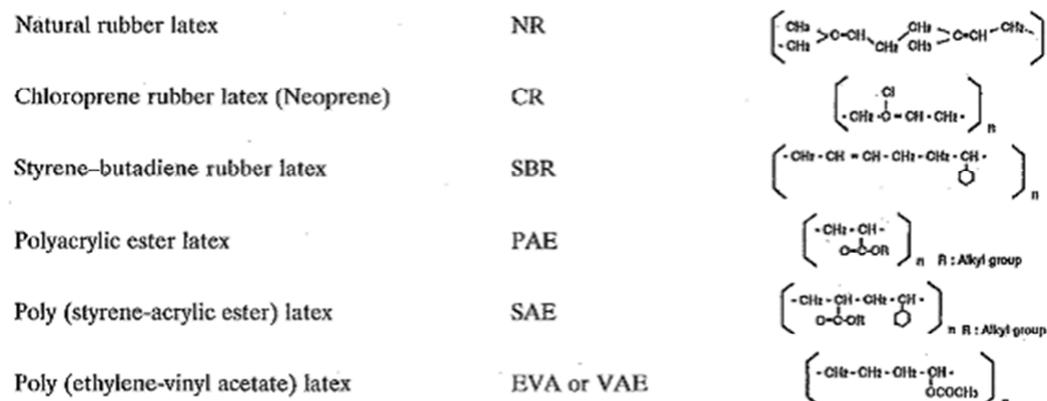


Figure 11 – Structure chimique des principaux types de polymères latex [20].

Les polymères de type élastomères les plus employés dans ces latex sont :

- le caoutchouc naturel;
- le styrène butadiène (SBS);
- le polyacrylonitrile (PAN);
- le butadiène;
- le polychloroprène.

Les polymères thermoplastiques les plus utilisés sont :

- le polyvinyle acétate, ou copolymère de vinyle acétate avec un monomère comme le chlorure de vinyle, le chlorure de vinylidène
- le polystyrène ou copolymère de styrène avec différents monomères acrylate;
- le PVC ou copolymère de chlorure de vinyle avec des monomères tels que le chlorure de vinylidène;
- les polyacrylates et leurs copolymères.

Historiquement, les premiers latex ont été utilisés dans les années 1930 et étaient composés de caoutchouc naturel. Dans la décennie suivante, les acétates de polyvinyle ont été employés de manière importante pour le resurfaçage des sols en béton. L'acétate de polyvinyle donne de meilleurs résultats que le caoutchouc naturel et il est encore fortement employé de nos jours. Il a par contre une durabilité discutable. Dans les années 1960, des latex à base de polymères thermoplastiques comme les acryliques et les chlorures de vinylidène ont prouvé une meilleure durabilité.

Actuellement, des latex élastomères comme les styrène-butadiène (SBS) sont largement employés. Ils ont une durabilité moindre que les thermoplastiques mais ils coûtent moins cher et induisent des propriétés uniques comme une meilleure résilience et une déformabilité plus grande pour les mortiers.

L'effet du latex sur les propriétés des mortiers en béton augmentera avec la dose de polymère ajouté, mais en général le rapport P/C se situe en pratique entre 0,1 et 0,2. Lorsque les latex sont mélangés aux mortiers et bétons, les particules de polymère se dispersent dans la pâte de ciment. Pendant l'hydratation du ciment, l'eau de la dispersion est en partie consommée dans les réactions chimiques d'hydratation et le polymère forme alors une espèce de membrane dans la structure poreuse de la pâte de ciment hydraté (Fig. 12). Ces membranes sont comparables aux films se formant lorsque le latex est exposé à l'air et sèche. Il importe de mentionner que les particules de polymère dans un latex, dont la taille est de l'ordre de 500 à 5000 Å, emplissent seulement partiellement la porosité de la pâte de ciment hydraté, dont la dimension des pores varie entre seulement quelques angströms et plusieurs centaines de angströms.

Dès lors, seulement les pores les plus larges de la pâte à ciment seront pénétrés et remplis par les films de polymère. Le latex diminue la perméabilité de la pâte et augmente de ce fait la résistance aux attaques chimiques. En général, le degré d'absorption d'eau diminue lorsque la teneur en polymère dans le mélange augmente (Fig. 13).

L'effet de colmatage des latex augmente également la résistance au gel des pâtes à ciment. Le taux de transmission de vapeur est également fortement diminué : la vitesse de transmission de la vapeur d'eau d'un mortier peut être réduite de 20 à 30 unités jusqu'à 2 à 5 unités par addition d'un latex butadiène-styrène avec un rapport massique Polymère/Ciment de 0,15.

Les films de latex dans la pâte à ciment augmentent également la cohésion de la pâte à ciment ainsi que l'interface « pâte-agrégat ». On considère généralement que la pâte à ciment est un agglomérat de silicates calciques hydraté, maintenu par les forces de Van der Waals. Dès lors, des microfissures se produisent très tôt dans cette structure lorsque des contraintes se manifestent. Ces fractures se propagent et conduisent à de très faibles résistances mécaniques. On observe que les films de latex pontent ces microfissures et réduisent leur formation et leur propagation (Fig. 14). Il en résulte de meilleures résistances des composites à base de ces produits.

Les jonctions sont également meilleures entre les mortiers et bétons modifiés au polymère et des surfaces existantes en béton. Dès lors, beaucoup d'emplois de latex sont en rapport avec les problèmes de resurfaçage de structures en béton existantes. En pratique, les surfaces à réparer sont sablées et nettoyées à l'aide

d'une solution acide. Toutes les particules de poussières doivent être enlevées au risque de voir diminuer la résistance des jonctions. Il a également été prouvé que de meilleures jonctions sont obtenues lorsque la surface de béton à couvrir a été humidifiée avant dépôt des matériaux d'apport. Si ces précautions sont prises, on peut arriver à des jonctions plus résistantes que la cohésion de l'ancien béton. En fait, on peut obtenir une surface réparée qui est imperméable, résistante et bien soudée à l'ancienne surface.

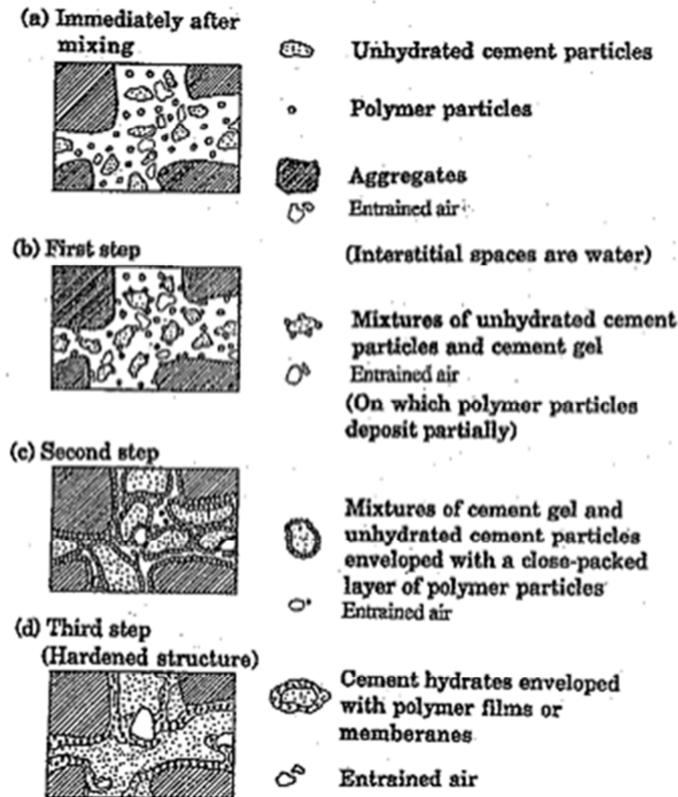


Figure 12 – Modèle simplifié de formation du complexe polymère – ciment hydraté [20].

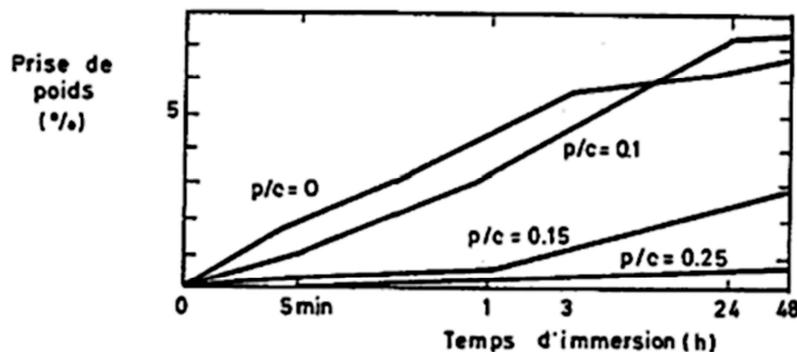


Figure 13 – Absorption d'eau par un ciment chloroprène maintenu dans l'atmosphère à 50% H.R. avant mesure, en fonction du rapport Polymère/Ciment.

L'emploi le plus commun des additifs latex pour mortier de réparation est le resurfaçage d'éléments en béton (Fig. 15), notamment les revêtements de tabliers, dalles routières et sols industriels. L'adjonction du latex se fait sur place dans le mixer. Il est préférable de mélanger d'abord le ciment et le sable et d'ajouter ensuite l'eau et le latex. Les propriétés du mélange frais varieront de manière importante en fonction de l'ordre dans lequel le latex et l'eau seront introduits. Si le latex est

introduit avant l'eau, le mélange sera moins ouvrable que dans le cas contraire. Cet effet est probablement dû au fait que le latex développe des caractéristiques thixotropes s'il est séché de manière brutale par absorption dans un matériau sec. Il est dès lors recommandé d'ajouter successivement l'eau, puis le latex. Comme noté précédemment, l'eau contenue dans le latex doit être prise en compte dans le calcul de la quantité d'eau de gâchage.

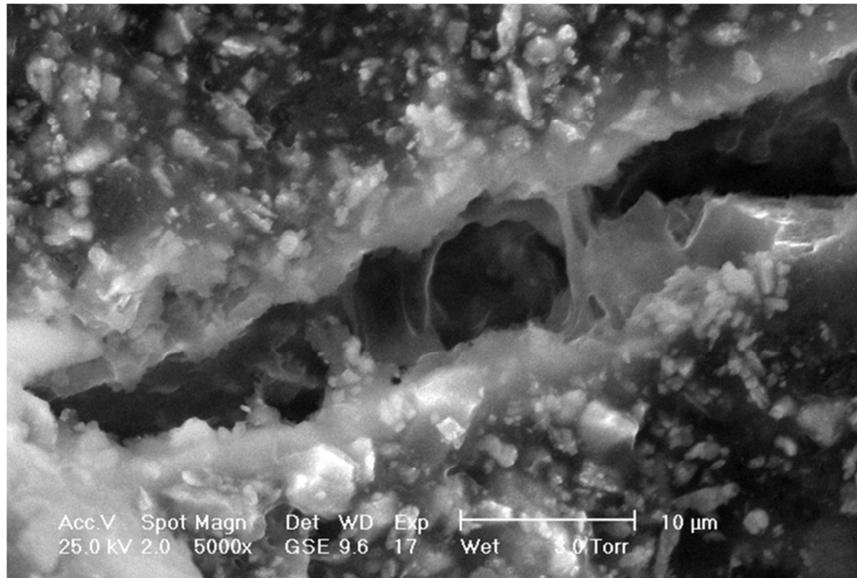


Figure 14 – Effet des polymères sur la liaison entre mortiers [21].



Figure 15 – Resurfaçage d'éléments en béton (dalle de sol) [<http://www.cimentme.com>].

Les mortiers modifiés au latex peuvent être mis en œuvre par les procédés classiques, par exemple, dans un mixer rotatif ou à la main. Malgré cela, ils ont tendance à mousser lorsqu'on les agite; dès lors, des agents anti-moussants, comme les huiles de silicone, sont ajoutés. La quantité d'agents anti-moussants est d'environ 1 % de la masse de polymère pur.

Des agents entraîneurs d'air ne peuvent être ajoutés à ces mélanges parce qu'ils sont incompatibles avec les latex.

La procédure de maturation est différente pour les mortiers additionnés de résine que pour les mortiers normaux car le latex ne peut sécher. La méthode la plus simple est d'assurer le contact du mortier avec de l'air sec. Le latex formera immédiatement un film en surface et emprisonnera l'eau du mélange. Cette eau sera dès lors utilisée pour l'hydratation du ciment et, de ce fait, le latex formera un film en trois dimensions

dans la pâte à ciment. Cette méthode de maturation donne satisfaction mais il est préférable de maintenir le mortier en saturation d'eau pendant deux jours et de le mettre ensuite en contact avec l'air sec. Ceci permet une bonne hydratation du ciment et conduit à de meilleures propriétés. Pour les deux méthodes de maturation, il est recommandé que le mortier soit séché à l'air pendant au moins 7 jours de manière à permettre au film de latex de se former. Habituellement, la résistance du mortier atteindra à ce moment environ 75 % de sa résistance ultime. Si l'on souhaite une maturation rapide, le mortier peut être chauffé à 50 – 70 °C pendant environ 5 heures, mais cela mène à des résistances plus faibles car le ciment ne sera pas complètement hydraté. Par exemple, la résistance à la compression d'un mortier sera réduite de 20 % par cette méthode de maturation. Nonobstant, cette méthode de maturation peut être un avantage dans le cas de la réparation de routes en béton pour lesquelles le trafic doit être rétabli rapidement.

3.1.2.2 Propriétés mécaniques des mortiers modifiés au latex

En général, les latex thermoplastiques ont une plus grande influence sur les résistances mécaniques que les latex élastomères. Le Tableau 1 montre quelques propriétés de mortiers modifiés avec deux types de latex :

- le styrène butadiène, qui est un élastomère;
- le chlorure de vinylidène, qui est un polymère thermoplastique.

Tableau 1 – Propriétés mécaniques de mortiers modifiés avec des latex styrène-butadiène et chlorure de vinylidène.

Propriétés	Styrène - butadiène			Chlorure de vinylidène			Contrôle
	10	15	20	15	20	25	
Teneur en latex (% en masse)	10	15	20	15	20	25	0
Résistance en compression (MPa)	27,6	28,5	33,1	42,6	58,3	66,6	30,9
Résistance en traction (MPa)	4,3	5,5	6	5,7	6,3	6,9	2,6
Résistance en flexion (MPa)	7,8	11,2	11,9	12,1	12,5	13,1	5,7
Module d'élasticité (MPa)	-	13,2	10,8	-	17,3	15,5	23,5
Adhérence en cisaillement (MPa)	4,3	4,5	4,4	4,5	4,6	4,5	0,35 - 1,38

Ces valeurs sont données pour des mortiers ayant subi une maturation de 28 jours à 22 °C et à 50 % d'humidité relative.

On remarquera que les mortiers modifiés au latex ont de meilleures résistances mécaniques que ceux traités au styrène butadiène, pour le même rapport massique polymère/ciment. Dans chaque cas, les résistances augmentent avec le rapport polymère/ciment, mais cela est vrai pour des valeurs de ce rapport jusqu'à 0,25 à 0,30 : au-delà, les contraintes diminuent. La raison en est probablement que, jusqu'à ces valeurs, le polymère remplit les vides de la structure du ciment; au-delà, le polymère doit créer des discontinuités de la structure du ciment et ainsi diminuer les résistances.

En pratique, le rapport polymère/ciment est limité à 0,25. Les valeurs de P/C sont en tout cas supérieures à 0,05 car, en-deçà de cette valeur, le latex ne modifie pas les caractéristiques des mortiers [34].

La forte cohésion des mortiers modifiés aux polymères provient de la forte liaison entre la pâte de ciment modifiée et les grains de sables (Fig. 16). Les deux types de latex mentionnés au Tableau 1 induisent de plus grandes adhérences des mortiers traités avec les mortiers existants. Les résistances au cisaillement de 4,46 MPa indiquent que l'adhérence du mortier modifié au mortier normal est plus grande que la résistance au cisaillement de ce dernier.

Le même raisonnement peut être tenu en adhérence-traction. Il est, par ailleurs, prouvé que l'adhérence des mortiers modifiés au latex augmente jusqu'à un rapport polymère/ciment de 0,2 à 0,25 après quoi, toute augmentation de ce rapport n'a plus

d'effet. A l'autre extrême, des rapports massiques P/C inférieurs à 0,10 ne modifient pas l'adhérence des mortiers.

En pratique, on aura donc $0,10 < P/C < 0,20$, aussi bien pour obtenir de bonnes résistances mécaniques qu'une adhérence suffisante.

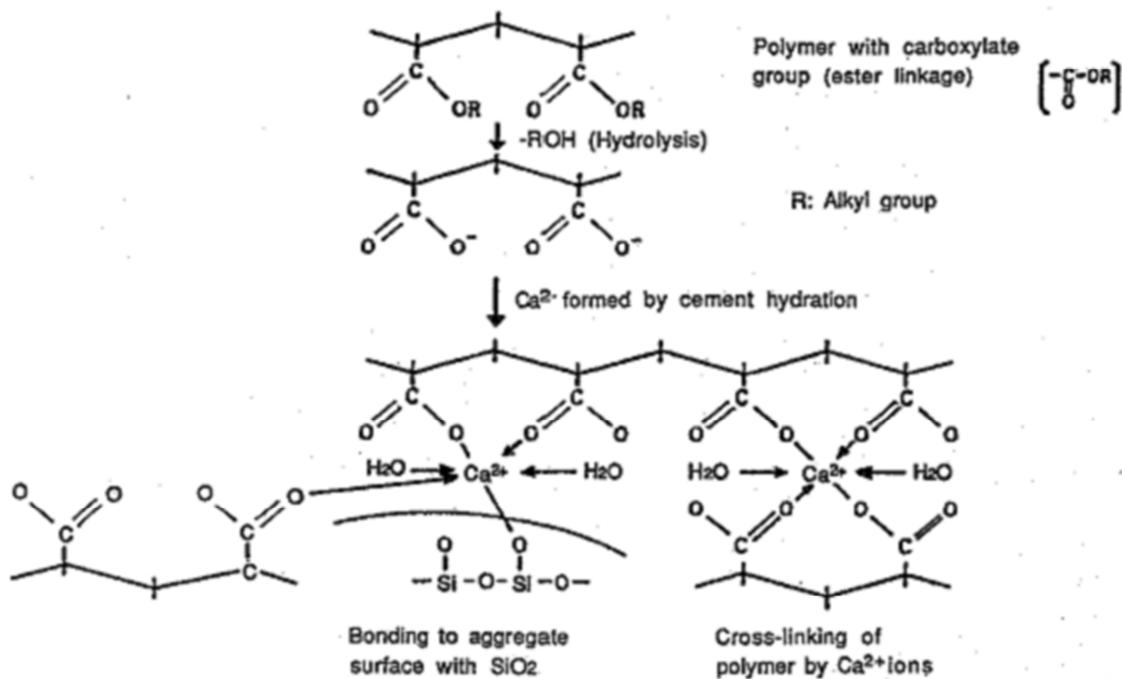


Figure 16 – Illustration schématique de la réaction d'un polymère avec un groupe carboxylique (lien ester) et le grain de ciment ou le granulat.

Les mortiers modifiés sont moins rigides que les mortiers non modifiés. Ce phénomène augmente avec le rapport massique P/C et est plus prononcé avec le latex butadiène styrène. Ceci peut être un désavantage pour certaines applications. Par contre, la résilience, et donc la résistance aux chocs, seront plus grandes. On peut visualiser cet accroissement de résilience sur la Fig. 17 : il se manifeste par une diminution du rapport $\sigma_{\text{rupture}} / \varepsilon_{\text{rupture}}$ lorsque P/C augmente.

La plupart des latex ont un effet plastifiant sur les mélanges frais. Ceci augmente l'ouvrabilité et, de ce fait, provoque une diminution du rapport E/C à employer et, en corollaire, de plus grandes résistances à ouvrabilité égale. Par exemple, l'addition d'un latex polychloroprène à un mortier avec un P/C de 0,15 permet une réduction de 40 % du rapport E/C sans diminution d'ouvrabilité.

Une autre propriété des mortiers modifiés au latex est une plus grande résistance à l'usure. Celle-ci augmente avec le rapport massique P/C. Par exemple, pour un mortier modifié avec un vinyle acétate, si $P/C = 0,05$, sa résistance à l'abrasion est multipliée par 2 et si $P/C = 0,15$, elle est multipliée par 20. C'est une des raisons principales de l'emploi de ces mortiers comme produit de surfacage de sol.

Le retrait des latex modifiés peut être plus grand ou plus faible que celui des mortiers modifiés. Cela dépend du type de polymère et du rapport P/C. Les latex thermoplastiques augmentent généralement le retrait. Par exemple, un additif d'acétate de polyvinyle peut augmenter le retrait d'un facteur 5 à 10.

Les latex élastomères diminuent généralement le retrait mais uniquement si le rapport P/C est important. Par exemple, un styrène butadiène pour lequel $0,10 < P/C < 0,20$ réduit le retrait de plus de 20% par rapport au cas où $P/C = 0,05$.

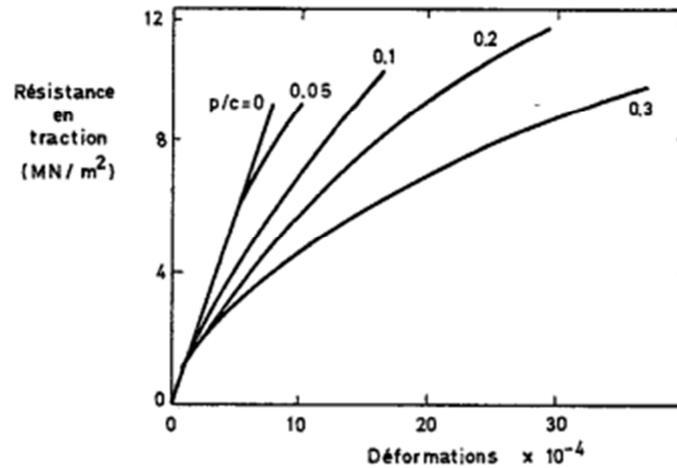


Figure 17 – Courbe contraintes/déformations pour des mortiers modifiés avec un latex d'acétate de polyvinyle [22].

Enfin, les mortiers modifiés au latex sont plus susceptibles à la température que les mortiers ordinaires. A haute température, le fluage augmente et les résistances mécaniques ainsi que la rigidité diminuent. Les effets sont détectables à la fois avec les latex thermoplastiques et élastomères.

Cet effet se fait d'autant plus sentir lorsque l'on utilise des thermoplastes dont la température de transition se trouve au-dessus de la température normale de 23 °C. A cette température, ces polymères perdent leurs caractéristiques mécaniques. Habituellement, les mortiers modifiés voient diminuer leurs modules d'élasticité et leur adhérence de 50 % à 45 °C. Ceci a toute son importance lorsque ces produits peuvent être chauffés de manière naturelle (par exemple par le soleil).

3.1.2.3 Durabilité des latex

Il est maintenant bien connu que les latex imperméabilisent les mortiers et diminuent fortement leur perméabilité en fonction du rapport P/C. Si le polymère reste stable, la durabilité de la pâte à ciment vis-à-vis des agents agressifs sera d'autant plus grande. Par exemple, la résistance au gel/dégel sera augmentée par suite de la plus faible pénétration de l'eau dans la structure du produit.

Les latex élastomères seront attaqués par les solvants puissants. Ces attaques peuvent être très rapides. Le polymère va gonfler et, dans certains cas, il sera complètement dissout par le solvant. Bien sûr, il y a de nombreuses applications où les solvants sont absents et où les latex fonctionnent normalement.

Certains types de latex thermoplastiques ont des durabilités discutables. Par exemple, les acétates de polyvinyle réagiront avec les alcalis de la pâte à ciment en présence d'eau. Par ailleurs, certains latex comme les copolymères de chlorure de vinylidène présentent de très bonnes résistances à l'eau et aux solvants. Ils sont dès lors employés pour le surfacage des sols des industries chimiques. Les latex acryliques ont également une très bonne résistance à la plupart des solvants mais ils perdront de manière réversible une partie de leur résistance en présence d'eau.

Une autre question importante est l'effet des latex sur la corrosion des armatures métalliques. En général, la vitesse de corrosion est diminuée par suite de l'alcalinité de la plupart des latex (pH ≈ 10). Par ailleurs, l'imperméabilisation de la pâte à ciment aura un effet bénéfique sur la vitesse de corrosion.

Les latex peuvent être employés d'une manière tout à fait différente pour diminuer la corrosion, en les employant comme peinture des armatures avant leur mise en présence du béton.

On emploie encore les latex dans les bétons moussés. Ces bétons étant plus poreux, les sels agressifs peuvent pénétrer la structure plus rapidement. Les latex ralentissent fortement cette tendance.

3.1.3 Mortiers de ciment de polymères – éthers celluloses

3.1.3.1 Comportement général

Les éthers celluloses sont des polymères dérivés de la cellulose (maillons d'anhydroglucose réunis par une liaison glycosidique) et solubles dans l'eau. La cellulose en tant que telle n'étant pas soluble dans l'eau, la substitution des groupes hydroxyles sur la chaîne de cellulose modifie cette propriété. Cette solubilité dépend de la longueur de la chaîne, de la nature, du nombre et de la répartition de ces groupements (Fig. 18).

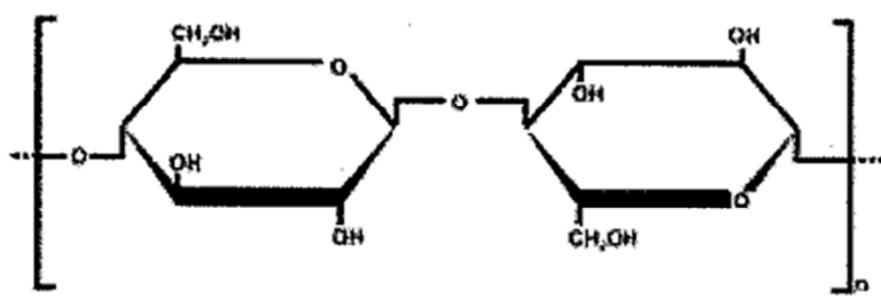


Figure 18 – Maillon de cellulose [23].

Ils sont employés dans l'agroalimentaire, les cosmétiques, le domaine pharmaceutique, les peintures et, dans une moindre mesure, la construction. On les retrouve comme agents rétenteurs d'eau et agents épaississants : ils contribuent à l'ajustement de la rhéologie des produits. Ils font généralement chuter le module de Young et la densité. Ce sont aussi des agents entraîneurs d'air : le volume poreux augmente, ce qui permet la création de réserves d'eau. Ils améliorent la résistance à la fissuration et permettent de contrôler le retrait par leur effet retardant ou rétenteur d'eau. Ils forment des films forts et flexibles dans la structure du mortier, ce qui lui confère une meilleure adhérence quand il est appliqué sur un support.

3.1.3.2 Methyl-hydroxyethyl-cellulose MHEC et Methyl-hydroxypropyl-cellulose MHPC

Les groupes hydroxyéthyl du MHEC (Fig. 19) et hydroxypropyl du MPHPC (Fig. 20) sont hydrophobes. Ces derniers engendrent une activité superficielle et des caractéristiques d'hydratation-déshydratation particulièrement importantes.

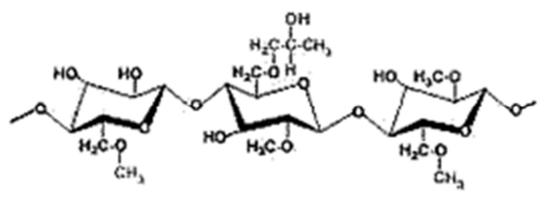


Figure 19 – Formule semi-développée d'un motif de MHPC [23].

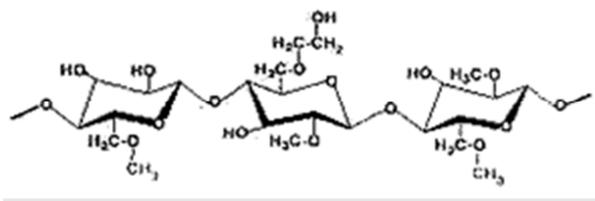


Figure 20 – Formule semi-développée d'un motif de MEPC [23].

Leur structure très riche en fonctions hydroxyle (-OH) leur permet de créer des interactions avec les molécules d'eau par le biais de liaisons hydrogènes.

Dans l'eau, ils peuvent se trouver sous forme de gels plus ou moins visqueux selon leur concentration dans le milieu et la température. C'est grâce à cette formation de gel que l'ajustement de la rhéologie et de la maniabilité du mortier est possible. Cela engendre aussi la propriété de rétention d'eau, empêchant un départ d'eau trop rapide, en particulier si le mortier est appliqué sur support poreux. Par ailleurs, plus la masse moléculaire de l'éther cellulosique est importante, plus la chaîne de polymère est longue et par conséquent plus la possibilité de réaliser des liaisons avec l'eau est grande : il en résulte une plus grande rétention en eau [23].

La formation du film de polymère peut aussi expliquer cette propriété. En effet, le MHEC est capable de former des films de polymère à l'interface air-eau, jouant par la suite le rôle de barrière.

3.2 Mortiers à base de résine époxy

Dans les bétons et mortiers à base de résine époxy (famille des PC), la teneur en résine époxy peut varier de 4 à plus de 20% suivant l'utilisation :

- faible teneur (4 - 8 %) : économiques, mais peu maniables et perméables, ils doivent être mis en place par vibrodamage;
- teneur moyenne (8 - 15 %) : matériau "truellable"; les plus courants;
- forte teneur (plus de 15 %) : systèmes autolissants, ne nécessitant plus de primer d'accrochage (à appliquer en surface horizontale).

La prise et le durcissement sont fortement dépendants de la température. La température optimale de mise en œuvre se situe entre 10 et 30 °C. En-dessous de 5 °C, la mise en œuvre est aléatoire et les performances mécaniques seront diminuées du fait des propriétés hygroscopiques des durcisseurs.

Les résistances mécaniques sont généralement atteintes après 2 à 3 jours de polymérisation :

- $R_{\text{compression}}$ de 50 à 110 N/mm² (MPa);
- R_{flexion} : environ 1/3 des résistances en compression;
- Résistance à l'abrasion : 5 à 15 fois supérieure à celle des bétons de ciment;
- Adhérence supérieure à la cohésion du béton;
- Bonne résistance aux agents chimiques.

Néanmoins, ce type de produit, outre son prix, présente une série de désavantages :

- Coefficient de dilatation supérieur à celui du béton; on risque donc des décollements du mortier dans le cas de variations de température trop importantes ou de couches trop épaisses; l'épaisseur de la couche doit être limitée, en fonction du matériau considéré;
 - 20 à 30 mm pour les mortiers contenant moins de 15 % de résine;
 - 2 à 3 mm pour les mortiers autolissants.
- Fluage élevé, au-delà de 30 à 40 °C;
- Chaleur de réaction élevée (2 à 3 fois celle du ciment);

- Sensibilité à la température (selon la température de transition vitreuse du liant); ne pas dépasser des pointes de température de 120 °C et éviter de longues expositions à plus de 40 à 50 °C.

3.3 Choix entre matériaux de réparation cimentaires et polymères

Le choix dépend de l'application et des contingences imposées lors de la mise en œuvre.

De manière assez générale, et surtout lorsqu'il est prévu que le ragréage participe activement à la protection des armatures, on préfère utiliser les formulations à base de liant hydraulique. Leur forte teneur en ciment leur confère un haut degré d'alcalinité, de sorte qu'ils peuvent participer à la réalcalinisation du béton par diffusion d'ions OH⁻. Au cas où cette réalcalinisation est indispensable, par exemple dans le cas d'une application sur béton carbonaté, il est préférable de ne pas doser le polymère à plus de 10 % par rapport à la masse de ciment, afin que les ions hydroxydes soient suffisamment mobiles [22].

Les ragréages à base de PC sont intéressants :

- lorsque l'ouvrage doit pouvoir être rapidement utilisé. Les PC développent en effet d'importantes résistances après 24 h;
- lorsque les ragréages ne concernent que de faibles surfaces;
- pour les ragréages de tabliers de ponts, en-dessous des couches bitumineuses;
- lorsque le béton est soumis à l'action d'eaux agressives (acides, séléniteuses, etc.);
- utilisés comme revêtements épais (8 à 15 mm) dans les cas suivants :
 - résistances élevées;
 - durcissement rapide;
 - imperméabilité aux gaz et liquides;
 - résistance aux agents chimiques;
 - haute résistance à l'abrasion.

3.4 Mortiers à retrait compensé

3.4.1 Expansion avant la prise par formation de bulles de gaz

Les produits de ce type contiennent des ingrédients qui génèrent des bulles de gaz peu de temps après le contact avec l'eau de gâchage. Des poudres d'aluminium ou de carbone sont généralement utilisées pour produire les bulles de gaz. Les bulles de gaz permettent de compenser toute forme de retrait pouvant se produire durant la phase plastique du matériau.

Il est nécessaire de fournir un confinement latéral et vertical pour permettre au produit de développer toutes ses caractéristiques physiques. Ces produits sont parfois très sensibles à la température et l'expansion peut survenir très rapidement (avant la mise en place) lorsqu'il fait très chaud.

3.4.2 Expansion en cours de durcissement

Contrairement au cas précédent (bulles de gaz), l'expansion des matériaux de cette famille de matériaux survient essentiellement après la prise et, suivant la nature du produit, se poursuivent dans les premières heures ou premiers jours de durcissement [24]. Les produits expansifs les plus couramment utilisés sont ceux à base de sulfoaluminate de calcium et ceux à base d'oxydes de calcium. Des mortiers et bétons à retrait compensés peuvent ainsi être obtenus en utilisant un ciment expansif contenant du sulfoaluminate de calcium (dénomination ASTM Type K) ou en ajoutant au mélange de base un agent expansif à base de sulfoaluminate de calcium (dénomination ACI C223 Type K) ou d'oxyde de calcium (dénomination ACI

C223 Type G). Dans le cas du ciment Type K et de l'agent Type K, l'expansion survient lorsque le sulfoaluminate de calcium anhydre (CSA) se transforme en ettringite, alors que pour l'agent Type G, l'expansion résulte quant à elle de la formation massive de plaquettes d'hydroxydes de calcium dans les premières heures d'hydratation.

Dans les deux types de systèmes, en particulier le Type G, l'expansion est sensible aux conditions d'humidité. Pour entretenir les réactions d'expansion, il faut assurer un apport suffisant d'humidité (mûrissement humide) pendant une durée de l'ordre de 3 à 7 jours en général.

4 Préparation des surfaces

La préparation des surfaces avant réparation constitue une étape essentielle dans le processus de réparation : elle va permettre à la fois d'enlever le béton dégradé mais aussi de rendre la surface propre et rugueuse, contribuant par-là à un meilleur accrochage du système de réparation.

La préparation de surface comporte quatre étapes fondamentales [25] :

- localisation de la zone à réparer;
- enlèvement du béton détérioré;
- préparation de la surface et du périmètre de la réparation;
- nettoyage de la surface et des aciers d'armature.

On peut classer les techniques de démolition en fonction de leurs principes d'opération [26] :

- techniques dynamiques, qui mettent à profit la faible résistance à l'impact du béton; le béton est brisé par application de chocs répétés;
- techniques mécaniques, qui exploitent la faible résistance en tension du béton; on crée une contrainte en traction supérieure à la résistance en tension;
- techniques abrasives, impliquant l'utilisation de diamants pour user le béton selon des plans préférentiels;
- techniques thermiques, par le biais desquelles le béton est éclaté sous l'effet de gradients thermiques importants;
- techniques chimiques, par le biais desquelles le béton est dissout au moyen d'un acide dilué.

On peut aussi classer les techniques de démolition selon l'effet qu'elles produisent :

- techniques de démolition profondes, impliquant la désagrégation et la démolition du béton sur toute son épaisseur (dynamite et explosifs); on les utilise lorsqu'on désire démolir complètement une structure ou une partie de structure;
- techniques de démolition de surface;
 - enlèvement du béton détérioré, par exemple au marteau piqueur, par hydrodémolition, etc.;
 - préparation finale de la surface à réparer par nettoyage au jet de sable ou au jet d'eau sous pression;
- techniques de découpage et de perçage, impliquant le découpage des différentes composantes de la structure en sciant ou en exécutant une série de perforations rapprochées; ces techniques sont souvent utilisées pour délimiter précisément l'étendue de certaines réparations.

Le rendement et l'efficacité des différentes techniques de démolition peuvent varier beaucoup en fonction de la qualité du béton. Une combinaison de deux ou plusieurs techniques peut être nécessaire pour effectuer une préparation de surface ou une

réparation de surface. Le choix d'une technique de démolition dépend de nombreux critères :

- localisation du site (intérieur, extérieur) et conditions particulières d'accessibilité et d'environnement;
- restrictions sur le bruit, poussières, vibrations, émanations, collecte des débris ou des résidus liquides;
- travaux sur échafaudages;
- épaisseur de démolition et type de défaut à éliminer;
- qualité du béton;
- présence d'armatures;
- type de structure (déformable ou non).

Nous allons nous intéresser ici aux techniques de démolition de surface et, notamment, à leur influence sur la qualité du support produit [27].

4.1 Utilisation du marteau-piqueur

4.1.1 Piquage du béton

Le piquage consiste en la percussion du béton au moyen d'une pointe. On distingue différentes formes de piquage :

- manuel;
 - limité aux petites surfaces horizontales, verticales ou plafonds et sur support massif ou déformable;
 - effectué à la pointe ou au burin;
 - procédé irrégulier et lent (artisanal);
 - surtout utilisé pour l'enlèvement des dépôts de surface ou l'ouverture des fissures;
 - ne s'applique qu'aux surfaces de béton et piquage de barres apparentes;
- mécanique : les marteaux piqueurs pneumatiques ou hydrauliques sont à employer avec prudence. Il faut utiliser de préférence les outils électriques et seulement en dernier recours si aucune autre technique n'est applicable; ils ne conviennent que pour éliminer des dépôts importants sur des supports massifs; on distingue les marteaux piqueurs légers et les brise bétons;
 - marteau piqueur léger (Fig. 21), dont le rendement varie beaucoup en fonction de la qualité du béton, de la présence d'armatures et de l'opérateur;
 - masse de moins de 14 kg;
 - 1000 à 2000 coups par minutes;
 - beaucoup de bruit;
 - peu de vibration;
 - peu de projectiles;
 - bonne qualité de surface;
 - coût relativement élevé par m² de surface;
 - brise béton, lequel peut être installé sur des mini-bras métalliques;
 - masse comprise entre 15 et 30 kg;
 - poinçonnement à la verticale;
 - beaucoup de bruit;
 - plus de vibrations;
 - moins bonne qualité de surface (fissuration);
 - coût relativement faible;
 - peut endommager et décoller les barres d'armature;

4.1.2 Bouchardage

Le bouchardage consiste en le martèlement de la surface avec un élément cylindrique ou carré à tête cruciforme ou munie de pointes. Le degré de finesse du traitement est proportionnel au nombre de pointes. C'est comme les précédents, un procédé violent. Il ne s'applique qu'aux surfaces en béton et ne peut être utilisé que dans le cas de support massif (surfaces horizontales, verticales ou plafonds).



réf. [28]



<http://www.directindustry.com>

Figure 21 – Représentation schématique du piquage et image d'un marteau piqueur léger

On distingue :

- bouchardage manuel;
 - procédé lent;
 - permet d'éliminer les surépaisseurs ou les croûtes;
 - appliqué pour éliminer des anciens revêtements;
 - provoque l'éclatement de quelques millimètres d'épaisseur de la peau de surface;
- bouchardage mécanique;
 - procédé très énergique qui peut désorganiser la structure de surface;
 - ne peut s'appliquer qu'avec beaucoup de précautions aux bétons précontraints;
 - convient surtout pour des rectifications de planéité;
 - utiliser de préférence des outils électriques dont l'énergie incidente est plus faible qu'avec des outils pneumatiques.
 - appliqué aux grandes surfaces horizontales.

4.2 Hydro-démolition

L'hydro-démolition utilise un ou plusieurs jets d'eau à très haute pression pour briser ou enlever le béton détérioré en surface (Fig. 22). Cette technique utilise des jets d'eau à très haute pression (138 à 276 MPa). La pression hydraulique peut être ajustée en fonction de la profondeur de démolition ou en fonction d'un critère basé sur la qualité minimale du béton à enlever [29].

On peut réaliser des démolitions profondes (complètes) dans le cas de dalles minces en béton armé (100 mm ou plus). L'hydro-démolition est une technique de démolition sélective.

Il existe des lances manuelles à un seul jet pouvant être utilisées par un opérateur. Ce type d'équipement est utilisé pour les endroits difficiles d'accès. Il existe aussi des équipements à plusieurs jets pouvant essentiellement être utilisés sur des surfaces horizontales (Fig. 23). Ces systèmes perfectionnés sont dotés de plusieurs jets dont

le déplacement peut être programmé pour déterminer précisément la profondeur et la superficie du béton à démolir.

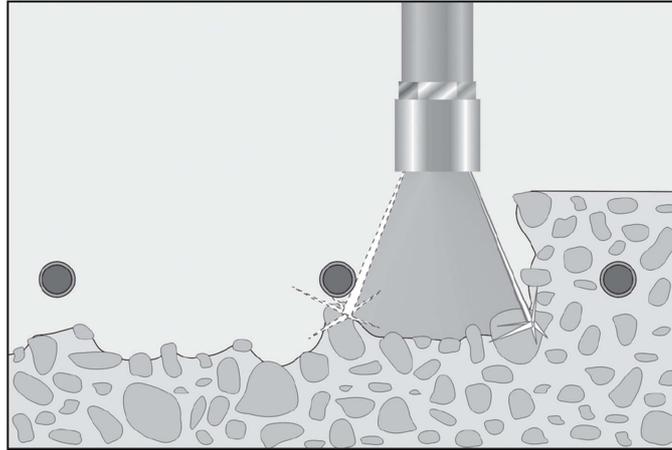


Figure 22 – Schéma du principe d'hydro-démolition à un seul jet [30].

On peut citer quelques avantages et inconvénients de la technique :

- très bonne qualité de surface;
- rendement très élevé (effectue le même travail que 20 à 40 hommes munis de marteaux piqueurs);
- n'endommage pratiquement pas les barres d'armature;
- bon nettoyage des barres d'armature (Fig. 24);
- peu de vibrations;
- peu de poussière;
- beaucoup de bruit;
- beaucoup de résidus liquides qui peuvent boucher les systèmes de drainage; il faut prévoir un nettoyage régulier des conduites et des surfaces;
- coût relativement élevé;
- nécessite de grandes quantités d'eau propre (100 à 250 litres/minute).

Il est nécessaire dans tous les cas de bien régler la pression en fonction de la qualité du béton; cette technique permettra également de faire apparaître les différences de compacité ou d'homogénéité du béton [29].



Figure 23 – Machine d'hydrodémolition à plusieurs jets.



Figure 24 – Etat du béton et des armatures après hydrodémolition.

4.3 Sablage et grenailage

Le nettoyage par jet de sable consiste en un flot de particules de sable tamisé fin entraînées à haute vitesse par un jet d'air comprimé (Fig. 25). Les chocs usent le béton et/ou nettoient la surface, ce qui permet un meilleur contact entre l'ancien et le nouveau béton. Il permet l'enlèvement de la laitance, saletés, huiles, etc. Cette technique est aussi utilisée pour le nettoyage des armatures corrodées. Elle engendre beaucoup de poussières [26].



Figure 25 – Sablage de surface en béton.

Le sablage est le meilleur procédé qui donne un très bon état de surface et une rugosité idéale pour les collages. Il ne peut être mené que par une main d'œuvre spécialisée et s'applique en général à toutes les surfaces (acier et béton). Dans tous les cas, un filtre déshydratant sera placé en aval du compresseur.

L'hydrosablage combine la technique de la lance sous haute pression d'eau et du sablage. Elle présente comme inconvénients d'être moins efficace que sablage et de livrer un support humide, qui nécessite un séchage. Elle permet toutefois d'éviter les poussières et les étincelles.

La projection de billes consiste à projeter à haute vitesse des billes d'acier (environ 2 mm de diamètre) (Fig. 26). Les billes d'acier sont aspirées immédiatement après leur projection sur le béton pour être réutilisées. Cette technique produit moins de poussière. La profondeur du béton qui est enlevé est généralement de quelques millimètres mais peut être plus importante si désirée.

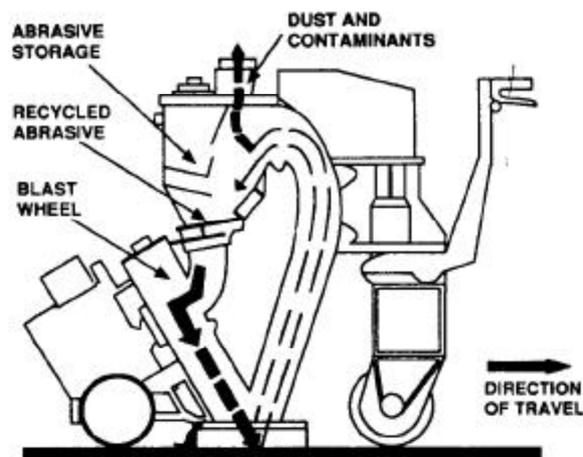


Figure 26 – Principe de fonctionnement d'un appareil à projection de billes (*shot blasting*) [31].

Les trois procédés (sablage, hydro-sablage et grenailage) s'appliquent à l'acier et au béton, sur supports massifs ou déformables ainsi qu'aux surfaces grandes, moyennes ou petites.

4.4 Précautions

Certaines méthodes de préparation de surface peuvent induire des microfissurations au niveau de la couche superficielle du béton [27]. Des observations ont été réalisées de façon systématique sur différents types de béton (Fig. 27).

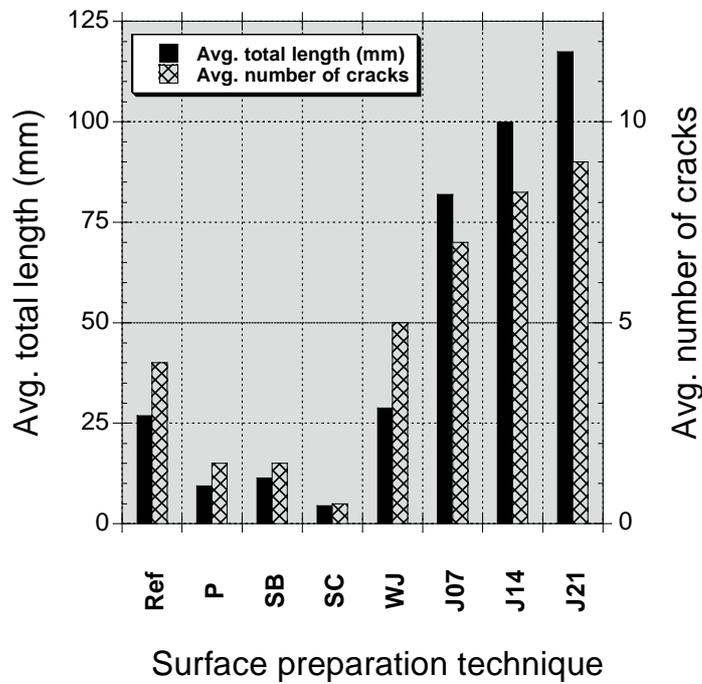


Figure 27 – Longueur cumulée et décompte des fissures observées pour différentes méthodes de préparation de surfaces sur une aire traitée de $0,32 \text{ m}^2$ (Ref : sans préparation; P : polissage; SB : sablage; SC scarification; WJ : hydro-démolition; J07 : marteau-piqueur 7 kg + sablage; J14 : marteau-piqueur 14 kg + sablage; J21 : marteau-piqueur 21 kg + sablage) [27].

Les résultats du programme expérimental de cette étude [27] montrent clairement que :

- le polissage n'induit que peu de perturbations ou fissurations;
- le nombre de fissures et la longueur totale des fissures observées sont généralement beaucoup plus élevés après la préparation avec marteau-piqueur qu'avec les autres techniques (entre 2 et 4 fois et de 4 à 25 fois, respectivement);
- la scarification et le sablage n'induisent presque aucune dégradation dans le substrat de béton;
- l'hydro-démolition semble induire une fissuration superficielle, mais dans une bien moindre mesure que le marteau-piqueur;

Il est évident que technique de préparation au marteau-piqueur est potentiellement plus nocive pour la couche superficielle de support en béton : la fissuration qui est induite est de nature à réduire l'adhérence entre la nouvelle couche de matériau et l'ancien support de béton [32]. En outre, il convient de souligner que, dans l'étude présentée ci-dessus, la préparation de surface avec marteau-piqueur a été suivie par un sablage approfondi, de façon à éliminer les poussières et particules résiduelles.

En l'absence de l'opération de sablage, les résultats en termes de fissuration auraient nécessairement été pires ! Il convient donc d'utiliser cette technique avec prudence.

Afin de limiter les risques d'une préparation inadéquate, il est recommandé de pratiquer une mesure de la cohésion superficielle (voir §3.7.2) directement sur le béton support : la présence de fissures favorisera une rupture dans la couche superficielle et des valeurs d'adhérence réduites [33].

5 Protection contre la corrosion

Il existe aujourd'hui une variété de méthodes et techniques pour restaurer et améliorer la résistance à la corrosion des ouvrages en béton armé [19, 34]. Dans l'optique de travaux de réparation, on peut classifier les différentes méthodes d'intervention envisageables en trois catégories:

- reconstitution de la couche d'enrobage;
- protection par imperméabilisation;
- protection par traitement électrochimique:
 - inhibiteurs de corrosion;
 - ré-alkalinisation et extraction des chlorures;
 - protection cathodique.

5.1 Reconstitution de la couche d'enrobage

Cette opération vise à réparer la couche de parement et à restaurer la protection de l'armature, après élimination des zones dégradées, remplacement des barres d'armature trop endommagées et protection directe du ferrailage. Suivant la nature et la condition de l'ouvrage, les contraintes constructives et architecturales, de même que la sévérité des conditions d'exposition, les principaux paramètres à considérer pour la réparation de la couche d'enrobage sont la nature du matériau et l'épaisseur de la couche d'enrobage, laquelle pourra dans certaines situations être accrue pour relever le degré de protection offert. La reconstitution d'une couche d'enrobage de qualité adhérant fermement au béton de support est une condition essentielle au succès et à la durabilité des réparations dans les ouvrages en béton armé.

5.2 Protection supplémentaire de l'armature

Au-delà de la protection fondamentale offerte par la couche d'enrobage, on peut opter pour la mise en œuvre de protections supplémentaires. Essentiellement, on peut on peut diviser les types de protection en deux grandes catégories, soit l'imperméabilisation et les traitements de nature électrochimiques.

5.2.1 Protection par imperméabilisation

Il existe différentes catégories de produits pour imperméabiliser les surfaces en béton, allant des produits appliqués par imprégnation (hydrofuges, consolidants) aux membranes, en passant par les revêtements de surfaces aux caractéristiques variées. Ces produits n'ont pas d'action directe sur la corrosion mais sont des traitements complémentaires, en limitant davantage l'accès d'humidité et de contaminants extérieurs.

5.2.2 Protection par traitements électrochimiques

Les traitements de protection de nature électrochimique visent à contrôler l'activité de corrosion en intervenant directement dans le processus. Aux fins de la réparation d'ouvrages en béton armé, on peut subdiviser les approches possibles en trois familles : les inhibiteurs de corrosion, les méthodes de conditionnement et les méthodes de protection cathodique.

5.2.2.1 Inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont des composés chimiques ajoutés au milieu cimentaire et ayant pour effet de ralentir ou prévenir le processus de corrosion de l'acier. Deux options de mise en œuvre sont possibles dans les ouvrages en béton, soit comme adjuvants mélangés au matériau avant la mise en place ou comme agent migrateur appliqué à la surface d'un élément existant. On distingue les inhibiteurs anodiques (diminution du courant sur la partie anodique du métal), les inhibiteurs cathodiques (augmentation de la surtension cathodique) et les inhibiteurs mixtes.

5.2.2.2 Conditionnement du béton (ré-alkalinisation, extraction des chlorures)

L'objectif des méthodes de conditionnement est de redonner au béton d'enrobage en place sa capacité à protéger l'armature. Les traitements en vue d'en favoriser la ré-alkalinisation (augmentation du pH dans du béton carbonaté) et/ou la déchloruration du béton consistent à polariser l'armature à l'aide d'une anode, noyée dans une pâte saturée d'un électrolyte approprié et disposée à la surface de l'élément à traiter. Le courant de polarisation circule de l'anode vers l'armature (cathode). Suivant la nature et la condition de l'ouvrage, les traitements doivent être mis en œuvre sur des périodes pouvant atteindre plusieurs semaines.

5.2.2.3 Protection cathodique

Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton à l'aide d'une anode sacrificielle noyée ou installée à la surface de l'élément. Il existe deux techniques de protection cathodique pour contrôler ou du moins ralentir l'activité de corrosion dans les éléments en béton armé (Fig. 28):

- actif (par courant imposé, ICCP) : un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature reconstitution de l'enrobage;
- passif (courant galvanique) : l'anode, en alliage correctement sélectionné, est directement reliée à l'armature.

Dans les deux types de système, on recourt à des anodes sacrificielles qui protègent l'acier en le rendant cathodique. Outre les considérations budgétaires, le choix de la technique appropriée dépend de la durée de vie utile additionnelle anticipée, des conditions de contamination actuelles, de l'ampleur de la protection à mettre en œuvre (protection locale ou globale) et de l'effort d'entretien future qui pourra être consacré au système.

Les systèmes de protection galvanique (passifs) utilisent des anodes sacrificielles disposées en différents endroits de l'élément et qui se consomment lentement en induisant de manière naturelle un courant (galvanique) qui protège les barres d'armature. Ces systèmes sont court-circuités, c'est à dire qu'ils sont directement connectés aux barres d'armature. Une fois installé, ce type de système s'autorégule et ne nécessite aucune maintenance. Dans le cadre de travaux de réparation, après l'enlèvement du béton contaminé/endommagé, on installe les anodes et on les enrobe avec le matériau de réparation. Il est également possible d'installer un tel système sans effectuer d'intervention sur l'ouvrage. Les anodes peuvent être alors disposées en surface (ex. : anodes disposées en bandes, surfaces métallisées, placages, etc.) ou insérées dans des ouvertures superficielles pratiquées en différents endroits choisis, tel que montré sur la Figure 29.

Les systèmes de protection cathodique à courant imposé (actifs) sont généralement utilisés sur des ouvrages d'une certaine ampleur et pour la mise en œuvre des anodes, on recourt typiquement à l'installation d'un treillis métallique sacrificiel à la surface, qu'on enrobe ensuite dans une couche de mortier. Cette anode est connectée à une source de courant permanente reliée aux barres d'armature en acier. Les systèmes de type ICCP sont non court-circuités et l'anode doit être isolée

de l'acier d'armature. Ces systèmes commandent une alimentation continue en courant, la protection s'estompant en cas d'interruption.

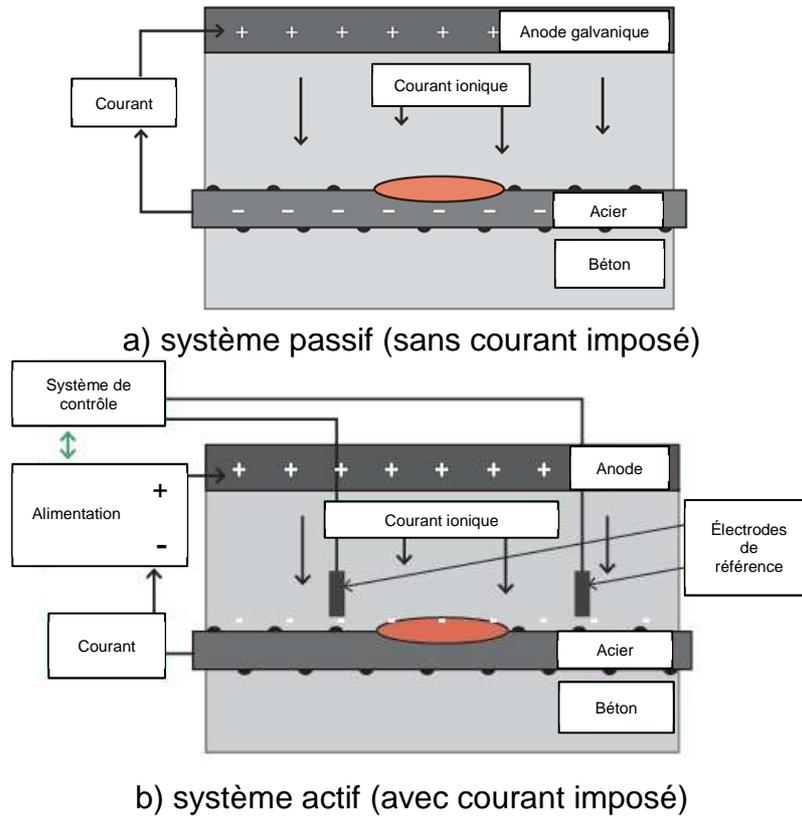


Figure 28 – Systèmes de protection cathodique pour le béton armé (<http://www.jpbroomfield.co.uk>).

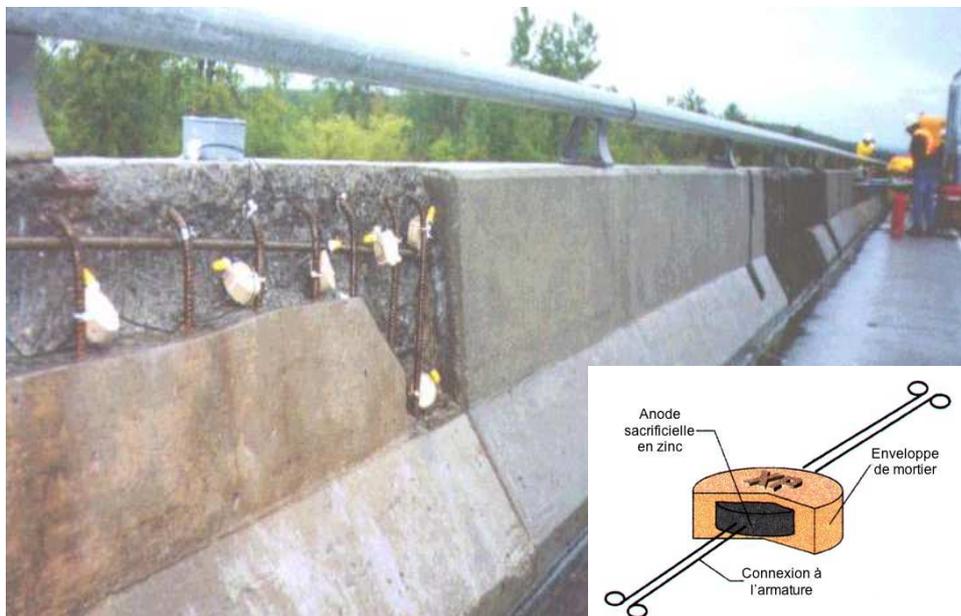


Figure 29 – Installation d'anodes sacrificielles noyées à la périphérie de réparations effectuées sur des parapets en béton.

6 Techniques de mise en œuvre pour la réparation des épaufrures

Il existe une très grande variété de situations. L'intervention peut servir à :

- combler un éclat provoqué par un impact;
- combler une cavité creusée par attaque chimique ou mécanique, ou résultant d'un défaut de mise en œuvre (nid de graviers);
- donner une texture à une surface en béton qui a été dégradée superficiellement par des effets climatiques (gel, pluie acide), par des effets thermiques (incendie) ou chimiques;
- rendre les caractéristiques mécaniques initiales d'un élément dégradé. Dans ce cas, le matériau participe au renforcement mécanique de l'élément.

A chaque situation correspondent un ou plusieurs types de ragréages mais aussi plusieurs modes d'applications (applications manuelles ou mécanisées (mortier ou béton projeté)). Chaque type d'application a ses exigences spécifiques. Néanmoins, il y a une exigence générale valable pour toutes les applications : il s'agit de l'adhérence du mortier de ragréage sur le support.

6.1 Considérations de base

La technique de mise en œuvre doit permettre la mise en place du matériau de réparation sélectionné sur le support de béton préparé avec des résultats prévisibles, en conformité avec les exigences du cahier des charges. Les propriétés des matériaux de réparation généralement spécifiées sont la résistance en compression, la résistance en traction, l'adhérence en traction et les caractéristiques relatives aux changements de volume, soit le module d'élasticité, le retrait de séchage et le coefficient de dilatation thermique. D'autres propriétés telles que la perméabilité, la résistance aux cycles de gel et dégel ou la résistance aux sulfates peuvent également être spécifiées suivant les conditions d'exposition. Le matériau de réparation doit encapsuler complètement l'acier d'armature exposé, développer une adhérence suffisante avec le substrat, et remplir la cavité préparée sans ségrégation. Si ces exigences ne sont pas satisfaites, la réparation n'offrira le niveau de performance attendu.

Le lien mécanique se développant entre la couche de ragréage et le substrat existant dépend du matériau de réparation devant réagir avec la surface du béton préparé et pénétrer dans les cavités et la porosité de ce dernier pour générer de l'engrènement (« *interlocking* »). Certains matériaux peuvent exiger l'application d'un agent de liaison pour assurer un contact optimal avec la surface préparée. Lorsque le matériau possède une quantité de liant suffisante et les caractéristiques rhéologiques adéquates pour mouiller à fond de substrat, l'utilisation d'un agent de liaison n'est pas requise [26].

Hormis le cas des matériaux autoplaçants (matériaux caractérisés par un seuil de cisaillement très faible, voire nul), la génération d'une force ou d'une pression est nécessaire pour assurer un contact intime du matériau de réparation avec la surface préparée. L'origine et l'intensité de la pression varient suivant la technique de mise en œuvre. Dans les systèmes truellés, le matériau de ragréage est plaqué contre la surface préparée par la pression appliquée sur la truelle par le finisseur. Le procédé de martelage propre au procédé de consolidation à sec (« *dry packing* ») génère une force d'impact localisée permettant la compaction du matériau contre le substrat et la minimisation des vides. Dans le cas des matériaux mis en place par gravité, la vibration interne favorise l'écoulement du matériau sous son poids, ce qui lui permet de mouiller la surface à réparer. Lors du pompage d'un matériau de réparation dans des coffrages pressurisés (ex. : « *form and pump* », « *slurry infiltrated concrete* »), la pression hydraulique développée à l'intérieur du coffrage favorise un contact intime

avec la surface à réparer et l'élimination des défauts à l'interface. Enfin, les techniques de mise en place pneumatiques à grande vitesse (bétons et mortiers projetés) génèrent une pression considérable au moment de l'impact avec la surface réceptrice, favorable à l'obtention d'une interface dense et exempte de défauts.

Il apparaît nécessaire d'insister ici sur le fait que les matériaux de réparation soient préparés et appliqués sans ségrégation. Toute séparation des constituants est de nature à modifier les propriétés physiques du matériau, altérant de ce fait l'aptitude de la réparation à restaurer l'état d'origine de l'ouvrage de façon efficace et durable. Il importe donc de s'assurer que pour le matériau utilisé et l'application considérée, la technique de mise en œuvre n'induit pas de ségrégation.

6.2 Application à la truelle

Cette méthode consiste à mettre en place le matériau de ragréage à la truelle (Fig. 30). Le matériau doit être préparé de façon à présenter une consistance plastique adaptée à l'opération. Le matériau est déposé sur la surface de béton à réparer avec la truelle ou avec un autre outil approprié. Le matériau de réparation est enfoncé dans le substrat par couches, suivant la profondeur à combler, en pratiquant des mouvements circulaires pour développer un contact intime et éliminer les vides.

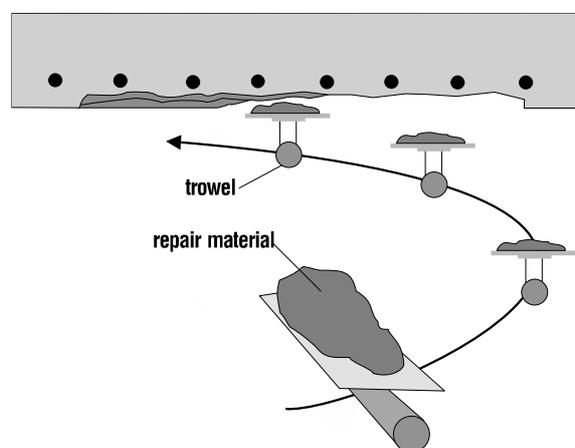


Figure 30 – Application d'un matériau de réparation à la truelle [35].

Cette technique est utilisée pour la réparation d'épaufrures de relativement faible profondeur où l'armature n'est pas exposée. Elle est adaptée à la mise en place de matériaux à grains fins aisément finissables. Dans le cas d'applications verticales ou en surplomb, les matériaux doivent avoir la consistance appropriée pour adhérer à la surface et rester en place.

6.3 Application par consolidation à sec

Dans la mise en œuvre par consolidation à sec (« *dry packing* »), le matériau de réparation est mélangé en incorporant la quantité d'eau et/ou d'adjuvant(s) minimale de manière à obtenir une consistance plastique uniforme (tout juste assez pour que le matériau soit cohésif). Le matériau est typiquement mis en place dans un espace confiné et compacté avec des outils manuels de martelage / pilonnage, de manière à obtenir un produit en place à la fois homogène et très dense (Fig. 31). Les applications se prêtant à ce type de mise en place particulier consistent principalement en l'obturation d'ouvertures de dimensions limitées, par exemple les trous laissés par les tirants de coffrages, les ouvertures autour de câbles de post-tension et les ouvertures dans les dalles nervurées uni- ou bidirectionnelles. La mise en place peut être effectuée indépendamment de l'orientation de la surface.

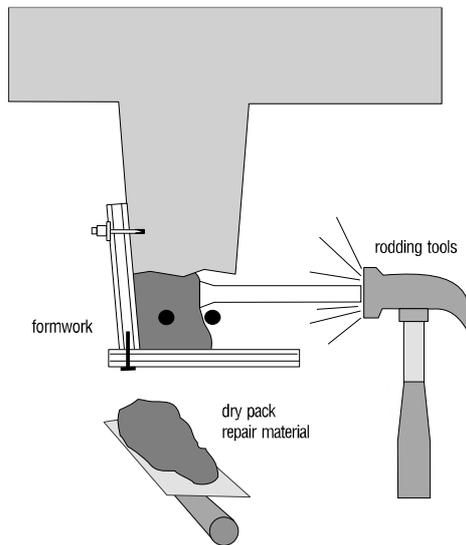


Figure 31 – Application d'un matériau de réparation par consolidation à sec [35].

Les matériaux appliqués par consolidation à sec sont des mortiers préparés à une consistance permettant de former une motte cohésive.

6.4 Mise en place par gravité dans des coffrages

Lorsque la localisation ainsi que l'étendue et/ou la profondeur des épaufrures le justifie, on peut procéder à l'installation d'un coffrage pour délimiter adéquatement les surfaces exposées (Fig. 32). Le matériau de ragréage est déposé dans le coffrage et consolidé par pilonnage ou, plus généralement par vibration, interne ou externe. Le type d'application est très varié et inclut notamment les colonnes, murs et portions extérieures de dalles.

Les matériaux prisés pour ce type de mise en place sont les bétons et mortiers caractérisés par un rapport eau/liant modéré, un comportement rhéologique approprié (maniabilité adéquate), une bonne adhérence et un faible retrait.

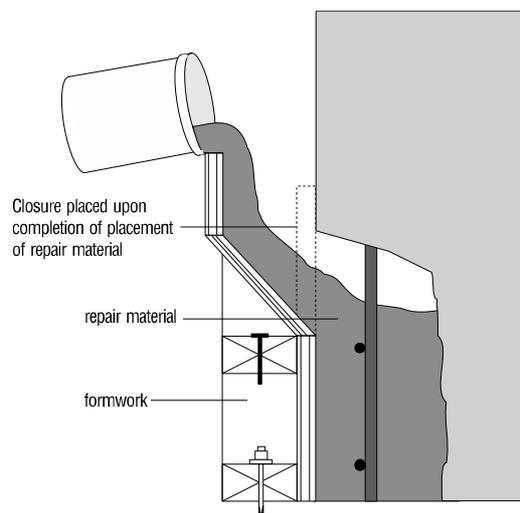


Figure 32 – Mise en place d'un matériau de réparation par gravité dans des coffrages [35].

6.5 Mise en place par pompage et pressurisation des coffrages

La méthode consiste à introduire un matériau de ragréage (préalablement malaxé) par pompage dans un coffrage étanche, via une conduite connectée à ce dernier, jusqu'à ce que le coffrage soit rempli et pressurisé (Fig. 33). La génération d'une pression interne dans le coffrage la consolidation favorise une excellente consolidation de la couche de ragréage et, en raison du contact intime, une adhérence accrue.

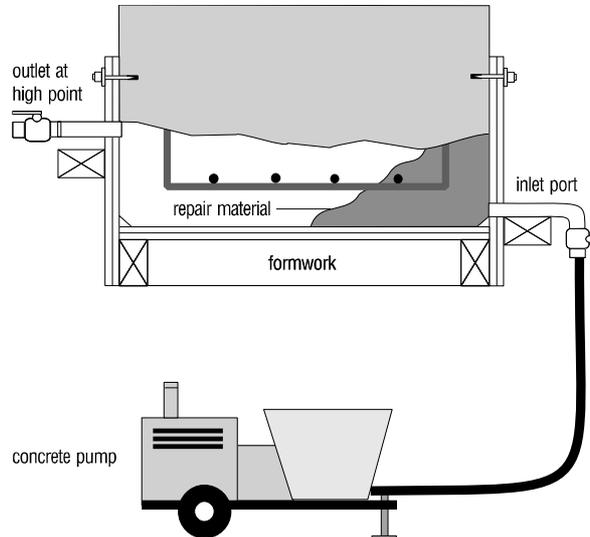


Figure 33 – Mise en place d'un matériau de réparation par pompage et pressurisation des coffrages [35].

La technique est particulièrement avantageuse dans les applications en surplomb (ex. : faces inférieures de dalles) et sur les parements verticaux où l'on doit composer avec des ferraillements congestionnés. Dans le même esprit, elle est également très efficace pour la réparation des semelles de poutres, les nervures, les diaphragmes, les chevêtres, etc.

Le matériau de ragréage utilisé pour la mise en place par pompage en coffrages pressurisé doit être évidemment pompable et suffisamment fluide et stable, et la taille des granulats doit être compatible avec le dégagement dans la cavité à réparer et entre les barres d'armature.

6.6 Mise en place avec granulats pré-placés

Cette méthode consiste à compacter un squelette granulaire à granulométrie discontinue dans un coffrage, à l'intérieur duquel on injecte ensuite un coulis sous pression pour combler tous les interstices (Fig. 34). En raison du contact entre les granulats et du volume de pâte très réduit, le retrait du béton ainsi obtenu est très faible.

La technique se prête avantageusement aux applications verticales et en surplomb pour lesquelles les exigences relatives au contrôle de la fissuration sont strictes. L'augmentation de section de colonnes est un exemple d'application pour laquelle la mise en place avec granulats pré-placés est bien adaptée.

Les constituants utilisés avec cette technique sont des granulats à granulométrie discontinue avec 40 à 50 % de vides, un coulis pompable et stable (résistant à la ségrégation) préparé avec du ciment Portland ou un liant modifié aux / à base de polymères. Dans le cas des coulis cimentaires, on utilise généralement des granulats ayant une taille nominale de 25 mm et plus.

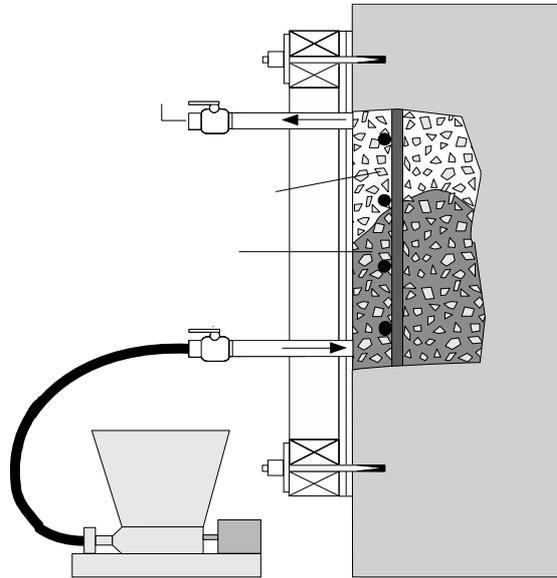


Figure 34 – Mise en place d'un matériau de ragréages avec granulats pré-placés [35].

6.7 Mise en place par projection

6.7.1 Projection par voie sèche

Dans le procédé par voie sèche, le mélange sec (pré-ensaché) ou légèrement pré-humidifié est introduit dans le compresseur à béton projeté et poussé dans les conduites au moyen d'air comprimé (Fig. 35). Le mélange est ainsi transporté jusqu'à la lance d'extrémité dans laquelle l'eau de gâchage et, le cas échéant, certains adjuvants sont introduits, et d'où le béton pressurisé est ultimement propulsé vers la surface réceptrice.

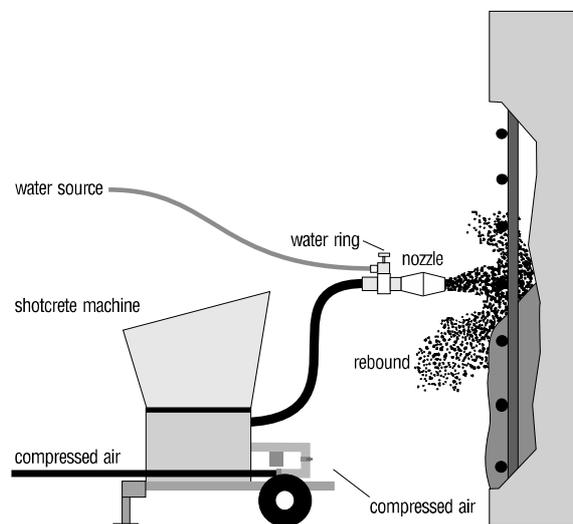


Figure 35 – Mise en place d'un matériau de ragréage par projection voie sèche [35].

La projection par voie sèche est bien adaptée aux surfaces verticales et en surplomb nécessitant l'enrobage de ferrailages peu encombrés et constitués de barres de relativement petit diamètre (moins de 20 mm). De plus, le recours à des matériaux secs procure une grande flexibilité dans les interventions en facilitant les opérations de mobilisation et démobilité.

Les formulations de béton projeté par voie sèche nécessitent un bon contrôle de la granulométrie, des liants adaptés (typiquement ciment Portland avec ajouts minéraux), et doivent permettre de minimiser les effets du rebond. Des adjuvants sont fréquemment utilisés pour réduire le temps de prise et/ou permettre la mise en place de couches plus épaisses, assurer une protection adéquate contre le gel, etc.

6.7.2 Projection par voie humide

En projection par voie humide (Fig. 36), les constituants, hormis certains adjuvants, sont d'abord dosés et complètement malaxés. Le mélange obtenu est ensuite versé dans une pompe à béton et transporté jusqu'à la lance, à l'extrémité de laquelle de l'air comprimé et des adjuvants additionnels, le cas échéant, sont introduits. Le matériau est ainsi accéléré et propulsé sur la surface à réparer grâce à l'air comprimé.

La technique se prête bien aux applications sur de grandes surfaces et permet de bien ré-enrober l'armature dans la mesure où il n'y a pas trop de congestion et que les barres sont de taille modérée (< 20 mm).

Le mélange doit être à la fois pompable et présenter un affaissement suffisamment faible pour ne pas s'affaisser après contact avec la paroi réceptrice.

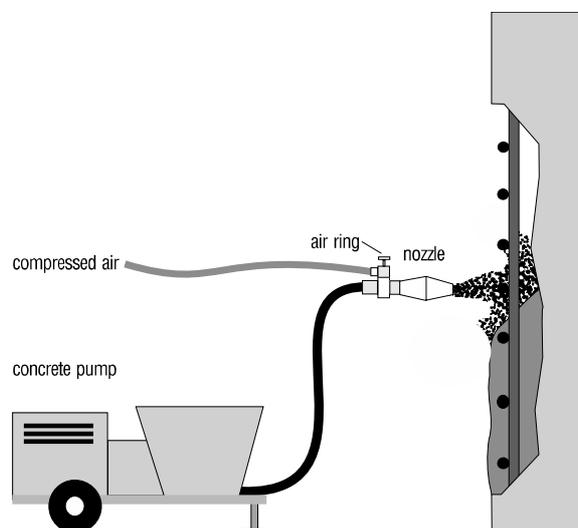


Figure 36 – Mise en place d'un matériau de ragréage par projection voie humide [35].

7 Contrôle qualité

La norme EN 1504-10 décrit les opérations à réaliser en vue d'exécuter correctement et de contrôler la qualité du travail réalisé [25].

Des prélèvements sont réalisés en vue de déterminer la conformité du produit avec les prescriptions du cahier des charges ou avec les échantillons testés au laboratoire lors de l'agrément. Des essais d'identification au laboratoire sont habituellement réalisés.

De plus en plus, les utilisateurs publics ou privés essaient de limiter les opérations de réception des matériaux sur chantier (coût et délais). Dès lors, ils exigent que les matériaux utilisés soient couverts par un agrément technique. Cependant, les autorités publiques ne peuvent pas exiger exclusivement des produits agréés mais peuvent indiquer que les produits ne disposant pas d'un agrément devront répondre à toutes les exigences d'un guide d'agrément.

On vérifiera également que les conditions de conservation sont conformes aux prescriptions du fabricant.

7.1 Contrôle pendant la mise en œuvre

Il convient de vérifier que les conditions de travail permettront d'obtenir une réparation de qualité. Outre les compétences de l'applicateur,¹ il importe de faire les observations suivantes :

- conditions atmosphériques (température, vitesse du vent, précipitations, brume, humidité relative);
- température du support (écart par rapport au point de rosée);
- qualité des mélanges;
 - homogénéité;
 - dosage des divers constituants; en cas d'utilisation de mélanges qui ne sont pas pré-dosés, description des moyens de contrôle du dosage utilisé par l'entrepreneur;
 - prélèvements de mélanges frais, coulage dans des moules appropriés;
 - après durcissement, contrôle en laboratoire;
- conformité de la mise en œuvre avec les spécifications du cahier des charges et du formulateur;
 - protection des armatures;
 - couche d'adhérence;
 - mise en œuvre du mortier;
 - délai entre couches;
 - délai entre préparation du mélange et mise en œuvre.

7.2 Contrôle après l'intervention

Les mesures de contrôle concernent essentiellement l'adhérence et la qualité de mise en place du produit de réparation sur le support en béton [36]. En particulier, on peut procéder aux mesures suivantes:

- mesure de l'adhérence par des essais d'arrachement (Fig. 37);
- mesure du taux de compaction des mortiers de ragréage (densité apparente supérieure à 95 % de la densité nominale du produit);
- mesure de l'épaisseur des couches.

Dans le cas de l'essai d'arrachement (*pull-off test*), la profondeur et le diamètre du disque sont les paramètres les plus importants [33, 37]. Pour limiter la dispersion des résultats, il est préférable de poursuivre le pré-carottage jusqu'à une profondeur minimale de 15 ou 30 mm dans le support de béton et d'utiliser des disques d'amarrage d'au moins 50 mm de diamètre pour les calibres de granulats les plus couramment rencontrés. Par ailleurs, il est non seulement important d'évaluer la valeur de la résistance à l'arrachement, mais aussi d'observer le mode de rupture (Fig. 36). La rupture devrait idéalement survenir dans le support en béton, pour une valeur supérieure à l'adhérence exigée et l'obtention d'un comportement parfaitement monolithique en réponse aux sollicitations en service.

La procédure d'essai utilisée pour la mesure de l'adhérence (*pull-off test*) peut alternativement être exploitée pour évaluer l'intégrité de la surface au terme des opérations de préparation. L'essai d'arrachement pratiqué directement sur le substrat permet de mesurer la cohésion du béton de support [27].

¹ En Belgique, des certificats attestent des compétences des techniciens amenés à mettre en œuvre les produits de réparation (2009).

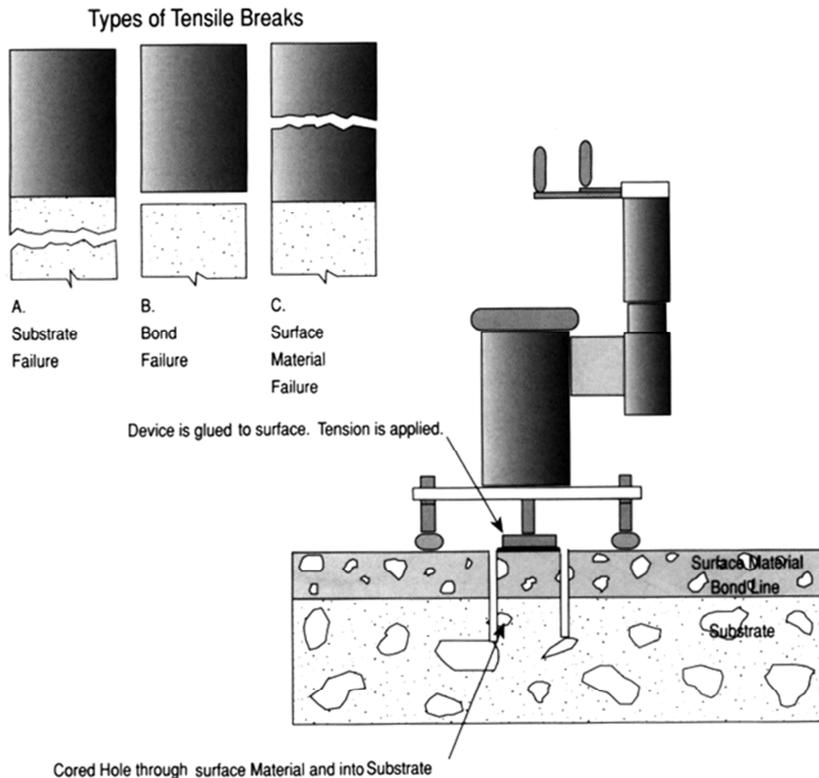


Figure 37 – Mesure de l'adhérence du produit de réparation – *pull-off test* [38].

8 Recommandations

La réparation passe par 4 étapes fondamentales :

- détermination des causes des dégradations;
- préparation de la surface à réparer;
- sélection, application et maturation du produit de réparation;
- contrôle de la qualité.

De nombreuses recommandations ont été publiées [38, 39], au travers de guides techniques, de normes ou de documents scientifiques. Même si certaines spécificités existent, elles visent toutes au développement des conditions d'adhérence après élimination du béton défectueux ou malade. Mais la première étape passe bien entendu par un diagnostic complet de la structure.

8.1 Investigations et diagnostic

Les investigations devront porter au minimum sur les points suivants [25] :

- profondeur de carbonatation;
- épaisseur de recouvrement de l'acier;
- niveau ou risque de corrosion de l'acier;
- cohésion du béton (zone superficielle);
- résistance à la compression du béton;
- teneur en chlorure, en alcalins et teneur en sulfate;
- réserve d'alcalinité (teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Tout autre test approprié et utile en fonction de l'environnement spécifique doit évidemment être mené en complément.

Le Tableau 2 présente un aide-mémoire mis au point pour éviter d'oublier les principales caractéristiques et propriétés du béton à vérifier dans le diagnostic. Les

valeurs requises sont présentées à titre indicatif pour donner une idée de ce qui devrait être prévu, mais les besoins réels peuvent différer, selon les codes et les pratiques locales en vigueur.

Tableau 2 – Essais et observations nécessaires l'évaluation du béton suivant la norme EN 1504-10 et le guide ACI 364.1-R07 [39]

Caractéristique	Méthode d'essai / Observation	Exigences
Délamination	Marteau	Pas de délaminage
Résistance en traction de la couche superficielle	Pull-off test	≥ adhésion (1,5 - 2 MPa) = f_{ct} ≥ 1 MPa
Mouvement de fissure	Jauges mécaniques ou électriques	Pas de mouvement
Largeur et profondeur de fissure	Jauges mécaniques ou électriques, carotte, inspection visuelle ou ultrasonique	-
Profondeur de carbonatation	Test à la phénolphthaléine, épaisseur de recouvrement	< épaisseur de recouvrement
Teneur en chlore	Echantillonnage et analyse chimique	recommandations EN 206
Corrosion de l'acier	Potentiel de corrosion (mapping)	recommandations ASTM C876
Pénétration/présence d'autres contaminants	Echantillonnage et analyse chimique	recommandations spécifiques
Résistance en compression	Carottage et essai de compression Marteau Schmidt (mapping)	Fonction du comportement structurel et dimensionnement

Le recours aux méthodes non destructives est bien souvent judicieux et utile, en particulier quand de grandes surfaces doivent être investiguées.

8.2 Préparation de surface

L'enlèvement du béton détérioré est indispensable. De nombreux outils de démolition, tels que le burinage, la scarification, les marteaux pneumatiques ou le piquage, introduisent des microfissures dans le substrat. Ils peuvent être efficaces dans l'élimination de bétons de moindre qualité. Mais ce qui est nécessaire est d'obtenir un substrat sain et sans fissure afin de promouvoir une bonne adhérence. Le jet d'eau sous pression (hydrodémolition) est très efficace sans causer de microfissures. C'est d'ailleurs la seule méthode d'élimination qui fonctionne de manière sélective, c'est-à-dire, qui supprime le béton endommagé de faible qualité sans endommager le béton de bonne qualité. Si le jet d'eau ne peut pas être utilisé en raison de limitations dues au volume d'eau nécessaire ou aux coûts d'installation, la microfissuration peut être éliminée ou du moins limitée en combinant une préparation mécanique et un sablage ultérieur.

La préparation de la surface implique aussi la propreté de celle-ci. Le substrat doit être exempt de particules, poussières, huiles, etc. et de toute pollution au moment de la coulée de béton. Le jet d'eau sous pression est très efficace de ce point de vue : il permet d'obtenir un substrat très propre et élimine la poussière et les produits de corrosion de l'acier d'armature. Il ne faut pas oublier que le substrat doit être propre au moment de la pose du béton et que, entre la préparation de surface et la coulée, les pollutions de la circulation, du chantier ou de l'environnement peuvent avoir définitivement affecté la propreté.

8.3 Sélection, application et maturation du système de réparation

Sélection

Dans l'ordre, les principales étapes dans la sélection du matériau de ragréage et de

la technique de mise en œuvre appropriés sont les suivantes :

- Choix d'un matériau de ragréage rencontrant les exigences générales de résistance mécanique, de durabilité et de compatibilité (déformationnelle, perméabilité, chimique et/ou électrochimique), de façon à restaurer l'intégrité et les qualités originales de l'élément ou de l'ouvrage;
- Choix d'une méthode de mise en œuvre adaptée aux conditions *in situ* et permettant la mise en place adéquate du matériau de ragréage sélectionné;
- Revue des caractéristiques du matériau de ragréage et des exigences de mise en place / installation pour apprécier correctement si le système de réparation sélectionné est approprié;
- Modifier / adapter au besoin le choix du matériau et/ou de la méthode de mise en œuvre pour assurer une application satisfaisante et le succès de l'intervention.

Ces choix impliquent très souvent des compromis. À cet égard, de manière générale, il importe de s'assurer d'abord de la durabilité du système de ragréage mis en œuvre, éventuellement au détriment de l'aisance de mise en œuvre. Le Tableau 3 présente un aperçu général du potentiel des différents matériaux de réparation et de resurfaçage des ouvrages en béton et de leurs usages les plus appropriés.

Tableau 3 – Matériaux pour la réparation des surfaces en béton [34]

Famille générique de matériaux	Type de matériau		8.3.1.1.1.1.1 Applications			
	Béton	Mortier	Réparations profondes		Réparations minces	Chapes
			Surfaces horizontales	Surfaces verticales / surplomb		
Matériaux cimentaires ordinaires (CC ¹)	•	•	×	×	×	×
Matériaux cimentaires à hautes performances (HP ²)	•	•	×	×	×	×
Matériaux auto-compactants (SCC; SCM)	•	•	×	×	×	×
Matériaux cimentaires modifiés avec des polymères (PCC)	•	•	×	×	×	×
Matériaux à base de polymères (PC)	•	•	×	×	×	×
Autres matériaux de spécialité ³	•	•	×		×	×

¹ incorpore souvent des ajouts cimentaires (fumée de silice, cendre volante, laitier); ² incorpore généralement de la fumée de silice; ³ ciment alumineux, ciment de phosphate de magnésium, etc.

Avant de procéder à la sélection finale du matériau de réparation et la technique de mise en œuvre, il est essentiel de s'assurer de la constructibilité du système. Pour ce faire, les questions suivantes doivent être considérées :

- le système peut-il être mis en œuvre adéquatement, tout en rencontrant les exigences du cahier des charges?
- la technique de mise en œuvre spécifiée peut-elle permettre la remise en service de l'ouvrage dans le délai imparti?
- les conditions de chantier sont-elles propices à l'exploitation de la technique de mise en œuvre spécifiée?
- des entreprises qualifiées sont-elles disponibles pour le projet?

Si la réponse à l'une de ces questions est négative ou soulève l'incertitude, le choix du matériau de réparation et de méthode d'installation doit vraisemblablement être réévalué.

Par ailleurs, chaque projet de réparation revêt des particularités. Le succès de l'intervention est intimement lié à la mise en application de mesures appropriées de contrôle de la qualité. Une considération fondamentale à cet égard est l'expertise de l'entreprise mandatée pour effectuer les travaux de mise en œuvre spécifiés et, le cas échéant, la certification de ses ouvriers. Si les qualifications de l'entreprise et de ses employés ne sont pas démontrées, il est souhaitable de procéder à un projet de démonstration (pilote).

Application

L'expérience démontre que toutes les étapes dans la mise en œuvre d'une réparation en béton sont importantes et, de manière générale, aucune ne saurait être omise sans hypothéquer la durabilité de l'intervention. Peu importe qu'il s'agisse de la main d'œuvre, des procédures et/ou des matériaux, des carences résultent presque inévitablement en des réparations de qualité moindre, avec pour résultats une durée de vie réduite.

La séquence d'application devrait être bien planifiée et rigoureusement contrôlée tout au long de l'intervention, de manière à s'assurer que les caractéristiques rhéologiques du matériau demeurent à l'intérieur d'un spectre d'acceptabilité et à éviter l'introduction de tout joint froid. Suivant la technique de mise en œuvre préconisée, l'équipement utilisé, les procédures observées et la main d'œuvre disponibles doivent permettre une mise en place adéquate et bien cadencée du matériau de réparation, sans ségrégation, et en assurer la consolidation et la finition appropriées.

L'obtention de surfaces finies ayant les qualités esthétiques et la durabilité souhaitées nécessite une attention particulière et la mise en œuvre de procédures adaptées. Pour les matériaux de ragréage mis en place de façon gravitaire – hormis le cas des matériaux autoplacants, les opérations de compactage sont importantes pour obtenir un ragréage dense et uniforme, et une interface de résistance optimale. Le compactage est particulièrement critique lors de la mise en place sur une surface au relief très accidenté, pour prévenir la formation de vides et de nids de cailloux à l'interface, potentiellement très pénalisants pour la durée de vie de l'intervention. L'utilisation d'aiguilles ou de plaques vibrantes est recommandée. Enfin, après le compactage, les opérations de régalinge, l'aplanissement et de finition doivent être accomplies de manière à ce que le matériau soit manipulé et déplacé de façon minimale. La manipulation excessive du matériau favorise la ségrégation du matériau par remontée des particules fines et de l'eau vers la surface, hypothéquant la qualité de la surface avec des risques accrus de faïençage (patron de fissuration fine) et de faible résistance à l'abrasion (surface poussiéreuse).

Mûrissement

La mise en œuvre d'un mûrissement approprié (type et durée suivant la nature du matériau de ragréage) est fondamentale pour l'obtention d'une réparation de qualité satisfaisant les exigences du cahier des charges. Non seulement le mûrissement est important pour assurer la durabilité et une résistance à l'abrasion satisfaisante, mais il permet également de réduire les risques de conséquences défavorables reliées au retrait de séchage. Dans les réparations de surface, le mûrissement se révèle encore plus critique que dans la construction d'éléments nouveaux et doit être mis en œuvre dès que possible. En effet, en raison de leur volume limité et de leur géométrie (rapport surface/volume en général relativement élevé), les couches de ragréage sont davantage sujettes à une dessiccation séchage rapide.

8.4 Contrôle de la qualité

Tout au long des travaux de réparation, il importe de mettre en œuvre un système de suivi rigoureux permettant d'évaluer le respect des exigences du cahier des charges et l'atteinte des objectifs visés. Les propriétés physiques des matériaux utilisés doivent être évaluées régulièrement en procédant à des essais ciblés sur site et/ou en laboratoire. L'adhérence des ragréages peut être vérifiée au moyen d'essais d'arrachement, les plus couramment utilisés étant les essais d'arrachement en traction (*pull off tests*). L'examen des trous de forage dans les zones ragréées peut fournir des renseignements relativement très utiles quant à la consolidation du matériau de ragréage et la qualité de l'interface, de même que la présence de symptômes de dégradation.

Conclusion

L'entretien et la maintenance de nos structures et infrastructures constituent un défi majeur pour nos sociétés. L'environnement construit en béton armé date principalement de l'après-guerre et nécessite d'urgence un plan de remise à niveau, quand il n'est pas déjà trop tard et que la seule solution qui reste est la démolition.

Les dégradations subies par les structures en béton armé sont liées dans tous les cas à la présence d'eau et, dans les environnements courants, à la corrosion des armatures, qui engendre gonflement de l'acier et épaufrures dans le béton. La prise en compte de l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit est fondamentale, non seulement dans le cas de la construction neuve, mais aussi en situation de maintenance et de réparation. Le produit utilisé, en particulier pour la réparation des épaufrures, doit apporter une résistance supplémentaire par rapport à l'environnement extérieur, en même temps qu'une bonne compatibilité – essentiellement dimensionnelle – avec le support à réparer.

En vue de favoriser l'adhérence et donc la durabilité de la réparation, les études montrent à suffisance l'importance de l'adhérence initiale du produit de réparation : c'est une condition nécessaire mais pas une condition strictement suffisante de longévité.

A ce sujet, la préparation adéquate de la surface à réparer, consistant à enlever le béton de mauvaise qualité, à garantir une rugosité minimale pour favoriser l'accrochage mécanique, à obtenir une surface propre sont des opérations indispensables pour garantir l'adhérence.

L'emploi de plus en plus généralisé de bétons auto-plaçant mais aussi de bétons à ultra-hautes performances posent question pour l'avenir à moyen et long termes : les techniques et les matériaux employés aujourd'hui sur des bétons de moindres qualités seront-ils toujours valables pour des matériaux plus résistants, moins poreux ? Ces produits sont-ils eux-mêmes susceptibles de servir de produits de réparations pour les bétons actuels ? Sont-ils compatibles ?

Remerciements

Les auteurs souhaitent rendre ici hommage aux professeurs Michel PIGEON (Université Laval) et Robert DEGEIMBRE (Université de Liège) qui les ont formés dans cette discipline et leur ont appris les fondements scientifiques qui sont à la base de tous les développements qui sont présentés ici.

Un remerciement est également adressé aux gouvernements du Québec et de Wallonie-Bruxelles (Wallonie-Bruxelles International) qui ont permis, depuis plus de 15 ans, l'échange et la collaboration de chercheurs de l'Université de Liège et de l'Université Laval sur ces thématiques de recherche.

Sources bibliographiques

- [1] COURARD L., NELIS M. (2003) Surface analysis of mineral substrates for repair works : roughness evaluation by profilometry and surfometry analysis. *Mag. Concrete Res.*, **55**(4) 355-366.
- [2] MAAGE M. (2004) The new European EN 1504 standard. Guidelines for consultant. NORECON Seminar, Copenhagen, Denmark.
- [3] FIEBRICH M.H. (1994) Scientific aspects of adhesion phenomena in the interface mineral substrate-polymers. In: *Proceedings of 2nd Bolomey Workshop, Adherence of young and old Concrete* (ed. F.H. Wittman, Aedificatio Verlag, Unterengstringen), 25-58.
- [4] COURARD L. (1999) How to analyse thermodynamic properties of solids and liquids in relation with adhesion? In: *ISAP '99, 2nd International Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete* (Eds Y. Ohama and M. Puterman, Rilem Publications), Dresden, Allemagne, 9-20.
- [5] COURARD L. (2000) Parametric Study for the Creation of the Interface between Concrete and Repair Products, *Materials and Structures*, **33**, 65-72.
- [6] GUTOWSKI W. (1985) Physico-chemical criteria for maximum adhesion. Part I : Theoretical concepts and experimental evidence. *Journal of Adhesion* **19**, 29-49.
- [7] SILFWERBRAND J. (1990) Improving concrete bond in repair bridge decks. *Concrete International* **12**(9), 61-66.
- [8] EMMONS P.H., VAYSBURD A.M. (1993) Compatibility considerations for durable concrete repairs. *Transportation Research Record* 1382, 13-19.
- [9] BAZANT Z.P., (1982) *Mathematical models for creep and shrinkage in concrete. Creep and Shrinkage in Concrete Structures* (édité par Z.P. Bazant et F.H. Wittmann), Wiley & Sons, Chichester (UK).
- [10] SPRINKEL M.M., (1983) Thermal compatibility of thin polymer concrete overlays. *Transportation Research Board Record* 899, Washington (DC), 64-72.
- [11] NEVILLE A.M., (1994) Wither expansive cement? *Concrete International*, **16**(9) 34-35.
- [12] TORRENTI J.-M. (2009) Du béton frais au béton durci - Éléments de comportement, *Techniques de l'ingénieur: Les bétons dans la construction*, C2240, Éditions T.I., Saint-Denis, France, 19p.
- [13] BENBOUDJEMA F., DARQUENNES A. (2015) Fissuration par retrait gêné dans les ouvrages en béton armé, *Techniques de l'ingénieur: Pathologie générale – Pathologie du béton*, C2255, Éditions T.I., Saint-Denis, France, 28p.
- [14] ACKER P., (1992), *Retraits et fissurations du béton. Documents Scientifiques et Techniques*, Association Française pour la Construction, 42p.
- [15] SCHRADER E.K., (1992) Mistakes, misconceptions, and controversial issues concerning concrete and concrete repairs (part III). *Concrete International*, **14**(11) 54-59.
- [16] CADY P.D., WEYERS R.E., WILSON D.T., (1984) Overlays and bridge deck substrate treatments. *Concrete International*, **6**(6) 36-43.
- [17] HIME W., ERLIN B., (1987) Some chemical and physical aspects of phenomena associated with chloride-induced-corrosion. *Corrosion, Concrete and Chlorides*, ACI SP-102, 1-12.
- [18] VAYSBURD A.M., (1993) Some durability considerations for evaluating and repairing concrete structures. *Concrete International*, **15**(3), pp. 29-34.
- [19] CAPRA B. (2014) *Corrosion des structures en béton armé, Techniques de l'ingénieur: Pathologie générale – Pathologie du béton*, C6151, Éditions T.I., Saint-Denis, France, 28p.
- [20] OHAMA Y. (1997) Water resistance of PMMA mortars (*Polymers in Concrete*, Eds. Ohama, Kawakami and Fukuzawa, E&FN SPON, London), 511-520.
- [21] BUTLER M., HEMPEL R., SHORN H. (2006) Bond behaviour of polymer impregnated AR-Glass textile reinforcement in concrete. In: *International Symposium Polymers in Concrete* (Eds José Barroso de Aguiar, Saïd Jalali, Aires Camões, Rui Miguel Ferreira), Guimarães, Portugal, 173-184.
- [22] COURARD L. (2013) *Maintenance, entretien et réparation des structures en béton. Notes de*

- cours (GCIV 0133-1). Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège (CDC), 168p.
- [23] BERTRAND L. (2004) Influence d'un MHEC sur les propriétés physiques et mécaniques d'un enduit de rénovation de façade : étude de l'adhérence de l'enduit sur une pierre de tuffeau. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [24] American Concrete Institute. (2010) ACI 223R-10 – Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete, Farmington Hills (MI), U.S.A., 16pp.
- [25] RAUPACH M., BUTTNER T. (2014) Concrete Repair to EN 1504: diagnosis, design, principles and practice. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 278p.
- [26] BISSONNETTE B., COURARD L., GARBACZ A. (2016) Concrete surface engineering, Modern Concrete Technology (18), CRC Press, Taylor and Francis Group, 258p.
- [27] BISSONNETTE B., COURARD L., VAYSBURD A., BELAIR N. (2006) Concrete removal techniques: influence on residual cracking and bond strength. Concrete International, **28**(12) 49-55.
- [28] EMMONS P.H. (1994) Concrete repair and maintenance illustrated, RS Means Company, Kingston, MA, USA, 295p.
- [29] STRÖMDAHL C. (2000) The history of hydro demolition. Concrete Engineering International, **4**(8) 32-35.
- [30] ICRI Guideline No. 310.3-2004 (2004) Guide for the preparation of concrete surfaces for repair using hydrodemolition methods, International Concrete Repair, Des Plaines, IL 60018, 16p. MAILVAGANAM N.P. (1992) Repair and protection of concrete structures. CRC Press, Boca Raton, USA, 473p.
- [31] GARBACZ A., GORKA M., COURARD L. (2005) Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. Mag. Concrete Res., **57**(1) 49-60.
- [32] BISSONNETTE B., COURARD L. (2004) Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation : analyse des paramètres d'essai. Mater. Struct., **37**(269) 342-350.
- [33] American Concrete Institute. (2014) ACI 546.3R-14 – Guide to Materials Selection for Concrete Repair, Farmington Hills (MI), U.S.A., 76pp.
- [34] ICRI Guideline No. 320.1R-1996 (2002) Guide for selecting application methods for the repair of concrete surfaces. International Concrete Repair, Des Plaines, IL 60018, 8p.
- [35] CLELAND D.J., LONG A.E. (1997) The pull-off test for concrete patch repairs. Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, **122**(11) 451-460.
- [36] COURARD L., BISSONNETTE B., VAYSBURD A., BELAIR N., LEBEAU F. (2012) Comparison of destructive methods to appraise the mechanical integrity of a concrete surface. Concrete Repair Bulletin **25**(4) (July-August), 22-30.
- [37] EMMONS P.H., VAYSBURD A.M. (1995) Performance criteria for concrete repair materials, Phase I. Technical Report REMR-CS-47, US Army Corps of Engineers, April, 113p.
- [38] BISSONNETTE B., COURARD L., BEUSHAUSEN H., FOWLER D.W., SILWERBRAND J., VAYSBURD A.M. (2013) Recommendations for the repair, the lining or the strengthening of concrete slabs or pavements with bonded cement-based material overlays. Materials and Structures, **46**, 481-494.

Normes et standards

EN 1504-10 : 2003. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions - Requirements - Quality control and evaluation of conformity, CEN, Brussels.

ACI 364.1-R07 (2007) Guide for Evaluation of Concrete Structures before Rehabilitation, Committee 364 Rehabilitation, American Concrete Institute, Detroit (MI), USA, 22 p.