

CHAPITRE 1

APERÇU SUR LA RÉPARATION

DES OUVRAGES DEGRADÉS EN BETON

1.1 Introduction

Aujourd'hui, la plus part des infrastructures en génie civil sont en béton armé, dont la majorité et surtout les ouvrages routiers ont atteint un seuil de dégradation important et même parfois la fin de leur vie utile. Il est donc temps de les réhabiliter ou de les remplacer.

Le remplacement de ces ouvrages pose en plus du problème de financement, le problème de mise en service et les délais précieux lors de leur remplacement.

De même il y a plusieurs structures dégradées qui ne doivent pas obligatoirement être démolies. Alors il est nécessaire de chercher d'autres méthodes telle que la réparation pour prolonger leur vie utile.

Sur le marché mondial des matériaux, de nouveaux matériaux de construction sont apparus mieux adaptés aux nouvelles techniques de réparation. Toutefois, le succès de la mise en application de ces nouvelles techniques repose grandement sur leur adaptation au type de l'intervention et aux conditions du chantier. Il est donc primordial que leur choix et leur mise en oeuvre se fassent en étroite collaboration avec les différents intervenants afin d'assurer leur succès [15].

Les réparations les plus courantes d'ouvrages en béton de ciment sont soit avec du béton projeté par procédé à sec ou humide, soit au moyen d'un coffrage avec ou sans surépaisseur de béton, soit plus récemment, avec du béton auto nivelant [26]. Cette technique innovante fait actuellement l'objet de toutes les intentions. Ce matériau est à ce point fluide et se prête aux formes les plus complexes sans qu'on le vibre [44].

Cependant, plusieurs contraintes rendent difficile l'opération de réparation, c'est pourquoi lorsque on conçoit une réparation, le principal objectif outre celui de redonner à la structure ses qualités initiales, est de garantir la durabilité de l'intervention [35]. A cet effet l'utilisation des bétons autonivelants dans la réparation des infrastructures présente des avantages bien distingués de point

du fait qu'ils possèdent une grande fluidité lui permettant de remplir tous les coins et les recoins et rendant la structure à son état initial.

1.2 Problématique et objectifs du mémoire

Les dernières décennies ont été marquées par une intense activité de construction ou de mise en place d'un vaste réseau d'infrastructures en béton de toute sorte. Ces infrastructures et surtout les ouvrages routiers, actuellement ont atteint un seuil de dégradation importants et parfois la fin de leur vie utile. Il est donc temps de les réhabiliter ou de les remplacer. Néanmoins, le remplacement ou bien la reconstruction complète d'une structure pose un problème aussi bien financier que technique. De même il y a plusieurs structures dégradées qui ne doivent pas obligatoirement être démolies. Donc il est nécessaire de chercher d'autres méthodes telle que la réparation pour prolonger leur durée de vie.

En ingénierie de la réparation des ouvrages, des progrès importants ont été accomplis ces dernières années quoi qu'il en soit, on se trouve encore aux prises avec trop de cas de réparations qui présentent des problèmes de durabilité nécessitant à court terme de nouvelles interventions [37] et parfois il faut réparer la réparation [38].

La réparation d'un élément en béton qui fait généralement intervenir deux matériaux très différents, où la mise en place d'un béton jeune sur un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes, tant physico-chimique, que mécaniques, liés à la compatibilité au sens large des deux matériaux en contact [35].

L'obtention d'une compatibilité mécanique conduit vers une réparation durable, qui nécessite le développement de nouvelles techniques de réparation comme le béton projeté, ou bien plus récemment le BAN.

De plus, certaines structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs géométries telles les formes variables, les courbures multiples ainsi que leur forte concentration en armatures. Par conséquent, l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages entraîne des défaillances structurales. A cet effet, les bétons autonivelants permettent la construction de membrure aux formes complexes et fortement armées sans voir à modifier les coffrages pour permettre l'introduction d'aiguilles vibrantes [51].

Et pour améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation, en couplant la maniabilité qui caractérise les bétons autonivelants avec des fibres qui sont déjà bien connues par leur effet bénéfique en tant qu'armature secondaire minimisant l'ouverture

des fissures, et pour donner aussi une bonne capacité au matériau de réparation, tout en arrivant aux objectifs spécifiques suivants de notre étude :

- A- procéder à une étude bibliographique approfondie et critique des récentes recherches sur la formulation des bétons autonivelants et les essais de caractérisation des propriétés rhéologiques et mécaniques ;
- B- Evaluer les performances mécaniques obtenues (compression, traction, module élastique et retrait) ;
- C -Etudier l'effet des ajouts minéraux, l'ajout des fibres, et de la résine sur la maniabilité, la résistance et l'adhérence entre ancien et nouveau béton ;
- D -Recommandations sur les bétons auto nivelants destinés à la réparation.

1.3 L'état des structures et le contexte de réparation

En Algérie comme dans le monde entier ,les dernières décennies ont été marquées par la construction ou la mise en place d'un vaste réseau d'infrastructures en béton de toute sorte, comme les barrages, les ports, les ponts, les structures portuaires, les digues et les quais, etc. Les ouvrages ont été exposés pendant plusieurs années aux intempéries, c'est pourquoi actuellement ils montrent des signes de vieillissement et de détérioration bien que l'on ait très longtemps cru que les ouvrages réalisés en béton étaient indestructibles.[18]

Une fissure constitue le premier signe d'une première manifestation visuelle de dégradation qui se développe avec le temps, et la situation s'aggrave de plus en plus jusqu'à la ruine totale de l'ouvrage. Pour éviter une telle catastrophe on doit faire un diagnostic afin d'aboutir à des solutions pour une réparation réussite.

Il existe de nombreux mécanismes de détérioration du béton ainsi qu'une variété de facteurs contributifs. Puisqu'il existe également de nombreuses solutions de rechange pour chacune des catégories de détérioration, un choix judicieux tient aussi bien de critères financiers que de critères techniques. Les causes des problèmes techniques observés et les moyens utilisés pour réparer le béton ont fait l'objet de recherches considérables au cours des 30 dernières années. Les progrès accomplis dans l'élaboration de matériaux et dans les techniques de démolition, de réparation et de protection ont devancé considérablement l'estimation des coûts globaux et l'analyse des coûts-avantages relatifs à une même réparation [20].

Au Canada par exemple 16 milliards de dollars ,soit 60% des coûts totaux de la construction, sont dépensés chaque année pour la réparation et la restauration des structures de bâtiments. Au Québec le ministère des Transports consacre plus de la moitié

de son budget à l'entretien des structures en béton dont la détérioration est causée par la corrosion des armatures d'acier [18].

En France, en Amérique, en Angleterre et dans la plupart des pays développés, les gouvernements ne cessent plus de dépenser des milliards de dollars pour la restauration et la réhabilitation de leurs infrastructures (Tab 1.1).

TAB. 1.1 - Chiffres d'affaires de la construction dans quelques pays. [38]

Secteur	Etat	France (2001) (Milliard €)	Angleterre (1998) (Milliard £)	Canada(2000) (Milliard \$)	USA (1997) (Milliard \$)
Bâtiment	Neuf	47.3	/	/	551
	Entretien	44	/	/	294
Travaux publics	Neuf	17	/	/	103
	Entretien	9.5	/	/	67
Secteurs confondus	Entretien	/	14.9	16	/

1.4 Causes de dégradation du béton

Tout d'abord, il est préférable de rappeler que la dégradation du béton peut se définir comme la perte de sa performance qui se manifeste par la détérioration, la déformation ou le changement de ces propriétés suivant plusieurs causes qui peuvent être physiques ; chimiques ; ou bien mécaniques.

1.4.1 Principales causes physiques de dégradation

D'un point de vue physique, les principales causes de la dégradation du béton sont [23] :

A- Le retrait : Le retrait est un phénomène qui existe de façon systématique au sein d'un béton et se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement (retrait plastique, et retrait de séchage). Ceci engendre des fissurations superficielles de formes et directions quelconques et peuvent être avec le temps des causes principales de la dégradation [53].

B- Le tassement : On trouve aussi le tassement localisé des surfaces de coulage causé par la présence d'armature dans le béton engendrant ainsi des vides ou des fissures au

voisinage de ces armatures. Une augmentation du diamètre ou un mauvais compactage favorisera l'apparition des fissures [53].

C- Les contraintes thermiques : Les variations de température à l'intérieur du béton durci causées par la chaleur d'hydratation de ciment, ou bien la variation de la température atmosphérique (par exemple le phénomène gel - dégel) entraînent des changements de forme et de volume, [53] ce qui provoque des dégradations dans le béton.

1.4.2 Principales causes chimiques de dégradation

Pour le béton, l'environnement externe (l'eau de pluie ou de ruissellement, le CO_2 de l'air) apparaît comme un milieu extrêmement corrosif. C'est un peu comme si nous devions vivre dans un environnement constitué d'acide sulfurique ! Malgré tout, il résiste à la plupart des attaques chimiques lorsqu'il est fabriqué et mis en place selon les règles de l'art.

Les principaux processus chimiques des dégradations du béton sont généralement regroupés en trois catégories [18] :

A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates : Lorsque les eaux de ruissellement ou l'humidité du milieu externe entrent en contact avec la pâte de ciment, elles tendent à lixivier (dissoudre) certains produits à base de calcium (surtout la chaux formée par l'hydratation du ciment). Ce processus peut diminuer les propriétés mécaniques des hydrates ou augmenter la porosité interne.

B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif : Certaines solutions acides souvent rencontrées en milieu industriel, peuvent interagir avec la pâte de ciment pour former des sels solubles qui peuvent ensuite être facilement lixiviés.

Des eaux agressives peuvent réagir avec la pâte de ciment pour former de nouveaux produits insolubles mais qui ne participent pas au développement des propriétés mécaniques du béton.

C- La formation de produits expansifs : Plusieurs types de produits expansifs peuvent se former dans la pâte de ciment durcie. Le processus de formation est fonction des matériaux utilisés et/ou du type d'exposition. Ces produits expansifs peuvent créer de très grandes pressions internes qui peuvent provoquer une intense fissuration du béton.

Les principales causes de la formation de ces produits expansifs sont :

- l'attaque par les sulfates que l'on retrouve parfois dans les eaux souterrains. Ces réactions produisent un gel expansif.
- les réactions alcalis granulats qui produisent aussi un gel de silice fortement expansif, provoquant le gonflement de la structure.
- la corrosion des aciers qui produits différents oxydes de fer très fortement expansifs au voisinage des barres corrodées, provoquant les décollements du recouvrement de béton.
- la formation de glace qui engendre des pressions internes dans les pores capillaires du béton.

1.4.3 Principales causes mécaniques de dégradation [16]

A- Les chocs : Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue, ils peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voir même des ruptures d'acier.

B- Abrasion, érosion : Les phénomènes d'abrasion et d'érosion se rencontrent essentiellement dans des structures de génie civil en contact avec des circulations intenses d'eau comme les barrages (Érosion des évacuateurs de crue) ou les galeries d'amenée d'eau, et dans les structures soumises à des charges mécaniques répétées comme les chaussés en béton.

C- Délamination : L'action conjuguée des sollicitations climatiques des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdis de ponts provoque des délaminations du béton pour un nombre considérable d'ouvrage d'art dans certains pays comme les Etats Unis et le Canada. Mais en France la cause principale du délaminations du béton est l'action conjuguée de la dissolution de la chaux formée du béton, du gel éventuel de ce béton gorgé d'eau et le passage répété des roues de poids lourds qui provoquent un feuilletage local, terminer par la formation des trous dans le hourdis.

1.5 Les facteurs affectant la durabilité des ouvrages en béton

Plus loin des causes de dégradation du béton, il est nécessaire de parler de la durabilité et les facteurs qui l'affectent.

1.5.1 Notions de la durabilité [18]

La durabilité des ouvrages en béton est une nouvelle exigence des maîtres d'ouvrages de 21^{ème} siècle. Les performances du béton armé et son coût économique, ont fait de lui le matériau de construction le plus utilisé à notre époque. Bien que l'on ait très longtemps cru que les ouvrages réalisés en béton étaient indestructibles, l'influence des détériorations sur les structures en béton a mis en évidence les problèmes de vieillissement et engendré des inquiétudes de plus en plus vives parmi les clients auxquels sont destinés ces ouvrages.

Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état, alors qu'il existe aussi d'autres cas où une mauvaise durabilité a engendré la ruine totale ou partielle des ouvrages. [18]

Le choix des formules de béton et la conception des ouvrages doivent désormais prendre en compte la durée de vie escomptée pour l'ouvrage, qui peut être très variable suivant le type de structure à construire, l'environnement considéré et naturellement le type de sollicitations que devra subir l'ouvrage. Cependant, la durabilité des structures en béton armé ou précontraint est difficile à quantifier et donc à prévoir [3].

D'après Jacques Barron, la durabilité diffère selon l'ingénieur et le maître de l'ouvrage. Ce dernier n'accepte que la durabilité objectif : c'est à dire que l'ouvrage doit avoir une durée de vie indéterminée, alors que l'ingénieur vise ce qu'on appelle la durabilité performance, comme un objectif de qualité qui s'analyse en performance spécifique mesurables du comportement du béton [4].

P.C.Kregier définit la durabilité des matériaux en général comme la perte de performance en fonction du temps. D'autres définissent la durabilité du béton comme la capacité du matériau à conserver un comportement et une performance suffisamment satisfaisante dans les limites de la sécurité, lorsqu'il est soumis aux conditions réelles de service et pendant une durée prévue [34].

M.Sonebi voit que le terme de la durabilité se réfère à la capacité du matériau de résister aux conditions d'utilisation sans subir de dommages significatifs durant la vie (de service) de l'ouvrage. La détérioration du béton est souvent initialisée par un processus chimique, malgré les facteurs physiques et mécaniques qui peuvent causer des détériorations propres combinées ou non à un milieu chimiquement agressif [51].

1.5.2 Facteurs affectant la durabilité du béton

Une étude publiée dans la revue « ANNALES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS » en septembre 2000 par [Bernard. Fargeot](#) sur les facteurs d'influence sur le vieillissement des ouvrages d'art met en évidence la prépondérance de trois facteurs principaux qui sont [14]:

- le facteur mise en œuvre ;
- le facteur défauts ou erreurs de conception ;
- le facteur défaut d'entretien.

[M.Sonebi \[51\]](#) regroupe les facteurs qui sont l'origine de dégradations en trois grandes familles :

- les facteurs climatiques et environnementaux; le type d'exposition face aux agents potentiellement agressifs;
- les facteurs liés à la conception et à la mise en œuvre de l'ouvrage;
- les facteurs liés aux caractéristiques des matériaux et du béton.

[Mehta et Gerwick \(1982\)](#), rapporté par [M.Sonebi](#), regroupent les principales causes physique de détériorations du béton en deux grandes catégories:

- dégradation de surface;
- fissuration interne.

On peut généralement regrouper les facteurs affectant la durabilité en quatre grandes familles [18] :

- les facteurs liés à la conception de l'ouvrage;
- les facteurs liés à la mise en œuvre de l'ouvrage;
- les facteurs liés aux caractéristiques des matériaux et du béton;
- les facteurs liés à l'entretien de la structure.

A- Facteurs liés à la conception de l'ouvrage

De nombreux critères de conception peuvent exercer une grande influence sur la durabilité de béton. Ainsi une structure mal conçue peut avoir une durabilité déficiente malgré l'utilisation d'un béton de bonne qualité.

Parmi les principaux critères de conception qui contrôlent la durabilité d'une structure, on cite:

- Les aspect liées au système de drainage et d'évacuation des eaux ;

- Le calcul des armatures et le choix de leur épaisseur de recouvrement;
- Les choix des enduits protecteurs ou des imperméabilisants ;
- Le choix d'une géométrie particulière de la structure qui permet de diminuer le stress environnemental.

B- Facteurs reliés à la mise en oeuvre de l'ouvrage

Le béton est un des rares matériaux de construction où les composants sont rassemblés au site, ou près du site de construction, pour ensuite être dosés, malaxés et mis en place dans les coffrages pour obtenir un produit fini. Il existe un très grand nombre de variables qui contrôlent ce type de production. Les principaux défauts d'exécution rencontrés sont :

- 1) mauvaise exécution des coffrages ;
- 2) mauvaise disposition des armatures ;
- 3) mauvaise formulation du béton ;
- 4) mauvaise condition de transport du béton frais ;
- 5) mauvaise mise en oeuvre du béton ;
- 6) mauvaise technique de mûrissement du béton ;
- 7) mauvaise étanchéité.

C- Facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton

Pour fabriquer un ouvrage durable, il faut donc utiliser un matériau durable, car les propriétés de ce dernier ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage.

A cet effet, le choix du type de ciment en fonction des types d'ouvrages; ou en fonction du type de mise en oeuvre; ou bien en fonction de l'environnement; l'eau de gâchage, tant du point de vue de la quantité que de celui de la qualité, le rapport E/C, le choix des granulats et leurs qualités, le choix des ajouts minéraux et leurs quantités; le choix de tous ces paramètres utilisés dans la confection du béton est plus que nécessaire pour assurer sa qualité et sa durabilité.

D- Facteurs reliés à l'entretien de la structure

Des programmes d'entretien ou de protection sont généralement nécessaires pour éviter ou retarder certains types de dégradations des structures, ou au moins contribuer à prolonger très significativement leur vie utile. Parmi les méthodes d'entretien on peut citer :

- 1) Nettoyage régulier des joints de dilatation ;
- 2) Remplacement des membranes d'étanchéité ;
- 3) Nettoyage des conduits de drainage ;
- 4) Nettoyage des joints de dilatation.



Phot. 1.1- Mise à nu d'armature en sous face d'un pont à poutres. [8]

1.6 Réparation des ouvrages dégradés en béton

La réparation des ouvrages dégradés en béton est une opération qui fait intervenir deux matériaux, dont les propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont différentes. Il s'agit d'une part, d'un matériau de base (substrat) dont l'hydratation est terminée et dont les propriétés mécaniques, notamment le module élastique, sont élevées. D'autre part, il y a le matériau de réparation, matériau encore jeune, qui va subir d'importants changements volumétriques au cours de ses premières années d'exposition à l'air libre.

D'après [O.Laurence \[35\]](#), deux types de réparation peuvent exister :

- une réparation superficielle (mince) qui fait référence à des réparations d'épaisseur inférieure à 100 mm, pour laquelle les aciers de renforcement n'ont pas été dégagés.
- Une réparation structurale dont l'épaisseur dépasse 100 mm et, qui sera alors dictée par les lois de la résistance des matériaux et de la mécanique, dont l'objectif est de restituer la capacité portante initiale de l'élément considéré.

1.6.1 Stratégie de la réparation

Il est parfois difficile de déterminer avec exactitude la cause des dégradations et a fortiori, les causes des dégradations des réparations. Une étude a été réalisée dans le cadre de REHABCON (Tilly, 2004) a montré que plus de 75% des dégâts étaient causés par une conception incorrecte (32%), un mauvais diagnostic (12%), une mauvaise mise en œuvre (16%) et le choix inadéquat du matériau de réparation (32%) [9].

A cet effet, et pour avoir une réparation durable, L.Molez [38] voit qu'il doit faire apparaître (03) trois étapes principales indissociables, pour une telle stratégie de réparation :

A- Analyses des causes de la détérioration

L'identification des causes des dégradations est une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées, car il n'est généralement pas possible d'évaluer la nécessité de réparer une structure ou de choisir la ou les méthodes de réparation sans avoir, au préalable, bien identifier l'origine des dégradations.

B- Préparation de la zone à réparer

Cette phase exige une suppression du béton endommagé avec un soin particulier aux bords de la réparation, qui peut se faire avec plusieurs techniques.

Trois techniques sont le plus couramment employées [35], il s'agit du marteau pneumatique ; de l'hydro démolition et du sablage, ces techniques génèrent à la surface du support une rugosité plus ou moins importante, joue un rôle prépondérant pour l'assurance d'une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise.

Après l'enlèvement du béton détérioré, un nettoyage de la surface est nécessaire pour enlever les débris et permettre d'obtenir une surface propre et prête pour l'application d'une réparation. Cependant, il est important de protéger lors de la préparation des surfaces, les aciers d'armatures apparents ou de les remplacer si besoin.

C- Mise en place du béton de la réparation

C'est la phase finale de la stratégie de la réparation. Après avoir identifié les causes de dégradations, les méthodes et les matériaux de réparation, et après le nettoyage et l'humidification de la surface à réparer, le béton de réparation, alors sera mis en place selon les techniques exigées généralement par un cahier de charge afin d'obtenir une réparation de qualité.



Phot. 1.2 - Surface dégagée avant (à gauche) et après le jet de sable (à droite). [38]

1.6.2 Problèmes de la réparation

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support d'ancien béton (vieux béton), il se pose le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité se définit comme un équilibre entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du matériau de réparation et du vieux béton existant.

Dans la littérature, plusieurs études nous ont conduit vers la constatation que l'incompatibilité déformationnelle peut se traduire par deux problèmes au niveau de la réparation, il s'agit de la fissuration du nouveau béton et, de la perte de l'adhésion avec le substrat.

1.6.2.1 Fissuration de la réparation

La fissuration à plus ou moins court terme des réparations effectuées sur les ouvrages en béton de ciment est malheureusement trop souvent présente et difficile à prédire. Les problèmes sont en bonne partie attribuable au fait que le retrait du matériau de réparation, phénomène inévitable, est empêché par le substrat [37].

Le séchage et le retrait qui en découle génèrent de façon inévitable la fissuration des réparations, au moins en surface. De plus la densité de fissuration est directement liée au retrait développé par le matériau. Un retrait important conduit en effet à une densité de fissuration plus importante [35].

Dans cette section essayons d'établir la corrélation entre le retrait et la fissuration.

A- Les différents types de retrait

Dès sa fabrication, et durant toute sa vie, le béton peut subir cinq formes de retrait. A la phase plastique, période s'écoulant entre la fabrication et le début de prise, pendant laquelle le béton ne présente pas de cohésion, il connaît sa première contraction volumique, c'est le retrait plastique, qui est défini de manière classique, comme la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage [54].

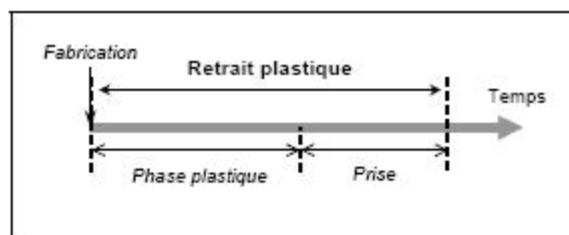


Fig. 1.1 - Définition du retrait plastique. [54]

Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va encore subir quatre formes de retrait [2] :

Le retrait thermique : les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante.

Le retrait endogène : l'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique.

Le retrait de séchage : c'est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique : après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant.

Le retrait de carbonatation : À la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, (la carbonatation) s'accompagne

d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer : on parle de faïençage.

B- Corrélation retrait- fissuration

O.Laurence voit que La fissuration est souvent la conséquence du retrait évoqué en premier lieu [35]. Il ajoute aussi que l'ouverture des fissures induites par le séchage varie essentiellement suivant l'intensité du retrait et la géométrie de la structure. Les ouvertures peuvent atteindre plusieurs millimètres dans le cas des pièces massives. Tant qu'elles sont peu profondes, leur espacement est petit car leur zone d'influence, directement reliée en élasticité à leur profondeur, est faible [35].

Ainsi, L.Molez [38] a conçu six matériaux de réparation, adaptés à la géométrie et aux propriétés des éléments à réparer, réparties comme suit :

- Deux (02) bétons ordinaires, mis en place par gravité et vibration, le premier (BO) est un béton classique de bonne qualité, le second (BOarr) est quasiment similaire au premier, mais un agent réducteur de retrait a été utilisé.
- Deux (02) bétons autoplaçants, le premier (BAP) est un béton autoplaçant, dont les adjuvants utilisés sont en poudre, le second (BAPftc) est un béton autoplaçant à faible teneur en ciment (une partie de ciment est remplacée par des cendres volantes).
- Deux (02) types de béton projeté ont été utilisés, l'un projeté par voie sèche (BPs), l'autre projeté par voie humide (BPh).

La composition de ces six bétons est illustrée dans le tableau 1.2

TAB. 1.2 - Caractéristiques des compositions. [38]

Matériaux	Unité	BO	BOarr	BPh	BPs	BAP	BAPftc
Ciment T10	Kg/m ³	400	400		400	412	235
Ciment T10SF	Kg/m ³			475			
Fumée de silice	Kg/m ³				40	37	20
Cendres volantes	Kg/m ³						214
Gravillons 10-2.5	Kg/m ³	957	957	495	210	769	766
Sable 5-0	Kg/m ³	767	767	850	1450	677	672
Fibres	Kg/m ³			18	1		
Eau	Kg/m ³	162	158	190	176	180	188
Agent. E.A	ml/m ³	80	80	119	qsp	qsp	qsp
Superplastifiant	ml/m ³	1800	1200	1675		qsp	qsp
Agents colloïdaux	ml/m ³					qsp	qsp
Agent .R.R	ml/m ³		800				
Teneur en air	%	8	8	14		12	8
Affaissement/Etal	mm	110	130	200		650	680
E/C		0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
S/G		0.44	0.44	0.62	0.87	0.46	0.46
Teneur en pâte	%	29	29	34	32	33	37
qsp : adjuvant en poudre. Quantité suffisante pour atteindre les propriétés souhaitées							

Les courbes de retrait total, de différents mélanges, mesuré sur des prismes scellés de dimension 100 mm x 100 mm x 300 mm, et conservé dans une salle à température et humidité contrôlées ($H_r=50\% \pm 5\%$ et $T_e=20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$), sont représentées à la fig.1.2 où nous pouvons constater que les amplitudes de retrait total vont de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BO à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BAP, de même les cinétiques diffèrent de façon significative. Par exemple, nous pouvons voir que le taux de retrait des BAP est plus important au jeune âge que le BO. Par contre il semble se stabiliser plus rapidement.

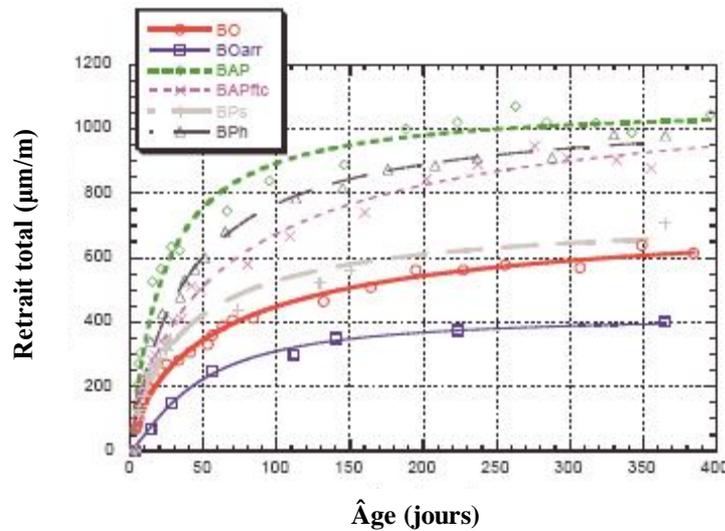


Fig. 1.2 - Retrait total de différents mélanges. [38]

Pour identifier la corrélation entre le retrait et la fissuration L.Molez [38] a effectué des essais sur des structures réparées. Les corps d'épreuves sont des poutres en béton armé de 4.1m de longueur et de section de 0.280x0.210. La fig.1.3 présente la coupe type des poutres. la zone foncée correspond à la zone réparée.

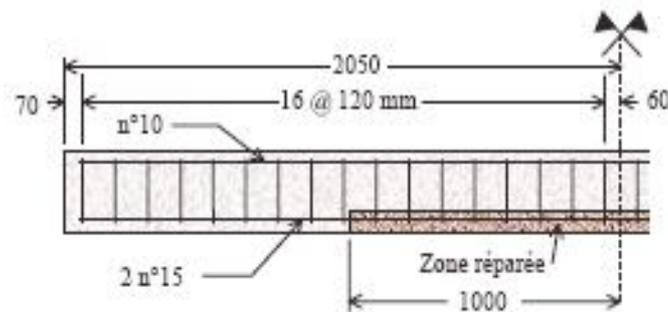


Fig. 1.3- Coupe type et armatures des poutres. [38]

Les poutres ont été exposées au séchage et conservées deux ans à l'extérieur, après une cure humide effectuée durant les sept premiers jours. Pour la préparation de la zone à réparer, les armatures ont été dégagées au marteau pneumatique.

Pour suivre l'évolution de la fissuration, douze poutres ont été réparées (deux poutres par mélange) et testées dans les conditions de séchage non couplé à un chargement mécanique.

Le faciès de fissuration de chaque poutre est observé pendant trois à six mois, où il a utilisé une lunette optique de grossissement 20X munie d'un vernier permettant de détecter les fissures de l'ordre de $5\mu\text{m}$ et de mesurer facilement les ouvertures des fissures supérieures à $25\mu\text{m}$. la figure 1.4, donne l'évolution de l'ouverture moyenne de fissure pour toutes les réparations en fonction du temps de séchage.

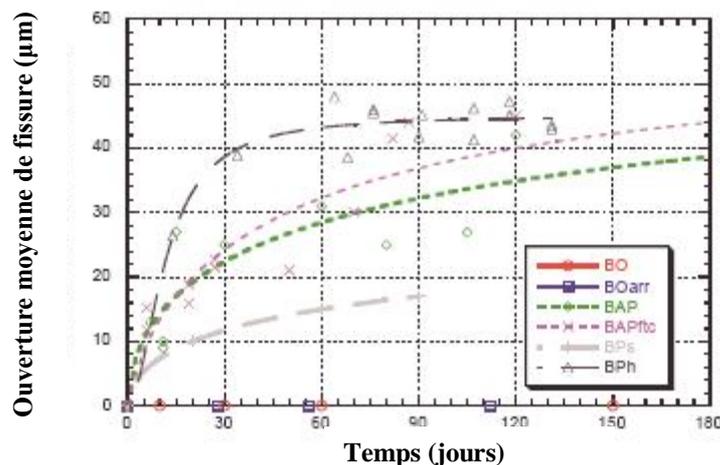


Fig. 1.4 - Evolution de l'ouverture moyenne de la fissure. [38]

Les courbes de cette figure, représentent les tendances générales suivies par chacune des compositions utilisées. Quatre tendances ressortent de ce graphique :

1. deux types de réparation (BO et BOarr) ne fissurent pas de tout ;
2. le BPs fissure très peu ;
3. les réparations effectuées avec les deux bétons auto-plaçants fissurent rapidement, mais le nombre de fissure est stable ;
4. le BPh fissure rapidement, et le nombre de fissures augmente.

Si nous pouvons relier ces quatre tendances au comportement en séchage et en retrait total des matériaux, nous constaterons les remarques suivantes :

1. les BO et BOarr font peu de retrait, mais ils n'ont pas fissuré ;
2. les BAP et BAPftc font beaucoup de retrait, mais la fissuration est importante.

La conclusion qu'on peut tirer de cette étude est que plus le retrait est faible, plus le risque de la fissuration est faible et réciproquement.

Dans le même but et, pour comprendre le lien entre le retrait et la fissuration, P.Turcry [54] a travaillé sur une gamme de douze formulations (sept BAP et cinq leurs dérivés en BO), il a constaté que le retrait plastique des BAP est systématiquement plus élevé que celui des BO, et l'amplitude passe au moins de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BO, à plus de 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BAP. Ce résultat rejoint d'après lui les résultats de H.E Gram et coll. Ensuite, il a choisi quatre bétons (deux BAP et deux leurs dérivés en BO), ces bétons ont été testés à l'aide du dispositif de fissuration à l'état frais pour béton, l'essai s'est déroulé pour les trois ambiances suivantes :

- 20°C, 50%HR, sans ventilation ;
- 20°C, 50%HR, avec ventilation ;
- 40°C, 50%HR, avec ventilation.

Les résultats trouvés sont représentés dans les figures : 1.5 et 1.6 comme suit :

- aucun des bétons ne fissurent en l'absence de vent ;
- le BO40 fissure plus rapidement que le BAP40.
- La fissuration qui se forme est d'ailleurs plus large.

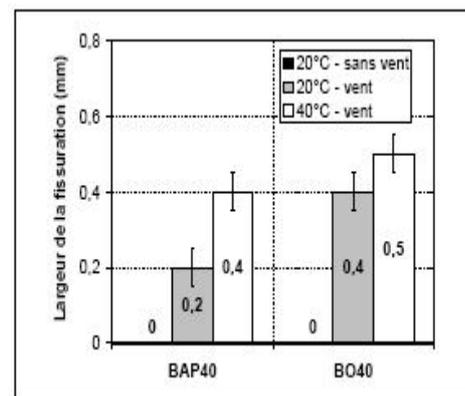
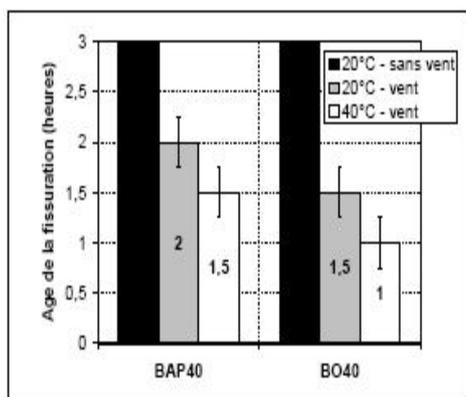


Fig. 1.5 - Age de la fissuration à l'état frais. [54] Fig.1.6 - Largeur de la fissure à 6 heures. [54]

A l'état durci, P.Turcry a testé les douze formulations de béton citées précédemment, où il a trouvé aussi que les retraits totaux des BAP sont toujours supérieurs aux retraits totaux des BO [54].

En ce qui concerne la fissuration, P.Turcry [54] a subi six formulations de béton (BAP40-BO40, BOPF5-BOF5, BAN1-BO1) au test de fissuration à l’anneau. Chaque béton a été testé sur un anneau équipé de jauges et sur un autre anneau sans jauge, ce qui lui donner une seconde mesure à l’âge de fissuration.

Les résultats de ce test sont groupés dans le tableau 1.3, où il a trouvé que les formules BAP40 et BAN1 se fissurent à la même échéance environs que les BO dérivés. Le BAPF5 se fissure en effet nettement plus tôt que le BOF5.

TAB. 1.3 - Âge de fissuration moyen mesuré sur deux anneaux. [54]

BAP40	BO40	BAPF5	BOF5	BAN1	BO1
27jours	27jours	21jours	56jours	25jours	28jours

Après ce test, P.Turcry [54] a issu à la conclusion suivante:

- le retrait total d’un BAP est proche du retrait total du BO dérivé de même résistance ;
- la fissurabilité (potentiel de la fissuration) ne se corrèle pas au retrait total à une échéance donné ;
- un BAP formulé au plus près des règles de l’art (recommandations AFGC) ne doit pas présenter de différence majeure en terme de fissurabilité avec un béton ordinaire de même résistance et formulé avec les mêmes constituants.

C- Le fluage

La relation entre la contrainte et la déformation du béton est une fonction du temps [38]. Lorsqu’un élément en béton est soumis à un chargement constant ou dont la vitesse est petite, il exhibe une déformation élastique instantanée mais également une déformation différée qui se poursuit dans le temps à taux décroissant tant aussi longtemps que le chargement est appliqué. Cette déformation supplémentaire, est appelée déformation de fluage [35].

A l’instar du retrait, il existe plusieurs formes de fluage : fluage propre et fluage de dessiccation. Leurs mécanismes sont complexes ; il n’y a, là non plus, pas de consensus général dans la littérature. C’est en tout cas la présence d’eau au sein du réseau poreux qui est au centre de toutes les explications [54].

- **le fluage propre ou endogène** : c'est lorsque le matériau ne subit pas d'échange hydrique avec l'extérieur, et le béton est en isolé de l'humidité en conditions isothermes [35] [54]. A long terme, le fluage peut être expliqué, du fait que les feuilles des hydrates (C-S-H), sous chargement, glissent progressivement les uns par rapport aux autres, alors au court terme, le chargement provoque une migration progressive de l'eau adsorbée dans ou entre les hydrates vers les pores capillaires, ce qui diminue globalement le volume du béton [5].
- **le fluage de dessiccation** : c'est le fluage qui vient s'ajouter au fluage propre lorsque le béton chargé est soumis à un séchage [54].

Le fluage est un phénomène fortement dépendant de la maturité du béton. L'amplitude des déformations différées décroît ainsi avec l'âge du chargement, et leurs mécanismes sont complexes [54], ils dépendent de plusieurs paramètres tels que : la teneur en pâte, la résistance et la contrainte appliquée, la finesse de ciment, l'humidité et la température [38].

D- Capacité d'adaptation par fluage

La bonne explication, que nous avons trouvée pour le phénomène de la capacité par adaptation, est celle d' O.Laurence [35], qu'on note intégralement :

Le retrait et le fluage des matériaux cimentaires sont deux phénomènes qui sont couplés tant sur le plan chronologique que sur le plan des mécanismes physiques mis en jeu. Le retrait de séchage additionné au retrait endogène engendre des contraintes importantes au sein de la couche de réparation, notamment en surface. Il y a alors deux possibilités. Soit le potentiel viscoélastique du matériau est suffisamment important pour permettre la relaxation des contraintes de retrait par fluage, soit la relaxation ne pourra se faire que par l'apparition de fissures. Il est fort probable que la réalité soit une combinaison de ces deux comportements.

Il ajoute : l'adaptation par fluage en situation de retrait résulte d'une compétition entre le retrait et le fluage d'une part, mais aussi entre les contraintes générées et la résistance en traction du matériau d'autre part.

Plusieurs comportements sont envisageables selon la capacité d'adaptation par fluage du matériau, soit le matériau ne développe pas assez de fluage pour relaxer les contraintes de retrait restreint et la fissuration apparaît alors au jeune âge de réparation (**cas 1**) figure 1.7, soit le matériau développe du fluage de telle façon que l'apparition de la fissuration est fortement retardée mais n'est pas empêchée (**cas 2**), enfin soit le matériau

développe une capacité d'adaptation parfaite et la relaxation des contraintes par fluage empêche totalement l'apparition de la fissuration (cas 3) .

L.Molez également a montré qu'une diminution du fluage tend à faire augmenter l'ouverture totale de fissure, alors qu'une augmentation du fluage provoque une décroissance. Avec un fluage important ($100 \mu\text{m}/\text{m}/\text{MP a}$) ajoute la fissuration est quasiment éliminée [38]. Peut être cette étude donne un avantage au BAN, qui se caractérise par un potentiel important de fluage, d'être utilisés d'une façon significative dans les travaux de réparation.

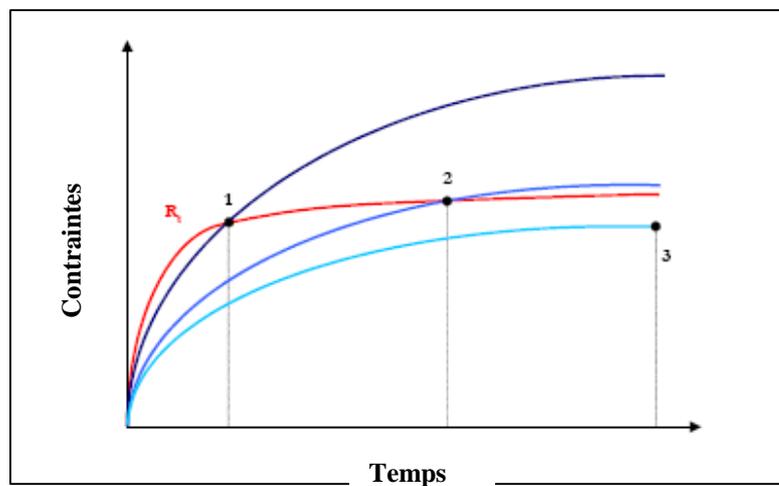


Fig.1.7 - Capacité d'adaptation par fluage. [35]

1.6.2.2 Perte d'adhésion avec le substrat

Dans le cas d'une réparation, l'interface béton vieux- béton jeune est un critère de durabilité capital [13]. Les phénomènes se déroulant à cette interface, sont complexes et dépendent d'un grand nombre de paramètres : caractéristiques du support, de la couche d'apport mais aussi de l'environnement climatique, chimique ou humain [9]. Comme aussi ils dépendent de la préparation et la rugosité de la surface [38].

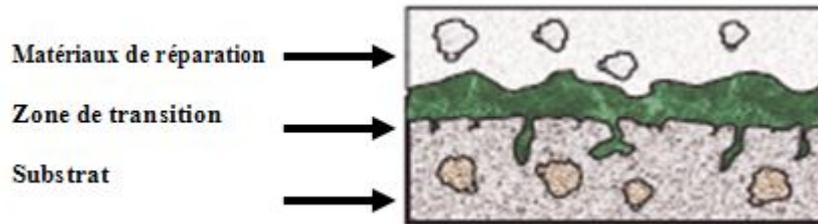


Fig.1.8 - Modèle d'interface dans un système réparation. [38]

L'obtention d'une bonne adhérence est la condition déterminante pour la tenue d'une réparation durable. De façon pragmatique une bonne adhérence est celle qui assure un lien efficace, uniforme et durable entre le matériau de réparation et son support. L'efficacité du lien réfère à sa capacité à unir les deux phases comme si elles n'étaient qu'une seule pièce monolithique [51].

A cet égard, une baisse d'adhérence est le gage d'une mauvaise durabilité car elle pourrait à long terme conduire au décollement de la réparation [35], ce décollement qui est en effet, généralement la conséquence de plusieurs causes de différents vieillissements comme le séchage, les cycles de mouillage- séchage ou de gel – dégel, ou encore la fissuration propagée dans la zone inter faciale, cette zone entre deux bétons, qui ont des propriétés différentes, constitue souvent la zone la plus faible dans la structure [38].

1.6.3 Durabilité de la réparation

1.6.3.1 Définition d'une réparation durable

Le principal objectif de toute opération de réparation durable est de prolonger la vie de la structure réparée, se prolongement peut être expliqué par le terme durabilité de la réparation, notion qui se traduit essentiellement par une fissuration minimisée ou évitée, et également par l'obtention d'une adhérence au support, qui soit suffisante et qui ne se détériore pas dans le temps.

Les deux notions : fissuration évitée, et adhérence au support, nous conduisent plus précisément vers le phénomène de la compatibilité, car nous constatons de nombreux cas de réparations déficientes sont dues à l'incompatibilité du matériau de réparation avec l'ancien béton. A cet effet, il est essentiel de développer des outils de caractérisation simples et accessibles, pour implanter la notion de la compatibilité dans la pratique des réparations [37].

1.6.3.2 Méthodes d'obtention de la compatibilité déformationnelle

Cinq principaux paramètres à considérer, pour caractériser la compatibilité déformationnelle, d'après F.Modjabi et coll. [37] : le retrait ; le module élastique ; le fluage ; le degré de restriction et la résistance à la traction.

O.Laurence [35] voit que l'obtention d'une bonne compatibilité déformationnelle, peut se faire de différentes façons. L'un des moyens consiste à utiliser un matériau dont le retrait est faible (utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait, ou encore l'utilisation d'un ciment expansif). Bien sûr minimiser le retrait de séchage peut aussi se faire en utilisant des matériaux dont la microstructure est très dense et donc dans la porosité est très fine. Mais cela n'est pas possible qu'avec des bétons de faible rapport E/C et comportant souvent de la fumée de silice dans leur composition.

Un autre moyen d'obtenir une compatibilité déformationnelle adéquate, ajoute O.Laurence [35] est d'améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation, cela peut se faire en utilisant des matériaux de forte résistance en traction (ce sont souvent des matériaux riches en ciment et de rapport E/C faible, et donc le retrait endogène va être élevé). Une autre possibilité consiste à utiliser des fibres d'acier qui donneront au matériau une meilleure capacité à contrôler la fissuration en le rendant plus diffuse et en minimisant les ouvertures de fissures.

En fin le dernier moyen, consiste à utiliser un matériau dont le potentiel de fluage est important comparativement au retrait qu'il développe au cours du temps [35].

Peut être ce dernier moyen donne l'avantage à l'utilisation des BAN dans les travaux de réparations, et ça ce que nous encourage de les formuler et les caractériser afin de les appliquer pour les travaux de réparation (thèse de notre recherche).

1.7 Les BAN dans les travaux de réparations

La technique du béton autocompactant ou autonivelant fait aujourd'hui l'objet de toutes les attentions que ce soit pour des travaux neufs, ou des travaux de réparation. En ce qui concerne les travaux de réparation, l'utilisation des BAN vise à garantir une bonne durabilité [45], peut être c'est l'objectif primordial de toute opération de réparation. Même la quantité et l'ouverture des fissures semblent se comparer avantageusement à celle, qui peut être typiquement rencontrée sur le même type de réparation au moyen de béton projeté [45].

Pour la construction d'un nouvel élément le béton doit fluer au minimum. Pour la réparation d'un élément de béton, lorsque l'on est en condition de retrait empêché non

structurale, on recherche un béton de réparation qui aura aussi une bonne capacité de fluage possible. C'est à cet égard, étant donné sa propension au fluage en tension au jeune âge, que l'utilisation d'un béton autonivelant présente un avantage marqué. Sous les contraintes internes de tension, le béton autonivelant flue, ce qui a pour effet de relaxer au fur et à mesure qu'elles se créent les efforts de tension causés principalement par le retrait du béton. Lorsque ce phénomène de relaxation permet au moment le plus critique d'avoir une résistance en tension du béton en tout temps supérieur aux contraintes internes en traction, il en résulte des surfaces exemptes de fissures [15].

Au Québec, les réparations les plus courantes d'ouvrages en béton sont réalisées soit avec du béton projeté par procédé à sec ou humide, soit plus récemment, avec du béton autonivelant [26].

Sa grande fluidité due à un dosage élevé de superplastifiant permet de combler toutes les vides, comme il s'avère aussi qu'il offre une excellente durabilité, une belle apparence des surfaces et une bonne adhérence au support, peu de fissuration et une mise en oeuvre adéquate [26][30].

1.8 Exemples de réparations avec le BAN

Il est envisageable que les domaines d'application des réparations avec le BAN, deviennent plus nombreux pour des raisons aussi bien économiques que techniques. Ils comprennent aujourd'hui des réparations des ouvrages d'arts, des bâtiments, et des constructions coulées sous l'eau.

Pour mettre en évidence la faisabilité de la réparation avec le BAN, on peut citer quelques exemples où ce type de béton a été la solution la plus adéquate pour plusieurs problèmes de réparation.

1- Réfection du passage inférieur Jarry/Querbes avec 420 m³ de béton auto nivelant fibré a été employé pour la réparation de 1700 m² de surface [15].

2- Réparation du Tunnel Notre-Dame de Grâce au cours de l'été 2000, Les réparations de sur près de 8000 m² de surface de plafond ont été réalisées sur une période de sept(07) mois au moyen du béton auto nivelant pendant les nuits tout en n'obstruant pas la circulation routière de jour[45].

3- Réfection du stationnement Webster à la ville de Sherbrooke en 1996 projet gagnant le prix du Ministère des Affaires municipales et de la métropole du Québec [17].

4- Réparation des piliers du pont d’Oakland (Californie), par du BAN fabriqué avec un agent colloïdal et de la fumée de silice. La densité du ferrailage et la présence de nombreuses installations temporaires nécessitaient l’utilisation d’un BAN [51].

5- Réfection de la centrale nucléaire de Sainte-Lucie avec un volume de 1530m³ de BAN coulé sous l’eau, contenant un agent colloïdal et un liant comportant (6% de fumée de silice et 12% de cendre volante) [51].

6- Réparation du barrage Red Rock (Etats-Unis) avec du BAN contenant un agent colloïdal coulé à une profondeur de 8m. Le ferrailage important et la profondeur rendaient difficile l’insertion du tuyau de pompage dans les coffrages [27].

Au Québec, une dizaine de réparations ont été faites avec du BAN, depuis 1997. Le tableau 1.4, illustre l’endroit, l’élément qui a été réparé et la formulation de mélanges.

TAB. 1.4 - Sites expérimentaux. [26]

ANNEE	ENDROIT	REPARATION	FORMULATION DE MELANGE/m ³
1997	Echangeur Blaise-Pascal (Québec)	Poutres précontraintes	580 kg de 10SF
1998	Autoroute 50(Gatineau) Autoroute Duplessis (Québec)	Extrémités de poutres Chevêtre	345kg de type10+30kgSF+161kg (LT) 500 kg de ciment ternaire
1999	Autoroute Dufferin-Montmoreney (Québec) Autoroute 10(Chambly) Autoroute 40(Trois- Rivières)	Poutres de rigidité Chevêtre Ponceau	475kg (50% type 10+50%type10SF) 500kg de ciment ternaire 500kg de type 10
2000	Autoroute20, rivière des Couture (Lévis) Deschambault (Portneuf) Autoroute5, boulevard Raymond (Hull)	Chevêtres Bases, colonnes et chevêtres Hauts des culées	480kg de ciment ternaire 510kg de ciment ternaire 394kg type 10SF+131kg de Laitier



Phot. 1.3 - Coffrage utilisé pour les travaux de réparation de la voûte au Tunnel Notre –Dame-grâce. [45]



Phot. 1.4 - Aspect final des réparations [45]



Phot. 1.5 - Passage inférieur Jarry/Querbes avant sa réfection [15]



Phot. 1.6 - Mise en place du BAN. [15]



Phot. 1.7 - Passage inférieur Jarry/Querbes tel que construit [15]

1.9 Bilan

Actuellement, la plupart des structures en génie civil, et surtout les ouvrages routiers, ont atteint un seuil de dégradation important. Alors il est temps de les réhabiliter ou les remplacer.

La dégradation de ces ouvrages peut se définir comme la perte de la performance du béton et qui se manifeste par déformation ou changement de ces propriétés suivant plusieurs causes: physiques; chimiques; ou bien techniques. A cet effet , dans la plupart des pays développés , les gouvernement ne cesse plus de dépenser des milliards de dollars pour la restauration et la réhabilitation , et de rendre durable leurs infrastructures.

La durabilité des ouvrages en béton qui forme une nouvelle exigence des maîtres des ouvrages du 21^{ème} siècle , peut être affectée par plusieurs facteurs liés aussi bien au défauts de conception qu'au défaut d'entretien et mise en oeuvre.

Afin de maintenir leurs états de service, la réparation constitue une solution primordiale pour les ouvrages dégradés. Cependant, lorsque un matériau de réparation est mis en place sur un support d'ancien béton, il se pose le problème de l'incompatibilité, qui se traduit par une fissuration évoluée et une perte d'adhésion avec le substrat, deux phénomènes conséquences du fait de retrait au sens large.

L'utilisation d'un matériau dont le potentiel de fluage est important comparativement au retrait qu'il développe, c'était l'un des moyens proposés pour obtenir une bonne compatibilité déformationnelle. Alors c'est peut être un avantage pour l'utilisation des BAN dans les travaux de réparation. Ces bétons qui constituent actuellement une innovation importante, liée essentiellement à la fluidité qui permet de remplir les formes les plus complexes, et de faire des réparations adéquates de surface de béton.