

1.1/ INTRODUCTION

Nous savons bien qu'un certain nombre d'ouvrages en béton armé nécessitent l'entretien, des réparations ou des reconstructions. La nature et l'origine des défauts sont multiples. Ainsi des erreurs peuvent être commises dès la conception ou la construction de l'ouvrage. D'autres dommages peuvent apparaître lors de chargement accidentel. Il reste enfin l'endommagement « normal » du béton au cours de la vie de la structure du aux charges d'utilisation, aux conditions climatiques, à l'environnement industriel et chimique. Des «maladies» du béton peuvent être aussi à l'origine de graves détériorations (réaction alcali-granulats, attaque au sulfate...). Sur les structures à réparer, on pourra alors relever un endommagement allant du défaut local (fissures, épaufrures...), à des délaminages importants et des attaques chimiques en profondeur. Dans notre étude, on s'intéresse à la réparation mince, le terme « réparation mince » fait référence au travail de réfection superficiel qui consiste à restaurer la surface d'un ouvrage en ajoutant une couche de béton non armée après en avoir dégagé la partie endommagée. L'épaisseur d'une réparation mince est inférieure à 100mm. Une réparation mince diffère donc d'une reconstruction partielle qui est parfois envisagée pour certains ouvrages pour lesquels l'endommagement est tel que la capacité structurale est affectée.

Il faut bien comprendre l'origine des dégradations afin d'éviter qu'elles ne réapparaissent une fois l'ouvrage réparé. Concevoir et réaliser une réparation sur une structure en béton est un problème complexe qui ne relève pas seulement d'un savoir-faire technique. Le système de réparation peut alors être étudié : technique de mise en place, choix des matériaux, dimensionnement. Ensuite la préparation de la zone à réparer doit être effectuée consciencieusement : suppression du béton endommagé, nettoyage et protection si nécessaire des aciers de renforcement, préparation de la surface du substrat et enfin application du produit de réparation. La durabilité d'une réparation 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.

Lors de la conception de la réparation, il faut évaluer les sollicitations que subira l'élément réparé, mais aussi la couche de réparation. Ces sollicitations dépendront de la configuration de la réparation, ainsi que de sa fonction.

Parmi toutes ces sollicitations, plusieurs études récentes (Saucier et coll., 1991 ; Bissonnette, 1996 ; Laurence, 2001) montrent que le retrait de séchage a un effet fortement préjudiciable pour la durabilité des réparations minces. Le retrait de séchage engendre un

gradient de déformations depuis la surface jusqu'à l'interface entre les deux matériaux. Le séchage du béton provoque un retrait qui évolue jusqu'à la mise en équilibre du matériau avec le milieu extérieur. Pour des éléments d'une épaisseur de quelques centimètres, cet équilibre n'est atteint qu'après plusieurs années.

Un autre paramètre qu'on doit mentionner est le fluage, qui influe sur le comportement mécanique des réparations. On va voir comment le fluage en traction peut à l'inverse avoir un rôle positif en permettant de relaxer les contraintes.

Dans ce chapitre on va présenter une recherche bibliographique générale sur la dégradation des ouvrages en béton (causes et origines), puis comment réparer et avoir une réparation durable. Donc on trouvera :

1. Origines et causes de dégradation du béton.
2. Facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages.
3. Système de réparation (préparation de surface et réparation).
4. Critères de sélection du matériau de réparation
5. Les phénomènes agissants sur le comportement des réparations.
6. Durabilité d'une réparation en béton.

1.2/ DEGRADATION DU BETON

La plupart des infrastructures de génie civil en service sont en béton. Le béton de ciment constitue certainement un des matériaux de construction Les plus durables, qui vieillit généralement lentement et bien Parfois, il peut arriver que son vieillissement soit accéléré selon les conditions environnementales. La longévité du béton va alors dépendre des attaques d'ordre climatique, chimique ou mécanique. Elle est aussi fortement tributaire de la qualité de l'exécution et de la conception de l'ouvrage lors de la mise en oeuvre. Ces ouvrages dégradés ont une durée de vie limitée et plusieurs d'entre eux nécessitent des réparations, voire une reconstruction partielle. Ainsi le domaine des réparations en béton connaît, depuis une dizaine d'années, un essor important dans le secteur du bâtiment et des travaux publics. L'entretien et la réhabilitation des ouvrages ont pris une part grandissante dans le secteur de la construction. La nature et l'origine des défauts sont multiples, l'identification des causes de dégradation est une des étapes les plus importantes dans le processus de réparation. Cette étape est aussi l'une des plus difficiles et délicates de tout le processus. En général, il est impossible d'évaluer la pertinence de réparer une structure ou de choisir les méthodes de réhabilitation sans avoir, au préalable, identifier la cause ou l'origine de la détérioration. [1]

1.2.1/ Origines et causes de dégradation du béton

Avant de commencer à citer les origines de dégradation du béton, on doit définir la dégradation, *C'est quoi dégradation du béton ?*

La dégradation du béton est sa perte de performance elle se manifeste par détérioration, déformation ou changement de ces propriétés. La fissure constitue le signe d'une première manifestation apparente de dégradation possible, comme elle peut prendre l'aspect des éclats ou couleurs de rouille. [2]

1.2.1.1/ Dégradations d'origine physique

D'un point de vue physique, il est important de noter que le béton est un matériau hydraulique et poreux et, qu'à ce titre les altérations physiques sont dues à des surcharges, à des sollicitations excessives, aux frottements, aux chocs thermiques, aux gonflements, aux retrait, tous ces phénomènes sont basés sur le comportement de l'eau en son sein et sur les échanges d'eau avec le milieu extérieur. [2]-[3]

a/ Retrait [4]

Le béton peut subir des dégradations dont la cause est l'existence d'un retrait mal maîtrisé. Le retrait est en effet un phénomène physico- chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Ce qui engendre en fissuration superficielle de formes et direction quelconque, on a différents types de fissures de retrait dont deux types sont :

❖ Retrait plastique

Causé par un manque d'humidité durant le mûrissement du béton.

❖ Retrait du séchage

La plus importante cause de fissuration du béton est le retrait au séchage sous contrainte. La perte humidité par la perte d'eau durant Le mûrissement cause le retrait de celui-ci de près de 1% par unité de longueur et, par conséquent, création de contraintes de traction. Si Le béton est libre de se déformer, aucune fissuration n'apparaît. Mais la combinaison des deux phénomènes, retrait et contrainte, provoque la fissuration du béton si la résistance à la traction de ce dernier est dépassée.

b/ 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. [4]

c/ Contraintes thermiques [4]

Les variations de température à l'intérieur du béton durci entraînent des changements de forme et de volume. Ce changement de température est causé par:

- 1) **la chaleur d'hydratation du ciment:** L'augmentation de la température du béton durant l'hydratation du ciment engendre une augmentation du volume de la structure. Quand le béton se rigidifie et la température de la structure baisse, des contraintes de tension s'établissent.
- 2) **La variation de la température atmosphérique** Où on a trois aspects, à prendre en considération :
 - **L'hétérogénéité des structures en béton** : Ou chaque élément dans la structure (granulat, pâte de ciment, armatures) a son propre coefficient d'expansion thermique. Une variation de la température entraîne une expansion différentielle des différents éléments et par conséquent, création de tension à l'intérieur du béton;
 - **une partie de la structure est soumise à un changement de température** : Le changement de volume résultant va être empêché par le reste de la structure, ce qui entraîne des tensions à l'intérieur de la structure;
 - **le gel- dégel** : le gel dans l'eau en circulation à l'intérieur de la structure ou dans des fissures déjà existantes à la suite d'une chute de la température va être accompagné par une augmentation du volume de l'eau. La pression qui en résulte conduit à la dégradation du béton. La dégradation du béton dû au gel-dégel se rencontre principalement dans les régions froides. Elles se produisent notamment sur les parties non protégées par un revêtement étanche, et son amplifiées par les utilisations de sel anti-verglas. Les symptômes les plus courants sont l'écaillage présent à la surface de la structure (Photo 1.1), et le gonflement de tout ou une partie de la structure accompagné le plus souvent d'une fissuration en réseau. A l'état ultime, il se produit parfois une désagrégation complète du matériau. [2]

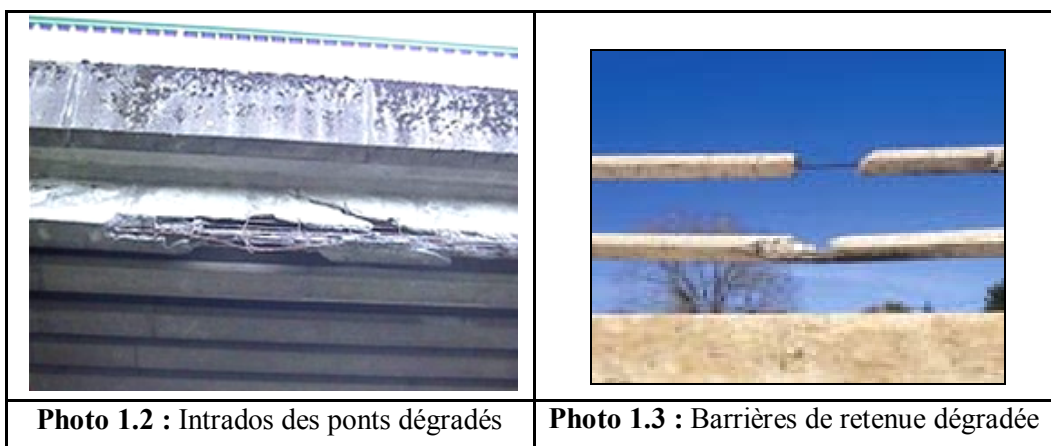


Photo 1.1 : Exemple de dommages causés par le gel-dégel

1.2.1.2/ Dégradations d'origine mécanique

A/ Chocs

Les désordres de ce genre concernant beaucoup plus les ponts. Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts (photo 1.2) ; les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue (photo 1.3), ils peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voir même des ruptures d'acier. [2]



B/ Abrasion, Erosion

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 chaussées en béton. [2]

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 dans sur 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 du béton, du gel éventuel de ce béton gorgé d'eau et, le passage répété des roues de poids lourds qui ont provoqué un feuilletage local du hourdis et qui a aboutit à la formation des trous dans le hourdis. [2]

1.2.1.3/ Dégradations d'origine chimique

A/ L'écoulement des fluides dans le béton

La cause principale de toutes les dégradations d'origine chimique est la possibilité de pénétration ou d'écoulement des fluides dans le béton, qui dépend de la perméabilité et par suite de la porosité du béton. La porosité interne du béton et de la pâte du ciment hydraté gouverne la durabilité des ouvrages en béton car, plus la porosité diminue, plus la perméabilité diminue, cette faible perméabilité retarde la pénétration des fluides agressifs. [3]

B/ La carbonatation

La carbonatation est un phénomène chimique présent dans l'épiderme du béton tout au long de sa vie. C'est l'ensemble des processus engagés par l'action du gaz carbonique sur les composés hydratés du ciment. Le béton qui est presque toujours en contact avec l'air ambiant, est donc soumis à l'action du gaz carbonique (CO_2) car, l'air contient 0.03% en volume de ce gaz, et peut atteindre jusqu'au 0.10%, cette teneur en dioxyde dépend de la pression et de la température. Ce gaz ne réagit pas directement avec le béton, il doit d'abord se dissoudre dans l'eau pour se transformer en un acide faible de forme H_2CO_3 . La carbonatation a pour effet d'abaisser le pH (le pH d'un béton carbonaté est d'environ 9, d'où le béton sain a un pH d'environ 13 ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs). A ces valeurs de pH, le film passif est détruit et la corrosion peut se développer. [2]-[3]

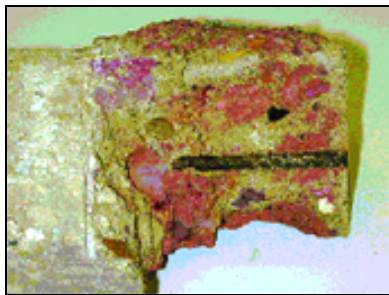


Photo 1.4 : Carbonatation du béton

Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation les atteint. Elle se traduit la plupart du temps par l'apparition d'épaufrures laissant apparaître des armatures oxydées (photo 1.4).

C/ L'attaque des chlorures

Les ions chlorures sont les plus agressifs, vis-à-vis des armatures. Une teneur élevée en ion chlore (>0,5% de la masse de ciment) provoque la corrosion si le béton est dans un environnement humide (avec une présence suffisante de O_2 et H_2O pour soutenir la réaction). Dans les bétons carbonatés, même une très faible teneur en chlorures peut provoquer la dépassivation des aciers d'armatures. [5]

D/ La corrosion des armatures

Les armatures sont généralement placées à une dizaine de centimètres de la surface. Si les armatures entrent en contact avec l'air ou l'eau, différentes réactions chimiques se produisent au voisinage de ces armatures. Le volume d'oxyde produit par la corrosion est, environ, huit fois celui du métal duquel il est issu, ce qui provoque des fissures et des épaufrures [ACI COMMITTEE 224, 1984]. [4]

Les dommages dus à la corrosion se manifestent par : (Photo 1.5), [3]-[6]

- Des expansions qui conduisent à la formation des fissures qui provoquent éventuellement du couvret du béton.
- Perte de l'adhérence des barres et la diminution de leur diamètre effectif, qui engendrent une perte de capacité en traction.
- Un éclatement de béton, car la rouille résulte de la formation de produits fortement gonflants qui dépendent de l'état de l'oxydation dont le volume peut être jusqu'à six fois supérieures au volume initial.
- Perte de section des barres d'acier.



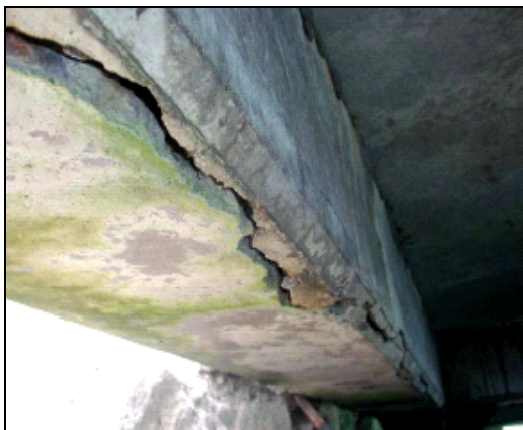
Eclats en formation



Poutre support de réservoir



Pile de pont



Poutre de tablier



Pile en zone de marnage

Photo 1.5 : Différents types de dégradations [6]

E/ Réaction d'alcalis–granulats [2]-[4]-[7]

Sous ce terme se regroupent toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. « Trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions puissent avoir lieu. Il faut que le granulat soit potentiellement réactif, que l'humidité relative excède 80 à 85% et que la concentration en alcalins dépasse un seuil critique ». Il existe trois grands types d'alcali- réactions : les réactions alcali- carbonate, alcali- silice et alcali- silicate. La réaction la plus fréquente est la réaction alcali- silice. Les désordres occasionnés par l'alcali- réaction se présentent sous forme de faïençage ou d'éclatement du béton. Ces réactions n'apparaissent en général qu'après plusieurs dizaines d'années. Cependant si les trois conditions précédemment citées sont remplies, avec notamment une forte réactivité des granulats et une forte teneur en alcalins, une alcali- réaction peut se développer en quelques années.

- **Réaction alcali- silice** : donnant lieu à un gel de silice expansif. ceci cause une expansion localisée et engendre des tensions à l'intérieur de la structure conduisant à une détérioration de celle-ci [ACI COMMITTEE 224, 1984]. (Photo 1.6)
- **Réaction alcali- carbonate** : provenant de certains agrégats calcaires. Le résultat de cette réaction est la formation d'alcalis et de silice entre les agrégats et la pâte de ciment [ACI COMMITTEE 224, 1984].
- **Réaction alcali- silicate** : se produisant avec les roches complexes, elles sont dues à la présence de silice très finement divisée et très réactive dont la réaction des hydroxydes alcalins conduit à la formation de gels de composition très voisine de celle des gels observés dans les réactions alcali- silice.

Les désordres apparents sur les bétons soumis à l'alcali- réaction se manifestent en plusieurs aspects :

- De la fissuration superficielle à un gonflement, en passant par des dégradations locales ;
- Formation de cônes d'éclatement ;
- Ces fissures typiques peuvent être accompagnées de déformations d'ensemble ou différentielles de l'ouvrage, de désaffleurement des fissures et dans des cas extrêmes de ruptures d'armatures [2].

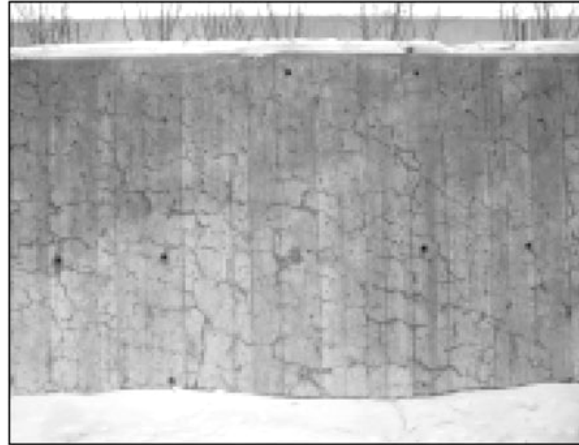


Photo 1.6 : Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis- silice dans un mur de soutènement à Ottawa

f/ Réactions sulfatiques [2]-[3]

Les sulfates présentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton, ils peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestiques et industrielle. Ils peuvent réagir avec certains composés du béton (notamment les aluminates), pour produire de l'ettringite secondaire, également appelée sel de Candlot ou trisulfoaluminate de calcium. Lorsqu'ils sont produits en quantité importante, ces sels à caractère expansif conduisent à un gonflement du béton et à sa fissuration. Les fissures produites sont généralement assez fines et surtout sont organisées en un réseau de mailles, on parle de faïençage (photo 1.7). L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans).



Photo 1.7 : Faïençage lié à une attaque sulfatique

g/ Les eaux pures

L'eau pure peut lessiver le béton (lixiviation), en dissolvant les constituants basiques du ciment, ce qui augmente la porosité et accélère la dégradation dans les zones béton dans la quelle l'eau pure circule. [3]

h/ Attaques des acides

Le béton résiste mal aux acides ou des composés qui peuvent se transformer en acide. Plusieurs acides organiques et inorganiques peuvent arriver dans l'eau de mer ou dans les eaux souterraines qui contiennent des composés de soufre ferreux comme une conséquence d'activité bactériologique. [3]

1.2.1.4/ Autres causes de dégradation

Nous avons vu que les bétons se dégradent à cause des milieux dans lesquels ils sont placés : agressions physiques et chimiques. Certaines autres causes, essentiellement dues à des événements extérieurs, peuvent également participer à la dégradation des bétons. [3]

a/ Incendie

Les dégradations par incendie sont heureusement rares pour les ponts, et affectent davantage les bâtiments. L'incendie a pour effet thermique d'élever rapidement la température au sein du béton, la vaporisation brutale de l'eau se combine à une altération interne du béton pour créer des microfissures, des écaillages, avec éclatements et des disparitions de béton [2], (Photo 1.8).

On trouve aussi d'autres causes de dégradation de béton qui sont liées a des événements extérieurs comme : Les séismes, les inondations, les mouvements de fondations, le vent, et les surcharges. (Photo 1.9).



Photo 1.8 : Dégradation causé par incendie



Photo 1.9 : Dégradation causé par surcharge

b/ Attaque bactériologique

Ce type se produit en présence de bactéries du type Thiobacillus qui oxyde l'hydrogène sulfuré gazeux (H_2S) que se condense sur les parois en acide sulfurique (H_2SO_4), ce dernier attaquant la portlandite pour former du gypse qui réagit à son tour avec les aluminates du ciment pour donner de l'ettringite. [3]

1.2.2/ Facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages

Avant de procéder à toute réparation de béton dégradé, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes et les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages. Malheureusement on trouve trop de réparation qui échouent, parce que l'étape de diagnostic a été escamotée.... En effet cette étape est nécessaire pour le choix convenable de la méthode de réhabilitation et du matériau à utiliser, qui peut être définie comme la réparation la plus durable sous les contraintes économiques imposés et sous les conditions d'exploitations de l'ouvrage.

Les principaux facteurs d'influence sur la dégradation des infrastructures en béton peuvent être regroupées en quatre familles [1] :

- Facteurs liées à la conception de la structure ;
- Facteurs liées à la construction de la structure ;
- Facteurs liées à la nature des matériaux ;
- Facteurs climatiques et environnementaux.

1.2.2.1/ Facteurs liées à la conception de la structure

Une structure mal conçue peut avoir une durabilité déficiente malgré l'utilisation d'un béton de bonne qualité. Les dégradations dues à une mauvaise conception (calcul et analyse) ou une mauvaise supposition (disposition constructive), c- a- d des éléments mal conçus qui, tout en respectant les exigences du cahier de charges, ne donne pas satisfaction en cours d'application [1]. Parmi les principaux critères de conception qui contrôlent la durabilité d'une structure sont :

- Les aspect reliées au système de drainage et d'évacuation des eaux ;
- Le calcul des aciers d'armatures et le choix de l'épaisseur de recouvrement des armatures;
- Les choix des enduits protecteurs ou des imperméabilisants ;
- Le choix d'une géométrie particulière de la structure qui permette de diminuer le stress environnemental.

1.2.2.2/ *Facteurs liées à la construction de la structure* [2]

Un certain nombre de dégradations du béton sont provoquées par une mauvaise exécution qui peut commencer dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en place de l'étanchéité. Les principaux défauts d'exécution rencontrés sont :

- **Mauvaise formulation du béton** : qui engendre une porosité trop élevée (surdosage en eau ou d'un sous dosage en ciment).
- **Mauvaise exécution des coffrage** : l'absence d'écarteur de coffrage peut entraîner des nids de cailloux ou des défauts de bétonnage.
- **Mauvaise disposition des armatures** : le manque de recouvrement des armatures mène vers la corrosion qui créer des fissures parallèles aux armatures, des épaufrures et de éclats.
- **Mauvaise condition de transport du béton frais** : qui peut provoquer la ségrégation, ou un raidissement du béton par un départ d'eau résultant d'un délai de livraison trop long ou d'une température extérieur très élevée.
- **Mauvaise mise en œuvre du béton** : une mauvaise vibration peut provoquer des défauts d'homogénéité et une ségrégation qui peut nuire à la résistance du matériau.
- **Mauvaise manutention d'élément en béton** : le manque de soin apporté lors de la manutention d'élément lourd en béton peut provoquer des épaufrures et mêmes des cassures de parties appartenant à l'élément (clés d'assemblage).
- **Mauvaise étanchéité** : elle facilite l'apparition d'efflorescences ainsi que la pénétration d'agent agressif et son corollaire : la corrosion des aciers.

1.2.2.3/ *Facteurs liées à la nature des matériaux*

La composition d'un béton peut être l'origine de dégradation d'un ouvrage. Il faut que les matériaux employés doivent répondre à trois objectifs : ils doivent pouvoir être mis en œuvre, présenté une fois en place ,les propriétés mécaniques que l'on attend d'eux, résister dans toute la mesure du possible , aux agressions du milieu environnant. [1]

Dans le choix des matériaux (ciment, granulats, ajout minéraux.....etc.), il faut penser à la stabilité chimique interne de la pâte de ciment hydraté. En effet la pâte de ciment hydraté peut se dégrader dans sa masse par suite de certaines incompatibilités telles que la présence de sulfate, l'utilisation des granulats réactifs (réaction alcalis granulats).

1.2.2.4/ Facteurs liées aux conditions climatiques et environnementaux [3]

Les différents mécanismes à la source des dégradations sont très souvent en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition du béton. L'ouvrage va subir au cours de sa vie l'action du milieu extérieur : cycle d'humidification et de séchage – cycle de chaud et de froid, ou ses variations thermiques trop importantes font fissurer le béton si des dispositifs n'ont pas été prévus pour éviter les contraintes qui en résultent. [3]

➤ On peut citer d'autres facteurs secondaires comme :

- **Les facteurs liés aux méthodes d'entretien** : des programmes d'entretien ou de protection sont nécessaires afin de reconstituer, améliorer ou maintenir la sécurité structurale pour éviter ou retarder certains types de dégradations des structures. (exemples : étanchéité, revêtement, nettoyage des joints dilatation...etc)
- **Les facteurs liés aux conditions d'exploitation** : On a des effets multiples d'exploitation des ouvrages telles que les routes les ponts ...etc, d'où des effets pondéraux, des effets dynamiques ou abrasifs résultants de la circulation des engins lourds et par les efforts de freinage, et les effets de répétition entraînant la fatigue.

1.2.3/ Symptômes et manifestations de dégradation

La pathologie des ouvrages en béton nous enseigne qu'il existe une multitude de symptômes de dégradation de béton. Les quatre symptômes principaux sont [2] :

1/ Les fissures

Se sont des ouvertures linéaires au tracé régulier dont la largeur est comprise entre 0.2 et 2 mm. Une fissure est une rupture entre deux parties du matériau qui ne sont plus liées et qui deviennent séparable (Photo 1.10). La nature des fissures varie en fonction des causes qui leur ont donné naissance, on distingue deux types de fissures [4] :

- **Fissures mortes** : Ce sont les fissures qui n'évoluent pas et tendent à se stabiliser dans le temps, elles sont généralement dues à un retrait au séchage ou un tassement localisé. Ces fissures ne présentent pas un grand danger pour la structure si elles restent inactives. Leur réparation est nécessaire si ces fissures constituent un problème pour l'étanchéité de l'ouvrage ou dans le cas où elles peuvent être le foyer d'autres types de fissures.

- **Fissures actives** : Ces fissures représentent un danger pour la structure. Elles sont en évolution progressive (étendue et ouverture). (Photo 1.10.a) La réparation de ces fissures est plus complexe, elle doit se faire à partir des causes qui leur ont donné lieu. Ces deux types de fissures peuvent exister sous forme d'un réseau de fissures ou en fissures individuelles et isolées.

2/ Les épaufrures

Fragment de béton détaché de la masse de l'ouvrage.

3/ L'écaillage

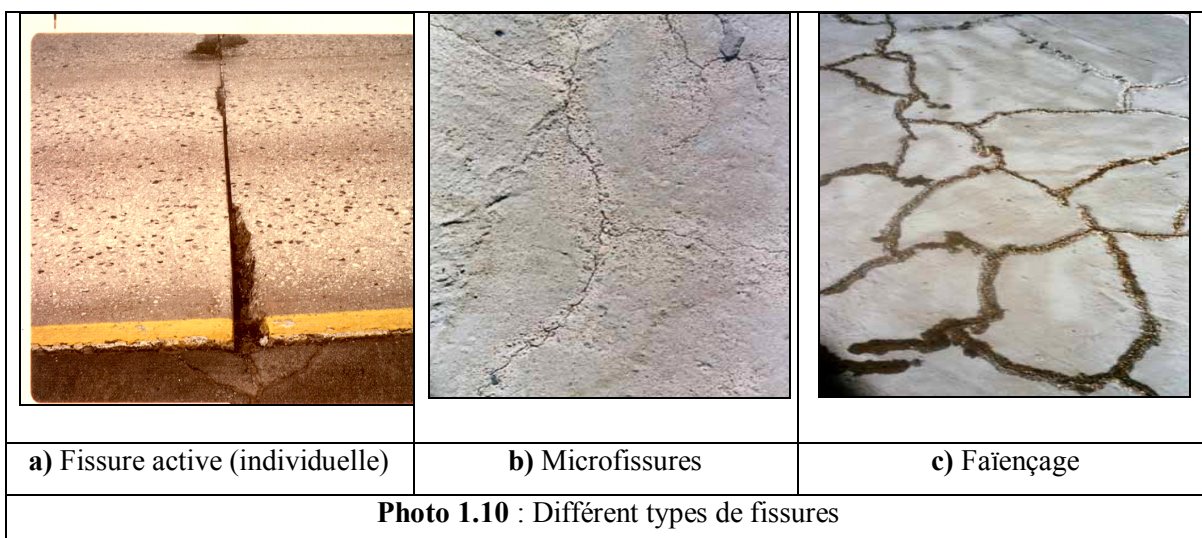
Décollement de la couche de mortier laissant les granulats à nu et pouvant se poursuivre par un délitage de la surface sous forme d'écaille. (Photo 1.11)

4/ La désintégration

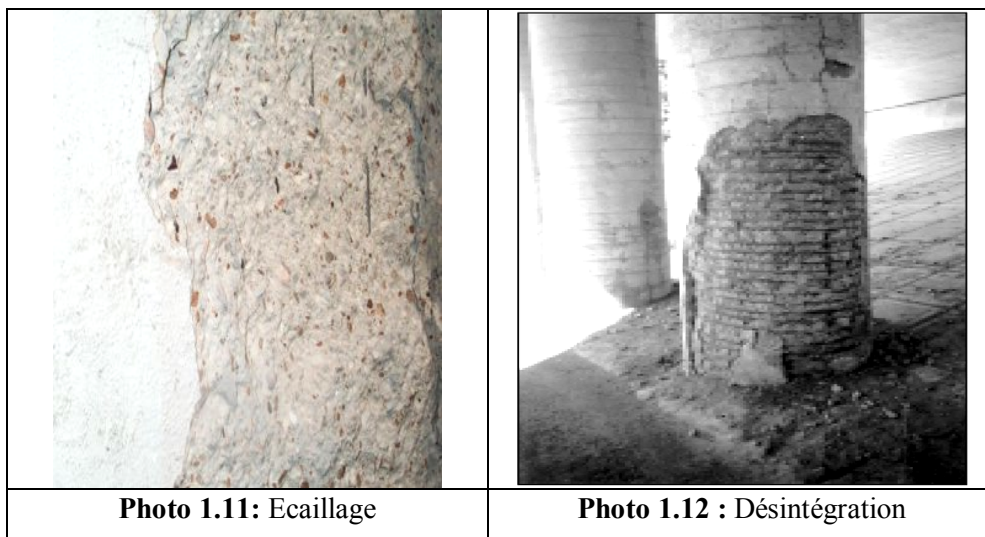
Désorganisation de la peau du béton pouvant se poursuivre par une destruction avancée du béton d'un élément d'ouvrage, et parfois assimilable à un pourrissement du matériau. (Photo 1.12)

❖ On cite d'autres manifestations secondaires comme :

- **Les microfissures** : Des ouvertures de moins de 0.2 mm. (Photo 2.10.b)
- **Faïençage** : un réseau de microfissures se présente sous forme d'un dessin géométrique a mailles irrégulières qui peut dépassé 100 mm, il peut apparaître sur les dalles ou les murs. (Photo 2.10.c)



- **Distorsion**
- **Fuites**
- **Taches de rouilles**
- **Délamination**
- **Echelonnage de surface :**



Le diagnostic doit donc, en premier lieu, identifier la ou les causes des dégradations ; mais il doit aussi évaluer l'étendue des désordres de façon à choisir la technique de réparation adéquate et de bien limiter les zones à réparer. Le tableau (1.1) rassemble les différents symptômes de dégradation selon leurs causes.

Tableau 1.1 : Principaux symptômes de la dégradation du béton [2]

	Fissures	Epaufures	Ecaillage	désagrégation	En activité ou en évolution
Carbonatation					
Corrosion des armatures	X	X			OUI
Dégradation interne (alcali- réaction)	X				OUI
Attaque bactériologique	X			X	OUI
Attaque sulfatique (externe)	X		X	X	OUI
Retrait, tassement	X				NON
Gel- dégel	X		X	X	OUI
Chocs	X	X			NON
Abrasion, érosion				X	OUI
Défaut d'exécution	X	X			NON
Incendie	X		X	X	NON

La connaissance de la nature physico chimique des réactions en cause dans les dégradations est primordiale. Il faut en effet juger si ce sont des réactions de dégradation internes ou externes au béton, c'est-à-dire si la réaction affecte la masse entière du béton ou simplement sa peau.

1.3/ REPARATION DES OUVRAGES

1.3.1/ Définition

La réparation d'un élément en béton fait généralement intervenir deux matériaux très différents. D'une part, il y a le substrat, qui date normalement de plusieurs années et qui est considéré stable du point de vue volumétrique. D'autre part, il y a le matériau d'apport ou de réparation qui subira d'importants changements volumétriques au cours de ses premières années d'exposition à l'air libre. Deux types de réparation peuvent être effectués: une reconstruction partielle ou une réparation mince. Dans le premier cas, l'état de la structure est tel que ses capacités sont réduites et elle n'est plus sécuritaire. Une partie importante de béton, qui est détérioré, doit alors être enlevée. La reconstruction partielle peut exiger l'utilisation d'étais afin de pouvoir enlever le béton de façon sécuritaire et des barres d'armatures sont ajoutées dans la partie reconstruite. Dans le second cas, la réparation se limite à enlever le béton détérioré sur une profondeur de quelques millimètres, soit entre 25 et 100 mm, et à le remplacer par un nouveau béton, avec ou sans ajout d'armature, afin de retrouver l'aspect esthétique de la structure d'origine .[8]

1.3.2/ Système de réparation

La stratégie de réparation doit faire apparaître trois étapes principales indissociables (figure 1.1). Une analyse des causes de la détérioration précède nécessairement les suivantes. Il faut bien comprendre l'origine des dégradations afin d'éviter qu'elles ne réapparaissent une fois l'ouvrage réparé. Le système de réparation peut alors être étudié : technique de mise en place, choix des matériaux, dimensionnement. Ensuite la préparation de la zone à réparer doit être effectuée consciencieusement : suppression du béton endommagé avec un soin particulier aux bords de la réparation, nettoyage et protection si nécessaire des aciers de renforcement, ajout de barres d'armature si besoin, préparation de la surface du substrat et enfin application du produit de réparation. La (figure 1.2) donne un rapide aperçu de ces trois principales étapes.

Lors de la conception de la réparation, il faut évaluer les sollicitations que l'élément réparé subira, mais aussi la couche de réparation. Ces sollicitations dépendront de la configuration de la réparation, ainsi que de sa fonction (protection de surface, transfert de charge...).

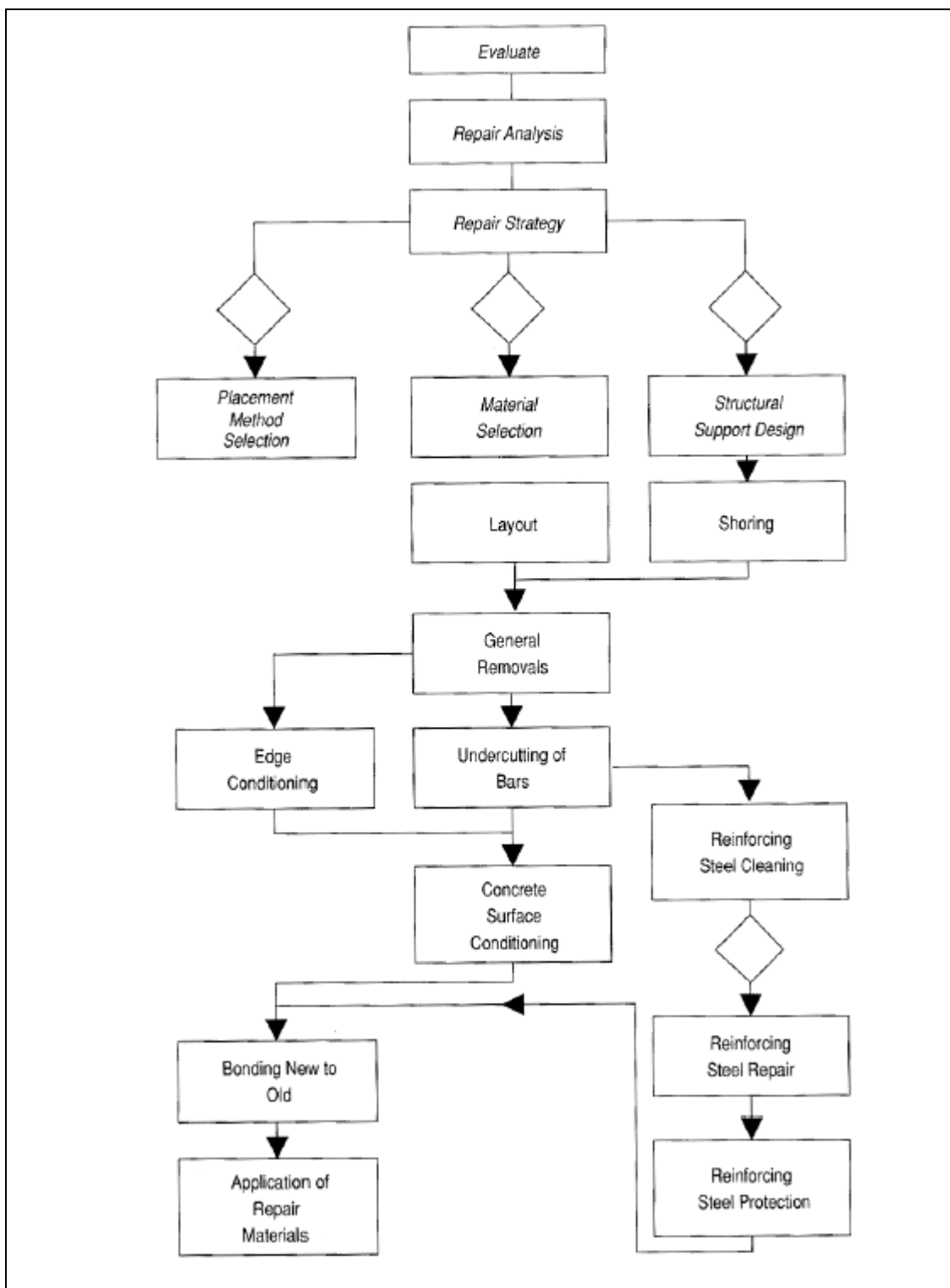


Figure 1.1 : Stratégie d'intervention à réparer [9]

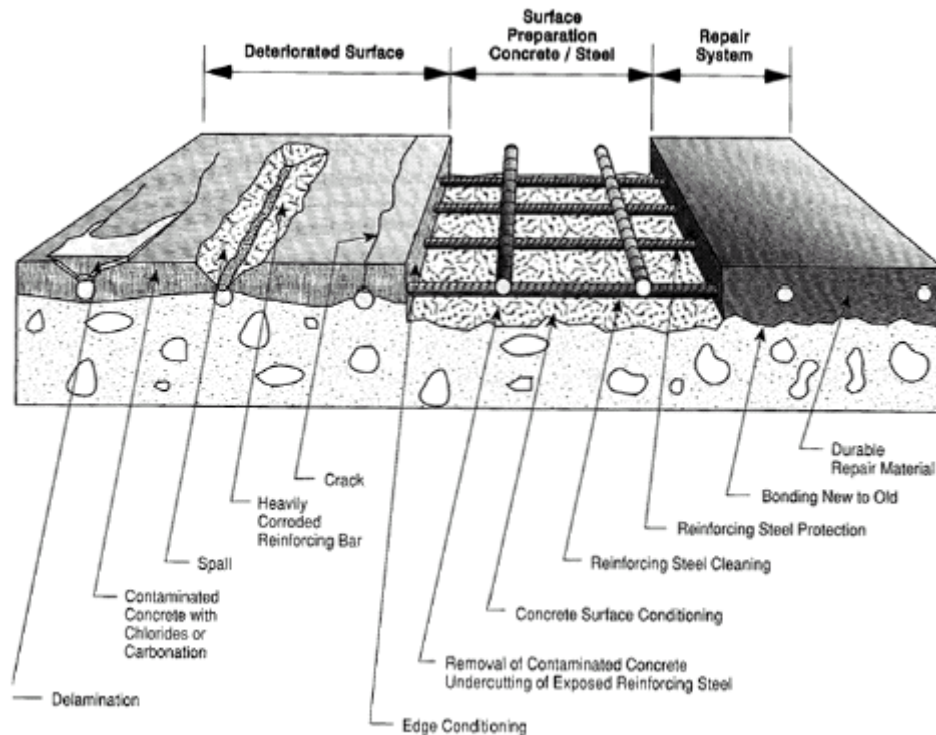


Figure 1.2: Les trois principaux étapes d'une bonne réparation [9]

Après avoir identifié les causes de dégradation, on doit choisir la méthode et le matériau convenable pour réparer. Le choix du système de réparation (méthode et matériaux de réparation) à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et l'importance des désordres constatés en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction. Des sujétions de chantier et des contraintes de site (condition d'exploitation d'ouvrages).

1.3.3/ Préparation des surfaces à réparer

Après la sélection des méthodes et matériaux utilisés, on doit d'abord établir le mode de préparation de la surface, l'objectif d'une bonne préparation de surface est de créer un support sain, propre, rugueux afin d'assurer une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise.

1.3.3.1/ Enlèvement du béton dégradé

Il est indispensable d'enlever toutes les parties de béton non adhérentes au support. Il s'agit des parties endommagées, partiellement décollées, poreuses ainsi que celles qui présentent une apparence saine mais sonne le creux sous des coups de marteau. En règle générale, le béton sain est celui qui est difficile à enlever par des moyens manuels. [2]

Lorsque la zone est carbonatée ou attaquée par les chlorures s'étend jusqu'aux armatures, il faut enlever complètement la périphérie des armatures jusqu'à l'apparition du béton sain.

Il existe de nos jours une grande variété de technique pour éliminer le béton dégradé. Les techniques les plus fréquemment employées pour démolition de surface sont :

a) L'hydro-démolition

C'est la technique la plus efficace et la moins traumatisante pour le support (peu ou pas de microfissuration), cette technique utilise des jets d'eau à très haute pression pour enlever le béton détérioré en surface, cette pression peut être ajusté en fonction de profondeur de démolition ou en fonction de la qualité du béton à enlever.

b) Marteau piqueur

A l'aide d'un marteau de masse moins de 14 kg avec un grand nombre de coups (1000 à 2000 coups/mn), il donne une bonne qualité de surface avec peu de vibration. Le rendement varie en fonction de la qualité du béton, de la présence des armatures et de l'opérateur.

c) La brise béton

C'est un gros marteau hydraulique de masse comprise entre 15 à 30 Kg, mais son utilisation provoque dans la plus part du temps des fissurations et trop de bruit, à cause de la grande vibration.

d) projection des particules

Le jet de sable, le jet de billes sont des techniques qui permettent l'enlèvement d'une mince couche (quelques millimètres).

- **Le jet de sable** consiste un flot de particules de sable entraînées à haute vitesse par un jet d'air comprimé. Les chocs usent le béton permettent un meilleur contact entre l'ancien et le nouveau béton.
- **La projection des billes** consiste à projeter à haute vitesse des billes d'acier (2mm de diamètre), par cette technique on aura moins de poussière.

1.3.3.2/ Nettoyage de la surface [2]

Le nettoyage de la surface est nécessaire pour enlever les débris, les huiles et les poussières, il permet d'obtenir une surface propre afin d'avoir une adhérence entre le matériau de réparation et le vieux béton (support), le mode de nettoyage varie selon les

techniques de préparation de surface employées auparavant, la méthode de nettoyage doit être compatible avec le produit de réparation qui sera mis en œuvre après. (Photo 1.13).



Photo 1.13 : Nettoyage de la surface

1.3.3.3/ Humidification de la surface

Après nettoyage de la surface, et dans le cas d'un produit qui exige un support d'application humide, il est souvent conseillé d'humidifier le parement de béton pour faciliter l'accrochage des produits de ragréage à base de liant hydraulique, et pour éviter l'effet de dessiccation du produit de réparation (retrait). L'humidification est généralement réalisée par arrosage ou par aspersion d'eau vers le support de façon qu'il soit saturé et qu'il conserve son aspect humide pendant plusieurs heures avant la réparation. Par la suite, on va voir l'effet de mouillage de substrat sur la durabilité des réparations.

1.3.3.4/ Protection et remplacement des aciers [2]

A la réparation du parement de structure en béton armé, on trouve en général les aciers apparents ont perdu leur couche de passivation, et certains ont entamé leur processus de corrosion. Cependant il faut assurer soit une nouvelle protection des aciers lors de la réparation, soit de remplacement des aciers fortement corrodés par d'autres aciers neufs. (Photo 1.14). Pour les armatures qui ne présentent que de légères traces de rouille (corrosion active) on ne doit pas les accepter surtout en présence de chlorures, la décision devrait être prise après une bonne évaluation d'un expert, et avec l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion.



Photo 1.14 : Enlèvement des aciers corrodés

A/ Décapage des armatures existantes

Lorsque les armatures sont corrodées ou portent des traces de rouille elles doivent être débarrassées de tout ce qui pourrait nuire à leur adhérence avec le béton rapporté. Leur décapage est alors indispensable et peut être réalisé par sablage par grenailage, par jet d'eau à haute pression où a la brosse métallique suivant l'ampleur des travaux.

B/ Remplacement des aciers

Parfois il est nécessaire de procéder à un remplacement ou un ajout d'aciers passifs dans le cas des ragréages, lorsque les longueurs de recouvrement sont insuffisantes, il est possible de souder de nouvelles armatures sur les aciers existants ou utiliser des coupleurs mécaniques.

1.4/ CRITERES DE SELECTION DU MATERIAU DE REPARATION

Une fois le diagnostic de dégradation est fait et la principale cause de détérioration déterminée et le béton détérioré enlevé, il est indispensable de sélectionner le matériau et la technique adéquate de réparation, ou l'ingénieur doit choisir le produit de réparation le mieux adapté au concret qui se présente en se basant sur les propriétés des matériaux de réparation, la compatibilité de ces matériaux avec le béton en place et la stabilité de service.

Actuellement, de nombreux produits commerciaux spécifiques aux réparations sont disponibles sur le marché des matériaux de construction. La composition de ces matériaux, qui ne sont pas toujours des matériaux cimentaires, est souvent gardée secrète par le fabricant, et leurs propriétés mécaniques et physiques ne sont pas toujours bien connues. De plus, les concepteurs de réparations n'ont pas beaucoup de retour d'expérience sur l'utilisation de ces matériaux.

Un des principaux problèmes qui se posent actuellement est qu'il n'existe aucun ensemble de règles de conception des réparations en béton qui permette aux ingénieurs d'en garantir le bon fonctionnement et la durabilité. Avant toute chose, il est donc nécessaire de mieux connaître et de mieux comprendre le comportement mécanique du système formé par la réparation et son support, ainsi que les mécanismes physico-chimiques mis en jeu. Seules des recherches conduites dans cet objectif permettront d'élaborer des règles de conception et par la suite de développer des matériaux spécifiquement adaptés au problème des réparations.

Tous les produits de réparation peuvent être classés en trois catégories principales qu'on va présenter ci-dessous.

1.4.1/ Présentation des produits de réparation

1.4.1.1/ Les liants hydrauliques [20]

Cette catégorie de produits est la plus utilisée et se subdivise en deux catégories selon que le ciment est seul (produit à base de liants hydrauliques traditionnels, encore appelés LHA), ou que celui-ci est modifié par ajout de polymère (produit à base de liants hydraulique modifiée, appelés LHM). Les produits à base de LHA (mortiers et béton ordinaires), auxquels il est possible d'incorporer des adjuvants ou des fibres. Les produits à base de LHM (bétons modifiés aux résines) sont constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines miscibles dans l'eau, et peuvent éventuellement être fibrés. Les résines sont principalement de types acrylique, vinylique, ou styrène-butadiène.

1.4.1.2/ Les polymères (Produits à base de résines de synthèse)[20]

Ces produits se composent de sable (cas de mortier), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques, et éventuellement de charges minérales.

Ils sont soit mono-composants et le polymère réagit en formant une structure linéaire après départ du solvant, soit bi-composant (voire tri-composants) et le polymère réagit en formant un réseau tridimensionnel au cours de sa réticulation. Les produits les plus couramment utilisés sont ceux à base de résines époxydes ou polyuréthanes.

1.4.1.3/ Les liants mixtes (liants hydrauliques associés à des polymères) [20]

Les produits mixtes sont des produits à base de ciment et de polymère organique réactif. Cette famille de produits est dominée par les systèmes époxy-ciment ; ceux-ci

comportent généralement trois composants de résine (base et durcisseur) et le mélange granulaire composé de ciment et de filler.

Chaque catégorie a des propriétés physiques spécifiques, comme on le montre dans le (tableau 1.2). Il est important de comprendre ces propriétés, car elles conditionnent le choix des matériaux de réparation qui soient compatibles autant que se peut, avec les propriétés du béton à réparer. Le choix et l'application du produit de réparation doivent être conformes aux normes destinées à la réparation [6]. (ANNEXE)

Tableau 1.2 : Propriétés des matériaux de réparation de béton typiques [10]

Type de matériau de réparation	Mortier à base de polymères ⁽¹⁾	Mortier cimentaire modifié par des polymères ⁽²⁾	Mortier cimentaire simple ⁽³⁾
Résistance à la compression (MPa)	50-100	30-60	20-50
Résistance à la traction (MPa)	10-15	5-10	2-5
Module d'élasticité (GPa)	10-20	15-25	20-30
Coefficient de dilatation thermique (déformation par °C)	25-30 x 10 ⁻⁶	10-20 x 10 ⁻⁶	10 x 10 ⁻⁶
Température maximale de service (°C)	40-80	100-300	>300

⁽¹⁾ : Les polymères ; ⁽²⁾ : Les liants mixtes ; ⁽³⁾ : Les liants hydrauliques

Parmi ces produits présentés ci dessus on a les bétons modifiés aux résines : le béton imprégné de résine et le béton traditionnel additionné de résine. On obtient le premier en imprégnant des éléments préfabriqués en béton de ciment Portland avec un monomère qui est ensuite transformé en polymère solide. On fabrique le second en remplaçant une partie du liant par un polymère latex [3]. Les propriétés types du béton modifié aux résines sont comparées a celle de béton de ciment Portland au tableau (1.3).

Pour notre étude de recherche en s'intéresse au bétons et mortiers de latex. Alors on doit définir les latex et indiquer leur rôle et leur effet dans la réparation.

Tableau 1.3 : Propriétés types* du béton modifié aux résines et du béton de ciment Portland [3]

Matériau	Résistance à la traction MPa	Module d'élasticité GPa	Résistance en compression MPa	Résistance au cisaillement KPa	Absorption d'eau %	Résistance aux cycles gel-dégel, nombre de cycles/ % perte de poids	Résistance aux acides**
Béton imprégné de résine	10,5	42	140	-	0,6	3 500/2	10
Béton imprégné de résine***	14,7	49	273	-	≤0,6	-	≥10
Béton additionné de résine	5,6	14	38	≥4 550	-	-	4
Béton de ciment Portland	2,5	24,5	35	875	5,5	700/25	-
*Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes; les caractéristiques des produits commerciaux peuvent varier considérablement selon la formulation et le procédé de fabrication.							
**Facteur d'amélioration par comparaison au béton de ciment Portland.							
***Béton traité en autoclave avant l'imprégnation.							

1.4.1.4/ Les latex [1] [11]

Le terme latex, qui désignait à l'origine le liquide sécrété par certains végétaux, se rapporte maintenant à une vaste famille d'émulsions de polymères synthétiques mise en solution dans l'eau. Les latex (composés de monomères et non de polymères) se distinguent en cela des autres résines, que l'on incorpore au béton à l'état frais et dont on provoque la polymérisation à l'intérieur de la matrice. Cette différence fondamentale explique la grande simplicité de mise en oeuvre du mortier ou du béton de latex : il suffit d'ajouter le latex au mélange frais.

Les latex se présentent généralement sous la forme d'un liquide blanc, de densité voisine de 1 et dont la teneur en solide varie de 20 à 50% en matières actives, Ils peuvent également être utilisés sous forme de poudre : c'est le cas pour le mortier prêt à l'emploi, préemballé. Le mode d'action du latex dans le mortier ou le béton de ciment peut être expliqué de façon simple. Au départ, les chaînes de polymère sont en suspension dans l'émulsion qui est ajoutée au béton ou au mortier. Avec la progression de l'hydratation, la pâte de ciment forme sa structure d'hydrates et le polymère est confiné dans les vides capillaires et

autour des granulats. Avec le temps, l'eau et les additifs se retirent des capillaires et les chaînes de polymère se déposent et coagulent pour former un film qui tapisse la surface des vides capillaires. La matrice cimentaire constituée des hydrates, tels que les C-S-H, est donc complétée par une co-matrice polymérique qui la scelle et la consolide.

L'amélioration des propriétés du mortier ou du béton par l'addition de latex nécessite donc l'assèchement, ou moins partiel, des pores capillaires afin que le film de polymère se forme. Cet assèchement se produit même dans un béton conservé humide à cause de l'autodessiccation due au processus d'hydratation, si le rapport E/C est suffisamment faible. Plusieurs latex sont sensibles à une exposition prolongée à l'humidité. Avec la restauration des pores, le polymère retourne sous forme d'émulsion. L'autre limitation importante vient du fait que la plupart des latex sont sensibles à la chaleur.

❖ *Les mortiers latex*

Les mortiers de latex contiennent généralement entre 10 et 20% de latex par rapport à la masse de ciment. Les latex confèrent au mortier une adhérence importante sur des supports même lisses, une amélioration de la plasticité permettant une réduction de la quantité d'eau de gâchage, une amélioration de l'imperméabilité, une diminution du module d'élasticité et une augmentation de la résistance à la traction. Les mortiers au latex se révèlent donc d'excellents matériaux pour réparer les structures.

1.4.2/ Choix des produits [2]

Pour les ragréages et pour la réparation des défauts les plus courants, le choix s'établit entre quatre types de systèmes de réparation :

- Les mortiers à base de LHM mis en œuvre après application d'une couche d'accrochage en liant époxyde, ou d'un gobetis d'une barbotine ;
- Les mortiers à base de résine époxyde mis en œuvre après application d'une couche d'accrochage en liant époxyde ;
- Les mortiers à base de résine polyuréthane mis en œuvre après application d'une couche d'accrochage en liant polyuréthane;
- Les mortiers mixtes de type époxy-ciment mis en œuvre après application d'une couche d'accrochage en liant époxyde ou d'un gobetis, ce système étant plutôt réservé aux reprofilages ou à la réparation de dégradations superficielles du béton.

Le choix est évidemment fonction de l'objectif de la réparation et dépend de nombreux paramètres dont les principaux sont les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des produits, les conditions de mise en œuvre, l'aptitude à l'entretien, la durabilité, l'esthétique et le coût. Pour aider au choix, le tableau (1.4), indique les principaux avantages et inconvénients des trois types de produits, le quatrième type étant moins utilisé pour la réparation des ponts. Les mortiers mixtes de type époxy -ciment cumulent les avantages et inconvénients des mortiers à base de ciment et des mortiers à base de résine époxydique, et leurs propriétés sont intermédiaires entre celles de ces deux familles.

Tableau 1.4: Tableau comparatif des caractéristiques des produits les plus utilisés [12]

Caractéristiques	LHM	EP	PUR
Adhérence sur support sec	+	+++	++
Adhérence sur support humide	++	+	-
Adaptation à la fissuration du support	+	+	++ ou +++
Effet passivant	+++	0	0
Comptabilité thermique	+++	+	+
Module d'élasticité	Elevé	Moyen	Faible
Fluage	Faible	Elevé	Elevé
Retrait	Elevé	Faible	Faible
Résistance aux agressions chimiques	+	+++	++
Résistance aux agressions de l'environnement climatique	+++	+	+++
Rapidité de remise en service	++	+++	++
Faiblesse du coût	+++	+	+

LHM : Produit à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères organiques ;

EP : Résine époxydiques ;

PUR : Résines polyuréthanes ;

+++ : Plus le nombre de + est élevé, mieux le produit est adapté à la caractéristique recherché ;

- : Non recommandé ;

0 : Le produit ne répond pas à la question posée.

1.5/ PROBLEME DES REPARATIONS MINCES

La qualité et le choix du matériau sont essentiels en ce qui concerne la performance à long terme d'une réparation. Néanmoins ce choix n'est pas en lui-même suffisant, car il faut également prendre en considération d'autres paramètres qui affectent la durabilité de la réparation d'une structure en béton tel que la préparation de la surface, les constituants du matériau de réparation et sa mise en place et enfin le type de mûrissement et le plus important

c'est la compatibilité du matériau de réparation avec le substrat. Car la mise en place d'un béton jeune sur un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes, tant physico- chimiques que mécaniques liées a la compatibilité au sens large des deux matériaux en contact.

D'après Emmons et coll, 1994, la compatibilité est définie comme étant « *un équilibre des dimensions et des propriétés physiques, chimiques et électrochimiques entre le matériau de réparation et le substrat* » [1], comme il est présenté dans la (figure 1.3), Chaque type de compatibilité est sensible à des facteurs différents. Un fort contraste de ces propriétés ne peut que conduire à une détérioration plus au moins rapide de la réparation.

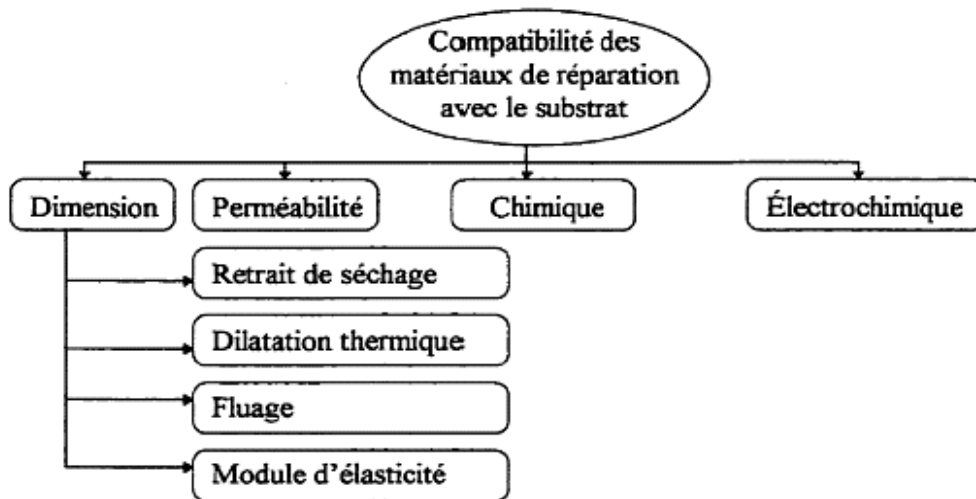


Figure 1.3 : Facteurs affectant la compatibilité des matériaux de réparation [1] [13]

Le problème initial dans la réparation est la compatibilité dimensionnelle des éléments. Dès sa mise en place, le matériau de réparation est le siège de variations volumiques causées aussi bien par la réaction d'hydratation du ciment (retrait endogène, retrait thermique) que par le séchage (retrait de dessiccation). Dans la mesure où le béton du support est stable hydriquement et que l'hydratation est inactive, les variations volumiques du matériau de réparation seront restreintes par la présence du support. Le matériau qui constitue le support de la réparation est de plus un matériau dont l'hydratation est terminée et donc dont les propriétés mécaniques, notamment le module élastique, sont élevées comparativement au matériau de réparation. Le retrait de séchage engendre un gradient de déformations depuis la surface jusqu'à l'interface entre les deux matériaux. Du fait de sa restriction par le support et par l'épaisseur même de la couche de réparation, ce gradient va générer des contraintes de traction en peau et de compression au cœur. Avec l'avancement du séchage, toute l'épaisseur

de la réparation sera le siège de contraintes de traction. Ces contraintes vont, en peau, rapidement atteindre la limite élastique du matériau et ainsi induire de la fissuration. Avec l'avancement du séchage, les fissures vont s'ouvrir, se multiplier et se développeront plus en profondeur dans la couche de réparation.

Afin d'éviter la création de contraintes de traction trop importantes dans la réparation, et ainsi de minimiser voire d'éviter la fissuration de retrait restreint, il est nécessaire que le matériau de réparation et le support soient compatibles en terme de déformation. Un matériau de réparation ayant une bonne capacité déformationnelle sera donc un matériau qui sera soumis à peu de déformations empêchées qui sont sources de contraintes de traction et de fissuration. [14]

Entre les propriétés des matériaux de réparations à considérer lors de la sélection, nous trouvons donc le retrait de séchage, le coefficient dilatation thermique. Un exemple qui illustre l'importance de ce que nous venons de mentionner est le fait que certaines résines époxydes ont un coefficient dilatation thermique huit fois plus grand que celui du béton. Si la compatibilité des propriétés mécaniques et thermiques est facile à obtenir entre le substrat et le matériau de réparation, le retrait de séchage du matériau de réparation est par contre difficile à contrôler en effet une multitude de facteurs affectent ce paramètre. Ces facteurs sont liés aussi bien aux matériaux qu'aux conditions environnementales [1].

1.5.1/ Les phénomènes agissants sur le comportement des réparations minces [14]

Une réparation en béton est un cas particulier de déformations empêchées. Dès lors, tous les phénomènes chimiques et /ou physiques qui provoquent des déformations au sein du matériau auront une influence sur le comportement mécanique des réparations. On va essayer de présenter les principaux phénomènes pouvant affecter le comportement et la durabilité des réparations en béton.

1.5.1.1/ Le retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière et un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment. La pâte de ciment et le béton manifestent des variations dimensionnelles en l'absence de chargement ; ces variations sont surtout en relation avec la dessiccation et la structuration progressive du ciment (hydratation).

Le retrait du béton est un processus relativement complexe, on a pris pour habitude de le composer en cinq types différents [15], le retrait : plastique, de séchage, thermique, de

carbonatation et endogène. Ces cinq composante du retrait total du béton sont cumulatives, mais elles ont des cinétiques très déférentes. Le retrait total peut conduire à la fissuration d'où cette dégradation peut nuire aux propriétés de durabilité du matériaux [16].

1.5.1.1.1/ Le retrait plastique

On l'appelle aussi le premier retrait, il se produit avant la prise du ciment, à un moment ou la pâte est encore déformable, et lorsque le flux d'eau évaporée au niveau de la surface est supérieur au flux d'eau ressuée. La réaction d'hydratation s'accompagne d'une réduction de volume Δv , appelé contraction le Chatelier, qui présente environ 10% de volume initiale d'eau et de ciment anhydre se combinant au cours de la réaction. Tant que la prise n'a pas eu lieu, c'est a dire tant que les grains de ciment en cours d'hydratation et en suspension d'eau ont la possibilité de déplacer les uns par rapport aux autres, on peut considérer que cette contraction s'applique au volume total de la pâte [17].

La duré de ce retrait est d'autant plus courte que l'auto-dessiccation est rapide. Le retrait plastique se caractérise par une diminution de volume qui peut conduire à une fissuration, d'autant plus qu'avant la prise, ou le béton n'a pas pu encore développé sa résistance à la traction. Les fissures de retrait plastique sont peu profondes. Le phénomène de retrait plastique peut aussi se produire par succion, lorsque le béton frais est coulé au contact d'un sol ou d'un béton sec.[18]

1.5.1.1.2/ Le retrait thermique [17]

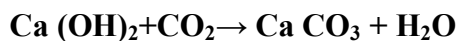
Les réactions d'hydratation étant exothermiques, on observe un dégagement de chaleur qui augmente la température du béton. Cette élévation de température provoque dès le début de prise une dilatation pendant que le béton est encore déformable.

Lorsque le refroidissement débute, le béton se contracte, alors que la prise a été déjà faite. La rigidité du béton limite la déformation et les contraintes de traction commencent à se développer.

Le retrait observé peut entraîner des fissurations, lorsque les déformations de traction dépassent la limite, et le risque de fissuration existe lorsque la contraction thermique d'une pièce de béton est gênée ou empêchée. Dans le cas des réparations minces ou l'épaisseur du recouvrement adhérent ne dépasse pas 100mm, la fissuration due au retrait thermique empêché n'est pas un problème important.

1.5.1.1.3/ Le retrait de carbonatation [18]

Lors de la réaction de carbonatation, les composées calciques issues de l'hydratation, principalement la portlandite, réagissent avec le dioxyde de carbone de l'air pour donner du carbonate de calcium et de l'eau conformément au schéma réactionnel simplifié suivant :



La transformation cristallographique de la portlandite en calcite s'accompagne d'une légère diminution de volume.

La carbonatation agit surtout en surface à cause de la présence de gaz carbonique dans l'air. Ainsi, pour les bétons ordinaires, on remarque que ce ne sont que les premiers centimètres qui font l'objet de cette réaction, même après plusieurs années. La réaction de carbonatation varie avec l'humidité du béton et l'humidité relative (l'optimum de la cinétique de carbonatation se trouve aux alentours de 65%). La diffusivité peut aussi être influencée par la présence de fissures. D'après BARON (1982), le retrait de carbonatation est proportionnel au retrait de dessiccation. Dans la plupart des cas, ce retrait est négligeable voire nul.

1.5.1.1.4/ Le retrait endogène

Le retrait endogène est défini comme la déformation volumique du matériau mesurée en condition adiabatique et sans échange d'humidité [système fermé] [9]. Le retrait endogène est une contraction de la pâte de ciment hydraté occasionnée par le développement de la réaction d'hydratation.

Baron (1982) distingue, après la prise trois stades de déformation : un 1^{er} retrait, un gonflement et un second retrait (figure 1.4). Le 1^{er} retrait débute dès la prise et se déroule pendant 2 à 3 heures. Le gonflement apparaît au début du durcissement et se poursuit durant une vingtaine d'heures. Le second retrait se manifeste à la fin de la prise et il peut durer plus de sept jours [9].

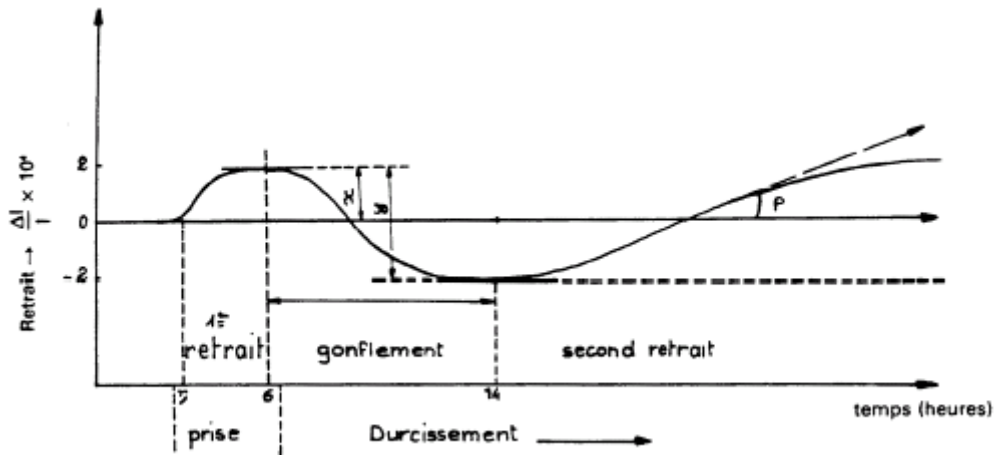


Figure 1.4 : Déformation endogène de la pâte de ciment [9]

Dés que le retrait endogène est empêché de quelque façon que ce soit géométriquement (cas de certaines structures) ou par certaines conditions aux limites (la présence d'un support dans le cas des réparations), des contraintes de tractions peuvent être générées et conduire à la fissuration du matériau. Cet effet mécanique est particulièrement observé au jeune âge, alors que la réaction d'hydratation est très active et que la matrice cimentaire n'a pas encore développé ses propriétés mécaniques optimales. Le risque de fissuration au jeune âge est particulièrement important pour les bétons de faible rapport E/C [14]-[19]. Les bétons de rapport $E/L < 0.42$, le retrait endogène peut présenter près de la moitié du retrait total développé. Contrairement aux retraits plastiques et dessiccation, le retrait endogène se développe sans perte de masse et de façon isotrope dans toute la masse de l'élément de béton qui durcit [20]. Dans le cas des éléments minces comme les réparations superficielles, un mûrissement efficace à l'eau peut considérablement réduire l'auto-dessiccation et aussi le retrait endogène [14].

L.Molez [9] a conçu six matériaux de réparation adaptés à la géométrie et aux propriétés des éléments à réparer: béton ordinaire, béton auto-plaçant, béton projeté (sans et avec agent réducteur de retrait), dont les propriétés mécaniques sont présentées au tableau (1.5) et à la figure (1.5). Et pour mesurer le retrait endogène, **L.Molez** a pris des prismes scellés de dimension 100mmx100mmx300mm conservés aux conditions ($Hr=50\% \pm 5\%$ et $Te=20^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$). Deux types de scellement ont été utilisés : un scellement par deux couches superposées de papier d'aluminium adhésif et un scellement à la cire chaude.

Les premières mesures sont prises dès le démoulage, soit en moyenne 24 heures après la fabrication du béton. Il a constaté une amplitude de retrait endogène en fonction du temps à

100 jours de mûrissement (figure 1.6), qui passe de 150µm pour le béton ordinaire, à près de 400µm pour les bétons auto-plaçant. Ces derniers ont en effet une teneur en pâte importante.

Tableau 1.5 : Résistance et module en compression et Résistance en traction à 28 jours

Matériau	F _{c28} (MPa)	E ₂₈ (MPa)	F _{t28} (MPa)
BO: Béton ordinaire	43	32800	3,6
BOarr ¹ : Béton ordinaire avec agent réducteur de retrait	37	29000	2,8
BAPftc ² : Béton auto-plaçant à faible teneur en ciment	43	35300	4,0
BP ^{s3} : Béton projeté par voie sèche	37	35000	3,5
BPh ⁴ : Béton projeté par voie humide	43	42500	4,3
	43	21600	4,3

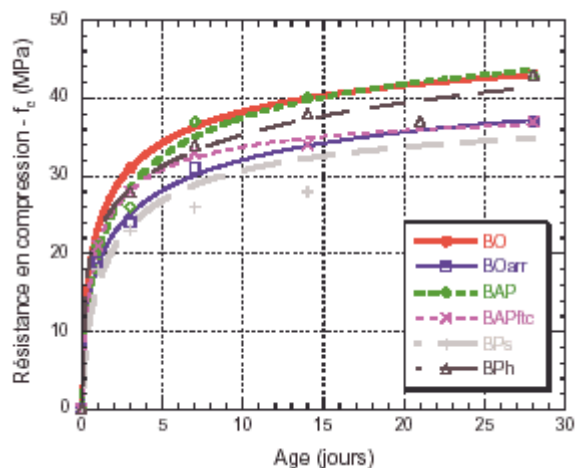


Figure 1.5 : Résistance en compression des différents matériaux de réparations [9]

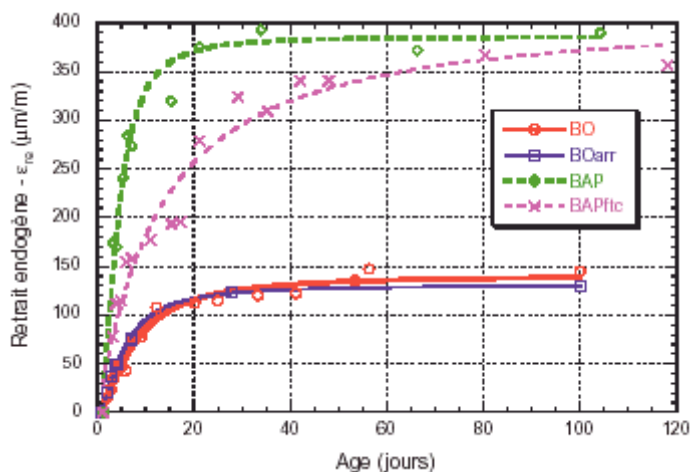


Figure 1.6 : Retrait endogène des différents matériaux de réparations [9]

O. Laurance [14] a testé quatre matériaux de réparation (mortier ordinaire, mortier avec fibre, béton ordinaire et béton haute performance). D'où les caractéristiques mécaniques sont présentés aux figures (1.7),(1.8),(1.9).

D'après les résultats présentés à la (figure 1.10), **O.Laurance** [14] a constaté que la vitesse de développement des déformations de retrait endogène du BHP est plus importante que celle des trois autres matériaux ce qui indique que des déformations importantes sont générés dans les réparations avant que les échanges hydriques avec le milieu extérieur débutent. Etant empêchées par le support, ces déformations peuvent avoir pour effet d'induire un état initial de contraintes de traction dans la réparation.

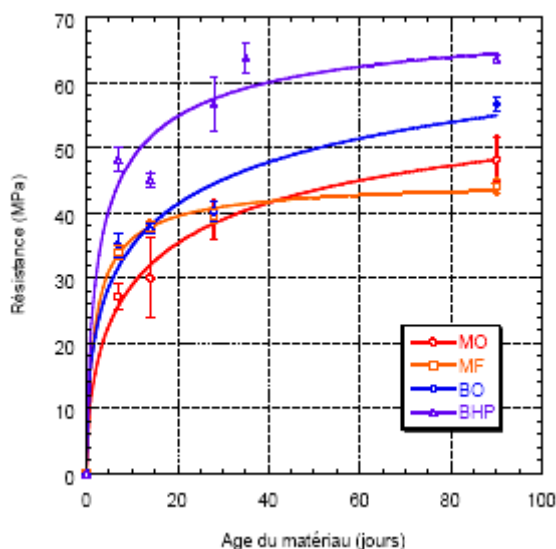


Figure 1.7 : Développement de la résistance en compression des différents matériaux [14]

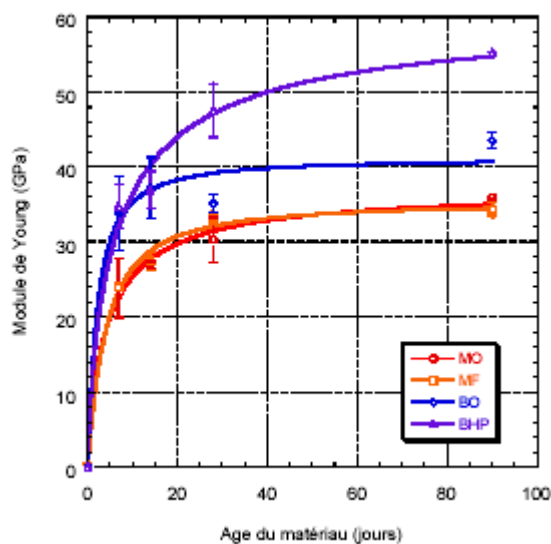


Figure 1.8: Développement du module de Young différents des matériaux [14]

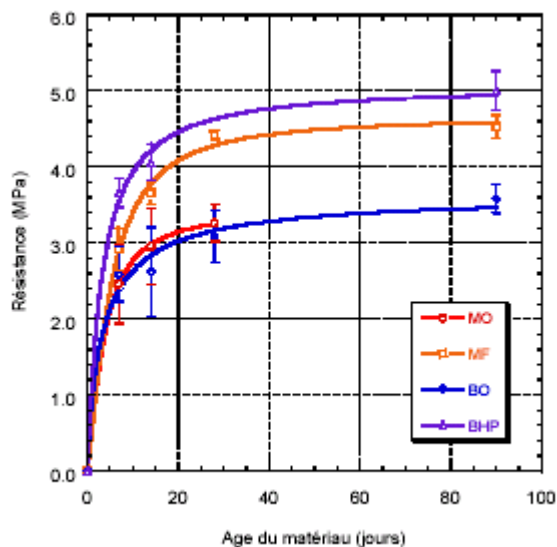


Figure 1.9 : Développement de la résistance en traction par fendage [14]

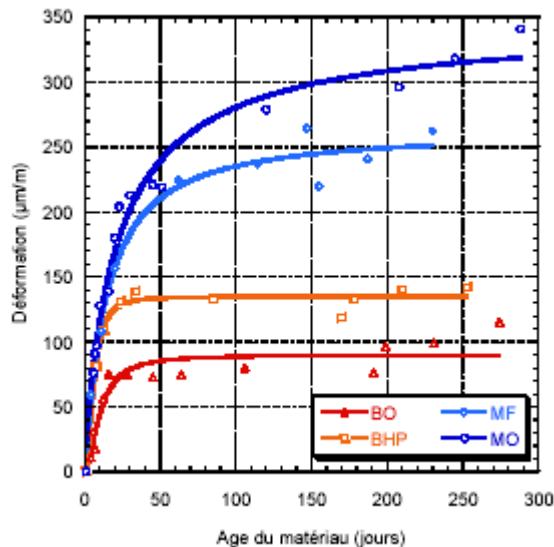


Figure 1.10 : Résultats des essais de retrait endogène [14]

1.5.1.1.5/ Le retrait de séchage

L'eau qui s'évapore d'un béton conservé dans l'air non saturé provoque du retrait dit de séchage [19]. Lors d'un séchage, un déséquilibre thermodynamique est engendré, provoquant un échange de vapeur d'eau de la matrice cimentaire vers le milieu extérieur. La dessiccation du milieu va créer une variation des tensions capillaire, des tensions superficielles et des pressions de disjonction. L'addition de ces mécanismes conduit à un retrait apparent à l'ordre de 200 à 1000µm/m. [9]

Le retrait de dessiccation se développe à partir de la surface de l'élément de béton durci exposé à l'air ambiant dont le degré hygrométrique est inférieur à celui du réseau capillaire de la pâte de ciment hydraté. Cette situation favorise l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte à partir de leurs extrémités exposées à l'air plus sec.

Le retrait de séchage s'arrête lorsque l'équilibre entre l'humidité relative ambiante et celle du béton est atteint ou lorsque les forces qui retiennent l'eau à l'intérieur des petits pores capillaires sont égales aux forces qui causeraient l'évaporation de cette eau [20].

Ce processus est traduit au niveau macroscopique chez Baroghel-Bouny (1998), Coussy et coll(1998) par une déformation qui constitue le retrait de séchage et qui est globalement corrélée de façon linéaire à la perte de masse de l'échantillon suivant des pentes différentes selon le domaine d'humidité considéré dans le matériau (Figure 1.11).

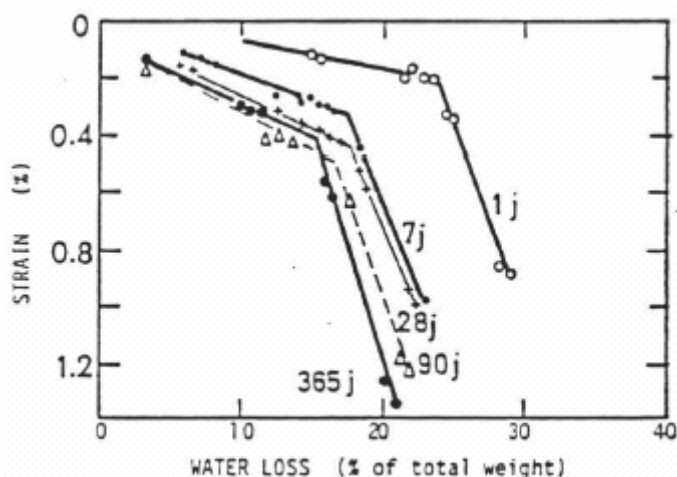


Figure 1.11 : Relation entre retrait et perte de masse en conditions contrôlées de température et d'humidité ($T=23^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=50\%$) [14]

Le processus de diffusion de la vapeur d'eau vers le milieu extérieur est extrêmement lent. Un gradient d'humidité relative depuis la surface vers le cœur de l'élément séchant est alors observé. A une humidité relative donnée, on peut faire correspondre un retrait dit libre (figure 1.12-a). Le retrait libre d'une couche infinitésimale est gêné par les couches voisines afin de respecter la continuité des déplacements. Cette auto-restriction des déformations de retrait génère ainsi des contraintes dans l'épaisseur de l'élément séchant (figure 1.12-b).

Dans le cas des réparations minces, la restriction due au substrat s'ajoute. Les contraintes ainsi produites peuvent dépasser la résistance en traction du matériau et provoquer la fissuration du béton. C'est le processus de fissuration par retrait empêché qui met en jeu lors du séchage des réparations en béton. Le retrait de séchage a été identifié par plusieurs auteurs étant l'un des paramètres les plus préjudiciables pour la durabilité des réparations minces.

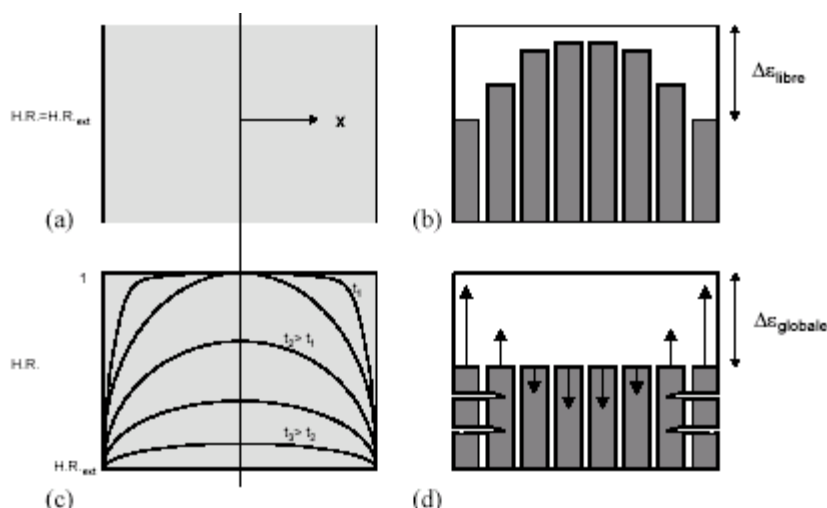


Figure 1.12 : Processus de fissuration due au séchage [9]-[13]-[14]

- (a),(c) : Distribution de l'humidité relative dans un élément soumis au séchage
 (b) : déformations de retrait correspondantes dans des couches supposées libres
 (d) : contraintes générées dans le cas de la compatibilité des déformations

L.Molez [9] a mesuré le retrait de séchage sur des prismes similaires à ceux du retrait endogène pour les mêmes matériaux, mais sans sceller les deux faces latérales opposées des éprouvettes à tester, afin de permettre le départ d'eau vers le milieu extérieur (figure 1-13). Les mesures de retrait et de perte de masse débutent 3 jours après la fabrication du matériau. Le retrait de séchage est calculé en soustrayant le retrait endogène du retrait total : $\epsilon_{rs} = \epsilon_r - \epsilon_{re}$. **L.Molez** [9] a remarqué que les comportements en séchage sont très différents pour les six matériaux ou les amplitudes vont de 300 à 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un temps de séchage de l'ordre de l'année. Le taux de retrait du BAP est plus important au jeune âge que le BO. Par contre, il semble se stabiliser plus rapidement, ou il a noté l'efficacité de l'agent réducteur de retrait, qui permet de diminuer de près de 40% le retrait de séchage du BO à 365 jours (Figure 1.14).

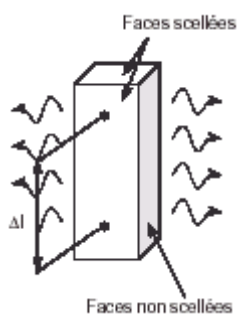


Figure 1.13 : Prisme de séchage uniaxial [9]

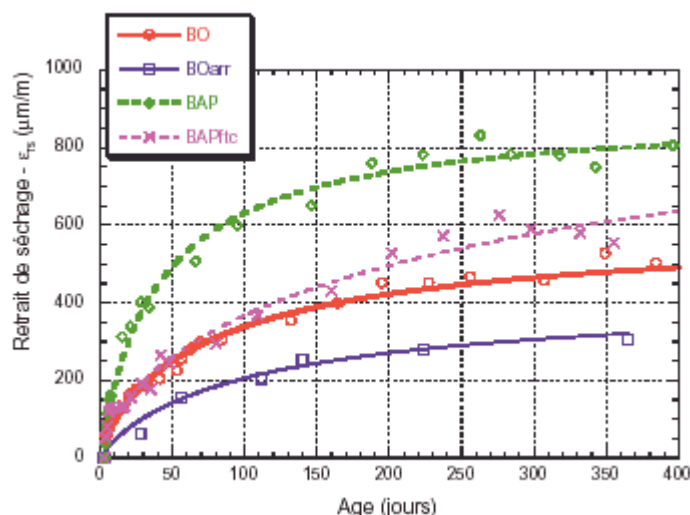


Figure 1.14 : Retrait de séchage des différents bétons [9]

De même le retrait total passe de 400μm pour le béton ordinaire avec agent réducteur de retrait à 1000μm pour les bétons auto- plaçant. La vitesse de séchage. (Vitesse de perte de masse) et les profils d'humidité relevés au sein des éprouvettes permettent d'expliquer ces différences (Figure 1.15). Il a constaté que le front de séchage dans les bétons auto- plaçant se propage rapidement alors que pour les bétons ordinaires et le béton projeté par voie sèche, ce front est confiné dans les premiers millimètres d'épaisseur.

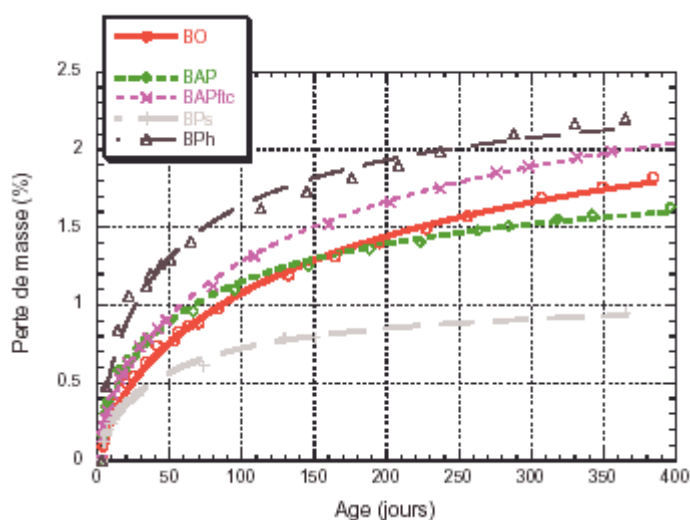


Figure 1.15: Perte de masse des différents bétons [9]

O.Laurance [14] a trouvé que le comportement hydrique des 4 matériaux est très différent aussi bien en terme de retrait que de perte de masse. Pour les deux mortiers, qui affichent des

comportements similaires, ont développés des déformations plus grandes que celles mesurées sur les deux bétons et aussi des pertes de masse plus importantes (Figure 1.16). Ce comportement s'explique par le volume élevé de la pâte pour les deux mortiers. Il a remarqué aussi un retrait du BHP plus faible que les trois autres matériaux (figure 1.17)

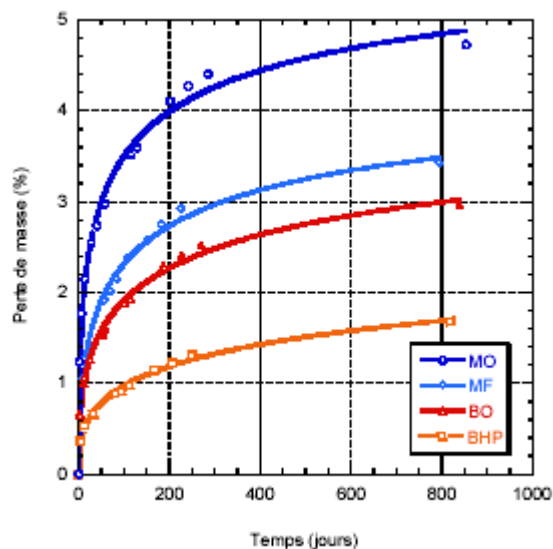


Figure 1.16: Résultats de pertes de masse au séchage des matériaux de réparation [14]

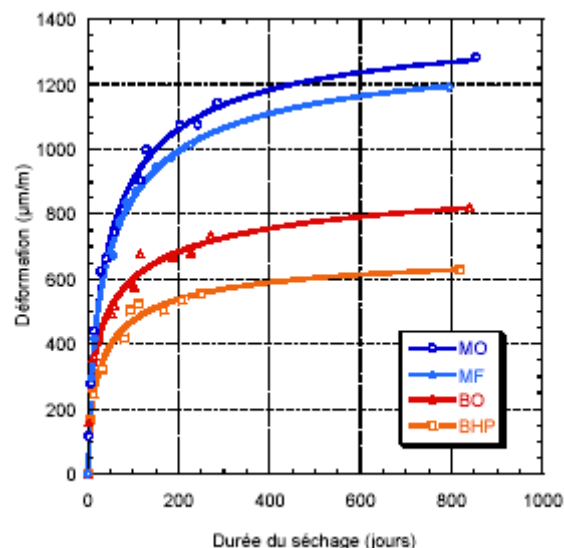


Figure 1.17 : Résultats de retrait avec séchage des matériaux de réparation [14]

D'après **Oliver Laurance** [14] 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. Cela peut être obtenu par l'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait ou encore par l'utilisation d'un ciment expansif. Bien sur, minimiser le retrait de séchage peut aussi se faire en utilisant des matériaux dont la microstructure est très dense et donc dont la porosité est très fine. Mais cela n'est possible qu'avec des bétons de faible rapport eau/ciment et comportant souvent de la fumée de silice dans leur composition. Or ce sont des matériaux susceptibles de développer une autodessiccation très importante et conséquemment un retrait endogène important. Le retrait total (endogène plus séchage) ne serait donc probablement pas beaucoup plus faible et des problèmes de fissuration au jeune âge pourraient être créés.

Un autre moyen d'obtenir une compatibilité déformationnelle adéquate est d'améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation. Cela peut se faire en utilisant des matériaux de forte résistance en traction. Malheureusement, ce sont souvent des matériaux riches en ciment et de rapport eau/ciment faible et donc dont 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 la rendant plus diffuse et en minimisant les ouvertures de fissures.

Enfin, 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. Cela introduit le deuxième concept important pour la durabilité des réparations, à savoir celui de la capacité d'adaptation par fluage.

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. L'excellente durabilité de certaines réparations, dont le retrait du matériau qui les constitue n'est pas négligeable, laisse présumer une réelle possibilité d'adaptation par fluage en situation de retrait restreint. [14]

1.5.1.2/ Le Fluage [9] [14]

La relation entre la contrainte et la déformation du béton est une fonction du temps. 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 et aussi longtemps que le chargement est appliqué. Cette déformation supplémentaire est appelée déformation de fluage. Lorsque le matériau ne subit pas d'échange hydrique avec l'extérieur, il s'agit de fluage propre. Sinon il s'agit de fluage de dessiccation.

Le phénomène du fluage peut être aussi vu sous un autre angle. Lorsque l'on applique une déformation constante à un béton, on observe une diminution progressive de la contrainte avec le temps (figure 1.18). Ross, (1958) a constaté le fait que l'on nomme relaxation peut être considéré comme une manifestation du fluage.

On appelle fluage propre, l'augmentation de la déformation par rapport à la déformation élastique initiale, dans des conditions où il n'y a pas d'échange hygrométrique ou thermique. En fait, le module d'élasticité augmentant avec la maturité, la déformation élastique diminue progressivement, et rigoureusement le fluage devrait être considéré comme la déformation en excès par rapport à la déformation élastique à l'instant où l'on détermine le fluage.

S'il y a échange hygrométrique durant le chargement, on considère que le retrait de séchage et le fluage s'ajoutent. Le fluage est alors défini comme la différence entre la déformation totale et la déformation due au retrait d'un échantillon identique conservé dans les mêmes conditions et non chargé (figure 1-19). Le supplément de fluage observé lors du séchage est appelé fluage de séchage. D'après Feldman [21], le fluage est principalement dû à l'enlèvement de l'eau se trouvant entre les feuilles de la cristallite de silicate de calcium et à un réarrangement possible des liaisons existant entre les surfaces des cristallites individuels.

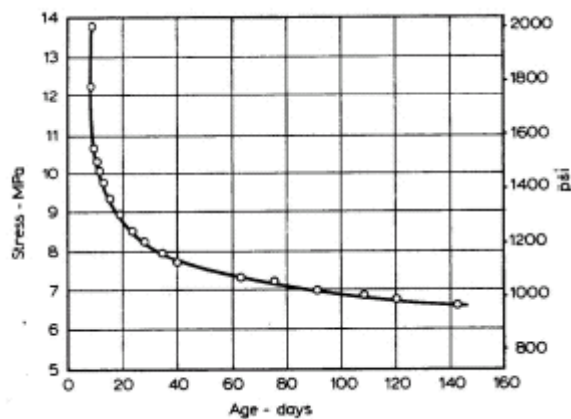


Figure 1.18: Relaxation de la contrainte de compression sous l'application d'une déformation constante de $360 \mu\text{m/m}$ [9]

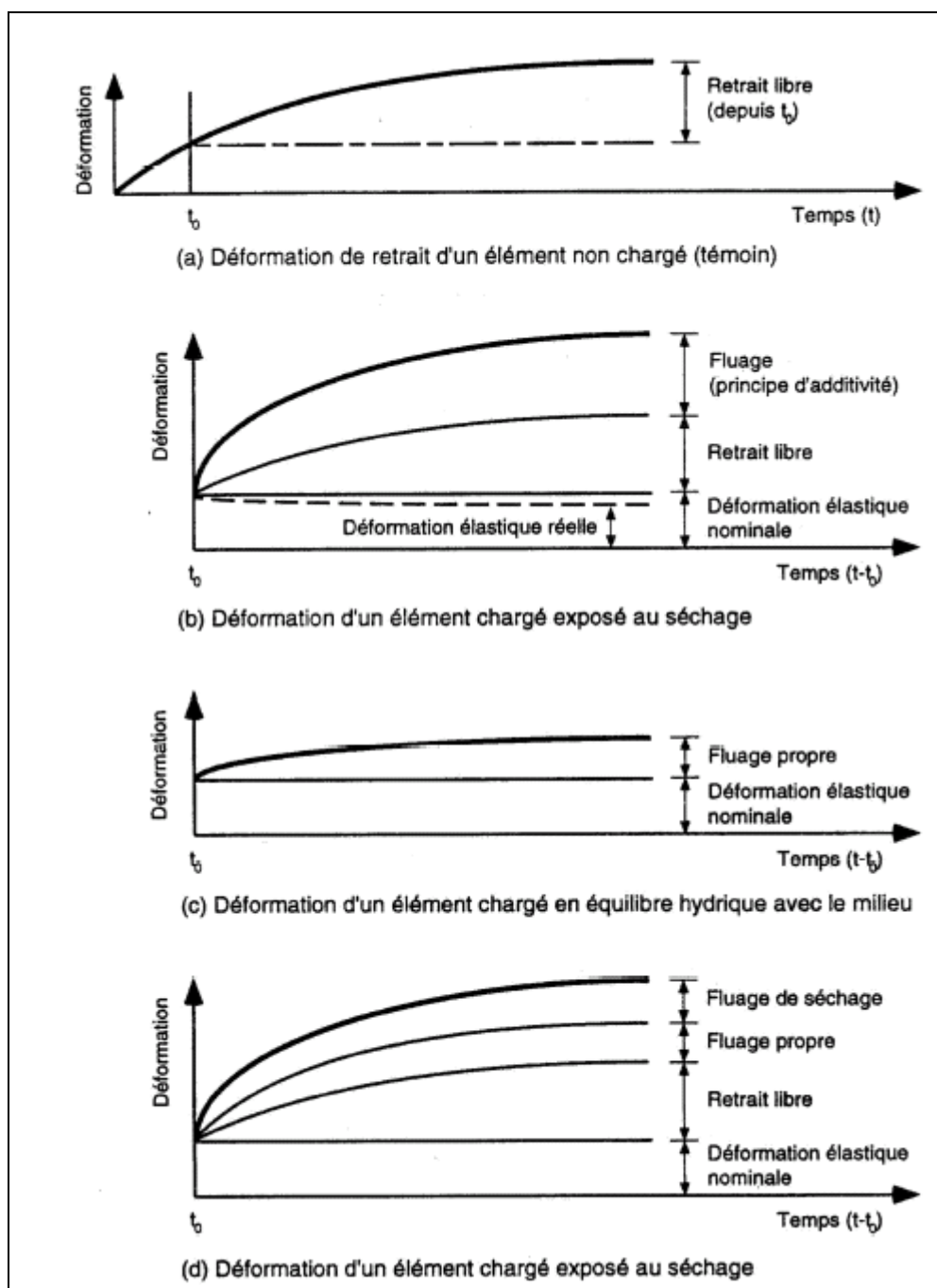


Figure 1.19 : Déformation d'un béton soumis à une charge constante dans le temps. Principe de sommation du fluage propre, du fluage de séchage et du retrait libre [9]

1.5.1.2.1/ Paramètres influençant le fluage

a/ Influence de la teneur en pâte [9]

On sait bien que le fluage dans les bétons ordinaires provient de la pâte de ciment, les granulats utilisés dans les bétons ordinaires ne présentant pas, ou très peu, de fluage. Les granulats, comme pour le séchage, jouent un rôle de retenue. Le fluage d'un béton représente 10 à 15% du fluage de la pâte de ciment qui le constitue.

Il a été démontré par Neville (1996), pour un même rapport eau/ciment, que le fluage en compression augmente lorsque la teneur en pâte augmente (figure 1.20).

Ne perdons pas de vue que dans les bétons ordinaires la variation de la fraction volumique en granulats varie, et lorsqu'elle passe de 65% à 75%, le fluage décroît seulement de 10% (Neville, 1996). Par contre cette propriété peut être importante pour des bétons spéciaux tels que les bétons projetés ou les bétons auto-nivelants qui sont caractérisés par une plus faible teneur en granulats. Ils présenteront donc un fluage et un retrait en principe plus importants.

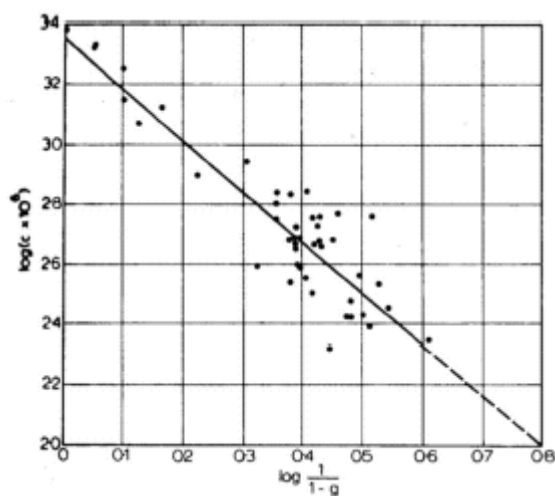


Figure 1.20 : Fluage à 28 jours en fonction de la teneur en granulats pour un béton chargé à 14 jours à une contrainte représentative 50% de la résistance ultime en compression [9]

b/ Influence de la résistance et de la contrainte appliquée [9]

De nombreux résultats compilés par Neville (1996) montrent qu'il y a proportionnalité entre le niveau de contrainte (rapport de la contrainte et la résistance) et le fluage. Cette proportionnalité existe jusqu'à une valeur limite du niveau de contrainte (0,3 à 0,6 pour les bétons, 0,8 à 0,9 pour les mortiers) qui correspond à la formation d'une micro-fissuration

importante au sein du béton, particulièrement à l'interface pâte -granulats. Au-dessus de cette limite, le comportement du fluage est fortement modifié.

On peut aussi dire que pour une résistance donnée, le fluage est proportionnel à la contrainte appliquée et que pour une charge appliquée donnée le fluage est inversement proportionnel à la résistance du matériau. La résistance peut être rattachée à l'âge ou plutôt à la maturité du béton. Le comportement en fluage est ainsi sensible à la maturité. (Figure 1.21)

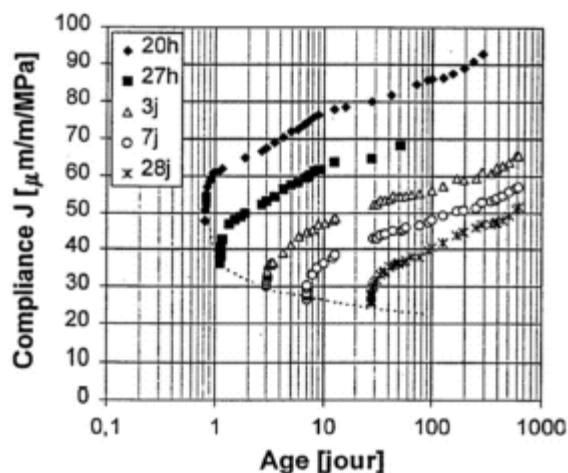


Figure 1.21: Influence de l'âge au moment du chargement sur la cinétique du fluage [9]

c/ Influence des propriétés du ciment [9]

L'influence du ciment est très difficile à quantifier. En effet, jouer sur les propriétés telles que la finesse du liant, ou les ajouts minéraux implique la modification de la montée en résistance du béton. Or, on a dit précédemment que la résistance (niveau de contrainte) est un paramètre influençant fortement le fluage. Il est donc difficile de séparer l'effet de la modification de la résistance, de celui du ciment.

Pour des ciments extrêmement fins ayant une surface spécifique de 740 kg/m^2 , on observe un fluage court terme plus important mais un fluage plus faible après un ou deux ans de chargement.

Il ressort toutefois que la modification de la microstructure par des ajouts minéraux, par exemple, peut influencer le fluage. Des ajouts tels que de la fumée de silice, des cendres volantes ou du laitier de haut fourneau provoquent une hydratation plus longue, qui implique un taux de fluage à long terme (Neville, 1996).

d/ Influence de l'humidité [9]

Le fluage des matériaux cimentaires est extrêmement sensible à l'humidité relative du milieu ambiant. Généralement, on observe que plus l'humidité relative est faible, plus le fluage est important (figure 1.22). Evidemment, on constate simultanément un séchage des échantillons très différent durant ces divers types de chargement. La vitesse de fluage varie de façon importante à court terme, mais à plus longue échéance, elle devient similaire pour les différents degrés d'humidité relative. Ainsi, comme nous l'avons déjà mentionné, le séchage augmente le fluage (Pickett, 1942), la part complémentaire étant appelée fluage de séchage ou effet Pickett.

En fait, c'est le différentiel d'humidité entre le milieu interne et le milieu externe qui gouverne le fluage de séchage. En effet, Parrott (1970) a montré que pour une même humidité relative du milieu ambiant, le fluage dépend de la teneur initiale en eau évaporable. Glücklich et Ishai (1962) ont mis en évidence qu'un béton complètement sec (dont on a enlevé toute l'eau évaporable) ne flue pas. Ils en concluent que le fluage n'est pas une propriété intrinsèque de la pâte de ciment.

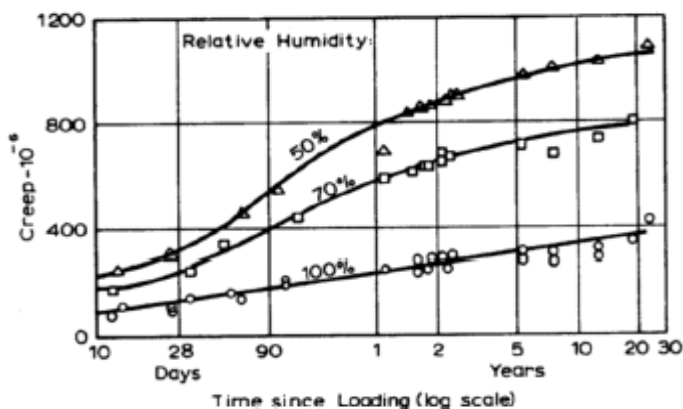


Figure 1.22 : Fluage d'un béton exposé à différents degrés d'humidité [9]

e/ Influence de la température [9]

La température est un autre facteur environnemental qui conditionne le fluage. Pour des bétons de masse, c'est la température interne qui est importante. Inversement pour des éléments minces, la température extérieure aura une influence importante. Même à basses températures, le béton est sujet au fluage.

1.5.1.2.2/ Fluage en traction [9]

Il existe peu d'études sur le fluage en traction. Cela s'explique par le fait que, dans la conception d'ouvrages, les faibles propriétés en traction du béton sont généralement négligées. Mais dans le cadre de la prévention de la fissuration, le fluage en traction peut jouer un rôle significatif (Brooks et Neville, 1977).

Un grand nombre de paramètres influe de la même façon pour le fluage en compression et le fluage en traction. Nous ne verrons ici que les différences entre les deux.

❖ Comportement en traction et en compression [9]

A) Fluage propre : les résultats obtenus sont plutôt contradictoires.

- Davis et coll. (1937) ont observé que, initialement, le fluage propre est plus important en traction, mais similaire à long terme au fluage en compression.
- Brooks et Neville (1977) ont mesuré un taux de fluage similaire à court terme en compression et en traction, mais à long terme le taux de fluage en compression diminue alors que celui en traction semble ne pas diminuer.
- Bissonnette (1996) montrent toutefois un comportement quasi-asymptotique du fluage en traction.

B) Fluage total : le fluage est initialement plus important en traction, mais est similaire à long terme en traction et en compression d'après : Davis et coll (1937) ; Brooks et Neville, (1977).

1.5.1.2.3/ Capacité d'adaptation par fluage [9] [14]

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.

La capacité d'adaptation se traduit pour un matériau par le rapport entre la déformation de fluage spécifique ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$) et la déformation de retrait, à un niveau de charge donné et à un instant donné. Ce rapport n'est pas fixe dans le temps, même si le fluage et le retrait sont deux phénomènes couplés. [14]

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 la réparation (cas1). Soit le matériau développe du fluage de telle façon que l'apparition de la fissuration est fortement

retardée mais n'est pas empêchée (cas2). Enfin, soit le matériau développe une capacité d'adaptation parfaite et la relaxation des contraintes par fluage empêche totalement l'apparition de la fissuration (cas3).

Les résultats expérimentaux du fluage en traction montré par **L.Molez** [9] témoignent que certains matériaux exhibent une capacité de fluage importante et ainsi que le fluage de traction n'est pas une propriété marginale du béton. Ou il a constaté que le séchage du matériau provoque une augmentation du fluage de plus de 150% par rapport au fluage propre. Pour ne pas négliger ce paramètre et pour bien comprendre le fonctionnement mécanique de ces matériaux de réparations (BAP, BAPfit, BPh, BPs), il a étudié leur comportement au fluage, et il a noté : Un fluage total spécifique élevé pour le BAP et BPh qui présentent un retrait total important. Par contre, le BPs qui montre un retrait de séchage similaire à celui du Bo présente un fluage nettement plus faible que celui du BO.

Et afin de comparer la capacité de chaque matériau à compenser le retrait par le fluage, **Molez** [9] a appliqué l'idée de Bissonnette (1996) qui propose de calculer le rapport fluage sur retrait [28], ou il a trouvé que ce rapport est important aux jeunes ages et se stabilise à partir d'une vingtaine de jours. Le BPs possède une capacité de compensation du retrait très faible, par contre les autres matériaux pourraient compenser entre 25 à 30% du retrait s'ils sont soumis à une contrainte de 1 MPa. (Figure 1.23)

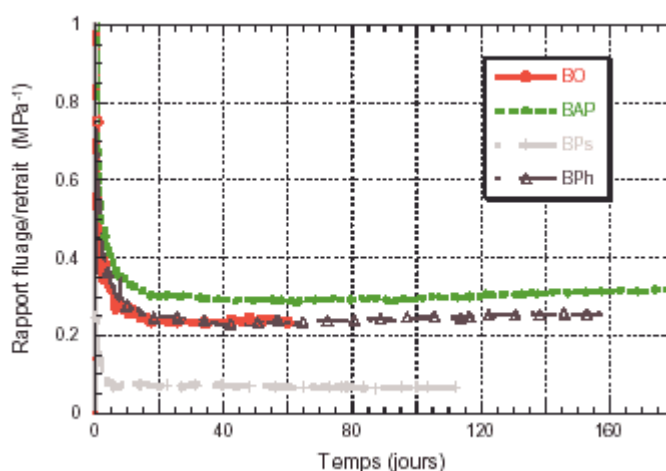


Figure 1.23 : Rapport fluage total spécifique / retrait total [9]

O.Laurance [14] a mis des essais suivant différents niveaux de contraintes par rapport à la contrainte de rupture en traction, en deux conditions : endogène, et avec échange hydrique avec le milieu ambiant (50%Hr, 23°C). La capacité d'adaptation des matériaux est exprimé sous la forme du coefficient : fluage spécifique/retrait noté $K_{F/R}$.

Ce coefficient reflète la capacité de relaxer les contraintes générées par le retrait empêché. Les résultats présentés au (tableau 1-6) nous montrent tout d'abord que le coefficient d'adaptation par fluage dépend des conditions d'échange hydrique auxquelles est soumis le matériau. Il constate que la capacité d'adaptation par fluage pour un même matériau est plus importante en condition endogène qu'en condition d'échange hydrique à 50%*Hr*.

Tableau 1.6 : Coefficient d'adaptation $K_{F/R}$ des matériaux de réparation [14]

Matériau	Condition	Type de relation	Coefficient fluage/retrait [$K_{F/R}$ (MPa)]	
Béton ordinaire	Avec séchage	Linéaire	0.13	
Béton ordinaire	Endogène	Linéaire	0.24	
Béton ordinaire	Séchage seul	Linéaire	0.07	
Béton haute performance	Avec séchage	Linéaire	0.024	
Mortier ordinaire	Avec séchage	Bi-linéaire	0.60	0.12
Mortier fibré	Avec séchage	Bi-linéaire	0.50	0.13

Les résultats montrent aussi que le coefficient $K_{F/R}$ varie en fonction de la nature du matériau. Le coefficient d'adaptation du PHP est 02 fois plus élevé que celui du BO en condition d'échange hydrique. On peut dire que le BHP est un matériau mieux adapté que le BO sur le plan de la compatibilité des déformations et cela montre aussi que les paramètres de formulation (ciment, E/C, présence ou non de fumée de silice) ont un effet significatif sur le comportement viscoélastique du matériau et sur sa capacité d'adaptation par fluage. Concernant l'influence du volume de pâte. Il a constaté aussi que la capacité d'adaptation par fluage du mortier est globalement plus importante que celle du béton ordinaire malgré des déformations de retrait plus importantes.

1.5.2/ Durabilité d'une réparation en béton

1.5.2.1/ Définition d'une réparation durable

Une réparation durable est une réparation dont l'adhérence à son support atteint une résistance mécanique suffisamment élevée et surtout qui est stable dans le temps (Saucier, 1990). C'est également une réparation qui développe un minimum de fissuration (figure 1.24). Selon le chargement auquel doit faire face la réparation (mécanique, chimique, gel,...), la

valeur d'adhérence souhaitée sera différente, et la fissuration minimum développée prendra différents aspects (ouverture maximum, densité de fissuration) [14].

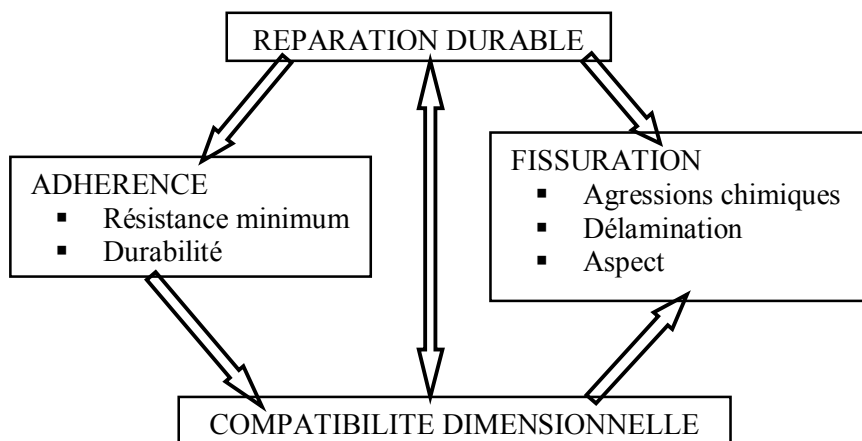


Figure 1.24 : Indicateurs de durabilité d'une réparation en béton [14]

1.5.2.2/ L'interface béton vieux- béton neuf

Une structure en béton est constituée de différents matériaux : la pâte de ciment, les granulats, les aciers d'armatures. Le bon fonctionnement mécanique de la structure est assuré par la transmission des déformations d'un matériau à un autre par adhérence.

L'interface pâte de ciment granulat joue aussi un rôle important tant chimique que mécanique. Lors de contraintes de construction nécessitent des reprises de bétonnage, d'agrandissement, de réhabilitation ou de réparation, les propriétés des interfaces vieux béton-béton jeune (cas d'une réparation) deviennent importantes et aussi un critère de durabilité capitale. [9]

Les propriétés mécaniques du matériau de réparation et du substrat peuvent également être différents, d'où certains chercheurs, dont (EMMENT et COLL, 1994) considèrent que le système de réparation constitue un composite dont la résistance de l'interface est fonction des propriétés du substrat, du matériau de réparation et de la préparation de surface. Ainsi, plutôt que de parler d'un système à deux phases, [Emmons et coll, 1994] préfèrent plutôt considérer un système composé de trois phases. La performance à long terme de ce système est gouvernée par les propriétés du matériau de réparation, de la zone de transition et du substrat, tel que schématisé sur la (figure 1.25).

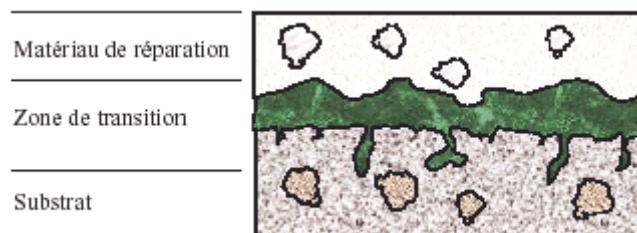


Figure 1.25 : Système de réparation à trois phases [9]

1.5.2.3/ Mécanismes d'adhérence [9]

L'adhérence entre la réparation et le béton existant est le résultat du contact entre deux solides, l'un formé à partir d'un matériau fluide durcissant (béton de réparation) mis en place sur le second, un matériau à l'état solide (béton du substrat). Quand aucun agent de liaison n'est utilisé, le mécanisme d'adhérence peut être subdivisé en trois différents phénomènes (figure 1.26) : une interaction physique (ou adhérence pure), une interaction physique et chimique (cohésion) et un blocage mécanique (ou adhérence mécanique). L'ancrage mécanique de la réparation dépend donc de la rugosité et de la porosité du substrat.

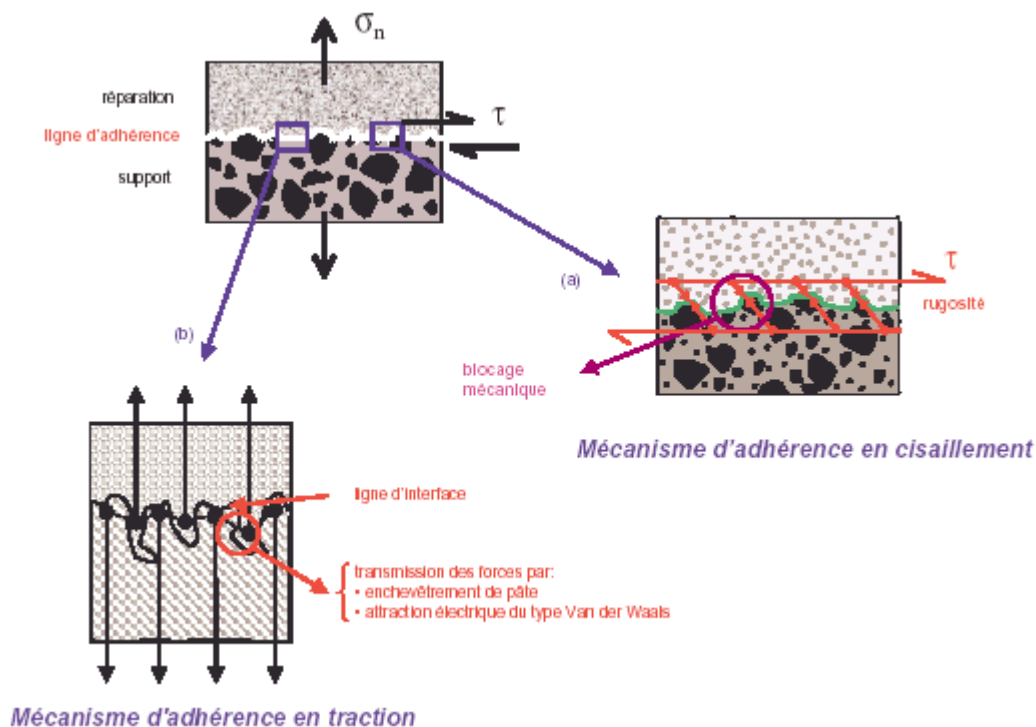


Figure 1.26: Mécanismes d'adhérence [8] [9]

1.5.2.4/ Paramètre influençant l'adhérence [8] [9] [14]

1.5.2.4.1/ Rugosité et intégrité du substrat

Afin d'obtenir une bonne adhérence, tous les auteurs admettent généralement qu'il faut avoir une interface propre et non fissurée. La technique de préparation utilisée va déterminer la rugosité de la surface du substrat. Cette rugosité intervient directement dans les mécanismes d'adhérences cités précédemment. Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'effectuer la préparation de surface qu'on a déjà cité comme : le marteau pneumatique, la projection de particules (billes d'acier ou sable), le jet d'eau sous pression (hydrodémolition), etc. Dans un rapport en 1956, Felt y présente des résultats d'essai en cisaillement, en effet, ces résultats démontrent que l'utilisation d'un marteau-piqueur permet d'obtenir une surface pour laquelle l'adhérence en cisaillement est supérieure à une surface préparée au jet de sable.

Toutefois, les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant une préparation à l'acide muriatique (27,9% de HCl), cette dernière procurant une surface moins rugueuse que les deux méthodes de préparation précédentes. Felt en conclut que la rugosité de surface a un rôle beaucoup moins important dans l'obtention d'une bonne adhérence comparativement aux deux facteurs suivants : (1) la résistance et l'intégrité du substrat et (2) la propreté de la surface de celui-ci. [8]

Inversement Saucier (1990) obtient de bonnes adhérences avec des surfaces sciées, son explication était : l'ouverture de la porosité lors du sciage des échantillons, la porosité étant l'un des paramètres mis en jeu dans les mécanismes d'adhérence. Les essais de Yuan et Marosszeky (1994) pour un béton modifié styrène -acrylique montrent une influence de la rugosité du support. Les essais de Cleland et Long (1997) pour différents matériaux de réparation confirment cette tendance [26]. Silfwerbrand [1990] a également observé l'influence de l'intégrité du substrat dans un système de réparation. Pour deux préparations procurant des rugosités similaires, soit l'hydrodémolition et le marteau pneumatique, il a obtenu des adhérences en traction plus élevées avec la première, la seconde entraînant des fissures dans le substrat. Hindo [1990] et Silfwerbrand [1990] ont également constaté la diminution de la quantité de microfissures engendrées par la méthode de préparation en utilisant le jet de sable. Silfwerbrand [1990] a remarqué que l'adhérence des réparations semble être influencée par la rugosité de la surface. Des surfaces sablées ont offert une meilleure adhérence que les surfaces hydrodémolies, alors que leur rugosité était plus faible.

Contrairement à ce que Felt et Silfwerbrand ont observé, Talbot et coll. [1994] ont noté qu'une bonne adhérence et durabilité de la réparation en traction sont obtenues avec des surfaces rugueuses. En effet, les essais de vieillissement accélérés ont démontré qu'entre deux et six mois, aucune perte significative d'adhérence en traction n'a été constatée pour des surfaces hydrodémolies ou préparées au marteau pneumatique suivi du jet de sable figure 1.27. Toutefois, une faible adhérence a été obtenue avec le marteau pneumatique employé seul. Pour leur part, les surfaces meulées et préparées au jet de sable ont présenté une perte de résistance avec le temps.

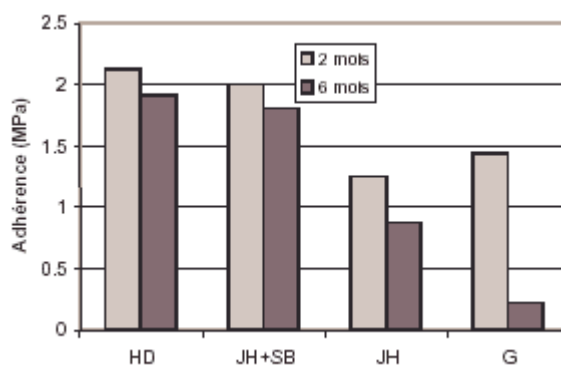


Figure 1.27: Influence de la technique d'enlèvement du béton détérioré [9]
HD: hydrodémolition, **JH+SB** : marteau pneumatique et jet de sable
JH: marteau pneumatique **G:** meulage

Selon certains chercheurs, l'adhérence de la réparation ne serait pas seulement attribuable à la rugosité et à la présence ou non de fissures sur la surface du substrat. Wells et coll. [1999] soulignent également que la structure poreuse se doit être ouverte afin de permettre une pénétration suffisante du béton plastique et assurer un maximum de liens mécaniques.

1.5.2.4.2/ L'utilisation d'un agent de liaison [9]

De nombreux auteurs ont étudié l'influence de l'utilisation d'agent de liaison. Felt (1956) et Saucier (1990) concluent tous deux que l'utilisation d'agent de liaison n'augmente pas spécialement la résistance de l'interface, mais diminue la variabilité des résultats obtenus. Des essais (Cleland et Long, 1997) montrent au contraire que l'utilisation d'agent de liaison permet d'augmenter significativement la résistance de l'interface. Silfwerbrand et Paulsson (1998) déconseillent l'utilisation d'agent de liaison, car cela mène à la création de deux

interfaces et donc à deux zones de faiblesse. Wall et Shrive (1988) rapportent que l'épaisseur de la couche d'agent de liaison appliquée est un paramètre important pour la résistance de l'interface. Le séchage de l'agent de liaison peut être très préjudiciable (Saucier, 1990 ; Austin et coll., 1995). Pour une épaisseur trop importante, la rupture a lieu chaque fois dans cette couche. Face à ces résultats contradictoires, la conclusion de Saucier semble adaptée. Il faut prendre autant de soin lors de l'étude de la formulation et de l'utilisation d'un agent de liaison que lors du choix du matériau de réparation. En cas d'utilisation d'agent de liaison, toujours utiliser un rapport E/C inférieur à 0,40. En cas de doute s'abstenir.

1.5.2.4.3/ Propriété du matériau de réparation [8] [9]

Afin d'assurer une bonne adhérence ainsi que la durabilité de la réparation, la compatibilité entre la réparation et le substrat doit être assurée.

Dans un premier temps, Emberson et Mays suggèrent que le matériau de réparation possède des résistances en compression, traction et flexion qui excèdent celles du substrat. Règle générale, cette recommandation est respectée pour la plupart des matériaux de réparation [Morgan, 1996]. Dans un second temps, ils recommandent que le matériau de réparation soit caractérisé par un module d'élasticité semblable à celui du substrat afin d'éviter la formation de concentrations de contraintes à l'interface. Cusson et Mailvaganam [1996], Lamontage et coll. [1995] ainsi que Morgan [1996] vont dans le même sens.

Il est vrai qu'une sollicitation en flexion entraîne une discontinuité dans le profil des contraintes normales au niveau de l'interface. Toutefois, ce saut ne désigne pas une concentration de contraintes, mais d'une variation subite pour satisfaire à la compatibilité des déformations [Bissonnette, 1996].

Le matériau de réparation doit également posséder un potentiel de retrait modéré, puisque le substrat restreint le développement du retrait, ainsi qu'un coefficient d'expansion thermique se rapprochant de celui du substrat. Si tel n'est pas le cas, alors des contraintes à l'interface pouvant largement dépasser la résistance en traction du matériau de réparation sont induites. Cette recommandation est d'ailleurs reprise par plusieurs chercheurs, dont Saucier [1990], Cusson et Mailvaganam [1996], Emmons et coll. [1994] et Bissonnette [1996].

La figure (1.28) schématise les divers problèmes qui peuvent survenir suite au retrait différentiel entre le matériau de réparation et le substrat. Afin de s'adapter aux mouvements différentiels sans se fissurer ou se désolidariser, le matériau de réparation doit faire preuve d'une « déformabilité totale » suffisante.

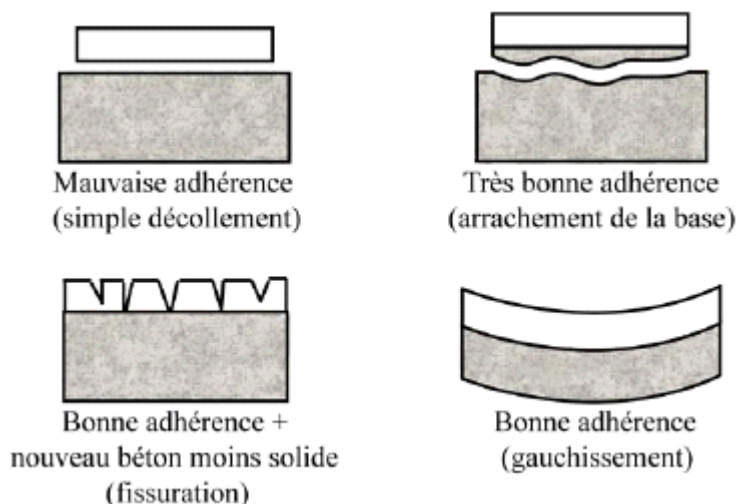


Figure 1-28 : Effets possibles du retrait différentiel entre deux bétons [8]

Les paragraphes précédents ont montré que bien des critères doivent être satisfaits pour permettre une bonne adhérence et une bonne durabilité de la réparation. Il semble difficile à première vue d'être en mesure de satisfaire à chacun d'eux. Toutefois, l'ensemble des travaux consultés soulignent que, peu importe le type de matériau de réparation et la composition de celui-ci, la grande majorité des réparations présentent un bon comportement à long terme [Emberson et Mays, 1990; Langlois et coll., 1994; Talbot et coll., 1994].

Des essais d'arrachement (Talbot et coll., 1994) montrent qu'il y a peu d'effet de la composition du matériau sur la résistance et la durabilité du joint. En effet, la variabilité des essais ne permet pas de faire ressortir des différences significatives entre les résultats obtenus par pull-off. Des essais de traction directe effectués sur éprouvettes bicouche, malgré une moins grande variabilité, mènent à la même conclusion (figure 1.29).

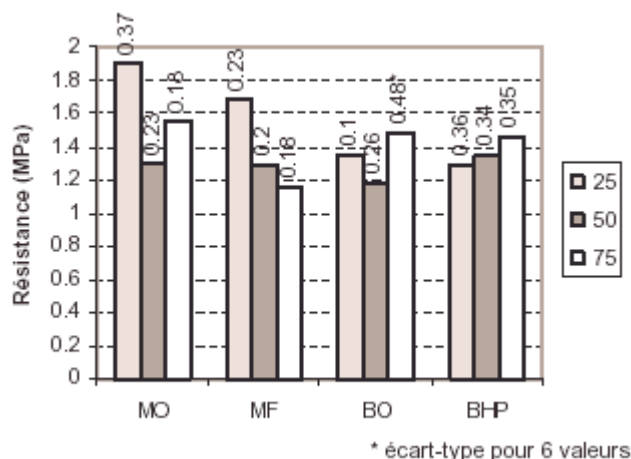


Figure 1.29 : Test de traction directe sur éprouvettes bicouches constituées d'un substrat en béton ordinaire et d'un matériau de réparation [9]

(**MO**: mortier ordinaire, **MF** : mortier fibré, **BO**: béton ordinaire, **BHP**: béton à haute performance) selon trois épaisseurs de réparation (25mm, 50mm,75mm)

1.5.2.4.4/ Mouillage préalable du substrat

L'état de saturation du support est un paramètre important de la durabilité de l'adhérence entre le matériau de réparation et le substrat. Il est toutefois difficile de fixer de façon absolue un état de saturation donné pour obtenir une bonne et durable adhérence. De nombreux auteurs (Saucier, 1990 ; Austin et coll, 1995 ; Cleland et Long, 1997 ; Silfwerbrand et Paulsson, 1998) concluent tous qu'il faut un substrat ni trop sec, ni trop humide. [9]

En effet, un substrat trop sec entraînerait un pompage excessive de l'eau venant du béton de réparation, créant une zone hétérogène et poreuse à l'interface (Silfwerbrand et Paulsson, 1998). A l'opposé, un substrat saturé résulterait en un rapport E/C plus élevé à l'interface. Dans les deux cas, la résistance de l'interface s'en trouverait réduite. Les essais de diffraction aux rayons X de l'interface réalisés par Saucier ont également dénoter qu'un substrat saturé en eau empêche la pénétration des cristaux d'ettringite dans la porosité de celui-ci, diminuant ainsi l'adhérence de manière significative dans certains cas. Saucier et Pigeon, ont obtenues de meilleures adhérences lorsque le substrat n'est pas saturé et quand sa capacité d'absorption n'est pas trop élevée. Il s'agit alors d'un état saturé surface sèche (SSS),[8]

1.6/ CONCLUSION

Concevoir et réaliser une réparation sur une structure en béton est un problème complexe qui ne relève pas seulement d'un savoir faire technique. Il faut bien comprendre l'origine des dégradations afin qu'elle ne réapparaissent plus une fois l'ouvrage réparé. La pathologie des ouvrages en béton montre qu'il existe multitude de symptômes de dégradations. Un diagnostic préalable à l'identification des causes est nécessaire et qui constitue l'étape la plus importante et la plus difficile de tout le processus de réparation, afin de choisir le matériau et la méthode convenable à réparer.

On distingue trois catégories de produits de réparation : les liants hydrauliques, les polymères et liants mixtes, chaque catégorie a des propriétés physiques spécifiques. Il est important de comprendre ces propriétés, car elles conditionnent le choix du matériau de réparation qui soit compatible autant que se peut avec les propriétés du béton à réparer.

La compatibilité est définie comme étant un équilibre des dimensions et des propriétés physiques, chimiques et électrochimiques entre le matériau de réparation et le substrat (Emmons et coll, 1994). Le problème initial dans la réparation est la compatibilité dimensionnelle des éléments.

Un matériau de réparation ayant une bonne capacité déformationnelle sera donc un matériau qui est soumis à peu de déformations empêchées qui sont sources de contraintes de traction et de fissuration. Donc entre les propriétés des matériaux de réparation à considérer lors de la sélection est le retrait, principalement le retrait de séchage.

L'obtention d'une bonne compatibilité déformationnelle peut se faire de différentes façons. On a vu que le retrait de séchage additionné au retrait endogène engendre des contraintes importantes au sein de la couche de réparation, pour permettre la relaxation de ces contraintes, il faut une capacité d'adaptation par fluage du matériau. L'excellente durabilité de certaines réparations, dont le retrait du matériau qui les constitue n'est pas négligeable, laisse présumer une réelle possibilité d'adaptation par fluage en situation de retrait restreint. D'où on constate que le fluage a un effet bénéfique sur la durabilité des réparations.

On a pu voir, plusieurs mécanismes physiques qui sont à l'origine de l'adhésion entre deux matériaux cimentaires. La résistance du collage entre les deux matériaux constitue un bon indicateur de la durabilité de la réparation, notamment dans le cas des problèmes de compatibilité dimensionnelle. En effet, l'adhérence est une propriété qui varie beaucoup selon le type d'essai conduit et selon certains facteurs susceptibles d'influencer l'adhésion comme la préparation de surface, l'emploi ou non d'un agent de liaison ou encore l'état hydrique du support au moment de la mise en place de la réparation.