

## Durabilité et réparations du béton

GCI-714

### CHAPITRE 3

## LES RÉPARATIONS DU BÉTON

### 3.1 ÉVALUATION ET DIAGNOSTIQUE DES STRUCTURES DE BÉTON

#### 3.1.1 Introduction

- L'identification des **causes des dégradations** est une des étapes les plus **importantes** et les plus difficiles de tout le **processus de réparation** des structures endommagées.
- Il n'est généralement pas possible d'évaluer la nécessité de réparer une structure ou de choisir la ou les méthodes de réparation sans avoir, au préalable, **bien identifié l'origine des dégradations**.
- Avant d'entreprendre des travaux de réparation il faut donc prévoir une **campagne d'évaluation** la plus détaillée possible de l'état de la structure.
- Le but de la campagne d'évaluation est d'obtenir des informations sur **l'étendue des dommages** et d'établir les **causes des dégradations**.
- La campagne d'évaluation fait partie d'un processus, constitué de **plusieurs étapes**, qui permettra de **choisir la ou les méthodes de réparation** les plus appropriées en fonction du type de dégradation.

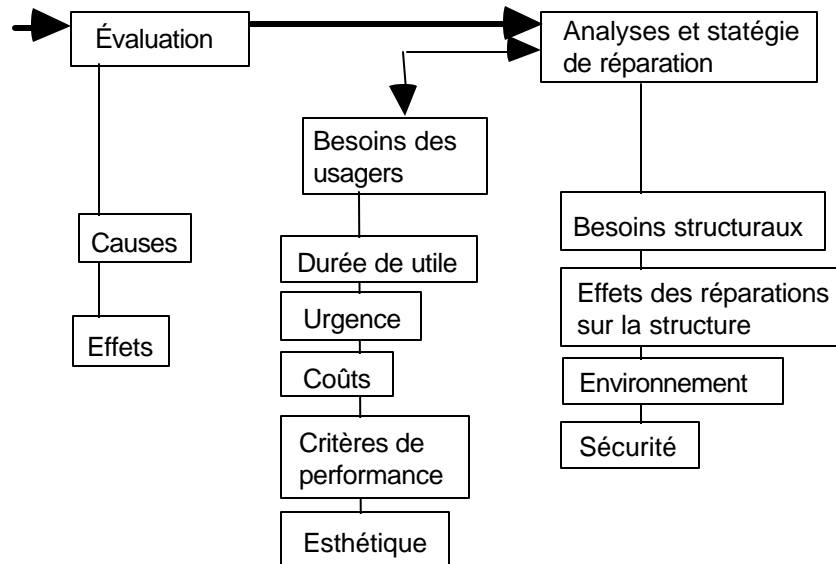
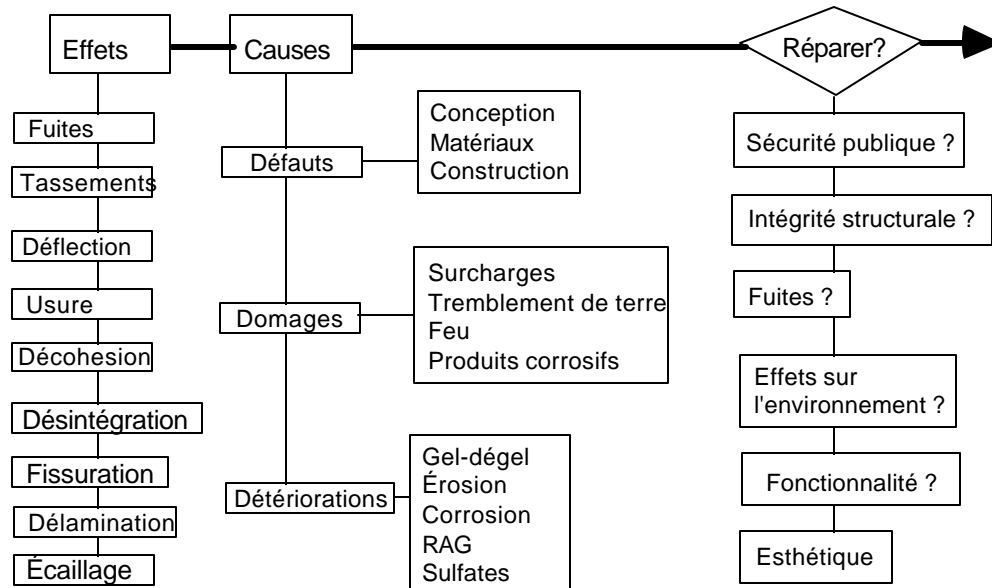


Fig 3.1 - Processus d'analyse et de décision pour les travaux de réparation des structures de béton.

[tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S.

### 3.1.2 Campagne d'évaluation

- Une **campagne d'évaluation** est généralement nécessaire pour évaluer la performance des d'ouvrages détériorés ou très âgés.
  - Cette étape est souvent effectuée à la demande de l'ingénieur en structure qui désire évaluer **l'intégrité structurale** de l'ouvrage.
  - La campagne d'évaluation peut parfois se résumer à une **simple évaluation visuelle**.
  - Elle peut aussi être beaucoup **plus détaillée** et comporter toute une série de **prélèvements ou d'analyses** in situ ou en laboratoire.

---

**Dans tous les cas, la campagne d'évaluation a pour but d'aider à établir les causes des dégradations et à choisir les techniques de réparations appropriées.**

---

- Les campagnes d'évaluation peuvent comporter 5 grandes étapes
  - **Dossier de documentation sur l'ouvrage**
  - **Analyse des conditions de service**
  - **Visite du site**
  - **Évaluation détaillée**
  - **Évaluation des données recueillies**

#### Dossier de documentation sur l'ouvrage

- Cette étape consiste à rassembler toutes les **informations** disponibles concernant la **conception, la construction, l'utilisation et l'entretien** de la structure:
  - Spécifications d'origine
  - Plans, photos
  - Dossier de construction, de surveillance
  - **Rapports d'essais sur les matériaux**
  - **Changements effectués durant la construction**
  - Réparations antérieures

Causes  
Méthodes utilisées  
Matériaux utilisés

- etc

### Analyse des conditions de service

- Cette étape consiste d'abord à évaluer dans quelle mesure la **fonction actuelle de la structure (conditions de service)** correspondent aux **spécifications d'origines**.
- Cette analyse peut permettre d'identifier les points suivants:
  - Les zones les plus sollicitées
  - Les parties exposées aux cycles de gel-dégel, aux cycles thermiques et aux variations d'humidité, etc.

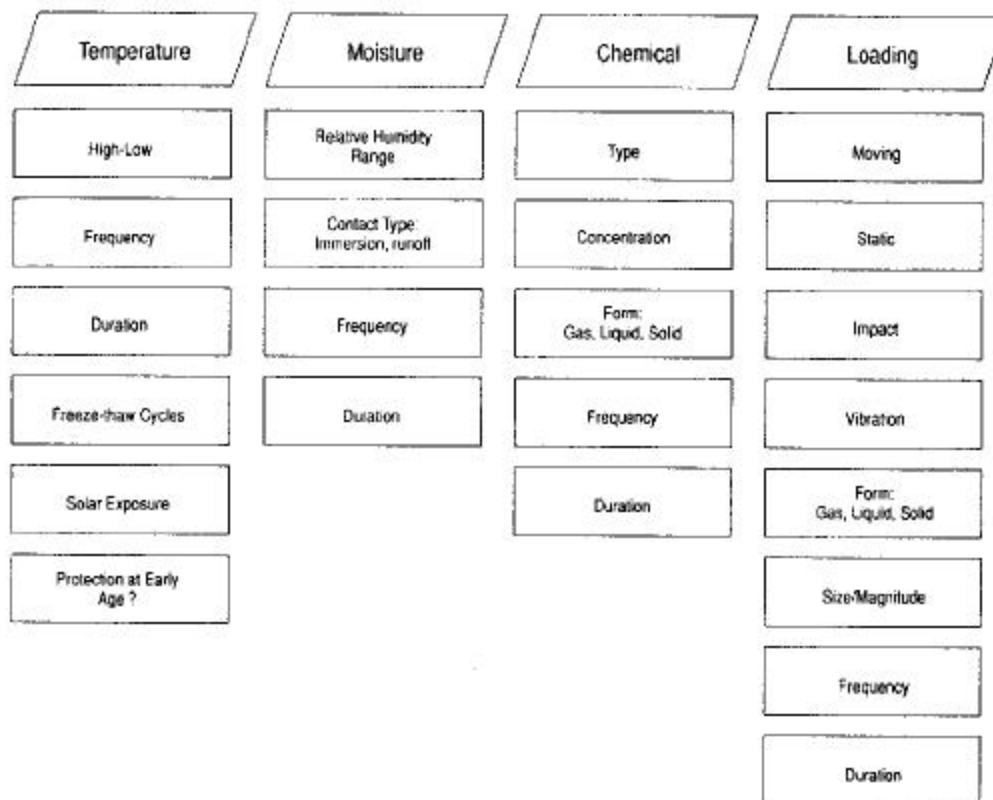


Fig 3.2 - Liste des principaux paramètres décrivant les conditions de service des

structures de béton.

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

- Cette étape devrait être effectuée avant la première visite sur le site

---

**L'analyse détaillée des conditions de service est une des étapes les plus importantes de la campagne d'évaluation. Très souvent, les principales causes des dégradations sont directement liés aux conditions de service.**

---

### Visite du site

- Il est généralement conseillé de prévoir des **schémas ou des plans simplifiés** qui pourront être utilisés pour **localiser les principaux problèmes** observés lors de la visite du site
- Les activités suivantes peuvent être effectuées sur le site
  - Observations visuelles
  - Prise de photos
  - **Identification et localisation des zones fortement sollicitées**
  - Observation des zones critiques (joints, appuis, système de drainage, etc)
  - **Localisation des fissures, des délaminations et des autres types de dégradations**
  - Mesures des ouvertures et des longueurs des fissures

---

**La visite sur le site peut permettre à l'ingénieur de déterminer dans quelle mesure il est nécessaire d'entreprendre un programme d'investigation plus détaillé.**

---

## Évaluation détaillée

- L'évaluation détaillée peut comporter les activités suivantes
  - Essais non destructifs
  - Campagne de carottage
  - Cartographie des fissures
  - Instrumentation (déplacements, efforts, température, humidité, écoulements)
  - Programme des essais à effectuer sur les échantillons prélevés par carottage
  - Programme d'essais in situ

## Évaluation des données recueillies

- Cette étape consiste à **évaluer et analyser l'ensemble des données** (techniques, visuelles, historiques, climatiques) obtenues sur le site et au laboratoire.

### 3.1.3 Méthodes d'évaluation

- Il existe de très nombreuses méthodes ou techniques d'évaluation qui peuvent aider à diagnostiquer les principales causes des dégradations (Fig 3.3 et 3.4).
- C'est surtout **l'expérience de l'ingénieur spécialiste en réparations** qui permettra de choisir la meilleure méthode d'évaluation parmi l'ensemble des méthodes disponibles.
- Les différentes méthodes d'évaluation actuellement disponibles permettent de caractériser les **propriétés mécaniques** du béton, de déterminer les **caractéristiques chimiques et physiques** du béton et de caractériser le **comportement l'environnement** général de la structure

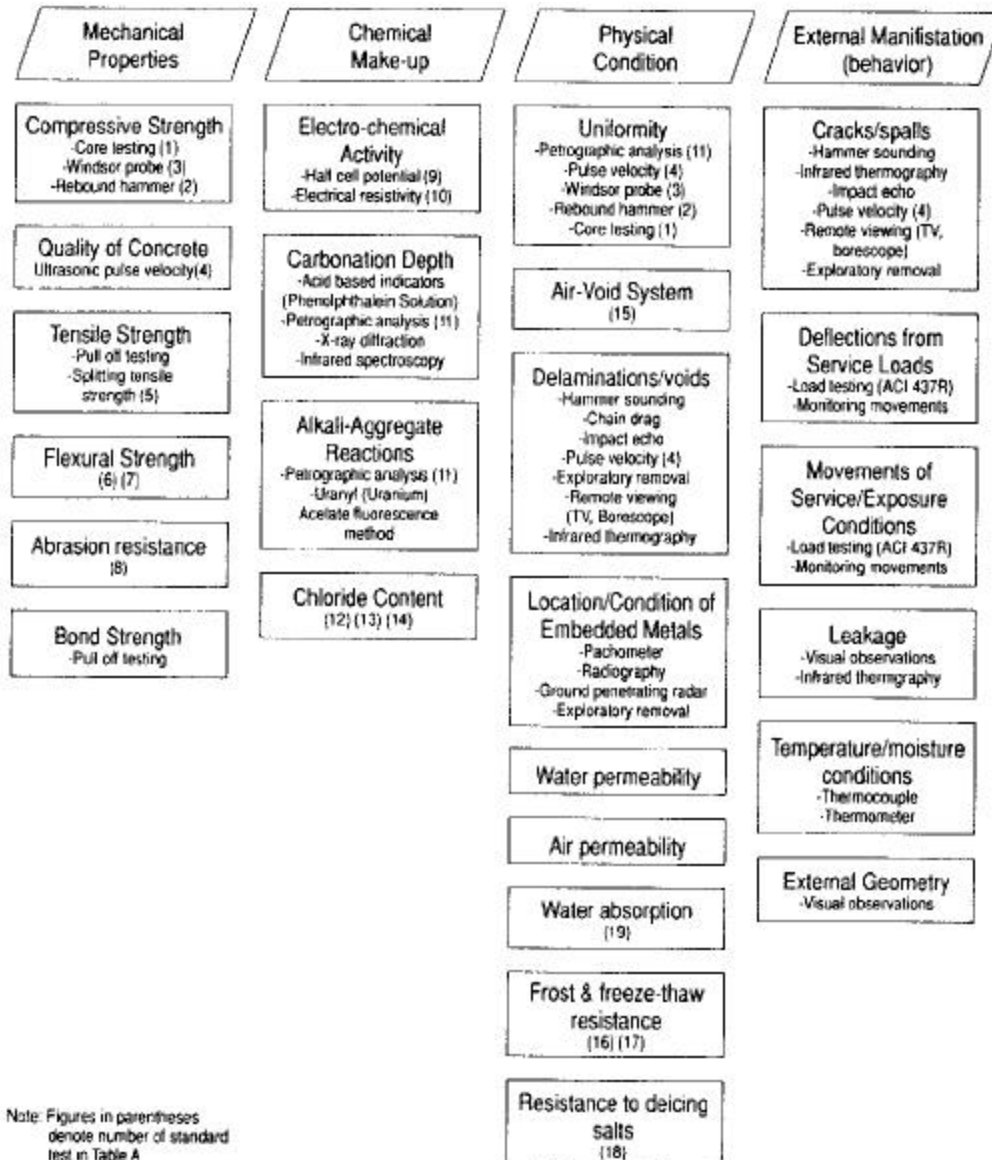


Fig 3.3 - Principales techniques d'évaluation du béton et des structures.  
 [tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.]

TABLE A. STANDARD TEST METHODS FOR EVALUATING CONCRETE		
NO.	DESIGNATION	TITLE
1	ASTM C 42	Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete
2	ASTM C 805	Rebound Number of Hardened Concrete
3	ASTM C 803	Penetration Resistance of Hardened Concrete
4	ASTM C 597	Pulse Velocity Through Concrete
5	ASTM C 496	Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
6	ASTM C 78	Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
7	ASTM C 293	Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)
8	ASTM C 418	Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting
9	ASTM C 876	Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
10	ASTM D 3633	Electrical Resistivity of Membrane-Pavement Systems
11	ASTM C 856	Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete
12	AASHTO T 259	Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration
13	AASHTO T 260	Sampling and Testing for Total Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials
14	AASHTO T 277	Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete
15	ASTM C 457	Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete
16	ASTM C 666	Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
17	ASTM C 671	Critical Dilatation of Concrete Specimens Subjected to Freezing
18	ASTM C 672	Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
19	ASTM C 642	Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete

Fig 3.4 - Principales normes applicables aux techniques d'évaluation du béton et des structures.

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

## Échantillonnage du béton

- L'échantillonnage du béton (carottage, sciage) constitue une étape importante du processus d'évaluation in situ de la structure.

**Il est important de retenir que les échantillons doivent être représentatifs des éléments structuraux analysés.**

- La dimension (diamètre) des carottes est généralement fonction de la dimension maximale des granulats.
- Il est important de **bien identifier** les carottes pour pouvoir retrouver leur localisation dans l'ouvrage.
- Il est généralement utile de prélever des carottes non seulement dans les **parties les plus détériorées** mais aussi dans les **parties saines**. L'analyse comparative des résultats d'essais facilite souvent l'identification des causes des dégradations.

### Évaluations en laboratoire

- L'évaluation en laboratoire commence généralement par une **description des échantillons** (types, dimension, provenance, etc).
- Elle peut comporter les analyses suivantes:
  - **Analyse pétrographique**
  - **Caractéristiques des vides d'air**
  - Essais mécaniques (compression, traction, flexion)
  - Densité, absorption
  - **Teneur en ions chlore**
  - État des aciers d'armature
  - Mesures soniques (PUNDIT)
  - Dosages en ciment et en granulats
  - Analyse chimique de la pâte

### Analyse pétrographique et chimique

- La norme ASTM C856 décrit les principales méthodes expérimentales utilisées pour l'analyse pétrographique. Cette analyse doit être effectuée par un **pétrographe d'expérience**.
- Une analyse pétrographique simple peut permettre d'identifier des **problèmes** au niveau de la **granulométrie et de la forme** des particules (granulat fin et gros granulat).
- Une analyse pétrographique, combinée à des analyses physico-chimiques

(ATG, DRX, XRD) permettent généralement de diagnostiquer la plupart des types de dégradations du béton.

- **Réaction alcali-granulat:** Auréole de réaction, gel de silice, microfissuration.
  - **Attaque par les sulfates:** Ettringite secondaire, dépôts de gypse
  - Carbonatation: Essai à la phénolphthaléine
  - **Corrosion:** Dépôts de produits de corrosion au voisinage des barres
- Des techniques d'imprégnation de résine fluorescente et d'analyse d'image permettent d'estimer le rapport E/C du mélange et la variation du rapport E/C à l'intérieur du béton (aux interfaces).

#### Caractéristiques des vides d'air

---

**La mesure des caractéristiques des vides d'air (Norme ASTM C457) est un essai essentiel pour l'analyse de la performance au gel du béton.**

---

- On doit prélever des éprouvettes à différents endroits représentatifs de la structure et noter les conditions d'exposition associées à chacune des éprouvettes.

#### Résistance à la compression

- La résistance à la compression peut être mesurée pour **estimer la qualité générale du béton.**
- La résistance à la compression des carottes de béton est fonction du **rapport longueur/diamètre**, de la teneur en humidité du béton. Elle peut être influencée par la présence de barres d'armature.
- Il faut choisir le diamètre des carottes en fonction de la dimension maximale du gros granulat (au moins 3 fois le  $d_{max}$ ).

## Teneur en ions chlore

- Une teneur élevée en ions chlore ( $> 0,5$  % de la masse de ciment) peut engendrer des problèmes de corrosion si le béton est dans un environnement humide.
- Il existe des **méthodes normalisées** qui permettent de déterminer la **teneur en ions chlore** totaux (solubles à l'acide) ou la teneur en ions chlore hydrosolubles (Fig 3.5).
- Cette technique peut aussi être utilisée pour déceler un surdosage en accélérateur de prise ( $\text{CaCl}_2$ ).
- Il est généralement préférable de prélever des échantillons de poudres à différentes profondeurs, pour établir un **profil de pénétration** des ions chlore.

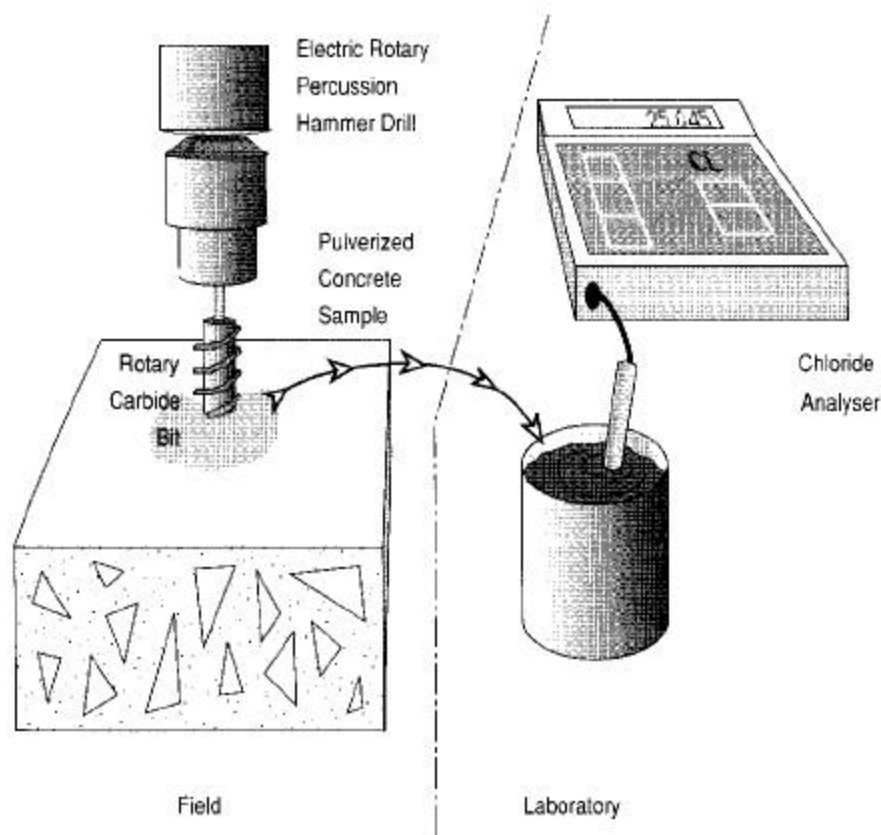


Fig 3.5 - Présentation schématique de la procédure de dosage en ions chlore dans le béton.

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

## **Méthodes et essais non destructifs (NDT)**

- Pour interpréter correctement les résultats de n'importe quel type d'essai, **il faut bien connaître ce qui est effectivement mesuré** et les limites de validité des résultats.
- Il existe une très **grande variété de méthodes** non destructives (in situ) permettant d'évaluer de nombreuses caractéristiques du béton (propriétés mécaniques, humidité, perméabilité, absorption, etc.)<sup>1</sup>

### Inspection visuelle

- Facile, rapide, économique
  - Identification des défauts de surface (écaillage, fissures, usure, fuites)
  - Déformations excessives,
  - Corrosion
  - Caractérisation de l'état des joints
- **Il faut prévoir un système de compilation des observations** (photos, notes manuscrites).
- **Le MTQ a conçu un guide d'inspection des ouvrages d'arts en béton armé.**
  - Permet une inspection visuelle, détaillée, précise et objective.
  - L'exploitation optimale du guide requière une formation spécialisée (cours)

### Essais de dureté de surface

- Essai de rebondissement: Marteau Schimdt (Fig 3.6)
  - \* Effectuer au moins de 10 à 15 lectures par région
  - \* **Très sensible aux conditions locales**  
Humidité du béton

<sup>1</sup> Malhotra V.M. 1984, *In situ / Nondestructive Testing of Concrete*, V.M. Malhotra Editor, ACI SP-82, 825 p.

Présence de gros granulats  
Carbonatation  
Uniformité de la surface  
Âge du béton  
Type de moule (pour établir la courbe de calibration)

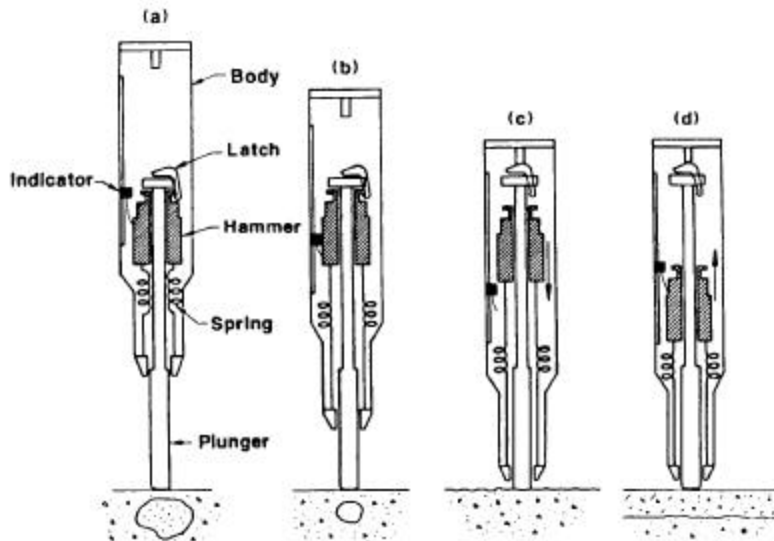


Fig 3.6 - Représentation schématique d'un marteau Schmidt.

[tiré de: Malhotra, V. M. and Carino, N. J. 1991 *Handbook on Nondestructive testing of concrete*, CRC Press, Boca Raton, USA, 343 p.]

- La résistance à la compression peut être déterminée à partir de la **courbe de calibration** de l'appareil (Fig. 3.7).

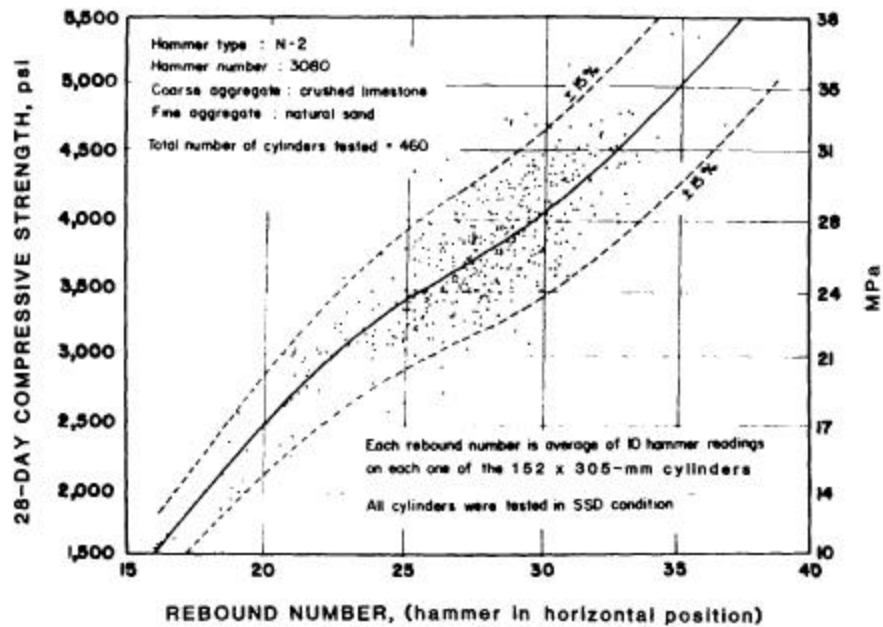


Fig 3.7 - Relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebond pour un granulat calcaire (marteau de type N-2).

[tiré de: Malhotra, V. M. and Carino, N. J. 1991 *Handbook on Nondestructive testing of concrete*, CRC Press, Boca Raton, USA, 343 p.]

- Essai d'arrachement (Pull-Out test, CAPO Test)

On peut évaluer la **résistance à la compression** en mesurant l'effort nécessaire pour **extraire un ancrage** fixé à la surface du béton (Pull-Out test).

On peut aussi utiliser un test essai de traction directe (CAPO test) pour évaluer la résistance à la compression ou **l'adhérence entre** deux matériaux (Fig 3.8 et 3.9)

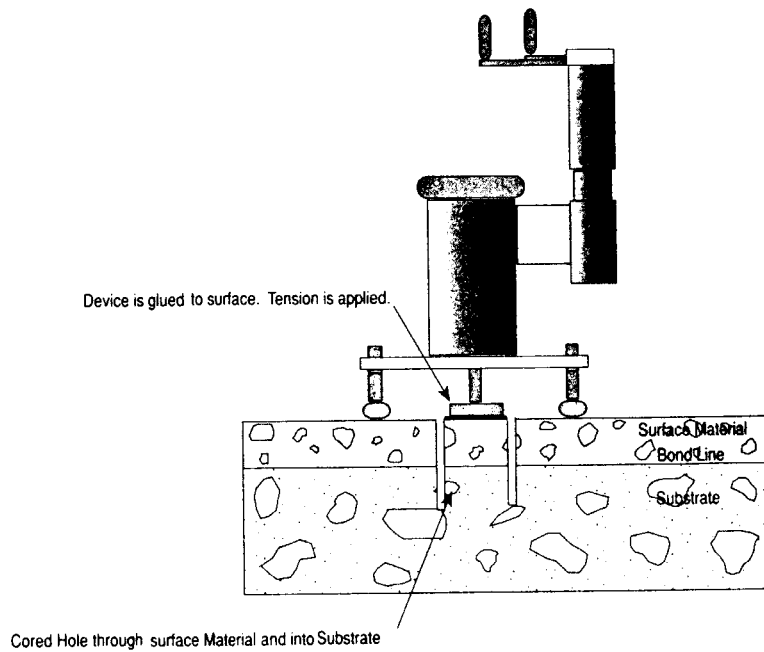


Fig 3.8 - Présentation schématique de la procédure pour l'essai d'arrachement.  
 [tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.]

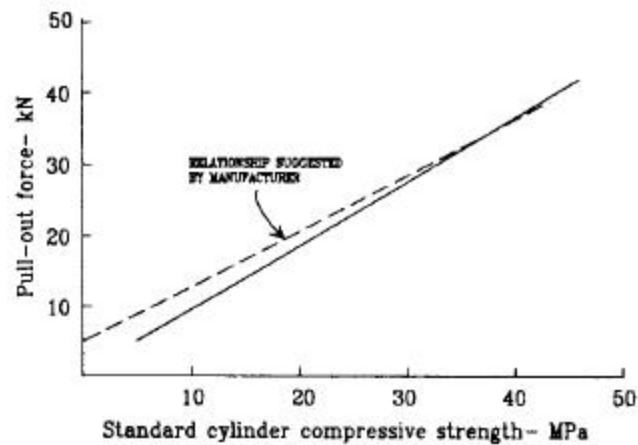


Fig 3.9 - Relation entre la force d'arrachement et la résistance à la compression du béton.  
 [tiré de Mailvaganam N.P. 1992, *Repair and Protection of Concrete Structures*, CRC Press, 473 p.]

### Essais acoustiques

- **Mesure de la vitesse de propagation d'une onde sonore (PUNDIT)**  
(Fig 3.10)

Localisation des fissures

Localisation des zones où le béton est détérioré

Localisation des délaminations

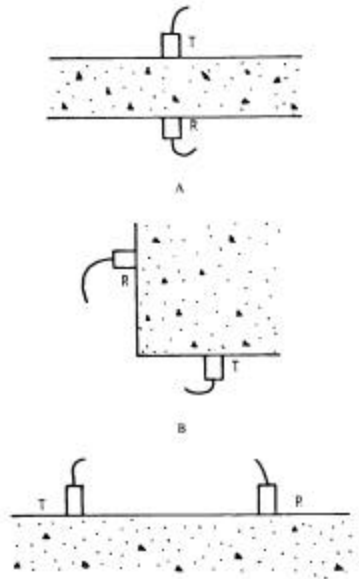


Fig 3.10 - Différentes méthodes pour mesurer la vitesse de propagation d'une onde sonore.  
[tiré de: Malhotra, V. M. and Carino, N. J. 1991 *Handbook on Nondestructive testing of concrete*, CRC Press, Boca Raton, USA, 343 p.]

- **Sondage acoustique** (Fig. 3.11)

Localisation des délaminations

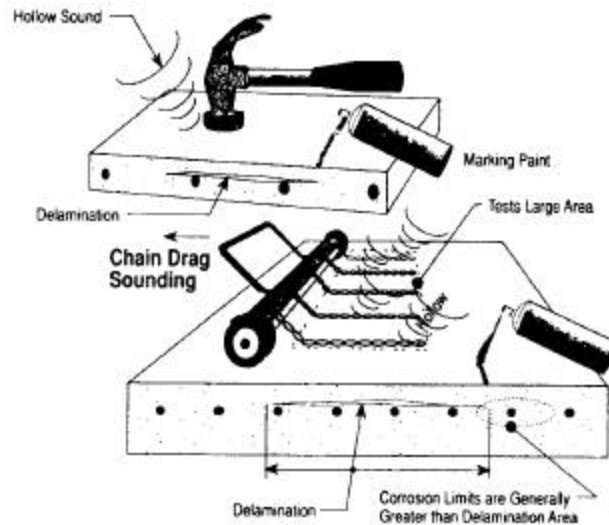


Fig 3.11 - Présentation schématique des procédures utilisées pour les sondages acoustiques.  
 [tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.]

### - Impact-echo (Fig. 3.12)

Un **impact généré** à la surface du béton engendre des ondes de compression et de cisaillement qui sont **réfléchies par les interfaces, les fissures ou les délaminations**.

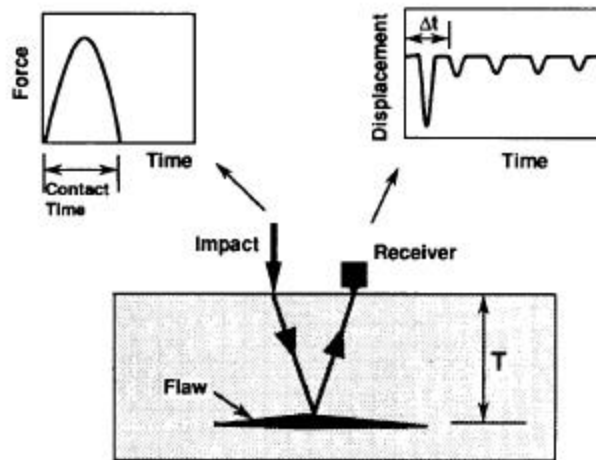


Fig 3.12 - Représentation schématique du principe de la mesure par impact - echo.  
 [tiré de: Malhotra, V. M. and Carino, N. J. 1991 *Handbook on Nondestructive testing of concrete*, CRC Press, Boca Raton, USA, 343 p.]

### Radar

- Cette méthode est basée sur l'étude du processus de propagation d'une **onde électromagnétique** à travers des matériaux possédant des **densités** variables. (Fig 3.13)

- **Localisation des délaminations**
- Mesure de la teneur en eau du béton
- Mesure des épaisseurs

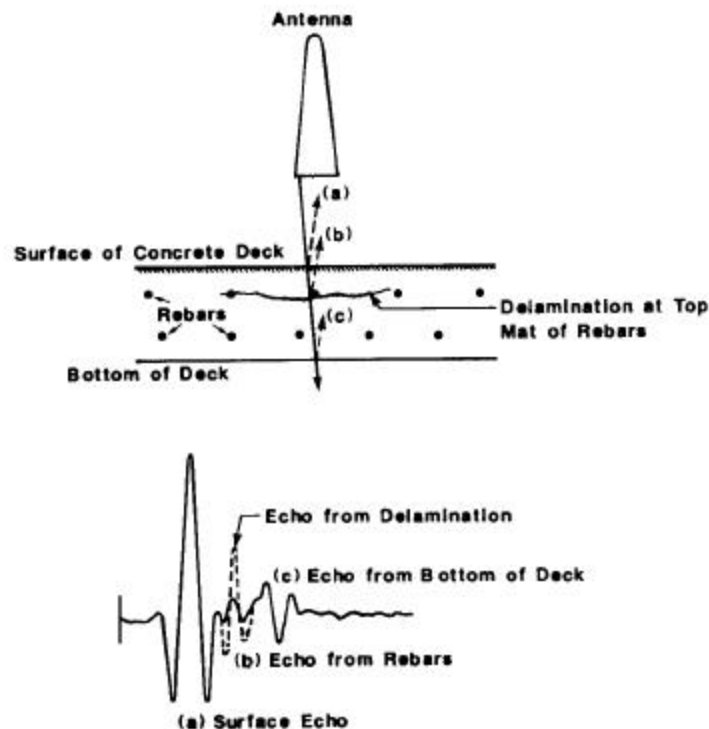


Fig 3.13 - Représentation schématique du principe de localisation des délaminations à l'aide d'un radar.

[tiré de: Malhotra, V. M. and Carino, N. J. 1991 *Handbook on Nondestructive testing of concrete*, CRC Press, Boca Raton, USA, 343 p.]

### Autres méthodes

- **Thermographie infrarouge**
- **Tomographie sonique**

## 3.2 LES PRINCIPES DE BASE D'UNE RÉPARATION DURABLE

### 3.2.1 Introduction

- La fabrication d'une réparation durable et efficace repose sur une **sélection appropriée des matériaux et sur leur utilisation selon les règles de l'art.**
- Le choix des matériaux n'est cependant pas la seule étape importante du processus de réparation. Il faut aussi porter une attention particulière à la **préparation des surfaces, aux techniques d'application et de mûrissement et au contrôle de la qualité.**

### 3.2.2 Notions de bases sur la compatibilité des matériaux de réparation avec le béton existant

- De nombreux cas de réparations déficientes sont dus à un **mauvais choix des matériaux** de réparation.
  - On constate souvent que les échecs résultent de l'utilisation de **matériaux incompatibles** avec le **substrat** ou avec les **conditions d'exposition.**

---

**La compatibilité se définit comme un équilibre entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du matériau de réparation et du vieux béton existant.**

---

- Elle fait en sorte que la réparation sera en mesure de résister sans dommages aux différentes sollicitations dues aux changements volumétriques et aux différents processus chimiques et électrochimiques.
- Les principaux facteurs contrôlant la durabilité des réparations et les différents paramètres de compatibilité sont présentés à la figure 3.14.

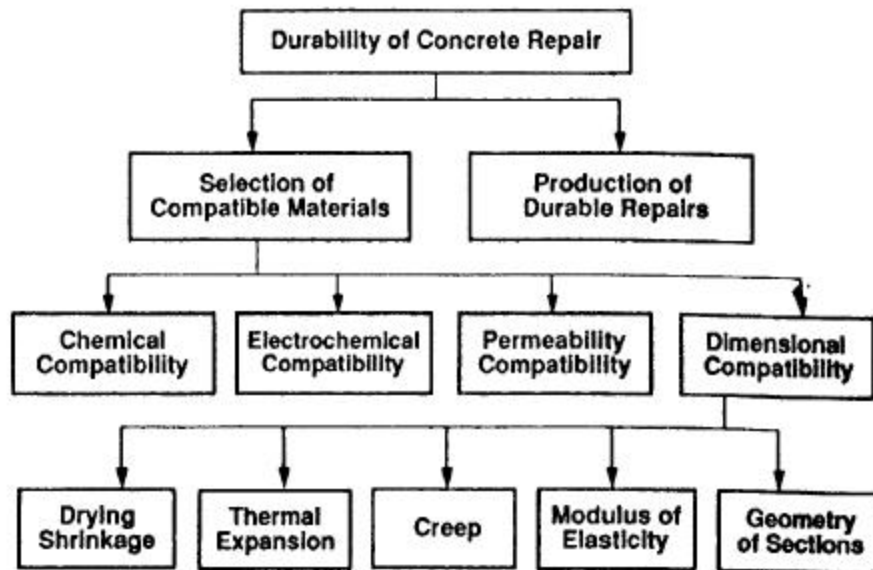


Fig 3.14 - Principaux facteurs contrôlant la durabilité des réparations.  
[tiré de Emmons, P.H et al. 1993 *A Rational Approach to Durable Concrete Repairs* Concrete International, September 1993, pp. 40-45].

- La **compatibilité dimensionnelle** est un des paramètres les plus **important** de la durabilité des réparations.
  - Une incompatibilité dimensionnelle peut affecter la durabilité ou la capacité structurale d'une réparation (Fig 3.15).

- \* Décollement
- \* Fissuration

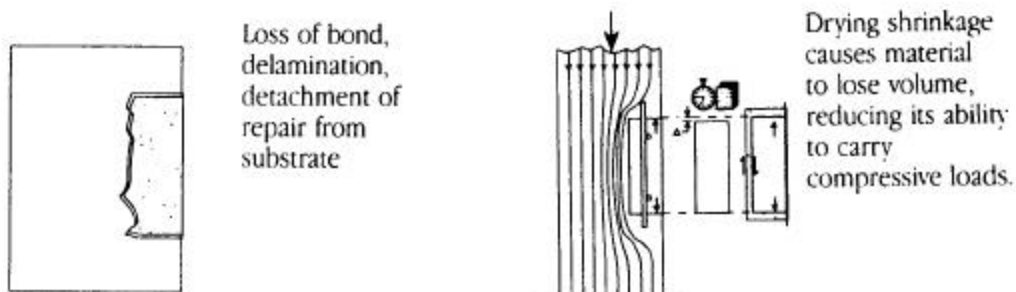


Fig 3.15 - Exemples d'incompatibilité dimensionnelle.  
[tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.].

- La **compatibilité chimique** doit tenir compte, entre autres, du contenu en alcali (possibilité de RAG), du contenu en C<sub>3</sub>A, de la teneur en chlorures du matériau de réparation ou du vieux béton.
  - Pour la réparation d'un ouvrage de béton contenant des granulats potentiellement réactifs (RAG), on doit utiliser un matériau avec une faible teneur en alcalis.
  - La réactivité du matériau de réparation de surface avec les aciers d'armature doit être analysée. Certains matériaux de réparation avec un pH modéré ou faible ne sont pas en mesure d'offrir une protection adéquate des aciers d'armature (non passivation des aciers d'armature).
- La **compatibilité électrochimique** doit tenir compte de la résistivité électrique et du pH.
  - Des résultats désastreux ont déjà été obtenus suite à des travaux de réparation pour lesquels on avait mal analysé la compatibilité électrochimique des matériaux

Exemple La réparation d'une partie seulement d'une large zone anodique peut augmenter le rapport cathode/anode et accélérer considérablement le processus de corrosion à la périphérie de la zone réparée.

### La compatibilité dimensionnelle

- Plusieurs propriétés du matériau peuvent influencer la **compatibilité dimensionnelle**
  - **Retrait au séchage**
  - Coefficient de dilatation thermique
  - Module d'élasticité
  - Le fluage

- Les **changements volumétriques** dans le matériau de réparation ou dans le vieux béton peuvent induire des **contraintes de cisaillement au niveau de l'interface**
  - Des contraintes de **tension** et de **compression** peuvent se développer dans chacun des matériaux. Cet état de contrainte engendre alors des **contraintes de cisaillement** au niveau de l'interface.
- Des **contraintes de cisaillement** à l'interface peuvent aussi être engendrées par des différences entre les **coefficients de dilatation thermique**, les **modules d'élasticité** ou les coefficients de **fluage** des matériaux (Fig 3.16).

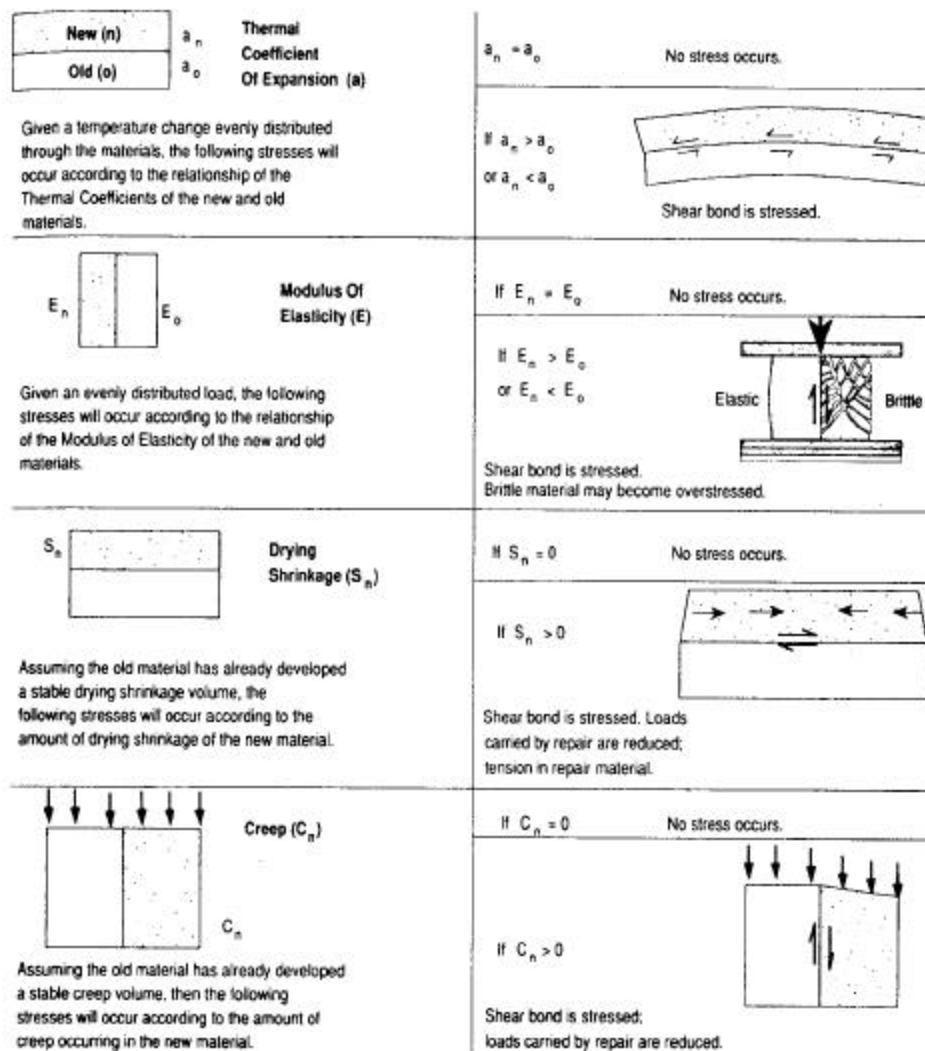


Fig 3.16 - Influence des changements volumétriques sur les réparations.

[tiré de Emmons, P.H et al. 1993 *A Rational Approach to Durable Concrete Repairs* Concrete International, September 1993, pp. 40-45].

- Il est pratiquement **impossible** de choisir un matériau de réparation avec une **compatibilité dimensionnelle parfaite**. Il a y toujours des différences plus ou moins importantes entre les propriétés du vieux béton et des matériaux de réparations. (Tableau 3.1).

Tab 3.1 - Propriétés à court terme typiques des matériaux de réparation.

[tiré de Emmons, P.H et al. 1993 *A Rational Approach to Durable Concrete Repairs* Concrete International, September 1993, pp. 40-45].

Property	Resin mortar	Polymer-modified cementitious mortar	Plain cementitious mortar
Compressive Strength (psi)	7250 to 14500	4350 to 8700	2900 to 7250
Tensile Strength (psi)	1450 to 2175	72 to 1450	290 to 725
Modulus of elasticity in compression (psi)	1,45 to 2,9 x 10 <sup>6</sup>	2,18 to 3,63 x 10 <sup>6</sup>	2,9 to 4,35 x 10 <sup>6</sup>
Coefficient of thermal expansion (in/in/°F)	14 to 17 x 10 <sup>6</sup>	6 to 11 x 10 <sup>6</sup>	5,5 x 10 <sup>6</sup>
Water absorption (% by weight)	1 to 2	0,1 to 0,5	5 to 15
Maximum service temperature (F)	104 to 177	215 to 571	571

**Le retrait au séchage est un des principaux paramètres contrôlant la durabilité des réparations de surface.**

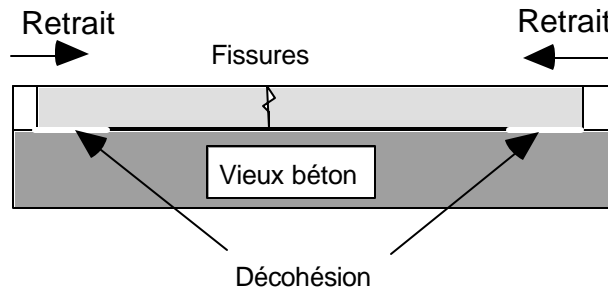


Fig 3.17 - Influence du retrait au séchage sur le comportement des réparations minces.

- Le **retrait au séchage engendre des contraintes de traction dans le matériau de réparation**. L'intensité des contraintes de traction augmente à mesure que progresse le retrait. Les fissures apparaissent lorsque les contraintes de traction dépassent la résistance à la traction du matériau (Fig 3.18).

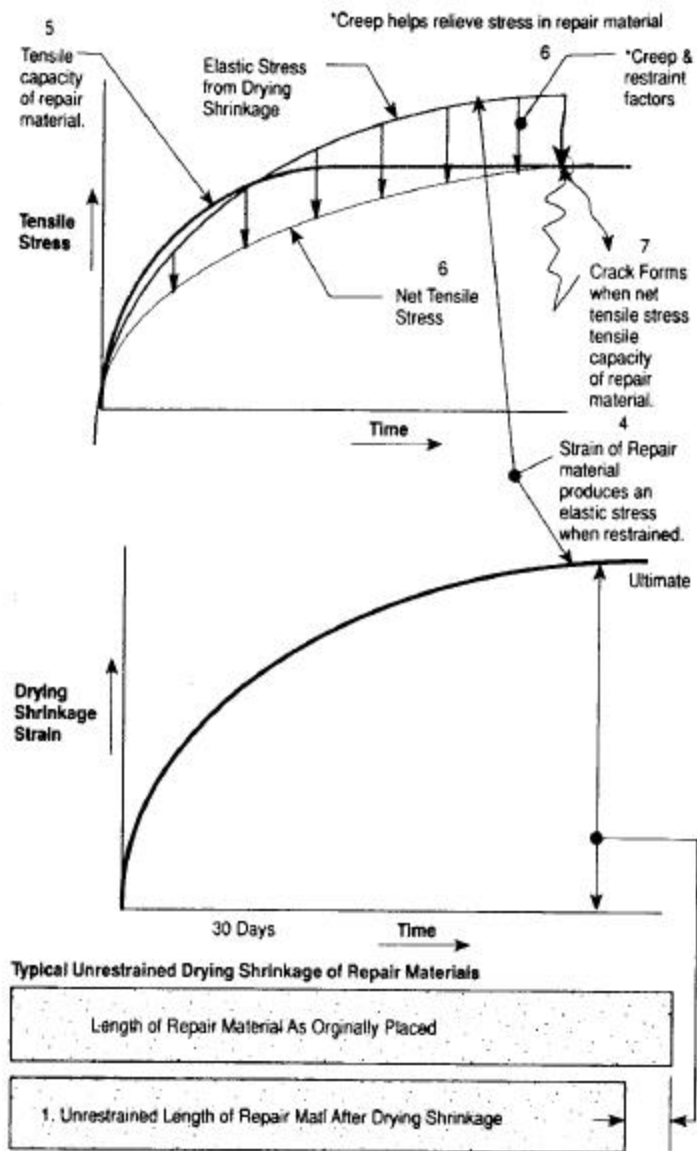


Fig 3.18 - Le rôle du retrait au séchage sur la fissuration des réparations minces. [tiré de Emmons, P.H et al. 1993 *A Rational Approach to Durable Concrete Repairs* Concrete International, September 1993, pp. 40-45].

---

**Le fluage en traction permet de diminuer l'intensité des contraintes de traction. Le fluage en traction permet donc de retarder ou empêcher complètement la fissuration du matériau de réparation.**

---

---

**Il est toujours préférable de choisir un matériau de réparation possédant un retrait au séchage le plus faible possible.**

---

- Le retrait au séchage est fonction des paramètres de composition du béton et des conditions environnementales (Tab 3.2).

Tab 3.2 - Paramètres d'influence du retrait au séchage du béton.

Paramètres de composition	Facteurs environnementaux, géométriques et autres
Teneur en ciment <b>Rapport E/C</b> Teneur en eau <b>Teneur en granulats</b> Âge	Humidité relative Durée du séchage Rapport volume/surface Mûrissement

- Comment diminuer le retrait au séchage ?

- \* Diminuer la quantité de pâte (augmenter la teneur en granulats)
- \* Diminuer la quantité d'eau
- \* Assurer un bon mûrissement
- \* Diminuer le rapport surface/volume

- Il est malheureusement surprenant de constater que le **retrait au séchage** de la **grande majorité des produits de réparation commerciaux est bien supérieur à celui d'un béton ordinaire** (Fig 3.19)

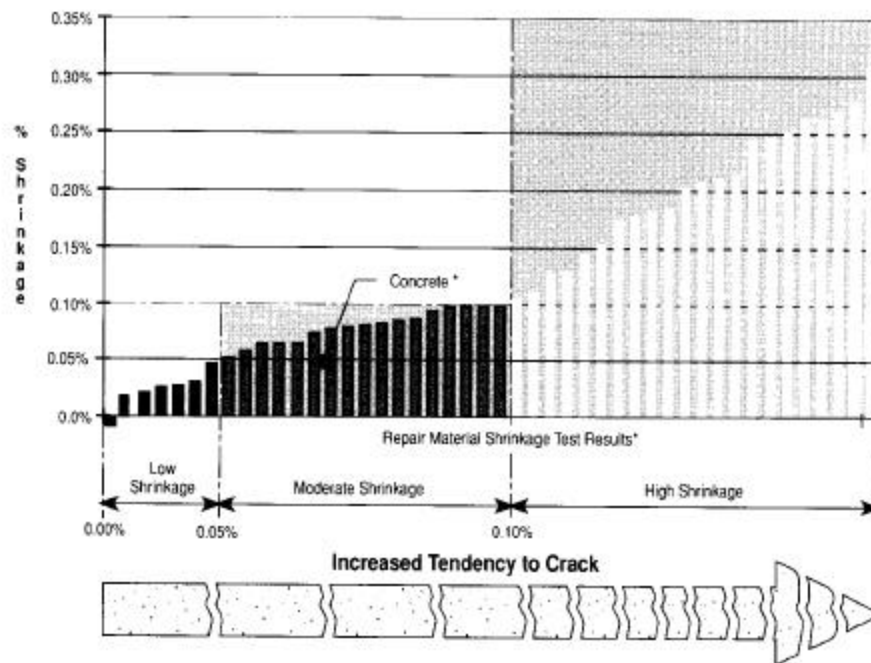


Fig 3.19 - Retrait au séchage de différents produits de réparation commerciaux.  
 [tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.] .

- Il est donc **important** de vérifier le retrait au séchage des matériaux de réparation de manière à **choisir les matériaux qui possèdent un faible retrait au séchage** (< 0,05%).
  - Si l'épaisseur de la réparation le permet, il est généralement préférable d'ajouter des gros granulats aux produits de réparation commerciaux.
  - Attention au mûrissement !