الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Filière Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : Kerkoub Aya

Sujet

Réhabilitation des éléments en béton sollicité en compression par injection de colle à base de résine.

Présenté et soutenu publiquement, le 29/06/2025 , devant le jury composé de :

Hamidane Hmida	MCB	Président
Ayeb Belkhir	MAA	Rapporteur
Boursas Farid	MCA	Examinateur 1
…	…	…

Promotion : 2024/2025

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M. Ayeb Belkhir, mon encadrant, pour sa précieuse orientation, son accompagnement constant et ses conseils éclairés tout au long de ce travail. Son implication et sa disponibilité ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères vont également à Mme Souad, ingénieure de laboratoire, pour son aide technique précieuse, sa patience et sa bienveillance durant toute la phase expérimentale.

Je remercie particulièrement M. Hamidane hmida et M. Abed abderrahime pour leur soutien et leur aide tout au long de cette étude.

Toute ma reconnaissance va aussi à mes chers enseignants pour la qualité de l'enseignement transmis, ainsi qu'à l'ensemble du département de génie civil, pour l'environnement d'apprentissage et les ressources mises à disposition durant ma formation.

Aya Kerkoub

Dédicace

À la mémoire de mon cher père, Larbi, feu de mon cœur,
que j'aurais tant souhaité voir à mes côtés en ce moment précieux.
Que ton souvenir reste vivant dans chacun de mes pas.
À ma mère Houria,
qui a été à la fois une mère tendre et un père courageux.
Ton amour et tes sacrifices sont la source de ma force et de ma persévérance.
À mon unique frère et pilier de vie, Anis,
ta présence est un soutien inestimable.
À mes sœurs bien-aimées, Ahlam et Asma,
lumière de mes yeux et douceur de mon cœur.
À ma belle-sœur et sœur de cœur, Houda.
À mes beaux-frères, Noureddine et Taki,
pour leur présence chaleureuse et leur bienveillance.
À mes plus belles bénédictions : Jouri, Siradj et Mohamed Larbi,
vous êtes la joie de mon âme.
À mes chères grands-mères, Hassna et Soliha,
et à mon oncle bien-aimé, Baba Hamid.
À mon frère de cœur, Riad,
à mes tantes Bernia et Ikram,
et à tous mes oncles et tantes maternels et paternels
que je porte dans mon cœur avec amour et respect.
Enfin, à mes amies fidèles et compagnes de route
qui ont partagé avec moi les efforts, les joies et les larmes :
Sarah, Hadjer, Cyrine, Besboussa, Hassna, Wissam, Aya, Siham, Wissal, Ryma, Hadil...
et à toutes celles et ceux qui résident dans mon cœur,
même si ma plume n'a pas pu citer tous leurs noms.
Alhamdulillah.

Liste des figures

Chapitre 2

Figure 2. 1: Efflorescence sur une surface en béton (dépôts blanchâtres)..... 18
Figure 2. 2: Croûtes d'efflorescence persistantes 21
Figure 2. 3: Début de corrosion des armatures (fissures linéaires + taches de rouille) 21
Figure 2. 4: Armature corrodée et béton éclaté..... 24
Figure 2. 5: Scaling – Détachement superficiel de béton (éclats visibles) 27
Figure 2. 6: Décollement des revêtements – Cloques et fissures sur la peinture..... 28
Figure 2. 7: Déformation excessive – Affaissement visible d'une poutre ou dalle 30
Figure 2. 8: Déformation et soulèvement de dalle causée par la RAS 38

Chapitre 3

Figure 3. 1: Réparation des fissures..... 50
Figure 3. 2: Béton projeté 52
Figure 3. 3: Renforcement par profilés métalliques externes 56
Figure 3. 4: précontrainte externe 57
Figure 3. 5: Peinture anti-carbonatation pour béton 61
Figure 3. 6: Renforcement des fondations par micropieux..... 66
Figure 3. 7: Réparation des épaisseurs dégradées ou nids internes 70

Chapitre 4

Figure 4. 1: MALAXAGE..... 75
Figure 4. 2: MOULAGE ET DEMOULAGE..... 76
Figure 4. 3: VIBRATION..... 76
Figure 4. 4: APPAREIL DE COMPRESSION 77
Figure 4. 5: PERÇAGE..... 79
Figure 4. 6: COLLE SikaDur®-52 Injection 80
Figure 4. 7: INJECTION..... 80
Figure 4. 8: ESSAI DE COMPRESSION 81
Figure 4. 9: EXEMPLE DE RESULTAT..... 84

Liste des Tableaux

Chapitre 4

Tableau 4. 1: dreux gorisse utilisée.....74
Tableau 4. 2: résultats récup d'écrasement.....77
Tableau 4. 3: résultats d'écrasement 7 jours.....78
Tableau 4. 4: résultats d'écrasement 14 jours.....78
Tableau 4. 5: résultats d'écrasement 28 jours.....78
Tableau 4. 6: résultats récup d'écrasement.....83

RESUME

La réhabilitation et le renforcement des structures et des éléments structuraux dégradés en béton ou en béton armé est devenue une réalité indispensable au cours de ces dernières années.
Plusieurs méthodes et techniques sont introduites et largement adoptées, elles sont justifiées par des réflexions et des recherches menées par des experts et des scientifiques de renommés.
La majorité des méthodes de renforcement s'articule et s'intéresse aux réhabilitations externes surfaciques ce qui représente un point faible et même insuffisant car toute dégradation de caractère structurelle induit un désordre au niveau des composants du matériau et modifie d'une façon microscopique la rigidité interne en influant sur la capacité de résistance qui ne peut être justifiée par des indices et des constatations visuelles. L'objectif principal de ce travail est de développer un programme expérimental pour étudier la possibilité d'utiliser la colle injectée comme moyen de renforcement en profondeur au-delà des épaisseurs d'enrobage de béton après avoir subit des dégradations par pré-fissuration. Pour atteindre les objectifs visés, des essais d'écrasement en compression ont été effectués sur 42 éprouvettes en béton : 6 (six)-de différents âges- testées pour déterminer les valeurs des résistances limites.
Une opération de pré-fissuration par compression a été effectuée en considérant trois de dégradation en termes de contrainte (20%, 50% et 80%) selon la répartition suivante :
-Six (06) : deux pour chaque âge, sollicitées à 20%.
-Six (06) : deux pour chaque âge, sollicitées à 50%.
-Six (06 : deux pour chaque âge, sollicitées à 80%.
Une fois ces opérations sont effectuées et en fonction des résultats obtenus, une autre opération sensible et plus intéressante consiste à renforcer les éprouvettes pré-fissurées en utilisant une colle SIKA LP 52 Injection qui présente qui a fait ses preuves dans le domaine de la réhabilitation des constructions. Par une technique de perforation profonde qui peut atteindre 11 cm, et en utilisant des seringues de grande capacité :
-Chaque éprouvette a été perforée latéralement dans quatre positions et suivant différentes orientations.
-La colle a été injectée progressivement par le moyen de seringues manuelles.
-Après injection, les trous ont été bouchés par des bandes autocollantes afin d'empêcher toute perte de colle.
Les éprouvettes sont laissées pour une période de séchage recommandée par le fabriquant puis on s'engage pour une autre compagne d'essais afin de redéterminer les nouvelles limites de résistance après renforcement.
Les résultats expérimentaux sont comparés avec les contraintes limites des éprouvettes de 28 jours comme référence règlementaire.
Comme conclusion, les résultats ont prouvé une augmentation considérable en termes de contrainte spécifiquement pour les taux de dégradation de 20% et 80%.

Les mots clés : réhabilitation ; renforcement ; pathologies ; dégradation ; compression ; colle.

الملخص

أصبحت إعادة تأهيل وتدعيم الهياكل الخرسانية المتدهورة أو الخرسانة المسلحة والعناصر الإنشائية حقيقة لا غنى عنها في السنوات الأخيرة

وقد تم إدخال العديد من الأساليب والتقنيات واعتمادها على نطاق واسع، وهو ما يبرره التأملات والأبحاث التي أجراها خبراء وعلماء مشهورون من

تركز معظم طرق التسليح على إعادة تأهيل السطح الخارجي وهي نقطة ضعف بل وغير كافية لأن أي تدهور في الطابع الإنشائي يؤدي إلى اضطراب في مكونات المادة ويعدل بطريقة مجهرية الصلابة الداخلية من خلال التأثير على قدرة المقاومة التي لا يمكن تبريرها بالقرائن والملاحظات البصرية

الهدف الرئيسي من هذا العمل

هو تطوير برنامج تجريبي لدراسة إمكانية استخدام المادة اللاصقة المحقونة كوسيلة للتقوية العميقة بعد من سمك طلاء الخرسانة بعد تعرضها للتدهور عن طريق ما قبل التكسير

ولتحقيق الأهداف

تم إجراء اختبارات التكسير بالضغط على 42 عينة مصنوعة من الخرسانة

:تم اختبار 6 (ستة) – من أعمار مختلفة – لتحديد القيم

من المقاومات الحدية أُجريت عملية التكسير المسبق عن طريق الضغط مع الأخذ في الاعتبار ثلاثة مستويات للتدهور من حيث الإجهاد(20%، 50% و80%) وفقًا للتوزيع التالي

ستة (06): اثنان لكل فئة عمرية، 20٪ من الوقت

ستة (06): اثنتان لكل فئة عمرية، 50٪ منها ملتمسة

ستة (06): اثنان لكل فئة عمرية، 80% منها ملتمسة

بمجرد إجراء هذه العمليات، واعتمادًا على النتائج التي تم الحصول عليها، هناك عملية أخرى حساسة وأكثر إثارة للاهتمام تتمثل في تقوية العينات المتصدعة مسبقًا باستخدام مادة لاصقة حقن SIKA NP

52، والتي تؤدي أداءً جيدًا في مجال إعادة تأهيل المباني

تم استخدام تقنية ثقب عميق يصل إلى 11 سم، باستخدام محاقن ذات سعة كبيرة

تم ثقب كل عينة بشكل جانبي في أربعة مواضع وفي اتجاهات مختلفة

تم حقن المادة اللاصقة تدريجيًا باستخدام محاقن يدوية

بعد الحقن، تم إغلاق الثقوب بشريط لاصق ذاتي اللصق لمنع أي فقدان للمادة اللاصقة تُركت العينات لتجف لفترة أوصت بها الشركة المصنعة، ثم أجريت سلسلة أخرى من الاختبارات لإعادة تحديد حدود القوة الجديدة بعد التعزيز تتم مقارنة النتائج التجريبية مع الضغوط الحدية لعينات 28 يومًا كمرجع تنظيمي

وفي الختام، أظهرت النتائج زيادة كبيرة من حيث الإجهاد خاصةً بالنسبة لمعدلات التدهور بنسبة 20% و80%

SUMMARY

The rehabilitation and strengthening of degraded concrete on reinforced concrete structures and structural elements has become a common practice in recent years.Several methods and techniques have been introduced and widely adopted, justified by the reflections and research carried out by renowned experts and scientists.

The majority of reinforcement methods are focused on external surface rehabilitation, which is a weak and insufficient point, since any structural degradation induces disorder in the material's components and microscopically modifies its internal rigidity, influencing its resistance capacity, which cannot be justified by visual evidence.

The main objective of this work is to develop an experimental program to study the possibility of using injected glue as a means of deep reinforcement beyond the thickness of the concrete coating after it has undergone pre-cracking degradation.

To achieve these objectives, compressive crushing tests were carried out on 42 concrete specimens: 6 (six) - of different ages - were tested to determine the limiting strength values.

A compression pre-cracking operation was carried out, considering three degradation levels in terms of stress (20%, 50% and 80%) according to the following distribution:

Six (06): two for each age group, 20% solicited.

-Six (06): two at each age, 50% of the time.

-Six (06): two for each age, at 80%.

Once these operations have been carried out, and depending on the results obtained, another sensitive and more interesting operation consists in reinforcing the pre-cracked specimens using a SIKA NP 52 Injection adhesive, which performs well in the field of building rehabilitation.

Using a deep perforation technique of up to 11 cm and large-capacity syringes:

-Each specimen was perforated laterally in four different positions and orientations.

-The glue was injected progressively using manual syringes.

After injection, the holes were sealed with self-adhesive tape to prevent any loss of glue.

The test specimens were left to dry for a period recommended by the manufacturer, before embarking on another series of tests to redetermine the new strength limits after reinforcement.

The experimental results are compared with the limiting stresses of the 28-day specimens as a regulatory reference.

As a conclusion, the results showed a considerable increase in stress specifically for the 20% and 80% degradations.

Table des matières

Remerciements
Dédicace
Liste des figures
Liste des Tableaux
RESUME
Table des matiére
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE 12
Introduction 13
Problématique 13
Objectifs du travail 13
CHAPITRE 2 : PATHOLOGIES ET CAUSES DE DÉGRADATION DANS LE BÉTON 15
2.1 Introduction 16
2.2 Fissuration 16
2.2.1 Définition 16
2.2.2 Types de fissures 16
2.2.3 Origines des fissures 17
2.2.4 Apparitions des fissures 17
2.3 Pathologies les plus fréquentes dans le béton 17
2.3.1 Efflorescence 18
2.3.1.1 Définition et mécanisme 18
2.3.1.2 Conditions favorables à l'efflorescence : 19
2.3.1.3 Types de sels favorisant la pathologie 19
2.3.1.4 Manifestations 19
2.3.1.5 Impacts éventuels 20
2.3.1.6 Prévention 20
2.3.1.7 Traitement 20
2.3.2 Corrosion des armatures d'acier 20
2.3.2.1 Conséquences de la corrosion 22
2.3.2.3 Manifestations visibles : 22
2.3.1.4 Facteurs favorisant la corrosion des aciers 22
2.3.1.5 Prévention : 23
2.3.2.4 Réparation et traitement : 23
2.3.4 SCALING (Éclatement du béton) 23
2.3.4.1 Définition et processus 24
2.3.4 Facteurs de déclenchement 25
2.3.4 Prévention 25
2.3.4.5 Réparation 25
2.3.5 Décollement des revêtements 26
2.3.5.1 Définition et mécanisme 26
2.3.5.2 Manifestations typiques 27
2.3.5.3 Moyens de prévention 28
2.3.6 Déformation excessive 28
2.3.6.1Définition et causes 29
2.3.6.2 Manifestations 29
2.3.6.3 Conséquences 29
2.3.6.4 Prévention et réparation 29

2.3.7 Retrait plastique 29
2.3.7.1 Définition et mécanisme 30
2.3.7.2 Manifestations et conséquences 31
2.3.7.3 Prévention 31
2.3.8 Réaction Alcali-Silice (RAS) 32
2.3.8.1 Définition 32
2.3.8.2 Mécanisme de dégradation et manifestations 32
2.3.8.3 Prévention et réparation 33
2.3.9 RAS retardée (Réaction Alcali-Silice retardée) 33
2.3.9.1Définition 33
2.3.9.2 Mécanisme spécifique et manifestations 34
2.3.9.3 Prévention et réparation 34
2.4 Autres types de pathologies 35
2.4.1 Pathologies biologiques 35
2.4.1.1 Définition et types d'agents biologiques 35
2.4.1.2 Conditions favorables à la pathologie et ses manifestations 35
2.4.1.3 Prévention et traitement 36
2.4.2 Fissures thermiques 36
2.4.2.1 Définition et causes 36
2.4.2.2 Manifestations de la pathologie et ses facteurs aggravants 37
2.4.2.3 Prévention et réparation 37
2.4.3 Délamination 38
2.4.3.1 Définition 38
2.4.3.2 Mécanismes de formation et manifestations 38
2.4.3.3 Conséquences et facteurs favorables 39
2.4.3.4 Prévention et réparations 39
2.4.4 Écaillage (SCALING) 40
2.4.4.1 Définition et mécanisme 40
2.4.4.2 Conséquences et facteurs favorisants 40
2.4.4.3 Prévention et réparations 41
2.4.4 Dislocation interne : 41
2.4.4.1 Définition et mécanismes de formation 41
2.4.4.2 Manifestations, conséquences et facteurs favorisants 42
2.4.4.3 Prévention et réparations 42
2.4.5 Tâches ou colorations anormales 43
2.4.5.1 Définition 43
2.4.5.3 Manifestations et conséquence 43
2.4.5.3 Prévention et traitement 44
2.5 Défaillance structurale 44
2.5.1 Définition et origines 44
2.5.2 Manifestations, conséquences et facteurs favorables 45
2.5.3 Prévention et réparation (si possible) : 45
2.6 Porosité excessive 46
2.6.1 Définition et origine 46
2.6.2 Manifestations et conséquences 46
2.6.3 Prévention et réparations 47
CHAPITRE 3 : METHODES ET TECHNIQUES DE REHABILITATION. 48
3.1 Réparation des fissures : 49
3.3 Béton projeté : 51

3.4 Renforcement par placage en fibre de carbone (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer) 53
3.5 Ajout de renfort en béton armé : 54
3.6 Renforcement par profilés métalliques externes : 54
3.7 précontrainte externe : 56
3.8 Protection cathodique : 58
3.9 Application d'inhibiteurs de corrosion 58
3.10 Étanchéité de surface : 59
3.11 Traitement anti-carbonatation : 60
3.12 Réparation des nids de gravier : 62
3.13 Réparation des joints défectueux : 62
3.14 Traitement des armatures corrodées : 63
3.15 Réparation des épaufrures et éclats : 64
3.16 Renforcement des fondations par micropieux : 65
3.17 Réparation des bétons par électrochimie (désalcalinisation, extraction des chlorures) : . 66
3.18 Remplacement locale du béton : 67
3.19 Réparation des joints de construction 68
3.20 Réparation des épaisseurs dégradées ou nids internes : 69
3.21 Réparation par remplacement partiel de pièce endommagée : 70
CHAPITRE 4 : PARTIE EXPERIMENTALE 72
I-Béton utilisé : 73
Méthode de Dreux-Gorisse 73
Autres méthodes de formulation du béton : 73
Méthode de Bolomey 73
Méthode de Feret 73
Méthode de Faury 73
Méthode de Lyse 73
Méthode de Fuller (ou Fuller-Thompson) 73
Méthode de Aïtcin 73
Méthode ACI (American Concrete Institute) 73
Méthode BRL (Bureau de Recherches Lavoisier) 74
Méthode CTT / LCPC 74
Méthode de Funk et Dinger 74
Méthode BTRHEPA 74
II-Préparation des éprouvettes : 74
1. Malaxage : 74
2. Moulage (cylindre 16×32 cm) : 75
3. Vibration : 76
4. Séchage humide (Cure) : 76
III-Protocol Des essais : 77
III-1 Essai de compression (limites de résistance) : 77
III-2 Procédure de pré-fissuration : 78
III-3 Essai de compression après injection : 79
CHAPITRE 5: ANALYSE DES RÉSULTATS 85
CONCLUSION GÉNÉRALE 92
Références bibliographiques 94

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

Le béton est un matériau de construction le plus utilisé dans le domaine du génie civil, sa popularité repose sur ses excellentes propriétés mécaniques, sa durabilité, sa disponibilité et sa facilité de mise en œuvre. Les structures réalisées en béton jouent un rôle essentiel dans la stabilité des bâtiments et des infrastructures. Parmi les différents types de sollicitation auxquels le béton peut être soumis, la compression constitue l'une des plus courantes, notamment dans les éléments verticaux tels que les voiles, les colonnes, les murs porteurs et les blocs de fondation.

Toutefois, malgré ses performances élevées en compression, le béton reste sensible à divers facteurs pouvant menacer son intégrité : vieillissement naturel, sollicitations cycliques, défauts de mise en œuvre, agressions chimiques ou environnementales….

Ces contraintes peuvent entraîner des signes de dégradation tel que l'apparition de fissures, de microcavités ou de délaminages internes qui réduisent la capacité portante des éléments concernés. Dans de nombreux cas, il devient alors nécessaire d'envisager des travaux de réhabilitation pour restaurer ou améliorer les performances structurelles initiales.

Parmi les différentes techniques de réparation existantes, l'injection de colle à base de résine s'est imposée comme une méthode efficace pour traiter les fissures et défauts internes dans les éléments soumis à la compression. Elle permet de combler les vides, de rétablir la continuité du matériau et d'assurer une meilleure transmission des efforts. Grâce à ses propriétés chimiques et mécaniques avantageuses, cette technique constitue une solution pertinente dans un contexte de maintenance durable du bâti.

Problématique

Face à l'augmentation du nombre de structures en béton présentant des signes de dégradation, les ingénieurs sont confrontés à une question essentielle : Comment restaurer efficacement la capacité portante d'un élément en béton fissuré soumis à la compression, sans recourir à des démolitions coûteuses ou à des renforcements massifs ?

Dans ce contexte, l'injection de colle à base de résine offre une alternative intéressante. Toutefois, plusieurs défis doivent être relevés :

- Dans quelles conditions cette technique est-elle réellement efficace ?
- Quels types de défauts peuvent être réparés par injection ?
- Quels paramètres influencent la durabilité et la fiabilité de la réparation ?
- Quelles sont les limites physiques et économiques de cette méthode dans la pratique?

Objectifs du travail

Ce travail vise à donner une contribution expérimentale pour la réhabilitation et le renforcement des éléments en béton sollicités principalement en compression.

La technique qu'on propose dans ce contexte est basée sur l'injection d'une colle à base de résine, en s'appuyant à la fois sur des données théoriques et également une procédure expérimentale pratique.

Les objectifs spécifiques se résument en :

1. Analyser les mécanismes et les taux de dégradation qui affectent les éléments en béton soumis à la compression.
2. Décrire les caractéristiques et les performances des colles à base de résine utilisées dans les opérations de renforcement.
3. Étudier les conditions de mise en œuvre optimales de la technique d'injection.
4. Réaliser une campagne expérimentale pour évaluer l'efficacité et la performance de cette méthode sur des éprouvettes pré-fissurées.
5. Donner des recommandations pratiques pour l'utilisation de cette technique en milieu réel.

CHAPITRE 2 : PATHOLOGIES ET CAUSES DE DÉGRADATION DANS LE BÉTON

2.1 Introduction

Le chapitre présente et explique le phénomène de fissuration comme étant l'aspect le plus visible dans une pathologie. Puis une description des différentes pathologies rencontrées dans le béton. On expose en premier lieu les pathologies les plus fréquentes en suite on décrit les pathologies particulières : biologiques, défaillance de résistance, porosité excessive. Le chapitre décrit en détails les différentes manifestations, l'origine, les mesures de prévention et un exposé bref sur les méthodes de réparation, les détails des méthodes font l'objet du chapitre suivant.

2.2 Fissuration

Dans cette section on donnera des détails sur la définition de la fissuration, les types de fissures et leurs origines respectives ainsi que leurs manifestations.

2.2.1 Définition

La fissuration est l'une des pathologies les plus communes rencontrées dans les structures en béton. Elle apparait sous forme de crevasses ou de lignes ouvertes à même la surface ou encore en profondeur de l'élément en béton. Elle peut se manifester à toutes les époques de vie de l'ouvrage en béton (dès le coulage, durant la prise, ou après plusieurs années d'exploitation). Selon leur origine, les fissures peuvent être classées comme superficielles ou structurelles, ou encore actives ou passives, et même fines ou larges.

2.2.2 Types de fissures

On distingue un grand nombre de fissures qui apparaissent dans un élément en béton, notamment :

- **-Fissures plastiques :** qui peuvent survenir juste après le coulage du béton encore frais. Elles sont généralement causées par une évaporation rapide de l'eau à la surface c'est le retrait plastique.
- **-Fissures de dessiccation :** se manifestant pendant le séchage du béton, après sa prise causée par un retrait hygrométrique non maîtrisé.
- **-Fissures mécaniques :** résultant d'une action ou d'une sollicitation excessive dépassant la limite de résistance en traction du béton.
- **Fissures thermiques :** générées par des grandes variations de température dans des structures massives par la création des gradients thermiques internes.
- **Fissures chimiques :** dues aux réactions comme la réaction alcali-silice (RAS), entraînant un gonflement interne du matériau.

2.2.3 Origines des fissures

Les différents types de fissuration énumérées plus haut prennent leurs origines comme étalées comme suit :

Retrait plastique est provoqué par un dessèchement prématuré du béton en surface, avant le début de l'hydratation qui résulte en des fissures fines parallèles entre elles, qui peuvent être souvent observé dans les dalles.

Dessiccation : phénomène de retrait différé causé par la perte graduelle d'eau du béton durci, surtout par manque de cure ou dans un environnement sec.

Surcharge ou mauvaise évaluation des actions : une sollicitation supérieure à celle prévue lors du dimensionnement de l'élément en béton peut engendrer des fissures en zones tendues.

Manque de cure : l'absence ou encore l'insuffisance de cure empêche une hydratation complète du ciment et par conséquent provoque des contraintes de retrait.

Le cycle Gel/dégel : l'eau présente dans les pores gèle, se dilate et engendre une pression interne provoquant ainsi des microfissures ou agrandissant celles existantes.

Erreurs dans la conception ou durant l'exécution : une mauvaise disposition des armatures, des épaisseurs insuffisantes de l'enrobage, ou des concentrations de contraintes.

2.2.4 Apparitions des fissures

Les fissures peuvent se manifester sous différentes formes :

- En toile d'araignée ;
- Longitudinales selon la direction des armatures) ;
- Transversales ou obliques dans les zones d'appuis pour le cas des poutres ;
- Diagonales c'est le cas des zones sous cisaillement.

Certaines fissures peuvent être visible à l'œil nu tandis que d'autres nécessitent un examen plus approfondi en utilisant une loupe, ou même des essais non destructifs. Leur largeur est un paramètre déterminant à savoir les fissures de moins de 0,2 mm sont généralement acceptées pour des éléments non exposés, par contre des fissures de plus de 0,3 mm peuvent porter atteinte à la durabilité de l'ouvrage.

2.3 Pathologies les plus fréquentes dans le béton

Dans cette section une présentation brève et succincte des pathologies qui touche le béton seront présentées. On détaillera chacune des pathologies. On

présentera chaque pathologie avec sa définition, son mécanisme, aux conditions favorables à son apparition, ses impacts, sa prévention et les moyens de réparation.

2.3.1 Efflorescence

L'efflorescence est une pathologie d'aspect du béton qui est caractérisée par l'apparition de dépôts blanchâtres à la surface de celui-ci. Bien qu'elle soit fréquemment considérée comme un désordre de l'aspect esthétique, son existence peut montrer des désordres plus profonds liés à la porosité, à la perméabilité ou à la présence d'humidité dans la structure atteinte. Le phénomène de l'efflorescence peut survenir peu de temps après le coulage ou plusieurs mois plus tard selon les conditions environnementales.



Figure 2. 1: Efflorescence sur une surface en béton (dépôts blanchâtres)

2.3.1.1 Définition et mécanisme

En fait, l'efflorescence résulte de la migration d'eau à travers la matrice poreuse du matériau béton qui dissout des sels solubles contenus dans les matériaux formant le béton (eau, ciment, granulats, adjuvants) ou encore ceux introduits depuis l'extérieur

(eaux de mer ou de ruissellement et les sels de déverglaçage). Ainsi, lorsque cette eau migre vers la surface et se vaporise, les sels dissous se cristallisent en formant des dépôts à couleur blanche et poudreux ou croûtés.

2.3.1.2 Conditions favorables à l'efflorescence :

Certaines conditions peuvent favoriser l'apparition du phénomène de l'efflorescence, notamment :

- **Présence d'eau :** l'humidité est nécessaire au transport des sels. Encore, une infiltration, une remontée capillaire ou un excès d'eau de gâchage peuvent aussi favoriser la manifestation du phénomène.
- **Porosité élevée :** l'eau peut circuler librement dans un béton mal compacté ou dosé, ou un béton avec une porosité ouverte et celui qui n'a pas reçu une cure efficace.
- **Sol riche en sels :** un sol contenant des chlorures ou des sulfates peut favoriser l'apparition du phénomène pour les structures en contact avec ce sol.
- **Évaporation rapide :** l'évaporation de l'eau à la surface est accélérée dans des conditions sèches et ensoleillées en provoquant une cristallisation rapide des sels.

2.3.1.3 Types de sels favorisant la pathologie

On note :

- **Hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) :** le plus habituel qui est issu de la pâte de ciment hydratée.
- **Sulfates ($CaSO_4$) et chlorures (NaCl, KCl) :** présents dans l'environnement extérieur immédiat ou dans les matériaux.
- **Carbonate de calcium ($CaCO_3$) :** fréquemment formé par réaction du $Ca(OH)_2$ avec le CO_2 de l'air.

2.3.1.4 Manifestations

A travers :

- **Un dépôt poudreux blanc :** qui est généralement léger, peu adhérent et facile à brosser.
- **Des Croûtes blanches dures :** elles sont plus persistantes. Elles signalent un phénomène permanent.
- **Des taches diffuses ou auréoles :** elles sont irrégulières. Elles sont visibles après une pluie et après séchage.

- **Une dégradation des revêtements :** l'efflorescence est capable de faire soulever ou faire gonfler les peintures ou les enduits peu adhérents.

2.3.1.5 Impacts éventuels

Bien que principalement inesthétique, l'efflorescence peut être le symptôme indiquant :

- Soit une perméabilité excessive du béton ;
- Soit une humidité piégée dans la structure du béton ;
- Ou d'une infiltration permanente en profondeur.

Elle peut également nuire à l'adhérence des produits de protection ou des finitions, et doit donc être traitée avant que l'on envisage une peinture ou un revêtement de l'élément.

2.3.1.6 Prévention

En observant les règles suivantes, notamment :

- **Une bonne formulation du béton :** avec un rapport E/C maîtrisé, et par l'utilisation d'adjuvants hydrophobes.
- **Une cure efficace :** afin de limiter l'évaporation prématurée.
- **Une étanchéité :** par un soin des interfaces, des joints, et des parties en contact avec l'humidité.
- **Un drainage adapté :** pour éviter les remontées capillaires.

2.3.1.7 Traitement

Notamment :

- Par un brossage à sec ou nettoyer légèrement à l'eau ;
- Par application d'agents neutralisants tels qu'un acide dilué ou nettoyants spéciaux dans le cas de dépôts tenaces ;
- Par un traitement préventif de la porosité si le phénomène est répétitif

2.3.2 Corrosion des armatures d'acier

La corrosion des armatures en acier est l'une des pathologies les plus importantes affectant les structures en béton armé. La corrosion compromet directement la durabilité, la stabilité et la sécurité des ouvrages en béton armé. Ce phénomène est souvent dissimulé avec un commencement sans signes apparents avec des effets pouvant être irréversibles s'il n'est pas repéré et traité à temps.

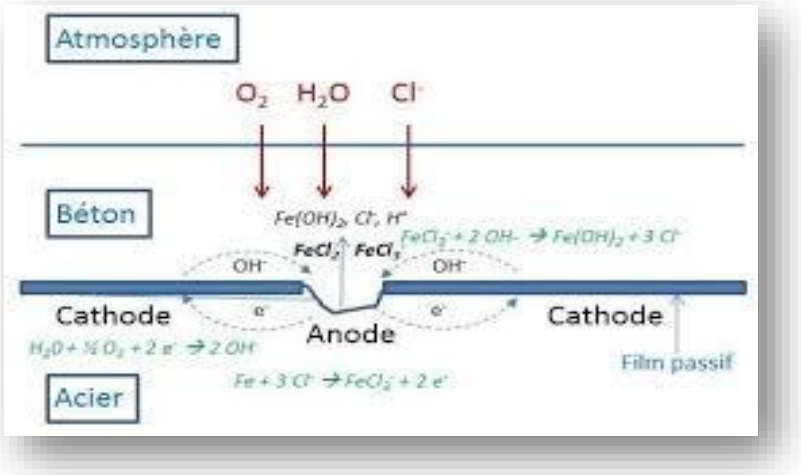


Figure 2. 2: Croûtes d'efflorescence persistantes



Figure 2. 3: Début de corrosion des armatures (fissures linéaires + taches de rouille)

Mécanisme de la corrosion des aciers

Dans un béton sain et bien alcalin le pH > 12,5, et les armatures sont protégées par une fine couche passive d'oxyde formée grâce à l'alcalinité de la pâte de ciment. Cette couche empêche l'acier de se rouiller, même en présence d'oxygène et d'humidité. Cependant, deux autres mécanismes principaux peuvent détruire cette protection : la carbonatation et la présence des chlorures.

- **Carbonatation**

Le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air pénètre à l'intérieur du béton et entre en réaction avec l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ pour former un carbonate de calcium ($CaCO_3$),

par conséquent, le pH du béton va chuter à des niveaux critiques c-à-d < 9. Ainsi, la couche passive se dissout exposant par conséquent l'acier à la corrosion en présence des deux facteurs favorisant la corrosion : l'humidité et l'oxygène.

- **Présence de chlorures**

Les ions chlorure (Cl^-), résultant des sels de déverglaçage, de l'eau de mer salée ou de matériaux contaminés, rentrent à l'intérieur de la masse du béton et attaquent directement les aciers d'armature indépendamment du pH. Les chlorures détruisent localement la couche passive, provoquant une corrosion par piqûres.

2.3.2.1 Conséquences de la corrosion

La corrosion produit de la rouille qui n'est autre que oxydes et hydroxydes de fer avec un volume de 2 à 6 fois supérieur à celui de l'acier originaire. Cela a pour conséquences de provoquer :

- Des pressions internes élevées dans le béton et provoquant des fissures parallèles aux armatures.
- Un éclatement du béton de couverture exposant ainsi les aciers à l'air libre.
- Une perte de section d'acier : réduction de la capacité portante de l'élément.
- Une diminution de l'adhérence béton-acier affectant ainsi le comportement structurel.

2.3.2.3 Manifestations visibles :

- L'apparition de fissures linéaires suivant les armatures (habituellement à proximité de la surface) ;
- L'apparition de taches de rouille en surface ;
- La formation d'écaillage ou délamination du béton ;
- Les armatures sont apparentes et rouillées ;
- L'affaiblissement localisé ou encore affaissement de l'élément structurel.

2.3.1.4 Facteurs favorisant la corrosion des aciers

- Si l'enrobage insuffisant des armatures ;
- Si le béton est poreux ou fissuré, aidant à la pénétration des agents agressifs ;
- Environnement agressifs (marins, industriels, tunnels, parkings) ;
- L'absence d'un entretien préventif : joints défectueux, infiltrations non traitées.

2.3.1.5 Prévention :

Pour prévenir l'apparition du phénomène de corrosion, ou du moins la retarder quelques règles sont à observer :

• Par l'utilisation d'un béton dense et correctement formulé ;

• Par l'adoption d'un enrobage adéquat des armatures (≥ 3 à 5 cm selon l'état d'exposition) ;

• Par adjonction de liants complémentaires à la formulation du béton :filler, pouzzolane, cendres volantes ;

- Par l'usage de barres inoxydables ou revêtues (époxy) dans les milieux très agressifs
- Par un traitement de surface : hydrofuges, protections anti-carbonatation, etc.

2.3.2.4 Réparation et traitement :

- Par un dégagement des armatures et une élimination complète de la rouille ;
- Par une passivation de l'acier par application de produits inhibiteurs ;
- Par la reconstitution du béton par mortier de réparation ajusté ;
- A travers une Protection globale (revêtement anticorrosion, peinture minérale, cathodique).

2.3.4 SCALING (Éclatement du béton)

Le **SCALING**, ou encore l'éclatement du béton, désigne la rupture et la décomposition localisée de la couche superficielle du béton avec un accompagnement habituellement d'un détachement de fragments plus ou moins importants. C'est une pathologie fréquente dans les anciennes structures exposées aux milieux agressifs ou par manque d'entretiens périodiques. Elle constitue une menace directe pour la durabilité et la sécurité, en révélant des désordres internes avancés.



Figure 2. 4: Armature corrodée et béton éclaté

2.3.4.1 Définition et processus

Le phénomène de spalling résulte habituellement d'une pression excessive interne imposée au béton, conduisant à son éclatement. Cette pression peut résulter de sources différentes :

- **Corrosion des armatures :** la couche de rouille qui se forme sur l'acier augmente de volume des armatures et pousse ainsi contre le béton environnant jusqu'à le faire éclater.
- **Gel de l'eau contenue dans les pores :** dans un climat froid, l'eau gèle, augmente de volume, et provoque par suite une pression interne qui fragilise puis décolle la couche de surface.
- **Réaction alcali-silice (RAS) :** Par la formation d'un gel expansif à l'intérieur de la matrice de ciment engendrant des pressions internes.
- **Chocs thermiques ou mécaniques :** tels que les incendies, les explosions, ou les chocs violents qui peuvent résulter en une fissuration explosive de surface.

Il existe aussi des formes typiques de manifestation de la corrosion dans les armatures:

- **Détachement de plaques de béton :** avec des morceaux de béton qui se détachent spontanément de la surface.

- **Éclats autour des armatures :** Ils sont observés surtout dans les dalles, poutres ou poteaux, et aux zones de faible enrobage.
- **Délamination :** qui concerne une séparation interne entre les couches du béton.
- **Poches creuses :** elle se localise sous la surface du béton perceptibles par percussion.

Les conséquences sont les suivantes :

- **Perte de la couche d'enrobage :** par suite, les armatures se trouvent exposées à l'air et à l'humidité, ce qui accélère le processus de corrosion.
- **Fragilisation structurelle :** avec notamment une réduction de la section résistante et de la protection des aciers.
- **Risque de chute de matériaux :** avec un danger pour les usagers, en particulier dans les ouvrages à caractère public : tunnels, parkings, ou balcons.
- **Esthétique dégradée :** avec notamment la présence de cavités, fissures, arêtes cassées etc.

2.3.4 Facteurs de déclenchement

- Dans un environnement humide et agressif ;
- Une présence de chlorures ou sulfates dans les matériaux ou l'atmosphère ;
- Un mauvais compactage du béton laissant des vides favorables à l''infiltration de l'eau ;
- Une absence totale de cure ou insuffisance de celle-ci ;
- Un enrobage insuffisant des aciers ;
- Ou encore la présence de microfissures initiales non traitées.

2.3.4 Prévention

- Par une formulation d'un béton dense, et peu perméable ;
- Un Enrobage règlementaire ;
- Usage d'adjuvants hydrofuges ou de liants pouzzolaniques pour améliorer la résistance contre les agents agressifs ;
- Par un contrôle rigoureux du compactage et de la cure ;
- Par une protection de surface par revêtements ou imperméabilisants.

2.3.4.5 Réparation

On peut utiliser un des moyens de réparation suivants :

- Par piquage des zones éclatées jusqu'à un substrat sain ;
- Par traitement des armatures : brossage, passivation ;

- Avec un reprofilage par mortiers de réparation ;
- Par application de revêtements protecteurs après la réparation ;
- Par une surveillance continue dans le cas où le phénomène est évolutif.

2.3.5 Décollement des revêtements

Le décollement des revêtements est une pathologie commune observée sur les surfaces en béton protégées ou décorées par des couches de finition : les peintures, enduits, mortiers de protection, systèmes d'étanchéité ou de carrelages. Malgré le fait que ce désordre soit souvent perçu comme un désordre esthétique, elle peut avertir sur des désordres plus sérieux dans la structure du béton ou dans sa mise en œuvre.

2.3.5.1 Définition et mécanisme

Le décollement qui correspond à la perte d'adhérence entre le revêtement utilisé et le support en béton. Cette perte peut être partielle ou totale, graduelle ou brusque. La cause de ce phénomène est une incompatibilité physique ou chimique du support et le revêtement, ou par engendré par des mouvements différentiels. Les principales causes sont :

- **Support mal préparé :** avec une présence de laitance, de poussières, de graisses, d'humidité ou à un béton non sain réduit l'adhérence.
- **Remontée d'humidité ou eau piégée** : l'action de l'eau sous pression peut bousculer le revêtement vers l'extérieur.
- **Incompatibilité thermique ou mécanique :** Les différences de dilatation entre le revêtement et le béton, et aux contraintes de retrait ou de fluage.
- **Vieillissement du produit :** avec une perte de flexibilité, une microfissuration du film ou un durcissement excessif.
- **Le choix d'un support trop lisse ou trop poreux :** une surface fermée sans rugosité suffisante peut empêcher l'ancrage mécanique.



Figure 2. 5: Scaling – Détachement superficiel de béton (éclats visibles)

2.3.5.2 Manifestations typiques

Tels que :

- Les gonflements ou cloques sous le revêtement ;
- Les décollements localisés en plaques avec bruit creux à la percussion ;
- Les fissures de surface dans le revêtement, quelque parfois accompagnées de taches d'humidité ;
- L'effritement ou pelage graduel de la couche de protection.

Les types de revêtements concernés : les peintures, les enduits à base de ciment ou de chaux ; les systèmes d'étanchéité liquide (SEL) ; les revêtements carrelés ou dalles collées ; ou encore les mortiers de réparation ou de ragréage. Les conséquences de cette pathologie se manifestent par une perte de protection contre les agressions climatiques ou chimiques ; par une infiltration d'eau et risque de corrosion des armatures si l'humidité atteint la structure ; par une altération esthétique importante ; par un risque de chute de matériaux dans les zones de circulation ou en façade ; et enfin par une compromission de l'efficacité du traitement. Les facteurs aggravants ce phénomène peuvent être soit un mauvais diagnostic préalable avant l'usage du revêtement ; par une application par temps humide, très chaud ou très froid ; par une épaisseur excessive ou non homogène du revêtement ; ou encore par une absence de primaire d'adhérence adapté au support et au produit utilisé.

2.3.5.3 Moyens de prévention

Plusieurs moyens peuvent être utilisé pour éviter ou du moins minimiser le phénomène de décollement des revêtements. On note un essai de test d'humidité avant la pose du revêtement (< 4 % masse sèche) ; le choix d'un revêtement adéquat et compatible avec le support ; avec un respect strict des conditions d'application e (température, hygrométrie, temps de séchage) ; et l'usage des primaires ou ponts d'adhérence si indispensable. Pour la réparation, on doit faire une dépose complète des parties décollées ; et la préparation du support jusqu'à l'obtention d'un substrat sain, rugueux et sec ; et de s'assurer de réparation des défauts du béton avant une nouvelle application ; et enfin un bon choix et application d'un revêtement adapté, selon les contraintes en œuvre.

2.3.6 Déformation excessive

La déformation excessive est une pathologie qui touche les éléments porteurs des structures en béton armé (dalles, poutres, planchers, etc.). Elle se traduit par une flèche plus grande que celle initialement prévue dans le calcul. Ce phénomène, souvent graduel, et peut être le symptôme d'un déséquilibre structurel, d'une erreur de conception, ou d'un comportement différé du matériau.



Figure 2. 6: Décollement des revêtements – Cloques et fissures sur la peinture

2.3.6.1Définition et causes

On parle de déformation excessive quand la flèche mesurée dépasse les limites admissibles par les normes de construction. Cette déformation peut être immédiate, due à l'action appliquée, ou différée de fluage ou du retrait. Les principales causes qui peuvent favoriser ce désordre sont : le fluage du béton ; un excès de surcharges **;** des erreurs de conception ; des défauts de mise en œuvre ; altération des appuis et un vieillissement et cycles thermiques.

2.3.6.2 Manifestations

La déformation excessive est une pathologie qui se manifeste sous plusieurs formes, notamment :

- Par un affaissement visible des dalles ou des poutres à mi-travée ;
- Par des fissures longitudinales ou transversales dans les parties inférieures ;
- Par un décollement de revêtements ;
- Ou encore pour les portes ou les fenêtres qui ferment mal ;
- Par une sensation d'instabilité ou d'élasticité importante dans les planchers.

2.3.6.3 Conséquences

Les conséquences de cette pathologie peuvent inclure une altération de l'usage des locaux; un risque de rupture repoussée quand l'élément atteint ses limites de résistances mécaniques ; une fragilisation des fixations secondaires ;et même une perception négative de la sécurité sentie par les occupants.

2.3.6.4 Prévention et réparation

Pour parer à ces conséquences, certaines règles peuvent être observées : une bonne conception basée sur les normes en vigueur ; une vérification des flèches admissibles durant l'étape de dimensionnement ; l'usage d'un béton à haute performance, bien préparé et surtout correctement mis en œuvre ; un contrôle rigoureux de la mise en place des armatures (position, recouvrement, ancrage) ; et bien sur une surveillance des charges d'exploitation après construction. Pour les réparations elles peuvent variées d'un renforcement structurel par ajout de poutres, plats métalliques, ou résines structurales ; à une injection de résines dans les fissures ou zones altérées ; par la mise en place de tirants, haubans ou appuis supplémentaires ; ou encore le recalage ou réajustement des appuis si un tassement est en cause.

2.3.7 Retrait plastique

Le retrait plastique est en fait, une pathologie précoce du béton, qui survient quelques heures seulement après la mise en place de celui-ci avant même le durcissement. Il se

manifeste par l'apparition de microfissures en surface, peu profondes, mais pouvant compromettre la durabilité à long terme de la structure en cas de non maîtrisées.

2.3.7.1 Définition et mécanisme

On définit le retrait plastique comme la réduction de volume du béton frais à cause d'une perte d'eau par évaporation avant que le béton n'ait atteint une cohésion satisfaisante. La contraction engendre des microfissures dues aux tensions internes qui dépassent la faible résistance à la traction du béton à l'état plastique. Son mécanisme se déroule quand le béton frais renferme une grande quantité d'eau indispensable à l'hydratation du ciment et en excès pour assurer sa maniabilité. Aussi, lorsque le béton est exposé à des conditions climatiques défavorables favorisant l'évaporation rapide qui provoque une rétraction superficielle de l'eau qu'elle ne peut être remplacée par remontée capillaire. Tous ce processus peut être favoriser par température ambiante élevée ; par une faible humidité de l'air ; avec un vent soutenu ; une surface du béton non protégée ou mal humidifiée ; un rapport eau/ciment élevé ; ou une absence ou retard de cure.



Figure 2. 7: Déformation excessive – Affaissement visible d'une poutre ou dalle

2.3.7.2 Manifestations et conséquences

Le retrait plastique peut se manifester sous plusieurs aspects, on note : par des microfissures superficielles irrégulières ; sous forme de fissures parallèles dans le cas des dalles, qui deviennent perpendiculaires au plus fort gradient thermique ou sous au vent dominant ; sans fissure visible en profondeur, avec une apparition pendant les premières heures suivant le coulage. Les conséquences peuvent inclure : une augmentation de la perméabilité du béton en surface ; avec un risque de corrosion accrue des armatures si les fissures atteignent l'enrobage ; par une altération de l'esthétique des surfaces apparentes ; ou un affaiblissement de l'adhérence des futurs revêtements ou traitements de surface.

2.3.7.3 Prévention

On peut, par l'observation de certaines règles, éviter l'apparition du retrait plastique du béton : à travers une cure immédiate et efficace dès la fin de la mise en place ; ou par une réduction du rapport eau/ciment par le moyen de l' utilisation de superplastifiants pour conserver la maniabilité ; par la mise en œuvre chaque fois par temps favorable ou protection contre le vent et le soleil (tentes, écrans) ; par l'usage d'adjuvants anti-retrait plastique si obligatoire ; et par une planification rapide des opérations de lissage et de finition. On peut procéder aux réparations dans le cas où les fissures sont plus prononcées, par un ponçage léger et nettoyage, suivi d'un traitement de surface protecteur les cas légers, en cas où la surface doit recevoir un revêtement, ragréage ou mortier d'imprégnation pour restaurer la cohésion superficielle.

2.8 Réaction Alcali-Silice (RAS)

La réaction alcali-silice, souvent en abrégée RAS, est une pathologie chimique interne affectant les structures massives en béton renfermant des granulats réactifs. La RAS est un phénomène expansif, lent, mais potentiellement destructeur, pouvant entraîner même une dégradation sévère du béton à moyen ou à long terme.

2.3.8.1 Définition

La réaction alcali-silice est une réaction chimique entre les alcalis (Na^+, K^+) présents dans le ciment ; et certaines formes de silice réactive contenues dans les granulats. Lorsque cette réaction se produit en présence d'eau, elle produit un gel silico-alcalin avec la propriété d'absorber l'humidité et de gonfler. Le gonflement engendre des contraintes internes qui provoquent la fissuration progressive du béton. Cette réaction nécessite certaines conditions pour se produire : une présence d'alcalis en quantité suffisante ; des granulats contenant de la silice amorphe ou mal cristallisée ; une humidité suffisante : l'eau est indispensable au développement de la réaction et à l'expansion du gel. Ce phénomène est favorisé par l'usage de granulats non contrôlés ou non conformes ; ou par l'utilisation d'un ciment à forte teneur en alcalis (> 0,6 % Na_2O équivalent) ; avec un climat humide ou alternance pluie/sécheresse ; et enfin par l'adoption des épaisseurs importantes de béton ralentissant le séchage et favorisant l'humidité piégée.

2.3.8.2 Mécanisme de dégradation et manifestations

La réaction chimique produit un gel expansif à l'intérieur de la pâte de ciment qui absorbe l'humidité, ce qui augmente son volume. Cette expansion entraîne des contraintes internes qui dépassent la résistance à la traction du béton. Il en découle l'apparition de fissures en réseau qui sont très fines au départ, puis s'élargissant avec le temps. L'apparition de la RAS se fait à travers des fissures craquelures aléatoires en carte à la surface du béton ; par des fissures longitudinales le long des armatures ou dans les éléments massifs ; par une déformation ou soulèvement de dalles, notamment sur les chaussées ou les trottoirs ; par une exsudation de gel ou de matière visqueuse dans les fissures ; ou encore diminution progressive des propriétés mécaniques du béton. En conséquence, une fissuration progressive et généralisée du béton ; avec une perte d'étanchéité et augmentation de la porosité ; par une corrosion secondaire des armatures à cause de la pénétration d'eau par les fissures ; par une altération de la

portance et réduction de la durée de vie de l'ouvrage ; et éventuellement par des coûts de réparation élevés, souvent impossibles à réaliser sans démolition partielle.

2.3.8.3 Prévention et réparation

Certaines règles simples suffisent à parer ou, du moins diminuer, les effets indésirables de la RAS, notamment par un choix de granulats non réactifs certifiés par des essais de laboratoire (ASTM, NF P 18-454) ; par l'utilisation de ciments à faible teneur en alcalis ; pat un ajout de liants pouzzolaniques (fumée de silice, cendres volantes, laitier) pour neutraliser la réaction ; ou par le contrôle de l'humidité pendant la vie de l'ouvrage ; ou encore par le recours à des inhibiteurs chimiques spécifiques dans les cas à risque élevé. Pour la réparation qui est généralement limitée on peut procéder à des injections de résines dans les fissures (solution temporaire) ; ou par un renforcement par platines métalliques ou fibres de carbone dans les zones critiques ; ou par une surveillance continue de l'évolution des fissures ; et dans les cas graves par une démolition et reconstruction partielle ou totale.

2.3.9 RAS retardée (Réaction Alcali-Silice retardée)

La réaction alcali-silice retardée est une forme repoussée de la RAS classique décrite dans le paragraphe 2.8, qui peut se manifester plusieurs années après la mise en service de l'ouvrage. Elle est particulièrement dangereuse en raison de son caractère lent, dissimulé et progressif, souvent difficile à découvrir avant que les dégradations ne soient visibles en surface.

2.3.9.1Définition

La RAS retardée correspond à un mécanisme chimique similaire à la RAS classique. Cependant, cette réaction est ralentie, voire temporairement inhibée, par les conditions thermiques ou hydriques subies pendant le durcissement du béton, comme : par la température élevée de cure (supérieure à 65 °C), souvent rencontrée dans les bétons de structure massive (fondations, voiles, barrages, poteaux coulés en place) ; par la présence d'humidité faible ou limitée durant les premières années. Dans ces conditions, le gel silico-alcalin peut rester inhibée, sous forme inactive dans le béton, jusqu'à ce que les conditions soient favorables avec une humidité ce qui déclenchent alors la réactivation et l'expansion différée. Ce type de pathologie touche essentiellement les bétons massifs coulés sur chantier (fondations, murs de soutènement, barrages) ; par préfabrication en vapeur à haute température ; et les environnements humides ou sujets aux infiltrations après mise en service. Elle se manifeste notamment par des fissuration évolutive et non réversible du béton ; par une

perte de cohésion interne, réduisant la capacité portante ; par une augmentation de la perméabilité et risque de corrosion secondaire ; et des difficultés de diagnostic, car les symptômes peuvent ressembler à d'autres pathologies ; et par des coûts de réparation très élevés puisque les dommages étant souvent profonds et diffus.

2.3.9.2 Mécanisme spécifique et manifestations

Le mécanisme de formation de la RAS retardée se fait à travers plusieurs étapes : on note la formation initiale de produits de réaction non expansifs pendant la cure à chaud ; par la latence chimique de plusieurs années (5 à 20 ans) ; par la réhydratation progressive du béton par infiltration, humidité ambiante ou remontée capillaire ; par la réactivation de la réaction et gonflement du gel ; et enfin la fissuration interne croissante et détérioration visible avec une apparition tardive de fissures (souvent 5 à 10 ans après la mise en service) ; par une forme en réseau des fissures fines qui souvent confondues avec des retraits ou des fissures thermiques ; avec notamment de soulèvements ou déformations progressives ;par une délaminations internes (décollement des couches internes sans éclatement initial) ; et enfin une fragilisation globale de la structure, parfois sans signes extérieurs importants au début.

2.3.9.3 Prévention et réparation

Certaines règles simples suffisent à parer ou, du moins diminuer, les effets indésirables de la RAS différée, notamment : un contrôle rigoureux des granulats (essais de réactivité) ; une limitation de la température de cure (max. 65 °C) dans les ouvrages massifs ; par une utilisation de ciments à faible alcalinité ; par un ajout de liants complémentaires (fumée de silice, laitier, cendres volantes) ; et la maîtrise de l'humidité dans les premières années et au cours de la vie de l'ouvrage. La réparation est très difficile puisque la réaction est interne, profonde, avec un accès difficile et souvent étendu ; par une possibilité de renforcement localisé (fibres de carbone, platines métalliques) ; par mesure préventive d'une injection dans les fissures pour limiter la pénétration d'eau ; et par une surveillance continue par jauges ou capteurs ; ou par un remplacement partiel des éléments très atteints dans les cas extrêmes.

2.4 Autres types de pathologies

2.4.1 Pathologies biologiques

Les pathologies biologiques désignent l'ensemble des dégradations du béton causées ou aggravées par des organismes vivants : micro-organismes, végétation, champignons, algues, racines… Bien que le béton soit un matériau inorganique, il n'est pas à l'abri d'une colonisation biologique, surtout lorsqu'il est exposé à des environnements humides, sombres ou pollués.

2.4.1.1 Définition et types d'agents biologiques

Une pathologie biologique se caractérise par la croissance ou l'action d'êtres vivants sur ou dans la masse du béton, cette action entraine des modifications physiques, chimiques ou esthétiques. Ces organismes peuvent se développer sur les surfaces poreuses, dans les fissures ou à l'interface entre matériaux, et parfois même en profondeur. Les agent biologiques pouvant être impliqués sont : les algues et mousses se développant en surface dans les zones humides à l'abris ou peu exposées au soleil ; des champignons et moisissures avec une croissance favorisée par l'humidité et les températures modérées qui affectent les bétons intérieurs mal ventilés (parkings, sous-sols, tunnels) qui fragilisent les revêtements et dégager des mauvaises odeurs; les bactéries dont certaines espèces (Thiobacillus) oxydent le soufre et produisent de l'acide sulfurique, qui attaque chimiquement le béton dans les réseaux d'assainissement notamment; les racines végétales qui pénètrent dans les microfissures à la recherche d'humidité en grossissant, elles exercent une pression mécanique qui agrandit les fissures et décolle les revêtements; et **Lichens qui sont des o**rganismes symbiotiques (algues + champignons), très résistants, souvent observés sur les ouvrages anciens ou peu entretenus pouvant altérer la surface par action acide.

2.4.1.2 Conditions favorables à la pathologie et ses manifestations

Notamment par la présence d'une humidité permanente ou récurrente ; ou par un manque d'ensoleillement (zones ombragées) ; et dans une atmosphère chargée en nutriments tels que les eaux usées, la pollution, et les dépôts organiques ; l'existence d'une porosité élevée ou microfissures non traitées ; et par l'absence de protection ou de traitement de surface. Cette pathologie se manifeste à travers surface des taches vertes, noires ou rouges ; des mousses épaisses sur les dalles ou façades ; une détérioration progressive des enduits ou peintures ; avec un décollement de

revêtements ; et un effritement du béton en profondeur dans les cas avancés (milieux acides, canalisations). Comme conséquence, certaines dégradations apparaissent notamment : une altération esthétique importante des façades ou surfaces visibles ; une glissance dangereuse sur les sols extérieurs ; un affaiblissement de la cohésion en surface ; une érosion chimique lente dans les milieux biologiquement agressifs ; et une dégradation prématurée des protections et revêtements.

2.4.1.3 Prévention et traitement

On peut appliquer certains procédés pour éliminer ces conséquences notamment à travers un drainage efficace et réduction de l'humidité stagnante ; par un nettoyage régulier des surfaces extérieures ; par le moyen de traitements biocides adaptés au béton ; avec choix adéquat de revêtements hydrofuges ou anti-mousses ; et par une conception architecturale évitant les zones de stagnation d'eau. Les traitements se font à travers un nettoyage par haute pression ou brossage mécanique selon la nature de l'organisme biologique ; par une application de solutions biocides ou fongicides ; et une réfection des protections de surface (peintures, imperméabilisants) ; et enfin une réparation des fissures ou joints défectueux pour empêcher la ré-infestation.

2.4.2 Fissures thermiques

2.4.2.1 Définition et causes

Les fissures thermiques sont des fissures provoquées par les variations de température dans la masse du béton engendrant des dilatations ou des contractions différentielles. Ces mouvements internes, lorsqu'ils sont contrecarrés pouvant provoquer des tensions qui surpassent la résistance à la traction du béton, engendrant des grandes fissurations particulièrement dans les structures massives. Ce phénomène prend son origine quand ce dernier subit des variations dimensionnelles en fonction de la température. Lorsqu'une structure en béton est soumise à un gradient thermique, elle tend à se dilater ou se contracter de manière irrégulière. Si ces déformations sont empêchées par la rigidité de la structure ou de ses appuis, cela génère des contraintes internes qui peuvent avoir des valeurs supérieures à la résistance en traction du béton. Les situations où ce phénomène peut surgir sont : dans les structures massives telles que voiles, fondations, barrages ; pendant les phases d'hydratation où beaucoup de chaleur est dégagée provoquant une élévation locale de température ; suivit pendant un refroidissement ultérieur qui génère un retrait thermique différentiel et provoque des fissures internes. Une forte exposition diurne/nocturne des dalles ou les murs exposés au soleil chauffent avec des variations thermiques journalières importantes.

Notamment les incendies avec une montée brutale de température suivie d'un refroidissement qui provoque des fissures thermiques intenses et profondes. Particulièrement, les ouvrages se trouvant en altitude ou dans des régions désertiques et dans des zones à climat continental.

2.4.2.2 Manifestations de la pathologie et ses facteurs aggravants

Elle se manifeste de plusieurs manières dont, notamment : des fissures longitudinales ou transversales rectilignes et transversales dans les éléments très épais ; par des fissures localisées au niveau des ancrages, des appuis, et des zones de changement de section par éclatement superficiel, fissures multiples en toile d'araignée, voire rupture structurale locale dans les cas extrêmes : aussi l'absence de joints de dilatation ou leur espacement trop important ; avec une rigidité excessive de l'ouvrage ; le choix d'une mise en œuvre en période de forte chaleur ou de froid intense ; par l'absence de cure thermique dans les bétons massifs ; et enfin par l'utilisation de ciments à forte chaleur d'hydratation. Suite au développement ci-dessus, les conséquences directes sont : un affaiblissement mécanique du béton dans les zones fissurées ; avec un risque d'infiltration d'eau et d'agents agressifs à travers les fissures ; une corrosion secondaire des armatures si les fissures touchent l'enrobage ; une altération esthétique des parties d'ouvrages apparents (murs, façades) ; t avec un vieillissement prématuré de la structure.

2.4.2.3 Prévention et réparation

On peut suivre certaines règles pour éliminer ces conséquences néfastes de cette pathologie, notamment avec une utilisation de ciments à faible chaleur d'hydratation pour les ouvrages massifs ; un contrôle de localisation des de joints de dilatation ou de retrait ; en effectuant un calcul à la température prévisionnel dans les ouvrages importants par voie de logiciels de simulation ; aussi un refroidissement contrôlé des éléments massifs ; et éventuellement par une cure thermique appropriée des couvertures isolantes, un arrosage, et un contrôle de température.

Plusieurs agissements peuvent être utilisé pour une réparation : une injection de résines pour colmater les fissures actives ou passives ; une reprise locale des zones fissurées avec mortiers de réparation ; par la mise en œuvre de joints de retrait ou de fractionnement si ceux -ci sont initialement absents, ou même par une application de protections de surface contre l'humidité et le CO_2.

2.4.3 Délamination

2.4.3.1 Définition

On désigne par délamination une pathologie du béton qui se caractérise par la séparation ou le décollement de couches internes du matériau parallèles à la surface et par une perte d'adhérence entre couches successives ou entre le béton et les armatures, souvent sous l'effet de contraintes internes ou d'agressions extérieures. Elle survient spécialement dans les dalles, les murs ou les voiles, et peut compromettre à terme la cohésion et la résistance du béton, en particulier dans les zones voisines des armatures qui ne sont pas toujours visibles en surface dans un premier temps.



Figure 2. 8: Déformation et soulèvement de dalle causée par la RAS

2.4.3.2 Mécanismes de formation et manifestations

La délamination est une pathologie qui affecte le béton dont le mécanisme s'effectue comme suit : la corrosion des armatures génère des pressions internes suite à une expansion du métal oxydé qui mène à un décollement local du béton autour des armatures, habituellement parallèle à leur tracé. Aussi, le phénomène de gel/dégel à travers l'eau emprisonnée dans les pores gèle et occupe plus de volume, créant ainsi des pressions internes et provoque des fissures en couches internes. Un compactage

insuffisant au moment du coulage engendre des zones poreuses ou des interfaces faibles entre couches, favorisant la séparation ultérieure. Encore, une mauvaise reprise de bétonnage avec un temps trop long entre elles peut aussi favoriser un décollement. Les réactions expansives internes telles que la (RAS) ou la formation de produits différés (avec notamment une ettringite secondaire) peuvent aussi engendrant des pressions internes. On peut percevoir des sons creux à la percussion (marteau ou test au tapotement) ; on peut également voir des apparitions de fissures parallèles à la surface surtout au droit des armatures ; par un décollement de fragments de béton avec exposition des aciers ; et une détérioration progressive des zones affectées, pouvant s'étaler sous l'effet des cycles climatiques.

2.4.3.3 Conséquences et facteurs favorables

Les conséquences de telle pathologie peuvent entrainer une perte de résistance locale du béton ; une exposition des armatures à la corrosion, une fois la couche protectrice délaminée ; un risque de chute de matériaux, surtout en plafonds ou en zones verticales ; une compromission de l'adhérence de revêtements ou systèmes de protection. Absence de vibration ou vibration insuffisante lors du coulage. Ceci peut être accélérer par l'influence des facteurs tels que : un temps d'attente trop long entre deux couches de béton sans reprise de surface ; une présence d'eau excessive ou d'une laitance entre les couches ; ou encore l'utilisation de granulats mal calibrés ou sales, favorisant une mauvaise adhérence interne.

2.4.3.4 Prévention et réparations

On peut éviter, ou du moins minimiser, les effets de cette pathologie en prenant certaines précautions telles qu'une vibration correcte et homogène du béton à la mise en œuvre ; une préparation soignée des reprises de bétonnage par nettoyage, humidification, et mortier de reprise ; par une formulation d'un béton cohésif, bien dosé, sans ségrégation ; par l'usage de contrôles qualité sur chantier notamment des essais de compacité, vérification de la cure ; et une protection contre les cycles gel/dégel et les infiltrations d'eau. Quant aux réparations, on peut, notamment procéder à un dégagement des zones délaminées jusqu'à un substrat sain ; par un piquage et nettoyage de la surface interne ; à travers un traitement des armatures apparentes par passivation, sablage ; également par une reconstitution par mortier de réparation adapté par fibres, résines, haute adhérence ; ou encore par un contrôle post-intervention par percussion ou méthodes non destructives (thermographie, radar).

2.4.4 Écaillage (SCALING)

2.4.4.1 Définition et mécanisme

L'écaillage, ou en anglais **SCALING**, est une pathologie affectant principalement la surface du béton qui se caractérise par une perte progressive de matière sous forme de pellicules, de flocons ou d'écailles. Ce phénomène est spécialement commun dans les climats froids ou les environnements soumis à des cycles de gel/dégel, répétés qui peut être accéléré par l'utilisation de sels de déverglaçage. On désigne l'écaillage par le détachement superficiel du béton sous forme de couches fines, affectant principalement la zone d'enrobage. Cette détérioration est généralement graduelle et débute par un aspect rugueux ou farinant, mutant ensuite vers des décapages visibles et parfois profonds. Son mécanisme est essentiellement dû **:** au cycle gel/dégel ; à l'insuffisance de la résistance du béton avec une porosité est trop élevée qui mène à une décohésion des couches superficielles ; l'augmentation de volume sous pression des eaux dans les pores qui génère une pression interne. Il est a noté que ce processus se répète à chaque cycle thermique, provoquant des détachements progressifs ; par les effets des s**els de déverglaçage en forme de** chlorures de sodium, calcium ou magnésium qui accélèrent l'absorption d'eau dans le béton, augmentant ainsi la saturation et peuvent aussi favoriser des réactions chimiques perturbant l'équilibre des pores et favorisant l'écaillage ; et un béton à fort rapport eau/ciment, mal compacté ou mal curé, développe une laitance fragile en surface, très sensible à l'écaillage.

Elle se manifeste par des pellicules de béton se détachant facilement au grattage ; par surface rugueuse, farinante, blanchâtre ou poudrée ; par une apparition de petites écailles ensuite des trous irréguliers ; par une exposition des granulats dans les cas critiques ; et aussi par une altération progressive de l'aspect (zones ternes, grises, irrégulières).

2.4.4.2 Conséquences et facteurs favorisants

Les conséquences de cette pathologie sont multiples et diverses notamment une perte d'esthétique sur les ouvrages architecturaux ; une exposition progressive des armatures à moyen long et terme ; un accroissement de la perméabilité aux agents agressifs tels que l'eau, le CO_2, et les chlorures ; par une accélération du vieillissement du béton et diminution de la portance de certaines parties des ouvrages avec des risques de glissance. Ces conséquences peuvent êtres favorisés par la présence d'humidité permanente en surface ; par l'absence ou mauvaise réalisation de la cure ; par l'application de sels de déverglaçage dès les premiers hivers après la

construction ; par l'usage d'un béton inadapté à la classe d'exposition (XF1 à XF4 selon EC0 et EC1) ; et par surface non protégée dans les zones sensibles : escaliers extérieurs, trottoirs, balcons.

2.4.4.3 Prévention et réparations

On peut prévenir l'apparition de cette pathologie en observant les règles suivantes : par l'utilisation de bétons résistants au gel (classe XF Eurocode) ; par une réduction du rapport E/C et l'incorporation d'adjuvants hydrofuges ; par le moyen de cure soignée dès le coulage, avec la conservation de l'humidité ; par une protection des surfaces exposées pendant les premiers jours de durcissement ; et par le non emploie de sels de déverglaçage sur les bétons jeunes (moins de 28 jours) ; et enfin par l'application d'un traitement de surface (hydrofuge, silicate, imprégnation anti- gel).

On procède aux réparations par un nettoyage mécanique ou hydrodémolition des zones atteintes ; par un ponçage ou fraisage léger pour les cas de détérioration superficielle ; aussi par reprofilage avec mortiers de réparation résistants au gel et compatibles avec le support ; et enfin par un traitement de protection final par application d'un produit imperméabilisant ou de surface durcissant.

2.4.4 Dislocation interne :

2.4.4.1 Définition et mécanismes de formation

Bien que la dislocation interne du béton soit une pathologie moins visible que les fissures ou l'écaillage, elle peut sévèrement altérer les propriétés mécaniques et la durabilité d'un ouvrage. Elle résulte d'un manque d'homogénéité ou d'une mauvaise cohésion entre les composants internes du béton, souvent causés par des erreurs commises pendant de la mise en œuvre du béton. Elle désigne la rupture de la cohésion entre les granulats et la pâte de ciment, ou la mauvaise répartition des composants dans la masse du béton. Cela génère des zones faibles, parfois invisibles en surface, qui peuvent se manifester à long terme par des fissures, ou un affaiblissement structurel, ou voire une dégradation accélérée. Le mécanisme de cette pathologie peut être présenté comme suite : une ségrégation des composants qui se produit pendant le coulage ou le transport, ainsi une mauvaise homogénéité peut faire remonter l'eau et descendre les granulats lourds, créant des couches séparées mal reliées entre elles; ou un mauvais compactage avec une vibration insuffisante ou irrégulière qui laisse des vides internes ou des poches d'air, diminuant la densité et l'adhérence entre les matériaux; par un ajout d'eau en excès sur chantier ; par l'usage de granulats sales ou mal calibrés par la présence d'argile, de boue ou de particules

fines sur les granulats empêche une bonne adhérence avec le ciment; et enfin par la durée de malaxage trop court ou trop long avec un malaxage insuffisant empêchant la bonne dispersion du ciment, tandis qu'un malaxage prolongé favorise la séparation des constituants.

2.4.4.2 Manifestations, conséquences et facteurs favorisants

Quand on mesure les résistances mécaniques en compression ou en traction du béton, on trouve de faibles valeurs et même au cisaillement ; on trouve aussi un aspect hétérogène du béton à la coupe ou en carottage ; avec une présence de couches friables, de nids de gravier, ou de grains mal enrobés ; par un béton sonnant creux à la percussion, même sans fissure visible ; par apparition possible de fissures secondaires dues à la faible cohésion interne du béton; un affaiblissement local ou généralisé de l'élément concerné est observé ; avec un risque de rupture prématurée sous charge ; un accroissement des phénomènes de pénétration d'eau et de corrosion ;avec une impossibilité d'atteindre la classe d'exposition ou la durabilité requise. Certains facteurs peuvent favorisés l'apparition de cette pathologie, notamment par une absence de contrôle qualité sur chantier ; une main-d'œuvre non qualifiée pour la mise en œuvre ; aux conditions climatiques extrêmes au moment du coulage ; l'utilisation de matériels de malaxage ou de vibration inadaptés ; et avec un transport excessivement long du béton sans remélange.

2.4.4.3 Prévention et réparations

Certaines consignes sont à observées pour un bon béton notamment une formulation rigoureuse avec des essais préalables (granulométrie, adjuvants) ; par contrôle strict de l'eau de gâchage ; par l'usage d'un malaxage bien adapté, avec une vérification de l'homogénéité ; par un compactage efficace et uniforme, adapté à la configuration du coffrage ; par une inspection visuelle et essais de consistance sur site ; par une formation des opérateurs sur les bonnes pratiques de mise en œuvre. Les réparations peuvent s'étendre par la réalisation de sondages ou carottages exploratoires pour évaluer l'ampleur du défaut observé ; par un renforcement structurel localisé en utilisant des ajouts de matériaux composites ou en acier ; par l'injection de résines époxydes dans les zones fissurées mais encore cohérentes ; quelque fois par la démolition partielle si la zone est trop dégradée ou inaccessible ; et enfin un contrôle rigoureux post-réparation, par essais non destructifs tels que ultrasons, radar, etc..

2.4.5 Tâches ou colorations anormales

2.4.5.1 Définition

Les tâches ou colorations anormales sont des signes superficiels qui peuvent aviser sur les désordres internes, une réaction chimique, ou des problèmes d'humidité. Malgré le fait qu'elles soient considérées comme des défauts esthétiques, elles peuvent dans certains cas révéler sur des pathologies plus profondes du béton. Cette pathologie se manifeste par l'apparition de zones de couleurs différentes : brunâtres, rouille, blanches, noires, verdâtres, etc., à la surface du béton. Ces altérations peuvent être dispersées ou localisées, temporaires ou permanentes, et résultent de processus physico-chimiques ou biologiques. Leurs origines sont diverses, elles peuvent être dues à une migration d'humidité ; à une présence de fer dans les granulats ou les armatures ; à des réactions chimiques internes telles que des réactions de carbonatation, RAS, ou contamination par des agents chimiques externes comme les polluants, agents de démoulage incompatibles ; à des Attaques biologiques telles que les mousses, les algues, les champignons et les bactéries qui forment des taches vertes, noires ou rouges sur les zones humides et peu exposées à la lumière ; une contamination de surface ; et enfin par cure non uniforme ou différentielle qui défaut de cure peut entraîner des zones plus claires ou plus foncées, révélant une hydratation inégale du ciment.

2.4.5.3 Manifestations et conséquence

Avec notamment des taches de rouille circulaires ou linéaires ; par des auréoles blanchâtres dues à l'efflorescence ou à la carbonatation ; des colorations vertes ou noires liées à la colonisation biologique ; des différences de teinte sur grandes surfaces (façades, dalles) indiquant des problèmes d'homogénéité ou de cure. Les conséquences peuvent êtres une altération esthétique importante, surtout sur les ouvrages visibles ou décoratifs ; et peut aussi être un indicateur d'une pathologie plus grave : corrosion, infiltration, ou réaction chimique ; par une perte de confiance des usagers ou des clients dans la qualité de l'ouvrage ; et un affaiblissement local si le phénomène est lié à une réaction expansive ou à une perte de cohésion. Les facteurs qui peuvent favoriser ce type de pathologie sont divers. Notamment, un environnement humide ou salin ; une mauvaise qualité des matériaux ou de l'eau de gâchage ; une absence de protection de surface ou de traitement adapté ; un mauvais entretien ou absence de nettoyage régulier ; ou encore du à un coffrage mal préparé ou réutilisé sans nettoyage.

2.4.5.3 Prévention et traitement

On peut utiliser des granulats et d'eau de qualité contrôlée ; procéder à un contrôle de la cure, du compactage et de la formulation ; par le moyen d'un nettoyage rigoureux des coffrages et des outils ; par une application de traitements de surface (imperméabilisants, hydrofuges) sur les bétons apparents ; et par éviter les adjuvants ou agents de décoffrage incompatibles avec les finitions souhaitées.

Le traitement : consiste à un nettoyage des surfaces selon la nature de la tâche avec de l'eau, un brossage, un produit dégraissant, acide dilué ; par la suppression des micro-organismes par biocide ou fongicide si colonisation biologique ; par un ponçage ou sablage léger dans les cas d'altération profonde ou tenace ; par une réparation ponctuelle des zones atteintes dans le cas où la tâche masque une corrosion ou une fissuration interne ; et enfin par une protection post-traitement par un revêtement adapté pour éviter la récidive.

2.5 Défaillance structurale

2.5.1 Définition et origines

La défaillance structurale est une pathologie parmi les plus critiques du béton, puisqu'elle compromet directement, contrairement aux pathologies superficielles ou esthétiques, la sécurité des usagers, la stabilité de l'ouvrage et nécessite des interventions d'urgence. Elle représente une perte partielle ou totale de la capacité portante d'un élément ou de l'ensemble de la structure. Ce phénomène est souvent la conséquence d'une accumulation de dégradations non traitées ou d'une erreur majeure de conception, d'exécution ou d'usage. La défaillance structurale désigne un état dans lequel les sollicitations dépassent la résistance prévue du béton armé, menant à des déformations excessives, des fissures profondes, ou même à l'effondrement partiel ou total de l'élément concerné. Son origine peut être dans l'accumulation de pathologies non réparées comme une corrosion avancée des armatures, des fissures ouvertes, une carbonatation profonde ou spalling prolongé pouvant conduire à une perte significative de résistance. Par des erreurs de conception avec un sous-dimensionnement des éléments porteurs, mauvaise estimation des actions variables, oubli de renforts, ou encore par un mauvais choix de matériaux. Par des défauts de mise en œuvre comme un enrobage insuffisant ou un mauvais positionnement des armatures, ou par un béton mal compacté ou mal formulé. Par des surcharges accidentelles non prévues incluant des installations d'équipements lourds,

surpopulation, surépaisseurs dans les dalles, ou charges ponctuelles mal réparties. Par des incidents externes qui peuvent arriver tels que les chocs, les explosions, les incendies, les séismes ou les mouvements de sol. Et enfin, par le vieillissement et absence d'entretien.

2.5.2 Manifestations, conséquences et facteurs favorables

Une défaillance structurale peut se manifester de plusieurs manières. Soit par de grandes fissures ouvertes > 0,5 mm ou évolutives et traversantes ; elle peut aussi conduire à un affaissement visible des éléments porteurs : poutres, planchers ; ou encore par un bruit inhabituel sous forme de craquements sous charge ; avec des déformations anormales au niveau des appuis, poteaux ou dalles ; à travers une exposition généralisée des armatures qui sont parfois déjà corrodées ; ou par un effondrement partiel, chute de morceaux de béton. Tous ces désordres peuvent mener à une perte de stabilité locale ou globale de la structure ; avec un risque élevé pour les occupants ou les usagers ; on procède quelque fois à une fermeture provisoire ou même définitive de l'ouvrage concerné si nécessaire; les coûts de réparation sont très élevés, dépassant parfois ceux de la reconstruction ; ainsi la responsabilité civile ou pénale du maître d'ouvrage ou de l'entreprise est engagée. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à une telle situation : par un manque d'inspections régulières et de maintenance préventive ; ou par une sous-estimation de la gravité des pathologies observées et non observées au fil du temps ; par des climats extrêmes ou environnement marin, sous l'action de sollicitations dynamiques ; ou encore une modification d'usage sans étude structurelle préalable.

2.5.3 Prévention et réparation (si possible) :

Les moyens de préventions pour que telle pathologie ne se produit pas sont : par une étude de conception et de dimensionnement conforme aux normes en vigueur (EC2 par exemple) ; par des contrôles rigoureux en phase d'exécution du ferraillage, du bétonnage, et de la cure ; à travers, notamment, d'une surveillance périodique des structures, avec sanctionnée par des rapports et un suivi ; par une limitation des surcharges et un suivi des transformations de l'usage du bâtiment ; par des réparation immédiate des désordres détectés pour éviter une dégradation cumulative.

Pour une éventuelle réparation qui reste toujours couteuse, on procède un constat des états des lieux structurel approfondi : un diagnostic, une auscultation, ou essais non destructifs) ; par un renforcement local ou global : ajout de platines métalliques, fibres de carbone, précontrainte additionnelle ; soit par un remplacement, dans la mesure du

possible des éléments gravement atteints (poutres, planchers) ; ou encore par la pose d'étais ou d'appuis provisoires, si la stabilité est menacée ; et enfin par une surveillance continue post-intervention, avec capteurs et instrumentation.

2.6 Porosité excessive

2.6.1 Définition et origine

La porosité désigne le volume de vides présent dans le béton par rapport au volume total. Une porosité excessive signifie que la proportion de ces vides dépasse les seuils admissibles pour garantir les performances structurelles et environnementales de l'ouvrage. Ces pores peuvent être ouverts (connectés à la surface) ou fermés (internes).

La porosité excessive est une pathologie répandue dans le béton, qui se manifeste à travers une présence anormalement élevée de pores, capillaires ou micro- cavités dans la masse du matériau béton. Elle peut affecter directement les performances mécaniques, la durabilité, l'étanchéité et la résistance aux agents agressifs du béton. Bien que parfois invisible à l'œil nu, ses effets sont souvent détectés par les symptômes qu'elle provoque : efflorescences, infiltrations, faibles résistances, etc. Elle prend naissance dans le cas où le un rapport E/C est trop élevé qui laisse des pores capillaires après évaporation, ou par compactage insuffisant si la vibration est mal réalisée ou incomplète, dans le cas d'absence ou insuffisance de cure qui augmente la porosité résiduelle ; une granulométrie mal équilibrée peut aussi favoriser l'apparition u phénomène ; à travers une mise en œuvre par temps chaud, sec ou venteux ; et enfin l'utilisation de matériaux inadaptés ou pollués.

2.6.2 Manifestations et conséquences

Parmi les facteurs pouvant aggraver l'apparition de la porosité excessive, on note une méconnaissance des exigences de durabilité lors de la conception ; par l'absence d'essais préalables (slump, compactage, résistance) ; ou par manque de coordination entre formulation, livraison et mise en place. Cette pathologie se manifeste à travers plusieurs aspects, notamment l'aspect granuleux ou farineux en surface du béton ; la présence d'efflorescences blanches, qui indiquent la migration de l'eau à travers les pores ; ou par une apparition rapide d'infiltrations ou de zones humides ; par une faible résistance à la compression mesurée par essais au laboratoire ; avec des sons creux à la percussion indiquant une faible densité interne ; ou encore à travers une altération des couches de revêtement par manque d'adhérence.

Ceci conduit généralement à une augmentation de la perméabilité aux gaz (CO_2) et liquides (eau, chlorures, sulfates) ; il peut aussi favoriser la carbonatation et la corrosion des armatures ; une réduction de la résistance mécanique (jusqu'à 20–30 % selon le niveau de porosité) ; une durabilité fortement diminuée, notamment en milieu agressif (bord de mer, tunnels, stations d'épuration) ; et un risque d'écaillage, de fissuration et de dislocation interne.

2.6.3 Prévention et réparations

Certaines règles sont à observées pour éviter une porosité excessive : On évite de produire le béton sur chantier sans contrôle qualité ; par une formulation optimisée du béton avec un rapport E/C ≤ 0,5 ; par l'utilisation de superplastifiants pour maintenir la fluidité sans excès d'eau ; à travers un compactage rigoureux, surtout dans les zones d'enrobage et les coffrages complexes ; par une cure efficace et continue pendant les 7 premiers jours suivant la mise en œuvre ; par un choix de matériaux propres, certifiés et bien calibrés ; et par un contrôle qualité sur site, avec suivi des essais de consistance et de résistance. On peut préconiser certaines techniques de réparation : une application pour limiter les échanges hydriques un traitements de surface : imprégnations hydrophobes, silicates de lithium; ou par une injection de résines ou de coulis dans les zones poreuses profondes ; par reprofilage par mortiers denses ou auto- nivelant pour les zones superficielles ; par un remplacement partiel dans les cas extrêmes où la porosité compromet la sécurité ; et enfin par une surveillance à long terme, surtout si la structure est soumise à des agents agressifs.

CHAPITRE 3 : METHODES ET TECHNIQUES DE REHABILITATION.

3.1 Réparation des fissures :

Elle consiste à traiter les ouvertures des fissures dont leurs tailles ne dépassent pas les recommandations exigées par les différentes normes en vigueur.

3.1.1 Étapes de mise en œuvre :

- Identification et classification des fissures : fissures actives (évolutives) et fissures passives (stabilisées).
- Nettoyage des zones de fissuration : élimination des poussières et /ou autres impuretés par aspiration ou soufflage.
- Préparation à l'injection : fermeture temporaire des extrémités avec une résine étanche et installation des instruments d'injection.
- Injection de la résine : utilisation d'une pompe à pression pour injecter la résine (époxy ou polyuréthane ...) jusqu'au remplissage et saturation complète.
- Durcissement et finition : laisser durcir la résine, retirer les ports puis réaliser une finition esthétique si nécessaire.

3.1.2 Matériaux et moyens :

- Résines époxy : adaptées aux fissures fines et passives, très résistantes mécaniquement.
- Résines polyuréthane : flexibles, elles conviennent aux fissures humides ou légèrement mouvantes.
- Appareils d'injection : pompes manuelles ou électriques, seringues, buses d'injection.

3.1.3 Applications pratiques :

- Réparation des éléments en béton fissurés comme les poutres, dalles, murs ou poteaux.
- Étanchéité de bassins, piscines, tunnels, réservoirs.
- Restauration d'ouvrages en béton, anciens ou modernes.

3.1.4 Résultats :

- Réparation précise, discrète et efficace.
- Restaure l'intégrité sans changer la forme de l'élément.
- Stoppe les infiltrations d'eau de manière définitive.

3.1.5 Difficultés :

- Inefficace sur les fissures actives non traitées.
- Préparation du support essentielle.
- Résines sensibles à l'humidité et à la température pendant l'application.



Figure 3. 1: Réparation des fissures

3.2 . Ajout de manteaux en béton armé (Jacketing)

3-2-1 Étapes de mise en œuvre :

- Évaluation structurelle : détermination de la nécessité de renforcer en compression, flexion ou cisaillement.
- Préparation du béton existant : élimination des parties altérées, décapage et nettoyage approfondi pour garantir l'adhérence.
- Mise en place des armatures supplémentaires : barres longitudinales et étriers fixés mécaniquement à l'élément existant.
- Coffrage du manteau : mise en place d'un coffrage autour de l'élément (bois ou métal).
- Coulage du béton ou injection d'un coulis autoplaçant : remplissage de l'espace entre le coffrage et la structure existante.
- Vibration ou auto-compactage : pour éviter les poches d'air et garantir la compacité.
- Cure : maintien de l'humidité pendant plusieurs jours pour assurer un durcissement optimal.

3-2-2 Matériaux et moyens:

- Béton à haute performance ou autoplaçant.
- Acier de renforcement : barres HA ancrées mécaniquement ou par scellement chimique.
- Coffrages étanches, produits de décoffrage, équipements de vibration si besoin.

3.2.3 Applications pratiques:

- Renforcement de poteaux, murs ou voiles sursollicités ou fissurés.
- Augmentation de la section résistante d'un élément porteur.
- Réparation après sinistre (séisme, choc).

3-2-4 Avantages / limites :

Avantages :

- Amélioration significative de la capacité portante.
- Méthode éprouvée et largement utilisée.
- Bonne compatibilité entre l'ancien et le nouveau béton avec une préparation correcte.

Limites :

- Alourdit la structure.
- Réduction de l'espace autour de l'élément renforcé.
- Durée des travaux importante (temps de coffrage et durcissement).
- Nécessite parfois des ancrages complexes.

3-2-5 Entretien après intervention :

- Vérification des fissures sur le manteau ajouté.
- Suivi des zones d'interface entre ancien et nouveau béton.
- Contrôle visuel régulier ou par scléromètre selon les sollicitations futures.

3.3 Béton projeté :

3.3.1 Étapes de mise en œuvre :

- Préparation du support : élimination du béton détérioré, nettoyage par brossage ou hydrodémolition pour assurer une bonne adhérence.
- Installation des armatures supplémentaires (si besoin) : mise en place de treillis soudés ou d'armatures fixées mécaniquement.
- Humidification de la surface : pour éviter l'absorption excessive d'eau par le béton projeté.
- Projection du béton : application par voie sèche ou voie humide .
- Compactage simultané : la projection sous pression compacte efficacement le matériau.
- Finition : lissage ou talochage selon l'usage.
- Cure : protection contre la dessiccation avec bâchage humide, produit de cure ou film protecteur.

3.3.2 Matériaux et moyens :

- Béton ou mortier à granulométrie fine.
- Adjuvants accélérateurs (voie humide).
- Armatures métalliques si nécessaire.

- Matériel de projection : compresseur, buses, machine à gunite.

3.3.3 Applications pratiques :

- Réhabilitation de tunnels, voûtes, piscines, murs de soutènement.
- Réparation de structures gravement endommagées.
- Ajout d'une couche protectrice ou de confinement.

3.3.4 Résultats :

- Application rapide, même sur surfaces irrégulièress ou complexes.
- Excellente adhérence et densité.
- Intervention possible en grande épaisseur.
- Accès facilité dans les zones restreintes.

3.3.5 Difficultés :

- Perte de matériau par rebond.
- Requiert une main-d'œuvre expérimentée.
- Risque de poches d'air en cas de mauvaise mise en œuvre.



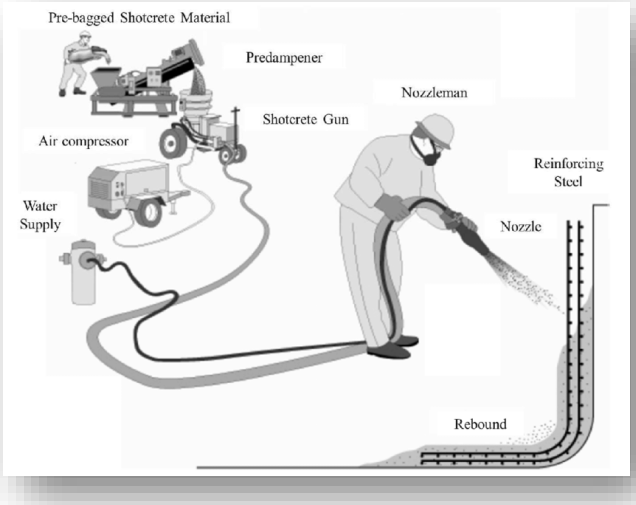


Figure 3. 2: Béton projeté

3.4 Renforcement par placage en fibre de carbone (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer)

3.4.1 Étapes de mise en œuvre :

- Analyse préalable de la structure : évaluation des dégradation et estimation des contraintes ainsi que la détermination des taux de renforcement nécessaire.
- Préparation du support : ponçage ou sablage des surfaces afin de les rendre rugueuses, propres et sèches.
- Réparations nécessaires : traitement en profondeur des fissures ou défauts de réalisation tels que nids de gravier avant l'application.
- Application de la résine d'accrochage : colle recommandée appliquée au rouleau sur les supports.
- Pose des bandes ou plaques CFRP : mise en place manuelle ou à l'aide d'un rouleau, en évacuant les bulles d'air.
- Durcissement : laisser l'ensemble, colle et plaque à l'air libre ou conditionnée (environ 1 à 3 jours).
- Contrôle de qualité : vérification visuelle et test éventuel d'adhérence.

3.4.2 Matériaux et moyens :

- Bandes ou plaques de fibre de carbone préfabriquées (CFRP).
- Résines époxy haute performance.
- Outils de mise en œuvre : rouleaux, spatules, systèmes de pression pour collage.

3.4.3 Applications pratiques :

- Renforcement de poutres, dalles et murs sollicités en flexion ou en cisaillement.
- Structures devant supporter des charges accrues (changement d'usage ou exigences sismiques).
- Ouvrages industriels, parkings, ponts ou bâtiments patrimoniaux.

3.4.4 Résultats :

- Grande résistance mécanique pour un poids réduit.
- Ne modifie pas les dimensions de la structure vu l'épaisseur très réduite.
- Mise en œuvre rapide facile et sans changement visible.
- Insensible à la corrosion, résistant aux environnements agressifs.

3.4.5 Difficultés :

- Matériau coûteux.
- Support doit être parfaitement préparé.
- Sensible à l'humidité lors de la pose.
- Non résistant au feu sans traitement spécifique.

3.5 Ajout de renfort en béton armé :

3.5.1 Étapes de mise en œuvre :

- Évaluation structurelle : détermination de la nécessité de renforcer en compression, flexion ou cisaillement.
- Préparation du béton existant : décapage et nettoyage approfondi pour garantir l'adhérence.
- Ajout et mise en place des armatures supplémentaires : barres longitudinales et étriers ou treillis à souder pour les fixer à l'élément existant.
- Coffrage du manteau : mise en place d'un coffrage autour de l'élément (bois ou métal).
- Coulage ou injection d'un béton autoplaçant : remplissage de l'espace entre le coffrage et la structure existante y compris le renfort.
- Vibration ou auto-compactage : pour éliminer les poches d'air et assurer la compacité.
- Cure : par arrosage pendant plusieurs jours pour assurer un durcissement optimal.

3.5.2 Matériaux et moyens :

- Béton à haute performance ou autoplaçant.
- Acier de renforcement : barres HA ancrées mécaniquement ou par scellement.
- Coffrages étanches, produits de décoffrage, équipements de vibration.

3.5.3 Applications pratiques :

- Renforcement de poteaux, murs ou voiles sursollicités ou fissurés.
- Augmentation de la section résistante d'un élément porteur.
- Réparation après sinistre (séisme, choc).

3.5.4 Résultats :

- Amélioration significative de la capacité portante.
- Méthode éprouvée et largement utilisée.
- Bonne compatibilité entre l'ancien et le nouveau béton avec une préparation correcte.

3.5.5 Difficultés :

- Alourdit la structure.
- Réduction de l'espace autour de l'élément renforcé.
- Durée des travaux importante (temps de coffrage et durcissement).
- Nécessite parfois des ancrages complexes.

3.6 Renforcement par profilés métalliques externes :

3.6.1 Étapes de mise en œuvre :

- Étude structurelle : identification des zones critiques ou sous-dimensionnées.

- Préparation du support : élimination des éléments détériorés, nettoyage des surfaces concernées, vérification de l'état des aciers existants.
- Découpe et ajustement des profilés : mise à dimension des pièces métalliques selon les conditions et les dimensions géométriques.
- Mise en place des profilés : fixation sur la structure par ancrage mécanique, soudure, boulonnage ou collage.
- Alignement et serrage : pour assurer une bonne adhérence et une transmission des efforts.
- Traitement des zones : peinture anticorrosion ou galvanisation des éléments métalliques.
- Finition si nécessaire : habillage esthétique ou protection complémentaire contre les chocs ou le feu.

3.6.2 Matériaux et moyens :

- Profilés métalliques : cornières, plats, IPN en acier galvanisé ou peint.
- Fixations : boulons, chevilles métalliques, ancrages chimiques.
- Produits de collage ou de soudure selon le mode d'assemblage.
- Revêtements anticorrosion : peintures à base de zinc, époxy ou polyuréthane.

3.6.3 Applications pratiques :

- Renforcement de poutres, poteaux ou linteaux trop sollicités.
- Correction de flèches ou de déformations.
- Interventions d'urgence sur des éléments fissurés.
- Réhabilitation de bâtiments anciens sans possibilité d'ajout de béton.

3.6.4 Résultats :

- Mise en œuvre rapide et relativement simple.
- Pas besoin de démolitions importantes.
- Intervention réalisable sans interruption de l'usage du bâtiment.
- Éléments démontables ou remplaçables si nécessaire.

3.6.5 Difficultés :

- Risque de corrosion si la protection est insuffisante.
- Aspect visuel brut sans finition.
- Ne confine pas la section existante comme le béton ou les fibres.
- Moins efficace en zone sismique sans étude approfondie.

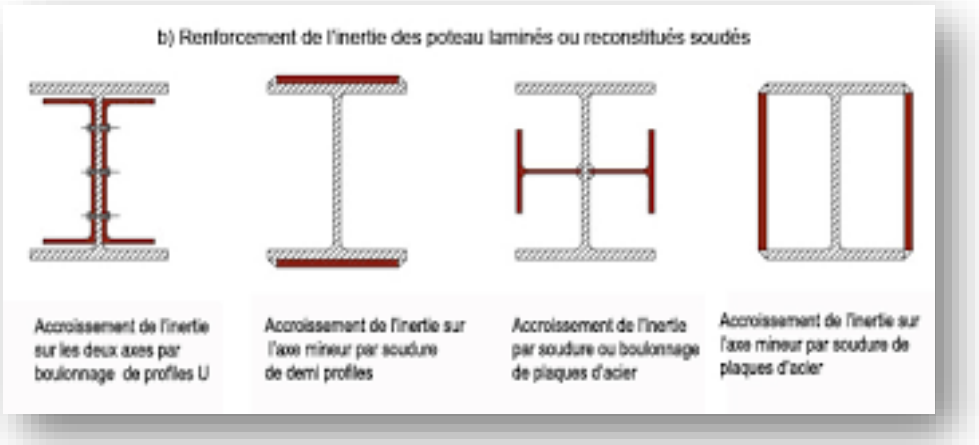




Figure 3. 3: Renforcement par profilés métalliques externes

3.7 précontrainte externe :

3.7.1 Étapes de mise en œuvre :

- Analyse structurelle approfondie : calcul des efforts nécessaires de précontrainte.
- Mise en place des ancrages : installation de plaques ou dispositifs d'ancrage aux extrémités de la zone concernée.
- Pose des câbles ou torons : positionnement à l'extérieur de la structure, généralement gainés pour la protection.
- Tension contrôlée : application de la force de précontrainte via des vérins hydrauliques selon des valeurs définies.
- Blocage définitif : verrouillage des câbles une fois la tension atteinte.
- Protection des torons : injection de coulis ou enrobage pour éviter la corrosion.

- Finition : habillage ou protection mécanique et esthétique si nécessaire.

3.7.2 Matériaux et moyens :

- Câbles ou torons en acier à haute résistance.
- Ancrages métalliques : plaques, systèmes de fixation.
- Gaines de protection en PEHD ou métalliques.
- Coulis cimentaires ou produits de scellement (graisse, cire).
- Vérins hydrauliques pour la mise en tension.

3.7.3 Applications pratiques :

- Renforcement de ponts, poutres, dalles de grandes portées.
- Correction des flèches excessives ou des fissures sous traction.
- Restauration de structures anciennes soumises à des surcharges.
- Amélioration de la réponse sismique ou dynamique.

3.7.4 Résultats :

- Permet de restaurer ou d'augmenter la capacité portante.
- Ajustable et retendable dans certains cas.
- Peu d'ajout de poids sur la structure.
- Efficace pour les portées importantes ou structures fragilisées.

3.7.5 Difficultés :

- Coût élevé et technologie spécialisée requise.
- Mise en œuvre délicate nécessitant du personnel qualifié.
- Demande un espace libre suffisant autour de la structure.
- Entretien nécessaire des torons en milieu agressif.

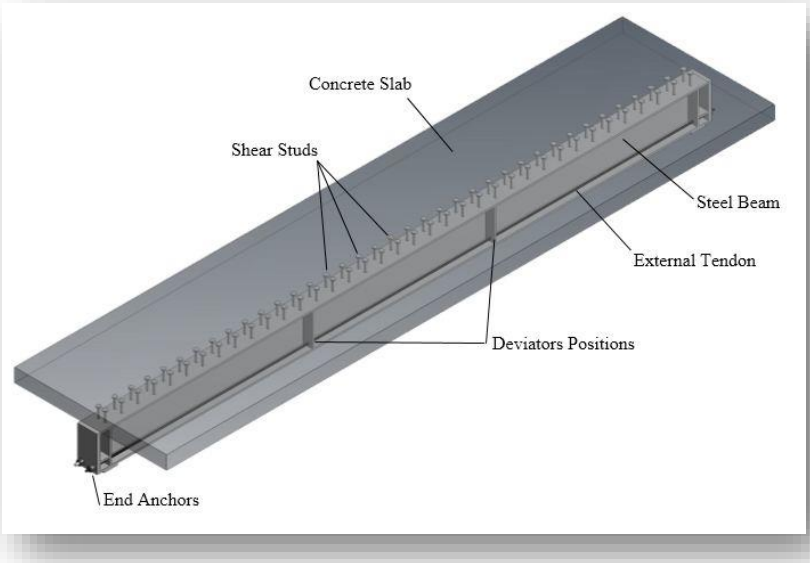


Figure 3. 4: précontrainte externe

3.8 Protection cathodique :

3.8.1 Étapes de mise en œuvre :

- Analyse de la corrosion : mesure des potentiels électrochimiques pour confirmer l'activité des armatures.
- Choix du système : soit par courant imposé (actif), soit galvanique (passif via anodes sacrificielles).
- Préparation du support : nettoyage soigné et réparation des zones endommagées.
- Pose des anodes : fixées à la surface ou insérées dans des trous forés dans le béton.
- Connexions électriques : liaison entre les anodes et les aciers à protéger.
- Mise en fonctionnement et réglage : ajustement du courant pour garantir une polarisation suffisante.
- Suivi : surveillance continue ou périodique pour assurer l'efficacité du système.

3.8.2 Matériaux et moyens :

- Anodes : en titane, zinc, magnésium ou alliages spécifiques.
- Générateurs de courant continu (pour le système actif).
- Boîtiers de régulation, câblage et appareils d'enregistrement.
- Produits de scellement et matériaux de réparation partielle.

3.8.3 Applications pratiques :

- Ouvrages sujets à la corrosion : ponts, parkings, ouvrages maritimes.
- Préservation à long terme des armatures sans intervention lourde.
- Structures soumises aux sels, eaux marines ou atmosphères industrielles.

3.8.4 Résultats :

- Stoppe activement le phénomène de corrosion.
- Prolonge la durée de vie de la structure.
- Méthode non intrusive pour les armatures.

3.8.5 Difficultés :

- Investissement initial important.
- Exige un suivi technique constant.
- Moins pertinent pour des zones localisées.
- 3.8.6 Résultats dépendants de la qualité du contrôle.

3.9 Application d'inhibiteurs de corrosion

3.9.1 Étapes de mise en œuvre :

- Évaluation de la corrosion : repérage des zones atteintes par la carbonatation ou les chlorures.
- Sélection de l'inhibiteur :

  - Inhibiteurs migrateurs : pénètrent le béton jusqu'aux aciers.
  - Inhibiteurs de contact : appliqués après ouverture du béton, directement sur les armatures.
- Préparation de la surface : nettoyage du béton et suppression des revêtements existants si nécessaires.
- Application du produit : par brosse, pulvérisation ou injection selon le type choisi.
- Temps d'imprégnation : durée variable selon l'épaisseur du béton.
- Protection finale : recouvrement éventuel par un revêtement d'étanchéité ou protecteur.

3.9.2 Matériaux et moyens :

- Inhibiteurs organiques (amines, aminoalcools) ou inorganiques (nitrites, phosphates).
- Solvants ou bases aqueuses.
- Matériel de pulvérisation ou d'injection à basse pression.

3.9.3 Applications pratiques :

- Prévention ou ralentissement de la corrosion dans des zones à risques.
- Entretien préventif pour ouvrages exposés (ponts, tunnels, quais).
- Complément à d'autres méthodes (reprofilage, injection, revêtement).

3.9.4 Résultats :

- Facilité d'application sans travaux lourds.
- Pénètre en profondeur et agit durablement.
- Préserve l'apparence du béton.
- Compatible avec d'autres interventions.

3.9.5 Difficultés :

- Efficacité dépendante de la porosité du béton.
- Action lente, nécessite du temps pour atteindre les armatures.
- Moins adapté en cas de corrosion avancée.
- Peut nécessiter plusieurs applications.

3.10 Étanchéité de surface :

3.10.1 Étapes de mise en œuvre :

- Diagnostic initial : identification des zones favorisant l'infiltration (dalles, balcons, toitures, murs enterrés).
- Préparation du support : traitement approfondi, élimination des poussières, matières et couches non adhérentes.
- Réparation locale : traitement des fissures, nids de gravier et joints dégradés avant l'intervention.
- Choix du produit d'étanchéité : membranes liquides, revêtements hydrophobes ou systèmes multicouches, colle d'étanchéité.

- Application du produit : en un nombre de couches selon l'état de dégradation, au rouleau, pinceau, taloche ou pulvérisateur.
- Temps de séchage : respecter le délai de durcissement recommandé avant toute mise en service.
- Vérification : contrôle de l'uniformité, de l'adhérence.

3.10.2 Matériaux et moyens :

- Membranes liquides à base de polyuréthane, bitume modifié ou résines acryliques.
- Produits hydrofuges (siloxanes, silanes).
- Feuilles d'étanchéité (PVC, EPDM).
- Primaires d'adhérence adaptés.
- Outils : rouleaux, taloches, pulvérisateurs.

3.10.3 Applications pratiques :

- Étanchéité de dalles horizontales (toits, terrasses, balcons).
- Protection des murs enterrés et ouvrages hydrauliques.
- Barrière contre l'infiltration d'eau, de CO_2 ou de sels.
- Complément à des méthodes de réparation (injection, reprofilage).

3.10.4 Résultats :

- Facile et rapide à appliquer.
- Renforce la durabilité du béton.
- Excellente protection contre les infiltrations et agents agressifs.
- Adaptable selon les conditions d'exposition (UV, abrasion).

3.10.5 Difficultés :

- Ne répare pas les désordres internes.
- Dépend fortement des conditions climatiques lors de la pose.
- Dégradation possible sans finition complémentaire.
- Durée de vie limitée sans entretien.

3.11 Traitement anti-carbonatation :

3.11.1 Étapes de mise en œuvre :

- Estimation de la carbonatation : mesure de la profondeur de carbonatation en utilisant des techniques et des produits spécifiques.
- Nettoyage du support : brossage, lavage à pression ou sablage léger, élimination des volumes dégradés.
- Réparations préalables : traitement des armatures apparentes et reprofilage si nécessaire.
- Application d'une couche d'accrochage : pour favoriser l'adhérence du revêtement.
- Mise en œuvre du revêtement anti-carbonatation : généralement deux couches croisées par brosse, rouleau ou pulvérisation.

- Contrôle de l'uniformité : vérification de l'épaisseur minimale requise pour assurer la barrière au CO_2.
- Séchage et durcissement : respect des délais avant exposition aux intempéries.

3.11.2 Matériaux et moyens :

- Revêtements anti-carbonatation : à base d'acrylique, polyuréthane ou siloxane.
- Primaires compatibles avec le béton.
- Matériel d'application : pinceaux, rouleaux, pulvérisateurs.
- Additifs anti-UV pour les surfaces exposées.

3.11.3 Applications pratiques :

- Façades, dalles, balcons et éléments en béton exposés.
- Structures urbaines, côtières ou industrielles.
- Application obligatoire après réparation de béton carbonaté.

3.11.4 Résultats :

- Bloque efficacement la pénétration du CO_2.
- Prolonge la durée de vie du béton.
- Résistance aux intempéries, UV et vieillissement.
- Aspect esthétique personnalisable (revêtement teinté).

3.11.5 Difficultés :

- Ne traite pas les zones déjà fortement carbonatées.
- Support doit être propre et sain.
- Efficacité réduite si le film est endommagé.
- Durée de protection variable selon l'environnement.



Figure 3. 5: Peinture anti-carbonatation pour béton

3.12 Réparation des nids de gravier :

3.12.1 Étapes de mise en œuvre :

- Repérage des zones concernées : observation visuelle des vides, granulats apparents ou manques de pâte.
- Ouverture locale : retrait du béton peu adhérent autour du nid à l'aide d'outils adaptés.
- Nettoyage approfondi : dépoussiérage, lavage, brossage pour assurer une bonne accroche.
- Humidification du support : prévenir l'absorption de l'eau de gâchage.
- Application d'un liant ou pont d'adhérence : barbotine cimentaire ou résine selon le cas.
- Remplissage : comblement du vide avec un mortier de réparation ou micro-béton.
- Finition : lissage de la surface et cure adaptée.

3.12.2 Matériaux et moyens :

- Mortiers de réparation structuraux (fibrés ou à retrait compensé).
- Barbotines ou résines d'accrochage.
- Micro-béton pour les cavités plus volumineuses.
- Outils : spatules, taloches, pompes à mortier si nécessaire.

3.12.3 Applications pratiques :

- Réparation de parements visibles.
- Remplissage sous les poutres, dalles ou poteaux mal vibrés.
- Zones critiques proches des armatures ou ancrages.

3.12.4 Résultats :

- Restaure l'intégrité et la compacité du béton.
- Limite l'entrée d'eau et la progression de la corrosion.
- Amélioration esthétique.
- Intervention simple et peu coûteuse.

3.12.5 Difficultés :

- Technique locale, non applicable aux dégâts généralisés.
- Support doit être propre et sain.
- Mauvaise exécution peut entraîner décollement ou reprise de fissuration.

3.13 Réparation des joints défectueux :

3.13.1 Étapes de mise en œuvre :

- Inspection des joints : localisation des défauts au endroits dégradés (fissuration, décollement, vieillissement du mastic).

- Élimination de l'ancien joint : retrait mécanique ou chimique du mastic détérioré.
- Nettoyage des bords : dépoussiérage, dégraissage, assèchement complet des lèvres du joint.
- Pose éventuelle d'un fond de joint : pour ajuster la profondeur et éviter l'adhérence sur trois faces.
- Application du nouveau mastic : extrusion à la pompe ou au pistolet, en respectant la géométrie du joint.
- Lissage : pour garantir l'adhérence et l'esthétique.
- Temps de séchage et protection : selon les recommandations du fabricant.

3.13.2 Matériaux et moyens :

- Mastics d'étanchéité : à base de polyuréthane, silicone, MS polymère.
- Fonds de joints compressibles (mousse PE ou PU).
- Primaires d'adhérence selon le support.
- Outils : cutters, brosses, pistolets manuels ou pneumatiques.

3.13.3 Applications pratiques :

- Joints de dilatation entre éléments de structure.
- Joints de façade, de dallage ou de préfabrication.
- Étanchéité entre matériaux différents (béton-acier, béton-verre).

3.13.4 Résultats :

- Préserve la mobilité des ouvrages.
- Améliore l'étanchéité et la durabilité.
- Large choix de mastics selon l'environnement.
- Intervention localisée et rapide.

3.13.5 Difficultés :

- Adhérence conditionnée par la propreté du support.
- Sensibilité aux conditions d'application (humidité, température).
- Durée de vie limitée à 10-20 ans selon l'exposition.

3.14 Traitement des armatures corrodées :

3.14.1 Étapes de mise en œuvre :

- Détection de la corrosion : inspection visuelle, sondages et mesures électrochimiques.
- Décapage local : retrait du béton autour des aciers affectés jusqu'à atteindre une zone saine.
- Nettoyage des armatures : brossage manuel ou sablage pour éliminer la rouille et les produits de corrosion.
- Évaluation du diamètre résiduel : vérification de la perte de section des barres.
- Renforcement éventuel : ajout de nouvelles barres ou couplage mécanique selon l'état des aciers existants.

- Application d'un passivant : revêtement anticorrosion sur les armatures nettoyées (base ciment ou polymère).
- Reconstitution du béton : remplissage avec un mortier de réparation adapté.

3.14.2 Matériaux et moyens :

- Produits de passivation à base de ciment modifié ou d'inhibiteurs chimiques.
- Mortiers de réparation compatibles avec les armatures.
- Outillage : burineurs, brosses métalliques, compresseur pour sablage.

3.14.3 Applications pratiques :

- Réhabilitation de poutres, poteaux ou voiles exposés à des environnements agressifs.
- Prévention de l'évolution de la corrosion après réparation.
- Complément indispensable aux réparations de surface (injections, reprofilage).

3.14.4 Résultats :

- Stoppe ou ralentit la corrosion des aciers.
- Préserve les propriétés mécaniques de la structure.
- Compatible avec d'autres techniques de réparation.
- Améliore la durabilité globale de l'ouvrage.

3.14.5 Difficultés :

- Intervention localisée et parfois invasive.
- Risque de reprise de corrosion si la passivation est mal réalisée.
- Nécessite une bonne accessibilité aux armatures.

3.15 Réparation des épaufrures et éclats :

3.15.1 Étapes de mise en œuvre :

- Identification des détériorations : observation des angles cassés, arêtes endommagées ou éclats de surface.
- Décapage local : suppression du béton délité autour des zones abîmées.
- Nettoyage : dépoussiérage, lavage ou brossage pour garantir une bonne adhérence.
- Préparation du fond : humidification et application d'un liant d'accrochage si nécessaire.
- Reconstitution : pose de mortier de réparation à la spatule ou au moule selon la géométrie.
- Finition : lissage et reproduction de la forme initiale.
- Cure : maintien de l'humidité pour éviter la fissuration du mortier frais.

3.15.2 Matériaux et moyens :

- Mortiers de réparation fins et thixotropes.
- Barbotines ou résines d'adhérence.
- Outils : spatules, taloches, coffrages souples ou rigides.

3.15.3 Applications pratiques :

- Reprise d'angles de poutres, poteaux, marches ou balcons.
- Réfection de parements visibles ou exposés.
- Travaux de finition après choc, corrosion ou usure mécanique.

3.15.4 Résultats :

- Restaure l'aspect et la fonction des éléments en béton.
- Technique ciblée et rapide à mettre en œuvre.
- Nécessite peu de matériel.

3.15.5 Difficultés :

- Ne traite que les désordres superficiels.
- Adhérence dépendante de la préparation.
- Sensible aux chocs ou sollicitations répétées après réparation.

3.16 Renforcement des fondations par micropieux :

3.16.1 Étapes de mise en œuvre :

- Étude géotechnique : analyse du sol pour déterminer la profondeur et le type de micropieux nécessaires.
- Repérage des emplacements : positionnement précis selon le plan de renforcement.
- Forage : réalisation de trous de petit diamètre (100 à 300 mm) à la profondeur définie.
- Mise en place des armatures : introduction d'un tube ou cage d'armature dans le forage.
- Injection de coulis : remplissage à haute pression du forage avec un coulis de ciment ou de résine.
- Vérification : contrôle de l'injection, de la verticalité et de la résistance du micropieu.
- Connexion à la structure : liaison par semelle, longrine ou plaque d'ancrage.

3.16.2 Matériaux et moyens :

- Tubes en acier ou cages d'armature.
- Coulis de ciment, micro-bétons ou résines.
- Forages mécaniques à sec ou avec boue de forage.
- Équipements : foreuses, pompes d'injection, vérins de contrôle.

3.16.3 Applications pratiques :

- Renforcement de bâtiments anciens ou sinistrés.
- Stabilisation de fondations affectées par des tassements.
- Reprise en sous-œuvre pour changement de destination ou ajout de charge.

3.16.4 Résultats :

- Peu invasif, convient aux espaces restreints.

- Adapté à tous types de sols.
- Possibilité d'intervention en présence de structures existantes.
- Renforcement durable et fiable.

3.16.5 Difficultés :

- Coût relativement élevé.
- Nécessite des équipements spécialisés.
- Suivi technique rigoureux indispensable.

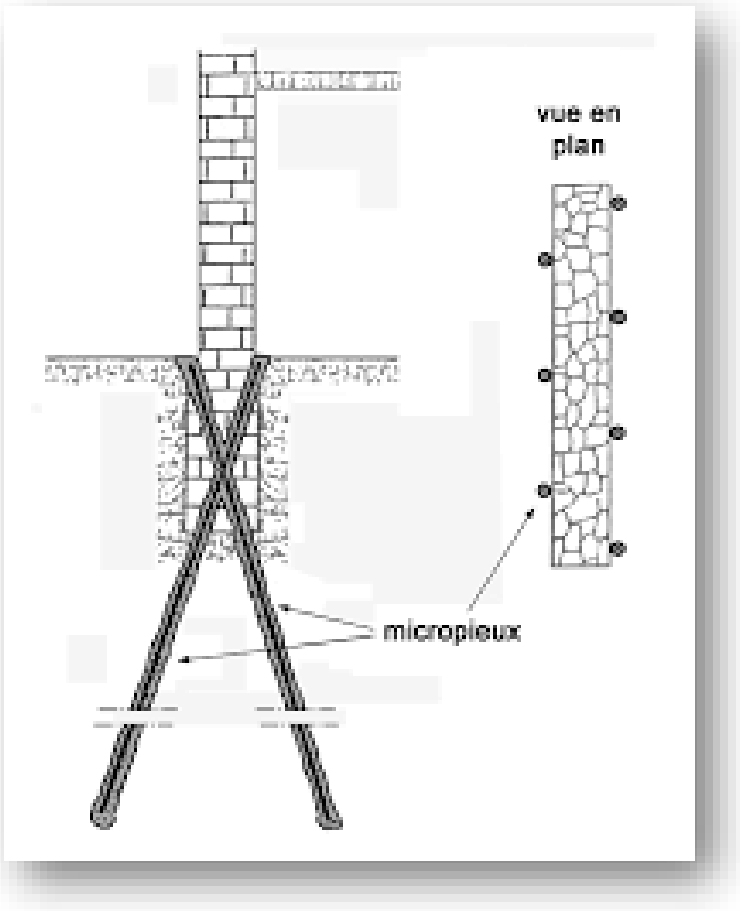


Figure 3. 6: Renforcement des fondations par micropieux

3.17 Réparation des bétons par électrochimie (désalcalinisation, extraction des chlorures) :

3.17.1 Étapes de mise en œuvre :

- Évaluation préalable : identification des zones contaminées par chlorures ou carbonatées.
- Installation du dispositif : pose d'anodes temporaires à la surface du béton.
- Connexion électrique : raccordement au courant continu avec contrôle de polarité.
- Application d'un électrolyte : solution saline ou gel conducteur sur la surface.

- Traitement électrochimique : passage d'un courant contrôlé durant plusieurs semaines.
- Surveillance : mesure continue des paramètres électrochimiques.
- Démontage du système : retrait des anodes, nettoyage et finition.

3.17.2 Matériaux et moyens :

- Anodes temporaires (mailles en titane, grillage).
- Sources de courant continu (alimentation régulée).
- Électrolytes (solutions de NaOH, KOH, gels spécifiques).
- Instruments de mesure (électrodes de référence, voltmètres).

3.17.3 Applications pratiques :

- Structures maritimes ou soumises à des sels de déverglaçage.
- Éléments en béton armé contaminés en profondeur.
- Traitement complémentaire à des réparations classiques.

3.17.4 Résultats :

- Élimine efficacement les agents corrosifs.
- Retarde ou stoppe la corrosion sans intervention lourde.
- Conservation du béton d'origine.

3.17.5 Difficultés :

- Technique longue (plusieurs semaines de traitement).
- Nécessite une mise en œuvre spécialisée.
- Coût élevé et besoin d'un suivi technique continue.

3.18 Remplacement locale du béton :

3.18.1 Étapes de mise en œuvre :

- Délimitation de la zone dégradée : traçage des contours de la partie à remplacer.
- Démolition contrôlée : retrait du béton détérioré à l'aide d'outils mécaniques ou manuels.
- Nettoyage du fond de fouille : suppression des poussières, laitance et éléments friables.
- Traitement des armatures : décapage, passivation ou remplacement selon leur état.
- Coffrage local : installation de banches ou moules adaptés à la forme d'origine.
- Coulage du nouveau béton : mise en œuvre par gravité ou injection.
- Vibrage et cure : compactage adéquat et protection pendant la prise.

3.18.2 Matériaux et moyens :

- Bétons de réparation : formulation adaptée à la résistance initiale.
- Coffrages bois, métal ou panneaux modulaires.
- Agents de cure, produits de décoffrage.

3.18.3 Applications pratiques :

- Reprise d'éléments fortement altérés ou partiellement détruits.
- Zones affectées par la corrosion ou les chocs mécaniques.
- Ouvrages pour lesquels une intervention ponctuelle suffit.

3.18.4 Résultats :

- Restauration structurelle efficace.
- Compatible avec les bétons existants.
- Permet de conserver l'élément d'origine.

3.18.5 Difficultés :

- Nécessite un accès suffisant à la zone.
- Risque de fissuration si le coffrage ou le bétonnage sont mal réalisés.
- Demande une bonne maîtrise de l'interface entre ancien et nouveau béton.

- Réparations ponctuelles possibles en cas de fissuration ou d'usure.

3.19 Réparation des joints de construction

3.19.1 Étapes de mise en œuvre :

- Inspection des joints : vérification de l'état du matériau de remplissage, des fissures ou des infiltrations.
- Nettoyage de l'interface : élimination des anciens matériaux, dépoussiérage et dégraissage des bords.
- Préparation du fond : mise en place éventuelle d'un fond de joint pour contrôler la profondeur.
- Application du produit de scellement : mastic souple ou résine injectée selon le type de joint.
- Finition : lissage de la surface du joint et retrait des bavures.
- Protection en phase de prise : éviter l'exposition à l'eau ou aux charges pendant la polymérisation.

3.19.2 Matériaux et moyens :

- Mastics souples (polyuréthane, silicone) ou rigides (mortiers spéciaux).
- Résines d'injection pour joints actifs.
- Fonds de joint, primaires d'adhérence.
- Outils : pistolets d'application, spatules, compresseurs.

3.19.3 Applications pratiques :

- Reprise des joints entre dalles, murs ou éléments préfabriqués.
- Traitement des joints soumis aux mouvements ou vibrations.
- Étanchéité entre matériaux différents.

3.19.4 Résultats :

- Maintien de la continuité et de l'étanchéité.
- Adaptabilité aux mouvements différentiels.
- Mise en œuvre rapide et ciblée.

3.19.5 Difficultés :

- Sensibilité à l'humidité ou aux UV selon les produits.
- Nécessite un support propre et stable.
- Durée de vie limitée si mal appliqué ou mal protégé.

Entretien après intervention :

- Contrôle périodique de l'élasticité et de l'adhérence.
- Ré application du mastic si usure ou fissuration.
- Surveillance accrue dans les zones soumises à de fortes sollicitations.

3.20 Réparation des épaisseurs dégradées ou nids internes :

3.20.1 Étapes de mise en œuvre :

- Identification des défauts internes : examen visuel, sondages ou auscultation non destructive (ultrasons, radar).
- Ouverture de la zone : décaissage partiel du béton pour atteindre la cavité ou la zone de faible densité.
- Nettoyage en profondeur : élimination des poussières, laitance ou parties mal adhérentes.
- Préparation des surfaces : application d'un liant d'accrochage ou d'un primaire si requis.
- Injection ou remplissage : utilisation d'un coulis fluide, micro-béton ou résine selon l'ampleur du vide.
- Finition : fermeture et lissage de la surface.
- Cure : maintien de l'humidité pour garantir le durcissement optimal.

3.20.2 Matériaux et moyens :

- Coulis de ciment ou résine époxy basse viscosité.
- Micro-bétons à retrait compensé.
- Primaires d'adhérence ou liants d'accrochage.
- Outils d'injection : pompes, seringues, buses.

3.20.3 Applications pratiques :

- Reprise des vides dans les voiles, poutres, dalles ou poteaux.
- Correction de malfaçons de coulage ou compactage insuffisant.
- Réparation après corrosion ou choc mécanique.

3.20.4 Résultats :

- Restaure l'homogénéité et la résistance du béton.
- Améliore la durabilité et la sécurité de l'élément.
- Technique ciblée et peu invasive.

3.20.5 Difficultés :

- Accessibilité parfois difficile aux zones internes.
- Nécessite un diagnostic précis avant intervention.
- Risque d'injection incomplète sans contrôle adapté.



Figure 3. 7: Réparation des épaisseurs dégradées ou nids internes

3.21 Réparation par remplacement partiel de pièce endommagée :

3.21.1 Étapes de mise en œuvre :

- Diagnostic préalable : évaluation de l'état de la pièce préfabriquée (poutre, panneau, dalle, etc.).
- Délimitation de la zone à remplacer : traçage précis en fonction des pathologies observées.
- Découpe contrôlée : sciage ou carottage pour retirer uniquement la partie endommagée.
- Préparation des interfaces : nettoyage, rugosité et éventuellement traitement des armatures.

- Mise en place de la nouvelle pièce : pièce préfabriquée identique ou sur mesure, ajustée sur site.
- Fixation : ancrages mécaniques, scellements ou soudures selon le type d'assemblage.
- Jointoiement et finition : comblement des interfaces et traitement de surface.

3.21.2 Matériaux et moyens :

- Élément préfabriqué de remplacement (béton armé, précontraint ou fibré).
- Mortiers de scellement, résines d'ancrage.
- Outillage de découpe, levage et pose.

3.21.3 Applications pratiques :

- Réhabilitation de bâtiments industriels, ouvrages d'art ou structures modulaires.
- Remplacement de parties précises sans démolition totale.
- Correction de défauts irréparables localement.

3.21.4 Résultats :

- Réparation structurelle précise et durable.
- Moins de temps d'arrêt par rapport à une reconstruction complète.
- Maintien des performances d'origine.

3.21.5 Difficultés :

- Fabrication sur mesure parfois nécessaire.
- Coordination précise entre découpe et pose.
- Risque d'incompatibilité géométrique ou matérielle.

CHAPITRE 4 : PARTIE EXPERIMENTALE

I-Béton utilisé :

Méthode de Dreux-Gorisse

Méthode française très répandue, utilisée pour concevoir des bétons de différentes classes.
Elle prend en compte :
- le type de ciment
- le plus grand diamètre des granulats (D_{max})
- le rapport E/C (eau/ciment)
- les proportions sable/gravier
- la teneur en air entraîné
- le besoin en eau

Formulation typique pour un béton courant (classe B25) :
- Ciment : 350 kg/m³
- Eau : 175 kg/m³
- Sable : 750 kg/m³
- Gravier : 1050 kg/m³
- Adjuvant plastifiant : 1% du poids du ciment
- Rapport E/C = 0,5

Avantages : méthode fiable, précise, et facilement adaptable sur chantier.

Autres méthodes de formulation du béton :

Méthode de Bolomey

Méthode empirique ancienne qui relie la résistance du béton au rapport E/C.
Formule : Rc = A × (C/E - B)
Formulation indicative :
- Ciment : 300 kg/m³
- Eau : 180 kg/m³
- Sable : 800 kg/m³
- Gravier : 1100 kg/m³
- Rapport E/C = 0,6

Méthode de Feret

Basée sur le calcul du volume de vides.
Formule : Rc = K / (w/c + a/c + s/c)

Méthode de Faury

Fondée sur le concept de compacité maximale du squelette granulaire.

Méthode de Lyse

Méthode géométrique basée sur les volumes spécifiques des composants solides.

Méthode de Fuller (ou Fuller-Thompson)

Basée sur la courbe de Fuller : P = (d/D)^n × 100, avec n ≈ 0,5 – 0,6.

Méthode de Aïtcin

Pour les bétons à hautes performances (BHP).
Formulation indicative :
- Ciment : 400–500 kg/m³
- Eau : < 150 kg/m³
- Rapport E/C ≈ 0,3

Méthode ACI (American Concrete Institute)

Basée sur des tableaux de dosage selon la résistance, le climat, la consistance.
Formulation indicative :
- Ciment : 350 kg/m³
- Eau : 175 kg/m³

Méthode BRL (Bureau de Recherches Lavoisier)

Optimisation des propriétés du béton frais et durci.

Méthode CTT / LCPC

Méthode française utilisée pour les chaussées ou structures.

Méthode de Funk et Dinger

Utilisée pour BHP et BAP – basée sur la densité de compactage.

Méthode BTRHEPA

Pour les bétons autoplaçants – équilibre entre sable, fines, eau, superplastifiants.

Formulation dreux gorisse utilisée :

Tableau 4. 1: Composition du béton selon la méthode de Dreux-Gorisse

Constituant	Dosage /m³ de béton
Ciment	350 kg
Eau	208 l
Gravier 15/25	769 kg
Gravier 8/15	404 kg
Sable 0/5	706 kg

II-Préparation des éprouvettes :

1. Malaxage :

Le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur de laboratoire. Étant donné que la campagne expérimentale comprenait un total de 24 éprouvettes cylindriques (16×32 cm), le malaxage a été réalisé en 6 séries, à raison de quatre éprouvettes par jour.

La formulation utilisée est basée sur la méthode Dreux-Gorisse, ajustée avec un excédent de 10 % pour éviter tout manque de matériaux lors du moulage. Les quantités pour chaque série étaient les suivantes :

- Sable 0/5 : 19,87 kg
- Gravier 8/15 : 11,65 kg
- Gravier 15/25 : 21,6 kg
- Ciment CEM I 42.5 : 9,9 kg
- Eau : 5,86 litres



Figure 4. 1: Malaxage du béton – Vue de la préparation manuelle

Les matériaux secs (sable, gravier, ciment) ont d'abord été introduits dans le malaxeur pour un pré-malaxage à sec d'environ 1 minute, avant l'ajout progressif de l'eau. Le malaxage s'est poursuivi pendant environ 3 à 4 minutes jusqu'à obtention d'un mélange homogène.

2. Moulage (cylindre 16×32 cm) :

Le moulage des éprouvettes cylindriques a été réalisé dans des moules métalliques aux dimensions normalisées de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur. Chaque moule a été soigneusement nettoyé et huilé avant remplissage pour faciliter le démoulage ultérieur.

Le béton frais a été versé dans les moules en deux couches successives, chacune compactée par vibration afin de limiter la présence de vides d'air et d'assurer une bonne densité du matériau.





Figure 4. 2: Moulage et démoulage des éprouvettes cylindriques

3. Vibration :

Chaque couche de béton introduite dans le moule a été vibrée à l'aide d'une table vibrante durant environ 10 à 15 secondes, ou jusqu'à disparition des bulles d'air en surface. Cette étape est cruciale pour garantir une compacité optimale et prévenir les défauts internes dans les éprouvettes.



Figure 4. 3: Vibration des moules pour compaction du béton

4. Séchage humide (Cure) :

Après le moulage, les éprouvettes ont été laissées dans les moules pendant 24 heures à température ambiante, puis démoulées et placées en cure humide. La cure a été effectuée par immersion dans l'eau à température contrôlée pendant une durée de 7 jours, afin de permettre un développement suffisant des propriétés mécaniques du béton avant les essais.

III-Protocol Des essais :



Figure 4. 4: APPAREIL DE COMPRESSION

III-1 Essai de compression (limites de résistance) :

Les éprouvettes ont été réparties en trois groupes selon la durée de cure humide et analysées en compression afin de déterminer la limite de résistance de chacune, deux éprouvettes pour chaque groupe ont été testées :

- 7 jours
- 14 jours
- 28 jours

L'essai d'écrasement a donné les résultats suivants :

Tableau 4. 2: Résultats de des essais de compression initiaux sur les éprouvettes témoins

7 j	1	15.350	15.836
	2	16.322	
14 j	1	24.332	20.721
	2	17.111	
28 j	1	22.155	23.089
	2	24.024	

III-2 Procédure de pré-fissuration :

Dans cette opération trois niveaux de sollicitations ont été considérés lors de l'essai de pré-fissuration, 20% ,50% et 80% de la valeur de la résistance limite de chaque groupe dont les valeurs sont calculées et donnée selon le tableau suivant :

7 jours :

Tableau 4. 3: Résistance à la compression à 7 jours

Niveau	Charge calculée (MPa)	Type	Charge appliquée (MPa)
20%	3.167	1	3.214
		2	3.224
50%	7.918	1	8.03
		2	7.960
80%	12.66	1	12.692
		2	12.700

14 jours :

Tableau 4. 4: Résistance à la compression à 14 jours

Niveau	charge calculée (MPa)	Type	charge appliquée (MPa)
20%	4.144	1	4.194
		2	4.145
50%	10.36	1	10.385
		2	10.365
80%	16.576	1	16.646
		2	16.575

28 jours :

Tableau 4. 5: Résistance à la compression à 28 jours

Niveau	charge calculée (MPa)	Type	charge appliquée (MPa)
20%	4.617	1	4.649
		2	4.667
50%	11.544	1	11.566
		2	11.583
80%	18.47	1	18.520
		2	18.491

III-3 Essai de compression après injection :

Après les essais de pré-fissuration, 18 éprouvettes (6 de chaque groupe de cure) ont subit l'opération d'injection d'une colle.

Préparation des éprouvettes :

Toutes les éprouvettes pré-fissurées sont perforées à une profondeur de 11 cm dans quatre endroits à trajectoires différentes par une perceuse électrique.



Figure 4. 5: PERÇAGE

Colle d'injection :

Après consultation des caractéristiques techniques assurées et recommandées par le fabriquant SIKA EL JAZAIR on a opté pour le **SikaDur®-52 Injection** qui présente une grande performance justifiée par une mise en œuvre pratique dans plusieurs situations et opérations de réhabilitation et renforcement.



Figure 4. 6: COLLE SikaDur®-52 LP

Procédure d'injection :

Une fois toutes les éprouvettes sont perforées, l'injection profonde de la colle (SikaDur®-52 Injection) est assurée par le moyen de seringues manuelles de grande capacité selon des étapes, puis ces trous sont bouchés par des autocollants professionnels pour empêcher tout débordement de la colle injectée.



Figure 4. 7: INJECTION

Essai

Après cette opération, les éprouvettes renforcées sont laissées pour une période de séchage pendant 48 heures avant de procéder de nouveau aux essais d'écrasement en compression afin de vérifier le nouvel état de résistance et d'estimer en même temps la contribution de cette technique de renforcement.







Figure 4. 8: ESSAI DE COMPRESSION

Le tableau suivant présente les résultats d'écrasement.

Tableau 4 6: **Résultats de compression après injection de la colle pour différents taux de dégradation**

Durée(jour)	Niveau(%)	N°	Résistance(MPa)	Résistance moyenne(MPa)
7J	20%	1	22.382	21.446
		2	20.510	
	50%	1	25.235	22.488
		2	19.742	
	80%	1	23.201	22.403
		2	21.605	
14J	20%	1	18.652	23.699
		2	28.746	
	50%	1	22.199	21.658
		2	21.118	
	80%	1	22.949	24.564
		2	27.033	
28J	20%	1	25.202	26.146
		2	27.091	
	50%	1	20.996	23.108
		2	25.221	
	80%	1	31.579	26.367
		2	21 .156	

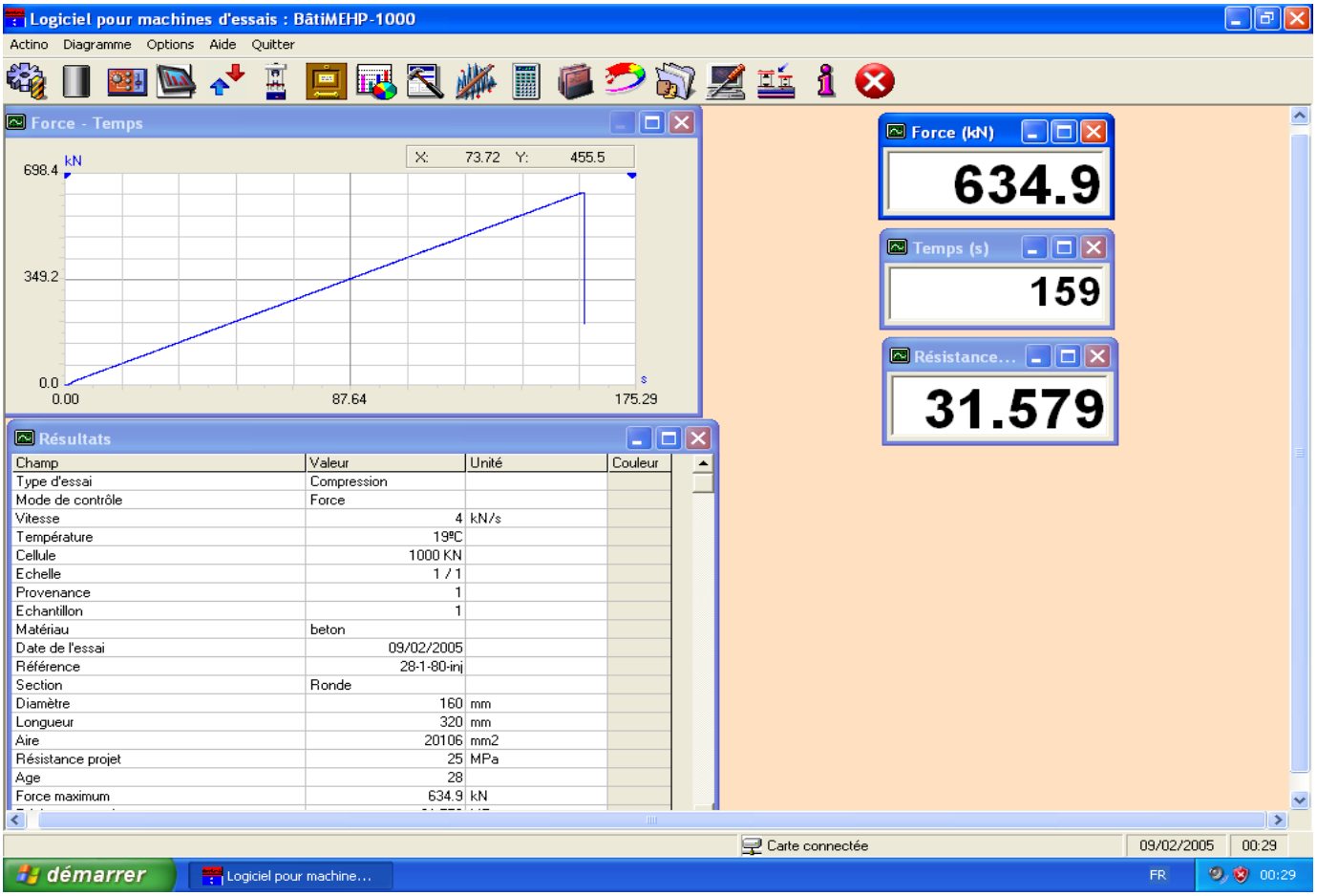
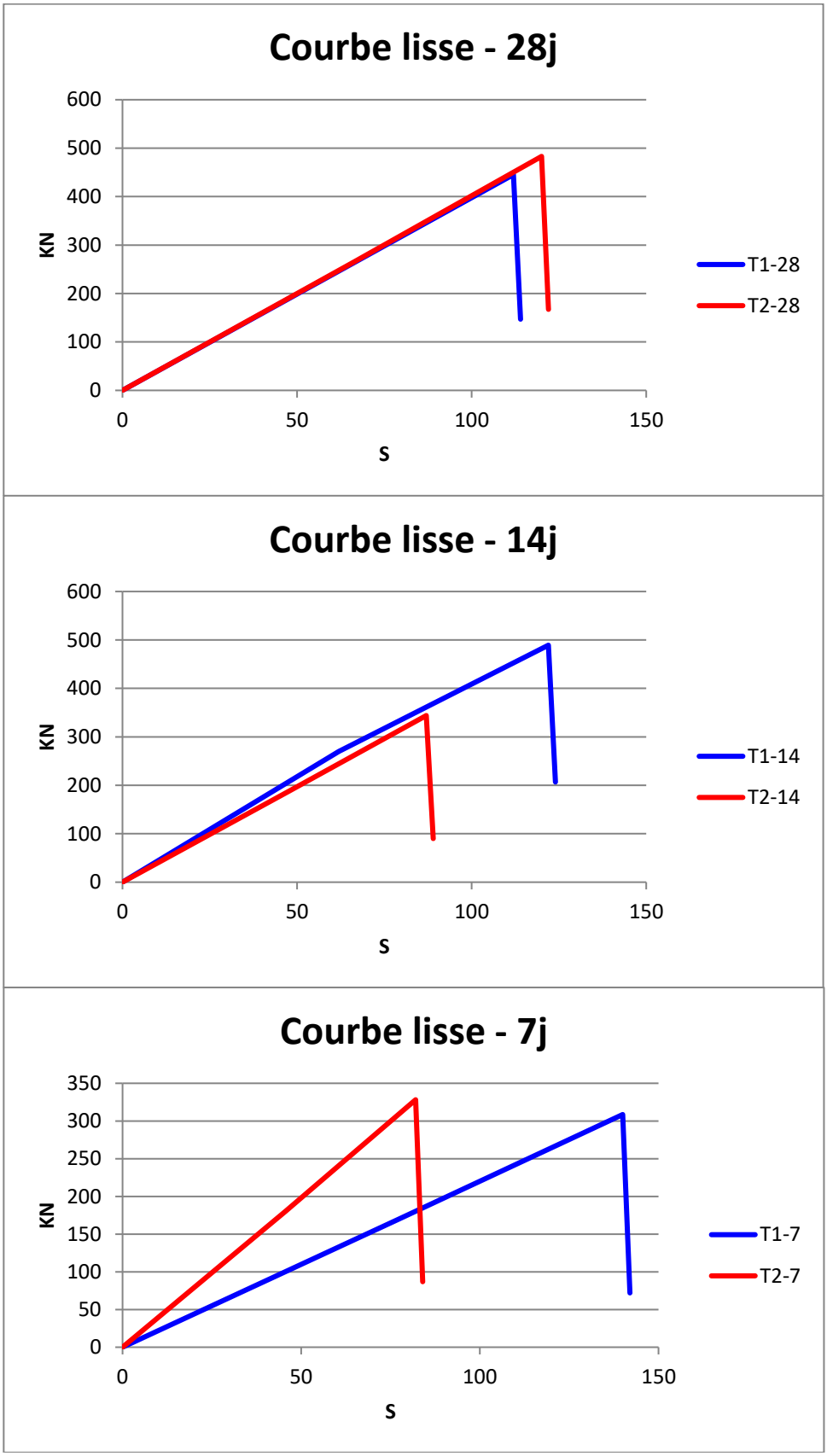
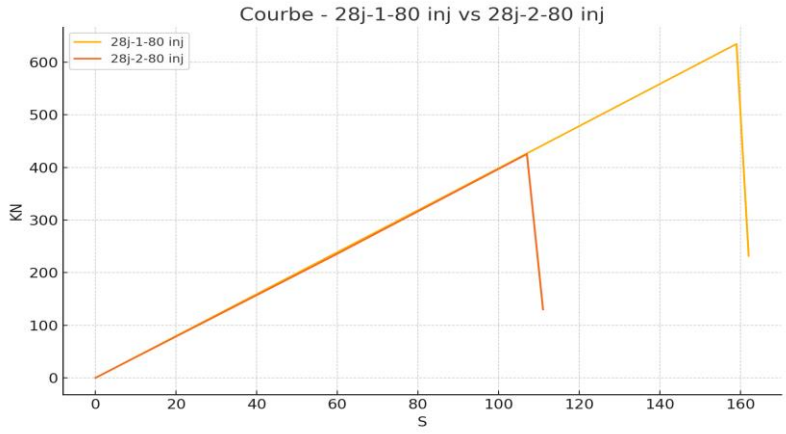


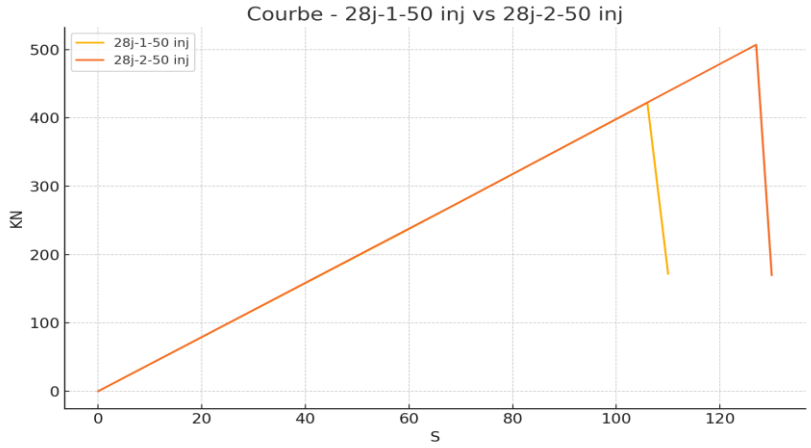
Figure 4. 9: EXEMPLE DE RESULTAT

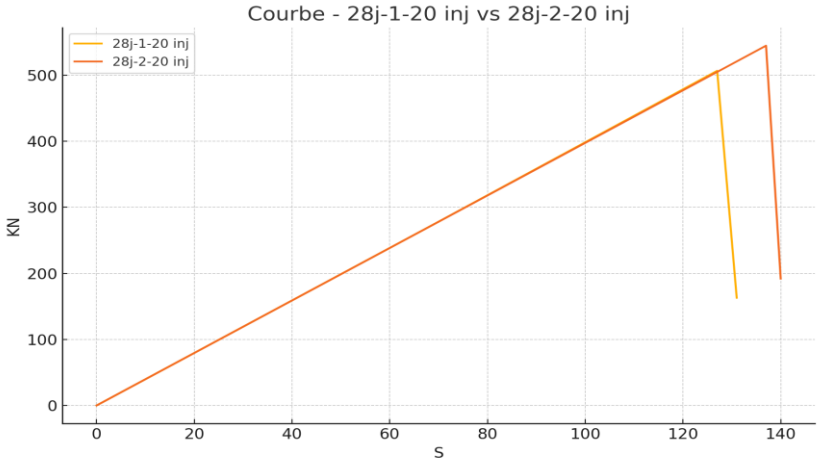
CHAPITRE V : ANALYSE DES RÉSULTATS


Courbe lisse - 28j
600
500
400
300
200
100
0
KN
0
50
100
150
S
T1-28
T2-28
Courbe lisse - 14j
600
500
400
300
200
100
0
KN
0
50
100
150
S
T1-14
T2-14
Courbe lisse - 7j
350
300
250
200
150
100
50
0
KN
0
50
100
150
S
T1-7
T2-7

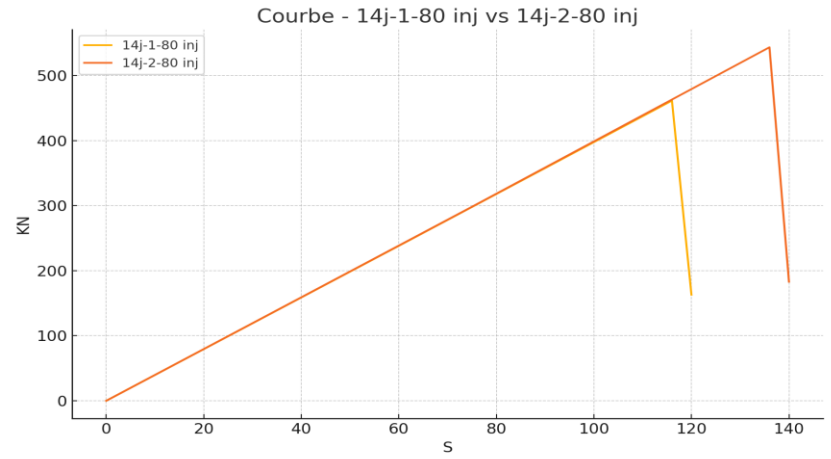
Après l'injection
28 JOURS

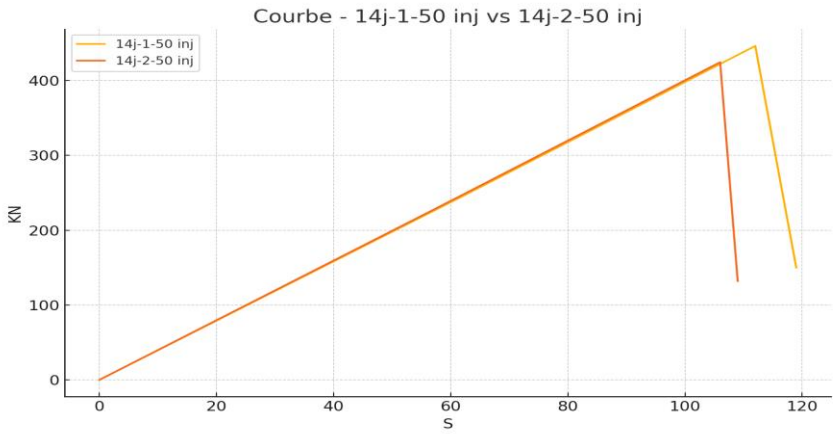


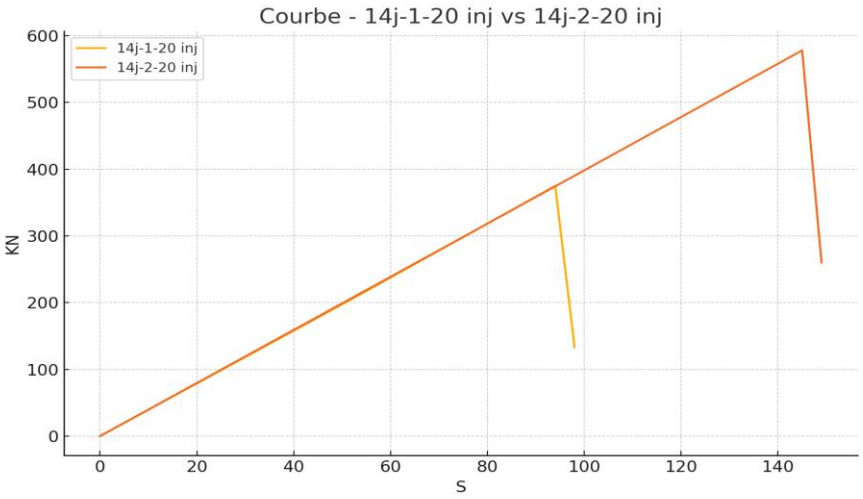




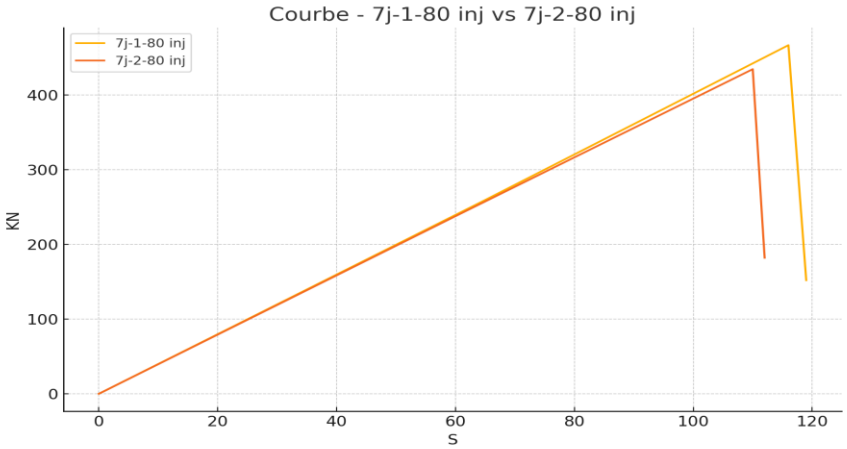
14 JOURS

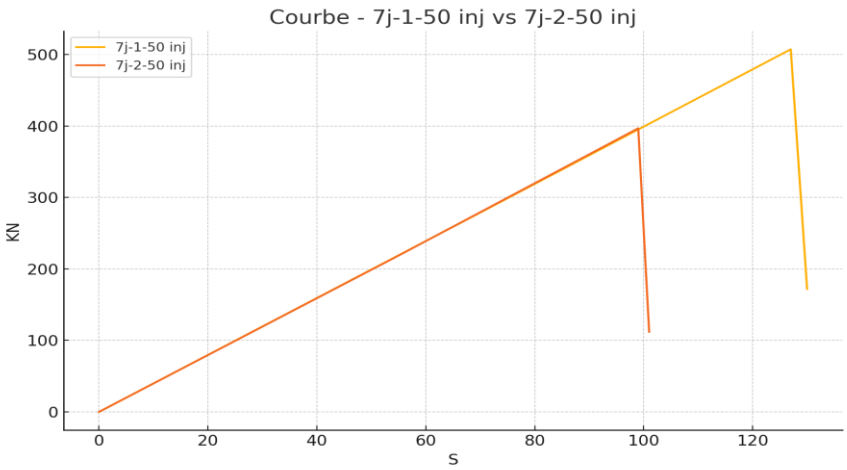

Courbe - 14j-1-80 inj vs 14j-2-80 inj
14j-1-80 inj
14j-2-80 inj
KN
S
0
100
200
300
400
500
0
20
40
60
80
100
120
140


Courbe - 14j-1-50 inj vs 14j-2-50 inj
14j-1-50 inj
14j-2-50 inj
KN
S
0
100
200
300
400
0
20
40
60
80
100
120


Courbe - 14j-1-20 inj vs 14j-2-20 inj
14j-1-20 inj
14j-2-20 inj
KN
S
0
100
200
300
400
500
600
0
20
40
60
80
100
120
140

7 JOURS


Courbe - 7j-1-80 inj vs 7j-2-80 inj
7j-1-80 inj
7j-2-80 inj
KN
S
0
100
200
300
400
0
20
40
60
80
100
120


Courbe - 7j-1-50 inj vs 7j-2-50 inj
7j-1-50 inj
7j-2-50 inj
KN
S
0
100
200
300
400
500
0
20
40
60
80
100
120

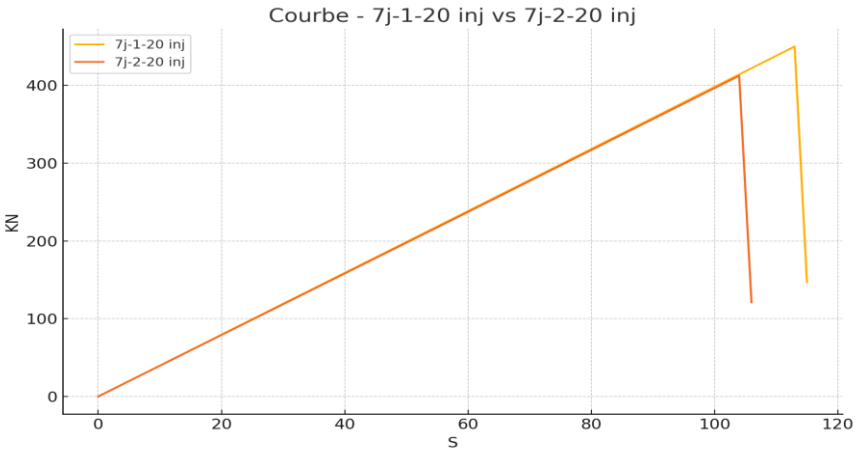
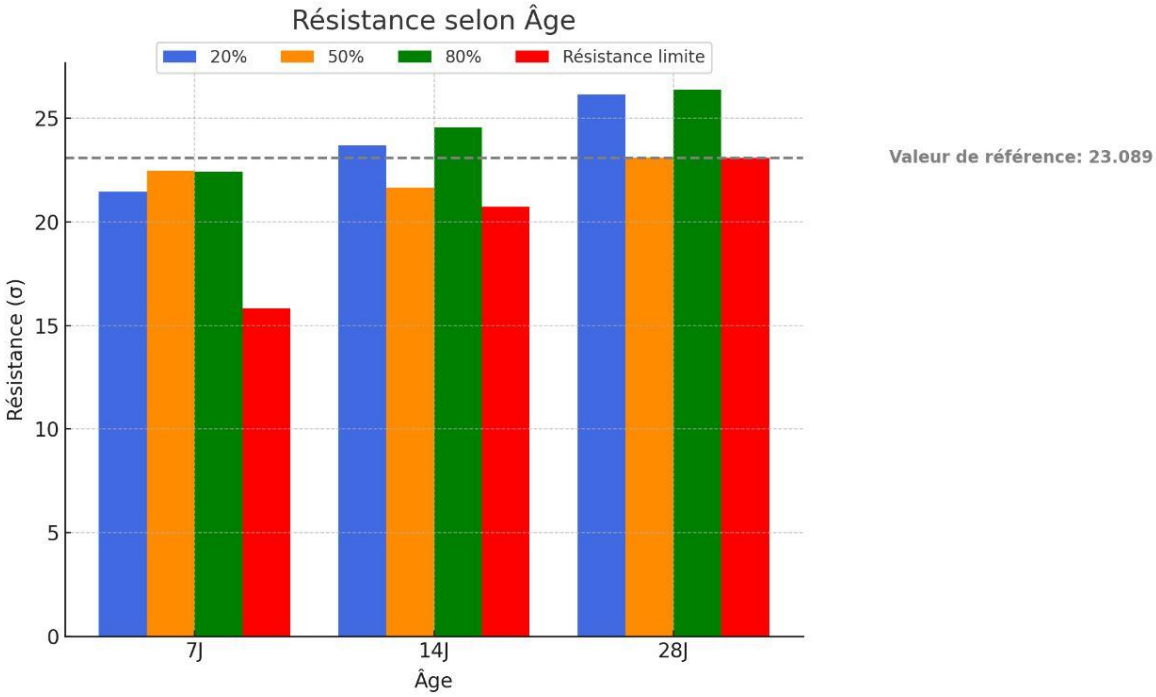

Courbe - 7j-1-20 inj vs 7j-2-20 inj
7j-1-20 inj
7j-2-20 inj
KN
S
0
100
200
300
400
0
20
40
60
80
100
120

Tableau des resultants :

Age (jour)	Résistance limite (Mpa)	20% (Mpa)	50% (Mpa)	80% (Mpa)	
7J	15.836	21.446	22.488	22.403	
14J	20.721	23.699	21.658	24.564	Valeur Reference 23.089
28J	23.089	26.146	23.108	26.367	

Graphique récapitulatif:



Discussion des Résultats Expérimentaux

• **Analyse du graphique "Résistance selon Âge" :**
Ce graphique illustre l'évolution des résistances à la compression (σ) des éprouvettes en béton à trois âges différents (7, 14 et 28 jours), après avoir subi une dégradation (pré-fissuration) selon trois niveaux de contraintes (20 %, 50 %, 80 %), suivie d'une injection de colle à base de résine.
• **À 7 jours (7J) :**
- Les résistances après injection pour les niveaux 20 %, 50 % et 80 % dépassent toutes les 22 MPa.
- L'échantillon dégradé à 80 % a atteint une résistance proche de 22,5 MPa.
- L'échantillon témoin non renforcé (rouge) présente une résistance très faible (≈ 16 MPa).
• **Interprétation :** Malgré l'âge jeune du béton, l'injection a permis une récupération importante des capacités mécaniques. L'amélioration est très significative, surtout pour le niveau 80 %.
• **À 14 jours (14J) :**

- Les éprouvettes injectées à 20 % et 80 % dépassent la valeur de référence (23,089 MPa).
- Le niveau 50 % reste légèrement inférieur à la valeur de référence (≈ 22 MPa).
- L'échantillon témoin atteint ≈ 21 MPa.

• **Interprétation :** Les performances sont améliorées grâce à l'injection, surtout pour le niveau 80 %, qui a montré une résistance supérieure à celle de l'échantillon témoin. Cela confirme que l'injection est bénéfique même après deux semaines de cure.

• **À 28 jours (28J) :**

- Tous les échantillons injectés dépassent la valeur de référence.
- La meilleure résistance est obtenue pour le niveau 80 %, avoisinant 26,5 MPa.
- L'échantillon témoin est aligné avec la valeur de référence (≈ 23 MPa).

•**Interprétation :** À maturité (28 jours), le renforcement par injection s'avère particulièrement efficace. La résistance est significativement améliorée pour toutes les éprouvettes injectées, et surtout pour le niveau 80 %, ce qui montre que la méthode est performante même sur des bétons déjà résistants.

• **Observations générales** :

1. L'efficacité du renforcement est démontrée, surtout pour les niveaux de dégradation élevés (%80), même à jeune âge.
2. Les résultats sont meilleurs à 28 jours, ce qui montre une synergie entre la maturité du béton et l'effet du produit injecté.
3. Le niveau 50 % donne des résultats inférieurs aux niveaux 20 % et 80 %, ce qui pourrait s'expliquer par un état de fissuration moins favorable à la diffusion optimale de la colle.
4. L'écart entre les éprouvettes témoins (rouge) et celles injectées est significatif, ce qui prouve l'apport réel de la technique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

L'étude expérimentale menée sur l'évolution de la résistance mécanique du béton selon l'âge (7, 14 et 28 jours) et sous différentes charges (20 %, 50 %, 80 %) après injection de colle a permis de dégager des résultats significatifs.

On observe que pour tous les âges, les valeurs mesurées de résistance sous les différents niveaux de contrainte dépassent nettement la résistance limite de référence (23.089 MPa), en particulier pour les niveaux de 20 % et 80 % :

• À 7 jours, la résistance atteint déjà plus de 21 MPa, ce qui est supérieur à la résistance limite.

• À 14 jours, elle dépasse les 23 MPa, atteignant même 24.564 MPa sous 80 %, ce qui indique une amélioration progressive due à l'effet de l'injection.

• À 28 jours, les valeurs culminent à plus de 26 MPa, marquant une hausse remarquable par rapport à la référence.

L'écart entre la valeur limite (23.089 MPa) et les résistances mesurées post-injection montre que l'injection de colle améliore significativement la cohésion et la résistance globale du matériau, en particulier à long terme. Cela se reflète surtout sous les niveaux de contrainte les plus élevés (80 %), où la résistance atteint jusqu'à 26.367 MPa à 28 jours, soit une augmentation de plus de 3 MPa par rapport à la limite.

Finalement ;

L'injection de colle s'est révélée être une méthode efficace pour renforcer la résistance mécanique du béton à court et long termes. Les résultats expérimentaux confirment l'effet bénéfique de ce traitement, en dépassant systématiquement la résistance limite de référence dès 7 jours. Ce constat ouvre des perspectives intéressantes pour l'amélioration de la durabilité des structures traitées par injection, notamment dans des contextes de réparation ou de renforcement structurel.

Références bibliographiques

Chapitre 02:

1. **AFPC-AFREM**. (1997). *Durabilité des Bétons : Méthodes Recommandées pour la Mesure des Grandeurs Associées à la Durabilité*.
2. **Berra, M. & Mangialardi, T.** (2004). "Alkali–silica reaction in concrete: mechanisms and diagnosis," *Cement and Concrete Research*, 34(5), pp. 871–876.
3. **Biczók, I.** (1972). *Concrete Corrosion, Concrete Protection*. Akademiai Kiado.
4. **Cheyrezy, M.** (2005). *Pathologies du béton armé et précontraint*. Presses de l'École des Ponts.
5. **ACI Committee 201**. (2016). *Guide to Durable Concrete*. ACI 201.2R-16, American Concrete Institute.
6. **LNEC** (Laboratoire National d'Ingénierie Civile). *Guide de Diagnostic des Ouvrages en Béton*.
7. **NF EN 206/CN**. (2023). *Béton – Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206*.
8. **Rilem Technical Committee**. (2003). *Diagnosis of deterioration in reinforced concrete structures*, *Materials and Structures*, 36(10).
9. **Tagnit-Hamou, A.**, *Pathologies des bétons* (Cours de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2012).

Chapitre 03 :

1. AFNOR. *NF EN 1504 - Produits et systèmes pour la réparation des structures en béton*. Norme française, parties 1 à 10.
2. ACI Committee 546. *ACI 546R-14: Concrete Repair Guide*. American Concrete Institute, 2014.
3. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. 5th Edition, Pearson Education Limited.
4. Bažant, Z. P., & Kaplan, M. F. (1996). *Concrete creep and shrinkage: Theory and application*. Cambridge University Press.
5. Emmons, P. H., & Vaysburd, A. M. (1996). *Performance criteria for concrete repair materials*. Construction and Building Materials, 10(1), 47–50.
6. CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. *Réparation et renforcement des structures en béton*. Guide technique.
7. CEREMA. *Guide technique – Diagnostic et réparation des ouvrages en béton armé*. Ministère de la Transition Écologique.
8. Sika France. *Systèmes de réparation et de protection des structures en béton*. Dossiers techniques disponibles sur : https://fra.sika.com
9. MAPEI France. *Solutions techniques pour la réparation du béton*. Dossiers professionnels consultables sur : https://www.mapei.fr
10. Fédération Internationale du Béton (fib). (2003). *Bulletin 24: Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings*.
11. Fédération Européenne de la Précontrainte (FIP). *Techniques modernes de renforcement du béton armé*. Publications techniques FIP.
12. Ministère de l'Écologie. *Ouvrages d'art – Pathologies et réparations*. Direction générale des infrastructures.

Chapitre 04 :

1. Dreux, G., & Festa, J. (1998). Nouveau guide de béton. Eyrolles.
2. Aïtcin, P.-C. (2000). High Performance Concrete. E & FN Spon.
3. American Concrete Institute (ACI) – ACI 211.1.
4. LCPC – Manuel de formulation des bétons.