



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID, TLEMCEM

**Faculté de technologie
Département de génie civil**

Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de master en génie civil

Spécialité : Réhabilitation intelligente des bâtiments

Thème

**Analyse des fissurations dans une structure en béton et
proposition d'une stratégie de réhabilitation : approche
expérimentale et gestion des risques : Etude de cas**

Présenté en juin 2026 par :

DJEZIRI RAHMA

et

KEHLI NISRIN

Devant le Jury composé de :

M. ABOU BEKR .N :	Professeur	Président
M. MAACHOU OMAR :	MAA	Examineur
Mme. BENACHENHOU K.A :	MCA	Encadrante
M. TALEB OMAR :	MCA	Encadrant

Année universitaire 2025-2026

REMERCIEMENT

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la volonté, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail, ainsi que la force de surmonter les difficultés rencontrées tout au long de son élaboration.

Nous adressons notre profonde gratitude à nos familles pour leur soutien constant, leurs encouragements et les sacrifices consentis tout au long de notre parcours universitaire. Leur présence et leur confiance ont été une source essentielle de motivation.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à nos encadrants, Mme.Benachenhou épouse Hakiki K.A. et M.Taleb Omar pour leur disponibilité, leurs précieux conseils, leur accompagnement et leurs orientations tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leurs remarques et leur encadrement ont grandement contribué à l'avancement et à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des membres du CDE, qui nous ont accueillies durant notre stage et ont contribué à son bon déroulement. Nous tenons particulièrement à remercier Douzi Ismail pour son accueil, sa disponibilité, son accompagnement ainsi que pour les conseils et les orientations qu'il nous a apportés tout au long de notre stage de deux mois.

Nos vifs remerciements s'adressent également à M. Abou Bekr.N pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider ce jury, ainsi qu'à M. Maachou Omar pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil pour la qualité de la formation reçue, leurs efforts et le savoir qu'ils nous ont transmis tout au long de notre cursus universitaire.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à notre collègue Younes Jihad Chaimaa, pour son aide, sa présence, sa disponibilité et son soutien tout au long de cette période.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À toutes et à tous, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Djeziri Rahma & Kehli Nisrin

إهداء

الحمد لله الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل.

أهدي ثمرة جهدي المتواضع هذا إلى أئمة الناس على قلبي...

إلى أبيي العزيز، سدي وفخري، الذي كان دائماً مصدر قوتي ودعمي، وكان حضوره وثقتي أكبر دافع لي لمواصلة الطريق. حفظك الله وأدامك تاجاً فوق رأسي.

إلى أمي الغالية، نبغ الحنان والرحمة، التي رافقتني بدعائها وصبرها ومحبتها في كل خطوة من مشواري، والتي كان لدعمها الأثر الكبير في بلوغي هذه المرحلة. أطال الله في عمرك وبارك فيك.

إلى أختي العزيزة شيماء، وإلى إخوتي الأحبة همام، حمزة وياسر، الذين كانوا دائماً إلى جانبي، أشاركهم هذه اللحظة بكل فخر ومحبة، وأسأل الله أن يديم علينا الألفة والمودة.

إلى عصفورة العائلة بنت أخي الحبيبة "نور إيلين"، ووالدتها الغالية، اللتين يملأ وجودهما حياتنا فرحاً وبهجة، أدام الله ضحككما وحفظكما لي.

إلى زميلتي ورفيقة هذا العمل نسرين، التي تقاسمنا معاً مشوار هذا البحث بكل ما حمله من تعب واجتهاد، فكان التعاون بيننا خير سند حتى إتمام هذا العمل.

إلى صديقتي المقربة إيناس، رفيقة دربي وسندي في كل الأوقات.

وإلى كل من ساندني، وشجعني، ودعا لي من قريب أو بعيد.

أهدي هذا العمل المتواضع، راجيةً من الله أن يجعله ثمرة خير وتوفيق.

جزيري رحمة

إهداء

الحمد لله الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل.

أهدي تخرجي إلى روح جدي الغالية،

ذلك الرجل الذي غادر الحياة مع بداية مشواري الجامعي، .

كم تمنيت أن تكون هنا لترى ثمرة تعبتي، ولأرى تلك النظرة المليئة بالفخر في عينيك
مرة أخرى.

إلى جدتي العزيزة، (أمي)

إلى المرأة التي كانت لي الأم والأب والسند في هذه الحياة...

شكرًا لأنك احتويتِ ضعفي قبل قوتي، وساندتِ أحلامي في أصعب اللحظات.

إلى أختي وبنات عمي وأقاربي،

شكرًا لأنكم كنتم دائمًا ذلك الدفء العائلي الذي يخفف عني ثقل الأيام، ولأن

وجودكم كان مصدر راحة وسعادة في حياتي.

إلى أعر صديقة، وأقرب روح إلى قلبي، إكرام بذكروني،

أنك لست مجرد صديقة بالنسبة لي... بل أنتِ الجزء الجميل من أيامي، والكتف الذي

أستند عليه كلما أثقلتني الحياة، والروح التي تشعر بي دون أن أتكلم.

كنتِ دائمًا بجانبتي في لحظات ضعفي قبل قوتي، وفي حزني قبل فرحي،

معك أدركت معنى الصداقة الحقيقية، ومعك أصبحت الحياة أخف وأجمل

شكرًا لأنك كنتِ عالمي الآمن، وسندي، وقلبي الثاني، وكل شيء جميل مرّ في حياتي.

مهما كتبت لن أستطيع وصف مكانتك في قلبي، فأنتِ نعمة أحمد الله عليها في كل

يوم.

إلى زميلتي وشريكتي في هذا العمل، رحمة ،
شكرًا لكِ على كل لحظة تعب واجتهاد وتقاسم للمسؤولية خلال هذا المشوار.
لقد جمعنا هذا العمل بالكثير من التحديات والذكريات، وأتمنى لكِ كل النجاح
والتوفيق في حياتك المهنية والشخصية.
إلى أصدقائي، من قريب ومن بعيد،
شكرًا لكل كلمة دعم، وكل موقف صادق، وكل شخص آمن بي ورافقني ولو بدعوة
طيبة أو حضور جميل.
وأخيرًا،
أهدي هذا العمل لكل من كان جزءًا من رحلتي،
فهذا الإنجاز ليس مجرد مذكرة تخرج، بل حكاية صبر، وحب، وذكريات ستبقى
محفورة في قلبي إلى الأبد.
كحلي نسرين

RESUME

Ce travail porte sur le diagnostic et la réhabilitation des structures en béton armé affectées par des phénomènes de fissuration. L'objectif principal est d'identifier les pathologies observées, d'analyser leurs causes et d'évaluer les risques associés afin de proposer des solutions d'intervention adaptées.

La démarche adoptée repose sur une approche structurée combinant l'analyse des fissurations, les méthodes de diagnostic des ouvrages et l'application d'outils de gestion des risques, notamment la méthode AMDEC, complétée par l'approche qualitative basée sur le jugement d'experts (méthode Hallowell).

Cette méthodologie est appliquée à une étude de cas portant sur une école primaire située à Djamaa Sakhra (Tlemcen). Le diagnostic réalisé a permis d'identifier les désordres majeurs, de hiérarchiser les risques selon leur criticité et de proposer des stratégies de réhabilitation cohérentes avec les exigences de sécurité et de durabilité.

Les résultats montrent que l'intégration de l'évaluation des risques dans le processus de diagnostic constitue un outil efficace d'aide à la décision en matière de réhabilitation des structures.

Mots-clés : fissuration, béton armé, diagnostic, réhabilitation, AMDEC, gestion des risques, durabilité.

ABSTRACT

This work focuses on the diagnosis and rehabilitation of reinforced concrete structures affected by cracking phenomena. The main objective is to identify the observed pathologies, analyze their causes, and assess the associated risks in order to propose appropriate intervention solutions.

The adopted approach is based on a structured methodology combining crack analysis, structural diagnostic methods, and the application of risk management tools, particularly the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method, complemented by the qualitative approach based on expert judgment (Hallowell method).

This methodology is applied to a case study of a primary school located in Djamaa Sakhra (Tlemcen). The diagnosis carried out made it possible to identify the major defects, prioritize risks according to their criticality, and propose rehabilitation strategies consistent with safety and durability requirements.

The results show that integrating risk assessment into the diagnostic process constitutes an effective decision-support tool for the rehabilitation of structures.

Keywords: cracking, reinforced concrete, diagnosis, rehabilitation, FMEA, risk management, durability.

يتناول هذا العمل تشخيص وإعادة تأهيل المنشآت الخرسانية المسلحة المتأثرة بظواهر التشقق. ويتمثل الهدف الرئيسي في تحديد الأضرار والاختلالات الملاحظة، وتحليل أسبابها، وتقييم المخاطر المرتبطة بها من أجل اقتراح حلول تدخل مناسبة.

تعتمد المنهجية المتبعة على مقارنة منظمة تجمع بين تحليل التشققات، وطرق تشخيص المنشآت، وتطبيق أدوات إدارة المخاطر، ولا سيما طريقة تحليل أنماط الإخفاق وتأثيراتها ودرجة خطورتها (AMDEC)، مع استكمالها بالمقاربة النوعية القائمة على حكم الخبراء طريقة (Hallowell).

وقد تم تطبيق هذه المنهجية على دراسة حالة تخص مدرسة ابتدائية تقع بولاية تلمسان. وقد مكّن التشخيص المنجز من تحديد أهم الأضرار، وترتيب المخاطر حسب درجة خطورتها، واقتراح استراتيجيات لإعادة التأهيل تتوافق مع متطلبات السلامة والاستدامة.

وتُظهر النتائج أن دمج تقييم المخاطر ضمن عملية التشخيص يشكل أداة فعالة لدعم اتخاذ القرار في مجال إعادة تأهيل المنشآت.

الكلمات المفتاحية: التشقق، الخرسانة المسلحة، التشخيص، إعادة التأهيل، AMDEC، إدارة المخاطر، الاستدامة.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: une fissure affecte une poutre en beton arme, batiment administratif chetouane [36]

Figure 1. 2: faïençage dans un enduit de façade d'un bloc administratif [42]

Figure 1. 3: fissure verticale dans un mur en beton arme [28]

Figure 1. 4: fissure horizontale, batiment administratif, chetouane [36]

Figure 1. 5: fissure en escalier dans un mur de façade batiment administratif, chetouane [36]

Figure 1. 6: fissure en moustache [5]

Figure 1. 7: fissure traversante, batiment administratif, chetouane [34]

Figure 1. 8: lezarde, batiment administratif, chetouane [36]

Figure 1. 9: illustration des fissures dues au retrait plastique du beton [37]

Figure 1. 10 : vibration du beton [38]

Figure 1. 11: ressuage de beton [3]

Figure 1. 12: schema de principe du clavetage au niveau d'un nœud poutre-poteau [3]

Figure 1. 13: une fissure verticale nette au joint entre un poteau en beton arme et un mur de maçonnerie en briques [39]

Figure 1. 14: difficultes de remplissage et de vibration du beton au droit des reseaux integres [3]

Figure 1. 15 : influence du tassement differentiel sur la fissuration d'une structure

Figure 1. 16: exemple de fissuration diagonale (45°) relevee au niveau des murs d'un laboratoire au l'universite de tlemcen [34]

Figure 1. 17 : le comportement thermique structurel selon la position de l'isolant [3]

Figure 1. 18: typologies des joints et exemple d'application sur les structures

Figure 1. 19 : mecanismes de fissuration du beton sous cycles de gel-degel [2]

Figure 1. 20: evolution de la carbonatation du beton et impact sur les armatures [3]

Figure 1. 21: degradation du beton sous l'action des chlorures [12]

Figure 1. 22: pathologies due a l'attaque sulfatique [32]

Figure 1. 23: alcali-reaction [33]

Figure 2. 1: classification des risques geotechniques : categorie n°01

Figure 2. 2: classification des risques geotechniques : categorie n°02

Figure 3. 1: la demarche methodologique de rehabilitation

Figure 3. 2: fissurometre –dispositif manuel [34] et numerique

Figure 3. 3: test choc-echo avec appareil olson's nde 360 [15]

Figure 3. 4: l'auscultation sonique des betons [15]

Figure 3. 5: sclerometre – mesure de la durete d'une surface beton [35]

Figure 3. 6: detection par fenetres et resultats [15]

Figure 3. 7: mesure du potentiel de corrosion [12]

Figure 3. 8: carbonatation sur carotte [12]

Figure 3. 9: graphique enrobage-carbonatation [15]

Figure 3. 10: carottage du beton arme [12]

Figure 3. 11: prelevement d'aciers [12]

Figure 3. 12: mise en œuvre d'une membrane bitumineuse d'etancheite [36]

Figure 3. 13: schema de la protection cathodique des armatures par anodes sacrificielles ou par courant impose [15]

Figure 3. 14: les differentes methodes de traitement des fissures [18]

Figure 3. 15: mise en œuvre et controle de l'injection des fissures [18]

Figure 3. 16: schema de calfeutrement des fissures par ouverture en v et en section rectangulaire [17]

Figure 3. 17: mise en œuvre du calfeutrement [17]

Figure 3. 18: pontage d'une fissure integrant une armature de renforcement [17]

Figure 3. 19: l'element de renforcement (armature) [17]

Figure 3. 20: schema de principe de realisation d'un joint de dilatation [17]

Figure 3. 21: mise en œuvre d'un ragreage manuel au mortier de reparation [12]

Figure 3. 22: schema projection de beton par voie seche [40]

Figure 3. 23: schema projection par voie humide [40]

Figure 3. 24: renforcement d'une structure en beton par feuille de fibres de carbone [15]

Figure 4. 1: vue satellitaire de l'emplacement de l'ecole primaire de jamaa sakhra [41]

Figure 4. 2: representation 3D des blocs pedagogiques de l'ecole realisee sous revit

Figure 4. 3: bloc A – partie ancienne realisee en maçonnerie de pierre a1 [43]

Figure 4. 4: façade principale du bloc pedagogique B realisee en beton [43]

Figure 4. 5 : vue d'ensemble des blocs pedagogiques C et d realises en beton [43]

Figure 4. 6 : indices de corrosion des armatures dans la partie 1 de bloc A [43]

Figure 4. 7: pathologies liees a l'humidite - traces au plafond de la partie A2 et remontees capillaires en partie inferieure de mur d'ancienne cantine [43]

Figure 4. 8: fissures diagonales visibles sur les deux faces du mur [43]

Figure 4. 9: fissurations du beton au niveau des poteaux [43]

Figure 4. 10: gonflement du revetement de sol du aux infiltrations d'eau [43]

Figure 4. 11: fissurations avancees des poteaux de 1er etage bloc C [43]

Figure 4. 12: fissurations longitudinales de poutres en beton arme induites par la corrosion des armatures bloc C [43]

Figure 4. 13: traces d'humidite observees au niveau du plafond du bloc C [43]

Figure 4. 14: effondrement partiel du plafond avec armatures apparentes au premier etage [43]

Figure 4. 15: fissurations des poteaux courts au premier etage du bloc D [43]

Figure 4. 16: eclatement du beton et mise a nu des armatures des poteaux de la cage d'escalier [43]

Figure 4. 17: degradations liees a l'humidite et decollement de l'enduit dans la cage d'escalier [43]

Figure 4. 18: eclatement localise du joint [43]

Figure 4. 19: mur de soutenelement et systeme de renforcement par contreforts [43]

Figure 4. 20: degradation des contreforts avec fissuration et eclatement de l'enrobage [43]

Figure 4. 21: degradation d'un poteau a section hybride [43]

Figure 4. 22: degradations sur les murs exterieurs de l'ecole [43]

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1: principaux types de fissures dans les structures en beton arme

Tableau 2. 1: applicabilite des techniques aux processus ISO 31000 [21]

Tableau 2. 2: les niveaux de l'evaluation de la gravite [26]

Tableau 2. 3: les niveaux de l'evaluation de la probabilite [26]

Tableau 2. 4: les niveaux de l'evaluation de la detectabilite [26]

Tableau 2. 5 : l'interpretation de la criticite [26]

Tableau 2. 6: niveaux de classification qualitative Hallowell

Tableau 3. 1: resultats des essais d'auscultation ultrasonique realises sur le beton (CEBTP) [15]

Tableau 3. 2: grille AMDEC type pour la rehabilitation

Tableau 3. 3: evaluation des modes de defaillance par la methode AMDEC et calcul de l'IPR

Tableau 3. 4 : criteres d'evaluation des solutions de rehabilitation des structures degradees

Tableau 3. 5: les techniques de rehabilitation recommandees

Tableau 3. 6: programme de suivi et de controle post-rehabilitation des structures

Tableau 3. 7: comparaison technique entre le ragreage et le beton projete [15]

Tableau 4. 1: classification de l'etat des differents blocs

Tableau 4. 2: decision de rehabilitation des desordres observes au niveau du cas d'etude

Tableau 4. 3: profils des experts selectionnes

Tableau 4. 4 : AMDEC (exemple d'etude de cas)

Tableau 4. 5: registre synthetique des risques et actions correctives proposees

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	V
ABSTRACT	VI
الملخص	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 Les fissures : typologie et causes	3
1.1. Introduction	4
1.2. La Typologie des fissurations.....	4
1.2.1. Définition de la fissure	4
1.2.2. Caractérisation des fissures dans une structure.....	5
1.2.3. Les différents types des fissures	6
1.2.4. Synthèse des principaux types de fissures dans les structures en béton armé	14
1.2.5. Détermination du caractère pathologique d'une fissure	15
1.2.6. Evaluation de criticité des fissures.....	16
1.3. Les causes des fissurations	17
1.3.1. Causes liées au matériau et à la mise en œuvre	17
1.3.2. Causes structurelles liées au comportement mécanique	23
1.3.3. Causes environnementales, climatiques et thermiques	25
1.3.4. Causes liées à la durabilité et aux agressions chimiques	29
1.4. Conclusion	33
CHAPITRE 2 Gestion des risques.....	34
2.1. Introduction	35
2.2. Définitions du risque	35
2.3. Définition de la gestion du risque.....	36
2.4. Processus de la gestion du risque	36

2.4.1. Identification des risques	36
2.4.2. Analyse du risque.....	37
2.4.3.Évaluation du risque.....	37
2.5. Traitement des risques	38
2.6. Les risques géotechniques	39
2.7. Outils et méthodes de la gestion des risques	41
2.8. A.M.D.E.C.....	44
2.8.1. Généralités sur la méthode.....	44
2.8.2. Principes fondamentaux de la méthode AMDEC	45
2.8.3. Objectifs de la méthode AMDEC	45
2.8.4. Démarche d'application de la méthode AMDEC	46
2.8.5. Paramètres d'évaluation de l'AMDEC	46
2.8.6. L'AMDEC dans l'évaluation des risques	48
2.9. Processus de sélection des experts.....	49
2.10. La méthode Hallowell — évaluation qualitative des risques par jugement d'experts structuré	49
2.10.1. Contexte et justification	49
2.10.2. Définition et fondements scientifiques	50
2.10.3. Niveaux de classification qualitative	50
2.10.4. Application dans ce travail.....	51
2.10.5. Articulation entre l'AMDEC et la méthode Hallowell.....	51
2.11. Conclusion	51
CHAPITRE 3 Méthodologie et réparations.....	53
3.1. Introduction	54
3.2. La démarche méthodologique	54
3.2.1. Première étape : collecte des documents	56
3.2.2. Deuxième étape : diagnostic structurel	56

3.2.3. Troisième étape : évaluation et gestion des risques	68
3.2.4. Quatrième étape : stratégie de réhabilitation : analyse des scénarios, choix et mise en œuvre.....	72
3.2.5. Cinquième étape : suivi, contrôle et retour d'expérience.....	77
3.3. Approche générale de la réparation des ouvrages en béton.....	80
3.3.1. Contexte et démarche de réparation.....	80
3.3.2. Organisation des interventions de réparation.....	80
3.3.3. Méthodes de protection et remise en état du béton.....	81
3.3.4. Méthode de traitement des armatures métalliques.....	84
3.3.5. Synthèse	85
3.4. Techniques de traitement et de réparation des fissures	86
3.4.1. L'injection des fissures	87
3.4.2. Le cachetage.....	88
3.4.3. Le colmatage	88
3.4.4. Le calfeutrement	88
3.4.5. Le pontage et la protection localisée.....	91
3.4.6. La protection généralisée	92
3.4.7. Autres techniques et dispositions communes.....	92
3.5. Méthodes complémentaires de renforcement du béton	93
3.5.1. Le ragréage manuel et le béton projeté	93
3.5.2. Protocole de préparation et traitement des aciers	96
3.5.3. Renforcement par tissus de fibres de carbone.....	97
3.6. Conclusion.....	98
CHAPITRE 4 Etude de cas - diagnostic et proposition de réhabilitation de l'école primaire Benamar Mosteghanemi.....	100
4.1. Introduction	101
4.2. Présentation générale du projet.....	101

4.3. Analyse pathologique de l'ouvrage et identification des désordres	104
4.3.1. Bloc A	104
4.3.2. Bloc B	106
4.3.3. Bloc C	108
4.3.4. Bloc D	111
4.3.5. Mur de soutènement.....	114
4.3.6. Eléments secondaires	116
4.3.7. Classification de l'état des différents blocs.....	118
4.3.8. Tableau de décision de réhabilitation des désordres observés.....	118
4.4. Processus de gestion des risques par couplage AMDEC–Hallowell.....	120
4.4.1. Identification des risques	120
4.4.2. Sélection des experts.....	120
4.4.3. Analyse et évaluation des risques par la méthode AMDEC	121
4.4.4. Hiérarchisation des risques	123
4.5. Proposition des solutions de réhabilitation et mesures préventives	125
4.5.1. Traitement des problèmes d'humidité et d'étanchéité	125
4.5.2. Traitement des fissures	126
4.5.3. Réhabilitation des éléments en béton armé dégradés.....	126
4.5.4. Renforcement structurel des éléments critiques.....	127
4.5.5. Mesures préventives et gestion des risques	127
4.5.6. Priorisation des interventions.....	128
4.6. Conclusion.....	129
CONCLUSION GENERALE	130
Annexes	131
FICHE 0 - CONTEXTE DE L'OUVRAGE ET HISTORIQUE.....	133
FICHE 1 - INSPECTION VISUELLE	135

FICHE 2 - INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES : END, ESD ET ESSAIS DE LABORATOIRE	138
FICHE 3 - ANALYSE AMDEC — HALLOWELL	141
FICHE 4 - SUIVI POST-TRAVAUX	143
FICHE 5 - SYNTHÈSE GLOBALE ET DÉCISION	145
BIBLIOGRAPHIE	147
WEBOGRAPHIE	150

INTRODUCTION GENERALE

Les contraintes économiques, environnementales et sociales rendent aujourd'hui la démolition et la reconstruction systématiques de plus en plus difficiles à envisager. Dans un contexte marqué par la raréfaction des ressources, l'augmentation du coût des matériaux et les exigences croissantes en matière de développement durable, la réhabilitation des ouvrages existants s'impose comme une alternative stratégique. Elle permet de prolonger la durée de service des structures, de réduire les coûts globaux, de limiter l'empreinte carbone et de préserver le patrimoine bâti. Toutefois, toute opération de réhabilitation pertinente repose impérativement sur un diagnostic fiable de l'état réel de la structure, fondé sur une compréhension approfondie des mécanismes de dégradation et des pathologies observées.

Parmi ces pathologies, la fissuration constitue l'un des désordres les plus fréquents et les plus complexes dans les structures en béton armé. Elle touche non seulement les ouvrages anciens, arrivés à un stade avancé de leur cycle de vie, mais également des constructions récentes, ce qui soulève des interrogations quant à la qualité de conception, d'exécution, de contrôle et de maintenance. À l'échelle internationale, de nombreux bâtiments présentent des fissures liées à des phénomènes variés : retrait, variations thermiques, surcharge, défauts de mise en œuvre, corrosion des armatures ou agressivité environnementale. Or, une intervention réalisée sans identification précise de l'origine des pathologies risque d'être inefficace, inadaptée, voire aggravante, entraînant des surcoûts et compromettant la sécurité de l'ouvrage.

Cette problématique revêt une importance particulière en Algérie, où une part significative du parc bâti, notamment les établissements scolaires et les bâtiments publics en béton armé construits au cours des dernières décennies, présente aujourd'hui des signes de dégradation. Situé en zone sismique et soumis à des conditions climatiques parfois sévères, le territoire national est exposé à des sollicitations susceptibles d'accélérer l'évolution des désordres et d'affecter la capacité portante des structures. Dans ce contexte, la réhabilitation ne constitue pas uniquement une opération d'entretien courant, mais représente un enjeu majeur de sécurité publique, de gestion des risques et de préservation du patrimoine bâti.

Face à cette réalité, la problématique de ce travail peut être formulée autour de la question suivante : comment identifier et interpréter les fissures observées dans une structure en béton armé, évaluer les risques qu'elles engendrent et proposer des solutions de réhabilitation adaptées permettant d'assurer la sécurité, la durabilité et la pérennité de l'ouvrage ?

Afin de répondre à cette problématique, ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré à l'étude des fissures dans les structures en béton armé, à travers la présentation de leurs différentes typologies ainsi que l'analyse des principales causes mécaniques, physiques, environnementales et chimiques pouvant être à l'origine de leur apparition. Le deuxième chapitre aborde les principes fondamentaux du management des risques et présente les outils retenus pour leur identification, leur évaluation et leur hiérarchisation, notamment la méthode AMDEC complétée par l'approche Hallowell.

Le troisième chapitre expose la méthodologie générale adoptée pour le diagnostic des ouvrages dégradés, les différentes techniques d'investigation disponibles ainsi que les principales méthodes de réparation et de renforcement applicables aux structures en béton armé. Enfin, le quatrième chapitre présente l'étude de cas réalisée sur l'école primaire Benamar Mosteghanemi située à Djamaa Sakhra (wilaya de Tlemcen), en appliquant concrètement la démarche développée dans les chapitres précédents afin d'identifier les pathologies observées, d'évaluer les risques associés et de proposer des solutions de réhabilitation adaptées.

À travers cette démarche, ce travail vise à contribuer à une meilleure compréhension des pathologies affectant les ouvrages en béton armé et à proposer une approche structurée de diagnostic et de réhabilitation, adaptée au contexte local et orientée vers la préservation durable du patrimoine bâti.

CHAPITRE 1

Les fissures : typologies et causes

1.1. Introduction

La fissuration constitue l'une des manifestations les plus fréquentes observées dans les structures en béton armé. Elle résulte de l'action de divers phénomènes pouvant être d'origine mécanique, physique, chimique ou environnementale, qui influencent le comportement du matériau et de la structure. Bien que certaines fissures soient inhérentes au fonctionnement normal du béton, d'autres peuvent traduire l'existence de désordres susceptibles d'affecter la durabilité, la fonctionnalité ou la sécurité de l'ouvrage. Ainsi, l'apparition de fissures ne doit pas être considérée uniquement comme un défaut esthétique, mais plutôt comme un indicateur révélateur de l'état et du comportement de la structure.

Dans le domaine de la pathologie des constructions, l'analyse des fissures constitue une étape essentielle pour comprendre les mécanismes responsables de leur formation et orienter les démarches de diagnostic et d'intervention. Cette analyse repose notamment sur l'identification des différentes formes de fissuration, l'observation de leurs caractéristiques ainsi que l'étude des facteurs susceptibles de provoquer leur apparition. La connaissance des typologies de fissures permet en effet de mieux interpréter les signes visibles sur les ouvrages et de relier ces manifestations aux causes qui les ont engendrées.

Dans ce cadre, ce chapitre est consacré à la présentation des principales typologies de fissures observées dans les structures en béton armé, ainsi qu'à l'analyse des différentes causes susceptibles d'être à l'origine de leur apparition.

L'analyse des fissures ne se limite pas à leur identification, mais constitue une première étape du diagnostic permettant d'orienter l'évaluation des risques et les décisions de réhabilitation.

1.2. La Typologie des fissurations

1.2.1. Définition de la fissure

Une fissure est une discontinuité localisée dans un matériau, caractérisée par une réduction ou une annulation des contraintes de traction à l'endroit de son ouverture. Elle apparaît sous l'effet de diverses sollicitations mécaniques, telles que la traction, la compression ou le cisaillement, et peut se produire aussi bien sous des charges statiques que sous l'effet de la fatigue, liée aux charges permanentes, aux surcharges ou aux variations et déplacements des charges appliquées à la structure [1].

Dans le cas du béton armé, la fissuration constitue un phénomène quasi inévitable, en raison de la faible résistance à la traction du béton, de ses propriétés intrinsèques et des conditions variables de mise en œuvre et de sollicitation. La plupart du temps, ces fissures restent très fines et peu visibles, mais leur apparition doit être prise en compte dans l'analyse et le diagnostic des pathologies du béton [2].

1.2.2. Caractérisation des fissures dans une structure

La caractérisation d'une fissure repose sur plusieurs paramètres essentiels permettant d'en évaluer la nature et le degré de gravité [3] :

1.2.2.1. L'ouverture

Correspond à la largeur mesurée entre les lèvres de la fissure, elle peut être estimée visuellement ou mesurée avec précision à l'aide d'un fissuromètre et constitue un indicateur direct de l'importance du désordre.

1.2.2.2. Le tracé

Représente le développement visible de la fissure, et s'observe sur une ou plusieurs faces de l'élément structurel, ce qui permet d'identifier la direction et l'étendue du phénomène fissuratif.

1.2.2.3. La profondeur

Renseigne sur le caractère traversant ou non de la fissure.

On distingue :

- Fissure superficielle : limitée à la surface, sans traverser l'épaisseur de l'élément.
- Fissure traversante : visible sur au moins deux faces de la structure.
- Fissure aveugle : traversante mais inaccessible sur une ou plusieurs faces

1.2.2.4. L'activité

Paramètre déterminant en phase de diagnostic et de réhabilitation.

Permet d'évaluer l'évolution de l'ouverture dans le temps.

Les fissures sont classées selon leur comportement :

- Fissure passive (ou morte) : ouverture stable, indépendante des variations de température ou de sollicitation.
- Fissure active : ouverture évolutive sous l'effet des actions thermiques, hygrométriques ou mécaniques.
- Fissure stabilisée : variations limitées, principalement liées aux effets thermiques.
- Souffle : amplitude de variation de l'ouverture d'une fissure active.

La compréhension des différentes typologies de fissures permet d'établir une première interprétation des désordres et de distinguer les situations nécessitant une simple surveillance de celles nécessitant un diagnostic approfondi.

1.2.3. Les différents types des fissures

1.2.3.1. Les fissures aux poutres en béton armé

Les fissures affectant les poutres en béton armé découlent principalement des sollicitations internes provoquées par les charges verticales exercées sur une poutre reposant sur deux appuis (**Figure 1.1**), à savoir le moment fléchissant et l'effort tranchant [4]. Le moment fléchissant déforme la poutre vers le bas, créant des contraintes de traction dans l'inférieure et des contraintes de compression dans l'extrême. Les forces de traction sont les plus fortes au milieu de la portée, surtout en cas de chargement réparti, ce qui peut conduire à l'apparition progressive de fissures de flexion d'orientation généralement verticale, s'ouvrant dans la zone tendue et se refermant vers la zone comprimée. En raison de la résistance à la compression du béton mais de la faible résistance à la traction, la reprise de ces efforts est assurée par des armatures longitudinales situées en bas de la poutre. De plus, près des appuis, la poutre est soumise à des efforts tranchants susceptibles de créer des fissures inclinées, typiques du cisaillement, et qui peuvent nuire à la sécurité structurale si elles ne sont pas gérées [4]. Des armatures transversales, appelées cadres, sont installées et les armatures longitudinales peuvent être relevées vers les appuis pour améliorer la résistance au cisaillement. De ce fait, la connaissance et l'étude de ces mécanismes de fissuration sont indispensables pour assurer la résistance, la stabilité et la sécurité des poutres en béton armé.

Les fissures du moment fléchissant d'une poutre en béton armé se forment progressivement en raison de la rupture du béton dans la zone de traction. Leur croissance est accompagnée, avant la rupture finale, d'un allongement plastique des armatures longitudinales, ce qui reflète leur contribution accrue à la reprise des efforts de traction. Avant d'atteindre cet état critique, les armatures supérieures, appelées armatures en chapeau et situées au droit des appuis, sont sollicitées et contribuent à la répartition des efforts, ce qui permet de créer un nouvel équilibre structural, appelé adaptation du béton armé [4]. Cependant, les déformations anormales de la poutre sont un signe d'alerte pour l'état de l'élément structural. De leur côté, les fissures causées par l'effort tranchant sont soudaines et peuvent provoquer une rupture brutale de la poutre, ce qui les rend particulièrement fragiles. L'étude des fissures sur les poutres est donc indispensable pour évaluer leur impact sur la solidité et la sécurité de la structure et déterminer la nécessité d'éventuelles actions correctives, telles que le renforcement, le déchargement de l'ouvrage ou la mise en place d'un étalement, surtout dans les cas où les fissures sont insuffisantes en résistance à l'effort tranchant.



Figure 1.1: une fissure affecte une poutre en béton armé, bâtiment administratif chetouane [36]

1.2.3.2. Les fissures d'enduit : microfissure et faïençage

Les fissures de très faible dimension observées sur les murs correspondent généralement à des fissures d'enduit, qui affectent uniquement la couche de revêtement superficielle sans atteindre la structure porteuse (**Figure 1.2**). Parmi ces fissurations, on distingue notamment les microfissures, dont la largeur est généralement inférieure à 0,2 mm [5], souvent causées par une mauvaise mise en œuvre de l'enduit, des variations d'humidité ou le vieillissement du matériau. On retrouve également le faïençage, caractérisé par un réseau de fissures fines entrecroisées formant des motifs semblables à une toile d'araignée, avec une largeur pouvant atteindre 1 mm [5], généralement dû au retrait de l'enduit provoqué par un excès d'eau dans le mortier ou un séchage trop rapide.

Ces fissures sont généralement sans danger pour la stabilité de l'ouvrage et relèvent principalement d'un défaut esthétique. Toutefois, elles peuvent à long terme favoriser la pénétration de l'humidité [5], ce qui nécessite une surveillance et, si nécessaire, un traitement par rebouchage avec un enduit adapté afin de préserver la durabilité du revêtement.



Figure 1. 2: faïençage dans un enduit de façade d'un bloc administratif [42]

1.2.3.3. Les fissures aux murs en béton

Les fissures traversant les murs sont généralement classées en six catégories principales :

a. Fissure verticale

La fissure verticale est une pathologie fréquente des ouvrages (**Figure 1.3**), souvent associée à des légers troubles des fondations. Mais elle est généralement bénigne à ses débuts. Dans le cas où son ouverture reste inférieure à 2 mm, il est recommandé de surveiller régulièrement son développement [5], notamment par l'installation de témoins permettant de détecter tout changement dimensionnel. À l'inverse, une augmentation de son ouverture ou la multiplication des fissures verticales peut indiquer un problème structurel plus grave, qui nécessite l'intervention d'un expert pour diagnostic complet [5]. Même si la fissure n'évolue pas, le traitement et le colmatage restent recommandés pour éviter les infiltrations d'eau et les dégradations futures de la façade.



Figure 1. 3: fissure verticale dans un mur en béton armé [28]

b. Fissure horizontale

Les fissures horizontales, qui se manifestent par une orientation parallèle au sol(**Figure 1.4**), sont souvent présentes au droit des planchers, où elles reflètent souvent un léger défaut de maçonnerie ou une faiblesse située à la jonction mur-plancher. Cependant, leur présence en dehors de ces zones, surtout lorsqu'elles sont profondes ou ouvertes, peut être un signe inquiétant d'un dysfonctionnement structurel, comme un défaut de chaînage dû à un dimensionnement inadéquat ou à une mauvaise répartition des charges [5]. Une telle situation peut fragiliser l'ensemble de l'ouvrage, les murs ne pouvant alors pas répondre correctement aux efforts verticaux. De ce fait, les fissures horizontales nécessitent une vigilance particulière, plus grande que celle habituellement portée aux fissures verticales, et toute évolution rapide ou aggravation de leur ouverture doit entraîner l'appel d'un expert pour un diagnostic approfondi.



Figure 1. 4: fissure horizontale, bâtiment administratif, chetouane [36]

c. Fissure en escalier

La fissure en escalier se présente par un tracé en gradins (**Figure 1.5**). Elle se rencontre le plus souvent dans les murs en briques ou en parpaings et, lorsqu'elle est profonde, elle reflète des vibrations différentes qui affectent la maçonnerie, montrant une désolidarisation progressive des éléments constitutifs du mur. Ce type de fissuration est très préoccupant, car il peut être le signe d'un dysfonctionnement structurel causé par un tassement des fondations ou par des variations du sol subjacent. En raison de la gravité de ces mécanismes, l'existence d'une fissure en escalier, surtout lorsqu'elle évolue ou s'aggrave, nécessite l'intervention rapide d'un expert pour établir un diagnostic précis et évaluer les actions correctives adéquates [5].



Figure 1. 5: fissure en escalier dans un mur de façade bâtiment administratif, chetouane [36]

d. Les fissures autour des ouvertures (en moustache)

Les fissures en moustache se forment généralement à partir des angles des ouvertures, surtout au droit des menuiseries (portes et fenêtres), se manifestant sous les appuis ou dans les angles supérieurs et inférieurs des baies (**Figure 1.6**). Elles découlent le plus souvent d'une faiblesse de la maçonnerie au niveau des appuis et des linteaux, signe d'une faiblesse structurelle située dans la zone de reprise des charges autour des ouvertures [5]. Une première fissure peut apparaître à l'angle supérieur de la fenêtre, puis une deuxième à l'angle inférieur, ce qui montre une concentration des contraintes dans ces deux points spécifiques. Lorsque ces fissures sont superficielles, elles ne sont généralement pas alarmantes ; cependant, leur profondeur et leur évolution doivent être examinées pour éviter tout désordre structurel sous-jacent. En cas de construction récente, l'apparition de fissures en moustache justifie la demande au constructeur pour un contrôle et une correction du défaut observé.



Figure 1. 6: fissure en moustache [5]

e. Fissure traversante

La fissure traversante fait partie des désordres structurels les plus fréquents (**Figure 1.7**). Cette profondeur montre un impact important de la structure, ce qui donne à ce type de fissuration un caractère particulièrement grave. Au-delà de son aspect visuel, elle présente des risques réels, tels que la fragmentation et la chute de fragments de matériaux, ainsi qu'une accentuation d'une instabilité générale du bâti. Les causes de ce phénomène sont le plus souvent des défauts de fondations ou des vibrations du sol, surtout lorsque la fissure est brutale. Dans ce cas, l'intégrité structurelle de l'ouvrage et, donc, son habitabilité peuvent être gravement compromises, ce qui nécessite l'application rapide d'un diagnostic technique approfondi et de mesures correctives appropriées [5].



Figure 1. 7: fissure traversante, bâtiment administratif, chetouane [34]

f. Lézarde

La lézarde est une fissuration profonde et ouverte de la maçonnerie qui se manifeste par une véritable crevasse dans le mur (**Figure 1.8**). De manière traditionnelle, toute fissure supérieure à 2 mm est appelée lézarde [5], ce qui lui confère un caractère structurellement préoccupant, capable d'affecter la stabilité de l'ouvrage et, dans les cas les plus graves, de rendre inhabitable l'ouvrage. L'apparition soudaine de son éruption peut être liée à un événement violent comme un séisme ou à une instabilité accentuée du sol, ce qui peut faire l'objet d'une prise en charge assurantielle. Par contre, si la lézarde résulte d'une aggravation progressive d'une fissure existante, la cause est souvent due à une mauvaise conception ou à un dysfonctionnement des fondations. De ce fait, l'identification précoce et la surveillance attentive des fissures évolutives en façade sont des actions indispensables pour éviter l'aggravation des troubles et l'ouverture rapide des enquêtes techniques.



Figure 1. 8: lézarde, bâtiment administratif, chetouane [36]

1.2.4. Synthèse des principaux types de fissures dans les structures en béton armé

Afin d'établir un lien entre les typologies de fissures et leur interprétation dans le cadre du diagnostic, le tableau suivant propose une classification synthétique des fissures en fonction de leurs caractéristiques, de leurs causes et de leur niveau de criticité. Cette synthèse constitue un outil d'aide à l'identification et à la hiérarchisation des désordres.

Tableau 1. 1: principaux types de fissures dans les structures en béton armé

Type de fissure	Cause probable	Ouverture	Gravité	Criticité	Implication
Microfissures / Faïençage	Retrait du béton, dessiccation, défaut d'enduit	< 0,2 mm	Faible	Faible	Désordre superficiel, impact esthétique, surveillance simple
Fissures verticales	Retrait, tassement léger, flexion	< 2 mm	Modérée	Moyenne	Surveillance de l'évolution, diagnostic si aggravation
Fissures horizontales	Défaut structurel (mauvaise reprise des charges, défaut de liaison)	> 2 mm	Élevée	Élevée	Diagnostic structurel nécessaire
Fissures en escalier	Tassement différentiel des fondations	Variable	Élevée	Élevée	Désordre structurel localisé, nécessite expertise
Fissures diagonales	Efforts tranchants, instabilité du sol	Variable (> 2 mm en général)	Élevée	Élevée	Indicateur de dysfonctionnement structurel

Fissures traversantes	Surcharge, instabilité du sol, défaut de conception	≥ 2 mm (souvent importantes)	Très élevée	Critique	Risque de perte de stabilité structurelle
Lézardes importantes	Instabilité globale, dégradation avancée des fondations	> 2 mm (ouverture importante)	Très élevée	Critique	Danger pour la sécurité, intervention urgente

Cette classification permet de distinguer les fissures superficielles des fissures à caractère structurel, et constitue une base essentielle pour l'évaluation des risques et l'orientation des décisions de réhabilitation qui seront développées dans les chapitres suivants.

1.2.5. Détermination du caractère pathologique d'une fissure

Les fissures dans les ouvrages en béton doivent être distinguées des fissures pathologiques, signes d'une dégradation interne ou d'un dysfonctionnement structurel, des fissures pathogènes, susceptibles de causer des dommages en cas de conditions défavorables. Il s'agit de trois critères principaux : l'origine de la fissure, son environnement et son ouverture.

1.2.5.1. Les fissures pathogènes

Une fissure devient pathogène quand son ouverture est supérieure à 0,3 mm et qu'elle est exposée à un milieu agressif, comme une façade non couverte. De plus près de cette limite, les forces de tension superficielles interdisent l'infiltration de l'eau en phase liquide et limitent le transport d'ions, ce qui protège le béton et les aciers. L'eau et les produits chimiques peuvent pénétrer, réduire le pH et entraîner la corrosion des armatures, ce qui donne à la fissure un potentiel destructeur.

1.2.5.2. Les fissures pathologiques

Les fissures pathologiques reflètent un défaut structurel ou un processus de dégradation du béton.

- D'origine mécanique : une fissure d'ouverture supérieure à 0,3 mm signifie que la force appliquée sur l'acier a dépassé la limite élastique, ce qui a conduit à sa plastification.
- D'origine chimique ou physico-chimique : les fissures causées par la carbonatation, l'attaque par les chlorures ou sulfates, ou la réaction alcali-granulat sont pathologiques dès leur apparition, quel que soit leur ouverture, car elles sont directement représentatives d'une dégradation du béton.

La détermination d'une fissure repose donc sur la relation entre son origine, son ouverture et l'environnement dans lequel elle se trouve, qui détermine son caractère potentiellement dangereux et la nécessité d'une intervention pour préserver la durabilité de l'ouvrage [3].

Ainsi, une fissure ne peut être considérée comme pathologique que si elle combine plusieurs facteurs défavorables, notamment une ouverture importante, une origine structurelle ou une exposition à un environnement agressif.

1.2.6. Evaluation de criticité des fissures

La gravité d'une fissure est évaluée en fonction de plusieurs critères techniques : son environnement d'origine, sa morphologie et son évolution dans le temps. Après avoir identifié les différents types de fissures, il est possible d'évaluer leur caractère potentiellement pathologique en fonction des facteurs suivants :

1.2.6.1. Situation de construction

Dans une maison neuve ou très récente, les fissures profondes indiquent généralement une malfaçon, souvent située au niveau des fondations. Il faut alors intervenir rapidement pour préserver les garanties légales, notamment la garantie biennale.

1.2.6.2. Typologie de la fissure

Les fissures horizontales et en escalier sont généralement plus dangereuses, car elles peuvent être associées à des troubles structurels. Cependant, une fissure verticale n'est pas toujours bénigne.

1.2.6.3. Évolution dans le temps

Une fissure fixe peut être le résultat d'un mouvement occasionnel du sol, tandis qu'une fissure évolutive est souvent le résultat d'un mécanisme actif, susceptible d'aggraver les troubles structurels. La surveillance continue est donc nécessaire.

1.2.6.4. Largeur et profondeur

Toute fissure supérieure à 2 mm, les fissures traversantes ou les lézardes sont préoccupantes et nécessitent un diagnostic approfondi.

1.2.6.5. Multiplication des fissures

La multiplication des fissures sur une même façade est un signe d'alarme, indiquant un dysfonctionnement global de l'ouvrage.

La mise en place d'un témoin de fissuration, notamment en plâtre, permet de suivre son évolution. La rupture de ce système indique une activité continue et nécessite l'intervention d'un expert pour évaluer la gravité du problème et les mesures correctives adéquates. [5]

Cette évaluation qualitative de la criticité permet d'établir une première hiérarchisation des fissures. Elle sera approfondie dans le chapitre suivant à travers l'application des méthodes d'analyse des risques, notamment la méthode AMDEC.

1.3. Les causes des fissurations

1.3.1. Causes liées au matériau et à la mise en œuvre

Les propriétés du béton et les conditions de sa mise en œuvre jouent un rôle déterminant dans l'apparition des fissurations. En effet, un béton mal formulé ou mal exécuté peut développer des contraintes internes qui dépassent sa résistance en traction, entraînant ainsi la formation de fissures dès les premières phases de vie de l'ouvrage.

1.3.1.1. Retrait du béton

Le retrait du béton correspond à une contraction de la pâte de ciment résultant de phénomènes hydriques, thermiques ou mécaniques, pouvant se produire avant, pendant ou après la prise. Cette contraction engendre des contraintes de traction susceptibles de provoquer des fissures lorsque la résistance du béton est dépassée. Le béton est soumis à plusieurs types de retrait pouvant se cumuler : retrait plastique (**Figure 1.9**), retrait d'auto-dessiccation, retrait thermique et retrait de dessiccation à long terme. L'importance de ces retraits dépend notamment de la formulation du béton, de la géométrie de l'ouvrage, des conditions climatiques et de la qualité de la mise en œuvre, en particulier de la cure [7].

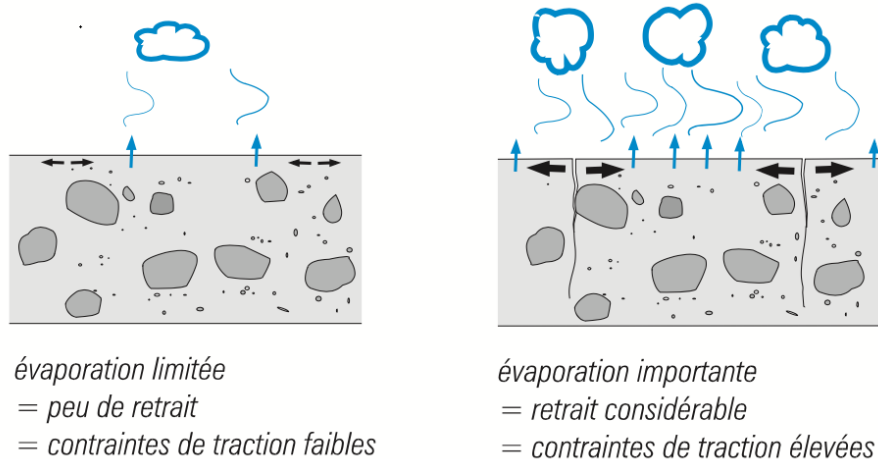


Figure 1. 9: illustration des fissures dues au retrait plastique du béton [37]

1.3.1.2. L'ajout d'eau

L'ajout d'eau au béton lors de sa mise en œuvre est une pratique susceptible de provoquer des problèmes de fissuration. Bien qu'il permette d'améliorer l'ouvrabilité du béton et de faciliter sa mise en place, il a des effets défavorables sur les performances mécaniques.

En augmentant le rapport eau/ciment (E/C), l'ajout d'eau entraîne une augmentation de la porosité capillaire du béton. Cette modification de la structure interne se traduit par une diminution de la résistance mécanique ainsi que par une réduction de la résistance du béton face aux agents agressifs, ce qui favorise l'apparition de fissures et accélère les phénomènes de dégradation [3].

1.3.1.3. La vibration

La vibration du béton a pour objectif d'assurer le bon remplissage des coffrages, le serrage du béton et sa désaération, en favorisant l'imbrication des granulats et l'évacuation de l'air emprisonné (**Figure 1.10**).

Cependant, la vibration doit être adaptée à la nature de l'élément à bétonner et correctement maîtrisée. Une vibration excessive ou mal appliquée peut entraîner des défauts de parement, tels que des fantômes d'armatures, ainsi que l'apparition de fissures, notamment en accentuant le phénomène de ressuage.

Et provoquer la ségrégation, c'est-à-dire la séparation des constituants du béton frais, pouvant résulter d'un malaxage insuffisant ou d'une vibration exagérée [3].



Figure 1. 10 : vibration du Béton [38]

1.3.1.4. Le ressuage

Le ressuage est un phénomène qui se manifeste par l'apparition d'un film d'eau clair à la surface libre du béton frais, en particulier sur les surfaces horizontales (**Figure 1.11**). Il est lié au tassement progressif du squelette granulaire sous l'effet de la gravité, accompagné d'une remontée simultanée de l'eau, expulsée vers la surface.

Ce phénomène peut conduire à la formation de fissures, notamment au droit des zones où le tassement du béton est localement entravé, telles que la présence d'armatures ou les variations d'épaisseur de l'élément. Dans ces conditions, le tassement différentiel du béton génère des contraintes susceptibles d'engendrer une fissuration [3].



Figure 1. 11: ressuage de Béton [3]

1.3.1.5. Influence des coffrages et du décoffrage prématuré

Les coffrages, bien que conçus pour supporter le poids du béton frais, restent déformables, et ces déformations peuvent provoquer des fissures dans les zones encore jeunes du béton. De plus, un décoffrage prématuré avant que le béton ait acquis une résistance suffisante peut entraîner des déformations, des fissures dans les parties tendues et des microfissures affectant la durabilité. Pour éviter ces problèmes, il convient de vérifier la conception et le montage des coffrages et de les maintenir en place jusqu'à ce que le béton soit assez résistant, en tenant compte de son durcissement et des conditions climatiques [6].

1.3.1.6. Les liaisons entre les éléments

a. Effets des reprises de bétonnage sur la fissuration

Les reprises de bétonnage constituent des zones de fragilité dans les structures en béton. Lorsque le béton frais est coulé contre un béton déjà durci, il subit un retrait empêché, ce qui favorise l'apparition de fissures. De plus, la présence du béton durci perturbe l'arrangement des granulats, rendant la zone de reprise plus riche en pâte du côté du béton frais comparativement au béton courant. Cette particularité entraîne une augmentation du retrait [3].

b. Influence des clavetages sur l'apparition des fissures

Prenons le cas d'un poteau servant d'appui à quatre poutres. Dans un objectif de rendement, les poutres ont été réalisées en préfabrication. Leur transport et leur mise en place peuvent provoquer des fissures en raison des chocs subis par ces éléments.

Le clavetage de ces poutres représente un point essentiel puisqu'il s'agit d'un nœud structural assurant la transmission de nombreux efforts. Une mauvaise exécution du clavetage peut ainsi entraîner l'apparition de fissures au niveau de la tête du poteau (**Figure 1.12**).

Les aspects déterminants du clavetage concernent le positionnement adéquat des armatures, la réalisation d'un coffrage étanche afin d'éviter les pertes de laitance et la formation de nids de cailloux, ainsi que l'utilisation d'un béton présentant une résistance suffisante et bénéficiant d'une vibration appropriée [3].

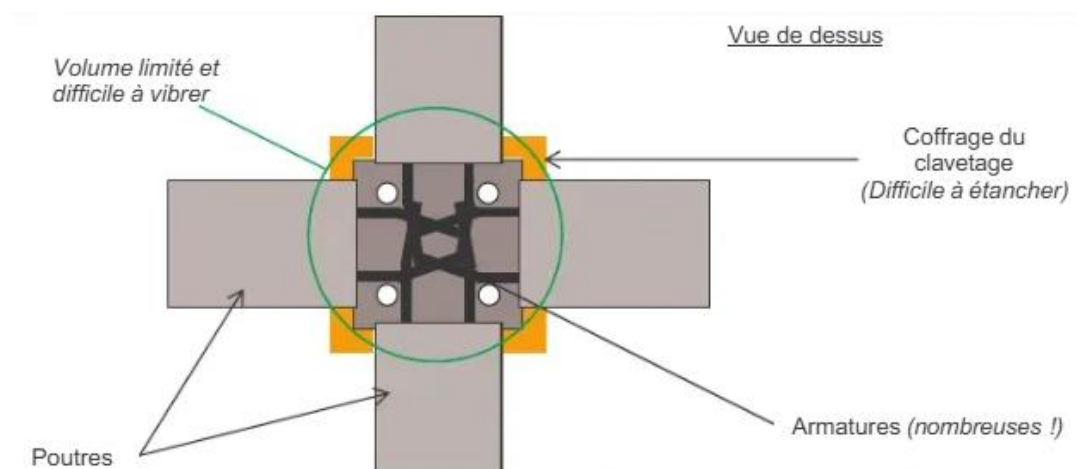


Figure 1. 12: schéma de principe du clavetage au niveau d'un nœud poutre-poteau [3]

c. Problèmes liés à l'interface béton armé–maçonnerie

Les éléments en maçonnerie présentent un comportement légèrement différent de celui du béton. Leur résistance en traction étant très faible, elle peut être considérée comme quasiment nulle, notamment au niveau des joints entre les parpaings (ou brique).

Les structures en maçonnerie sont souvent associées à des éléments en béton armé, tels qu'un linteau de fenêtre, un plancher ou une jonction poteau-mur (**Figure 1.13**). La liaison entre ces deux types d'éléments peut engendrer des fissures en raison de la différence de comportement entre les deux matériaux [3].



Figure 1. 13: une fissure verticale nette au joint entre un poteau en béton armé et un mur de maçonnerie en briques [39]

1.3.1.7. La mise en place des armatures

Lors de l'exécution, il est indispensable que toutes les armatures prévues par le bureau d'études soient installées et positionnées conformément aux plans. Pour certains éléments, un mauvais emplacement des armatures les empêche d'assurer leur fonction et peut entraîner des désordres au niveau de l'ouvrage.

Prenons l'exemple d'un balcon en porte-à-faux. Si les armatures sont placées dans la partie inférieure de l'épaisseur de la dalle, elles ne peuvent pas remplir leur rôle, ce qui peut, dans les cas les plus graves, provoquer la chute du balcon.

Sur chantier, la gestion de la superposition des différents lits d'armatures prévus par le bureau d'études peut s'avérer complexe, voire parfois difficilement réalisable. Cela soulève la question de savoir si la disposition théorique des armatures a été vérifiée afin d'assurer la possibilité de leur mise en place tout en respectant les exigences d'enrobage. Une autre interrogation concerne la faisabilité réelle de cette mise en œuvre sur le chantier [3].

Par ailleurs, le respect de l'enrobage des armatures, tel que défini dans le BAEL 91 révisé 99 (article A.7.1), est essentiel, car il participe à la protection des armatures contre les agressions extérieures, notamment la carbonatation du béton [8].

1.3.1.8. Impact des réseaux intégrés sur l'apparition des fissures

La présence de réseaux (gaines électriques, canalisations de plomberie, etc.) dans les éléments en béton peut favoriser l'apparition de fissures (**Figure 1.14**).

En effet, au droit de ces réseaux, l'épaisseur de béton est réduite, ce qui crée localement une zone de faiblesse [3].

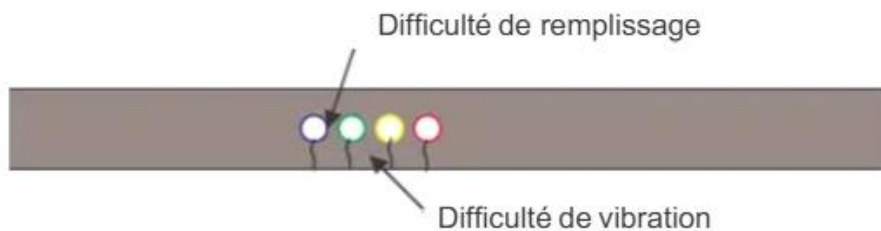


Figure 1. 14: difficultés de remplissage et de vibration du béton au droit des réseaux intégrés [3]

1.3.2. Causes structurelles liées au comportement mécanique

Lors du dimensionnement, le comportement mécanique de l'ouvrage est défini à partir d'hypothèses concernant les charges, l'environnement et le mode de fonctionnement de la structure. Après réalisation, le comportement réel sous charges permet de vérifier la conformité avec le modèle de calcul initial.

Dans un ouvrage correctement conçu et exécuté, les fissures dites fonctionnelles restent compatibles avec un comportement normal. Leur caractère admissible dépend principalement de leur ouverture. Au-delà de 0,3 mm, elles ne sont plus considérées comme normales mais pathologiques.

Une fissuration non conforme au schéma de calcul peut révéler un défaut de conception, de mise en œuvre ou d'exploitation. Certains phénomènes extérieurs, comme un tassement du sol ou une modification d'usage, peuvent également perturber le comportement mécanique prévu. Enfin, une modélisation inadaptée peut conduire à un écart entre fonctionnement théorique et réel [3].

1.3.2.1. Effets du tassement différentiel

Le tassement du sol entraîne un déplacement des fondations et provoque des déformations dans la structure (**Figure 1.15**). Lorsque ce phénomène n'est pas uniforme (en raison de l'hétérogénéité du sol, de différences de fondations ou de répartition des charges) il génère des contraintes supplémentaires, principalement en traction.

Ces efforts conduisent à l'apparition de fissures, généralement inclinées à environ 45° (**Figure 1.16**) [3].

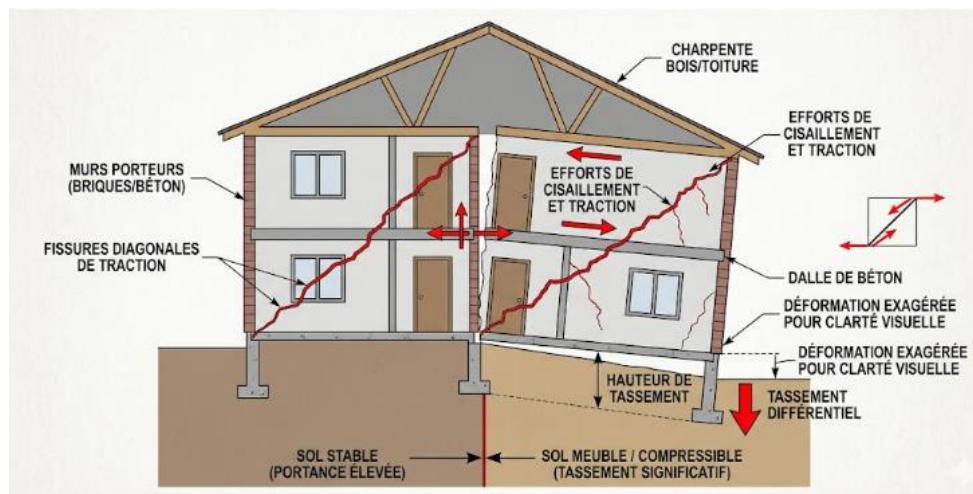


Figure 1. 15 : influence du tassement différentiel sur la fissuration d'une structure



Figure 1. 16: Exemple de fissuration diagonale (45°) relevée au niveau des murs d'un laboratoire au l'université de Tlemcen [34]

1.3.2.2. Impact du changement de destination de l'ouvrage

Le dimensionnement dépend de l'usage prévu et des charges associées. Toute modification de destination pendant ou après les travaux peut entraîner des désordres.

Par exemple, une façade initialement destinée à recevoir un bardage peut être laissée en béton apparent. Le béton se retrouve alors exposé différemment des conditions prévues au départ.

De même, un dallage industriel soumis à des charges réelles supérieures à celles prises en compte lors du calcul peut se fissurer par sous-dimensionnement [3].

1.3.2.3. Influence d'une modélisation non représentative

Lorsque la modélisation ne traduit pas fidèlement le comportement réel, une mauvaise répartition des charges peut apparaître.

Les éléments les plus rigides reprennent alors des efforts plus importants que prévu. Cette redistribution entraîne une fissuration qui modifie progressivement le fonctionnement de la structure [3].

1.3.3. Causes environnementales, climatiques et thermiques

1.3.3.1 Variation thermique

a. Effets du mode d'isolation thermique

Le comportement thermique varie selon la position de l'isolant.

Avec une isolation intérieure, les façades et les planchers subissent des variations de température différentes. En été, les façades se dilatent tandis que les planchers se rétractent. Cette différence crée des efforts supplémentaires au niveau de leurs liaisons. En hiver, le phénomène est inversé.

Avec une isolation extérieure, les éléments sont globalement à la même température, proche de celle de l'intérieur du bâtiment. Les déformations différentielles sont alors fortement réduites (**Figure 1.17**) [3].

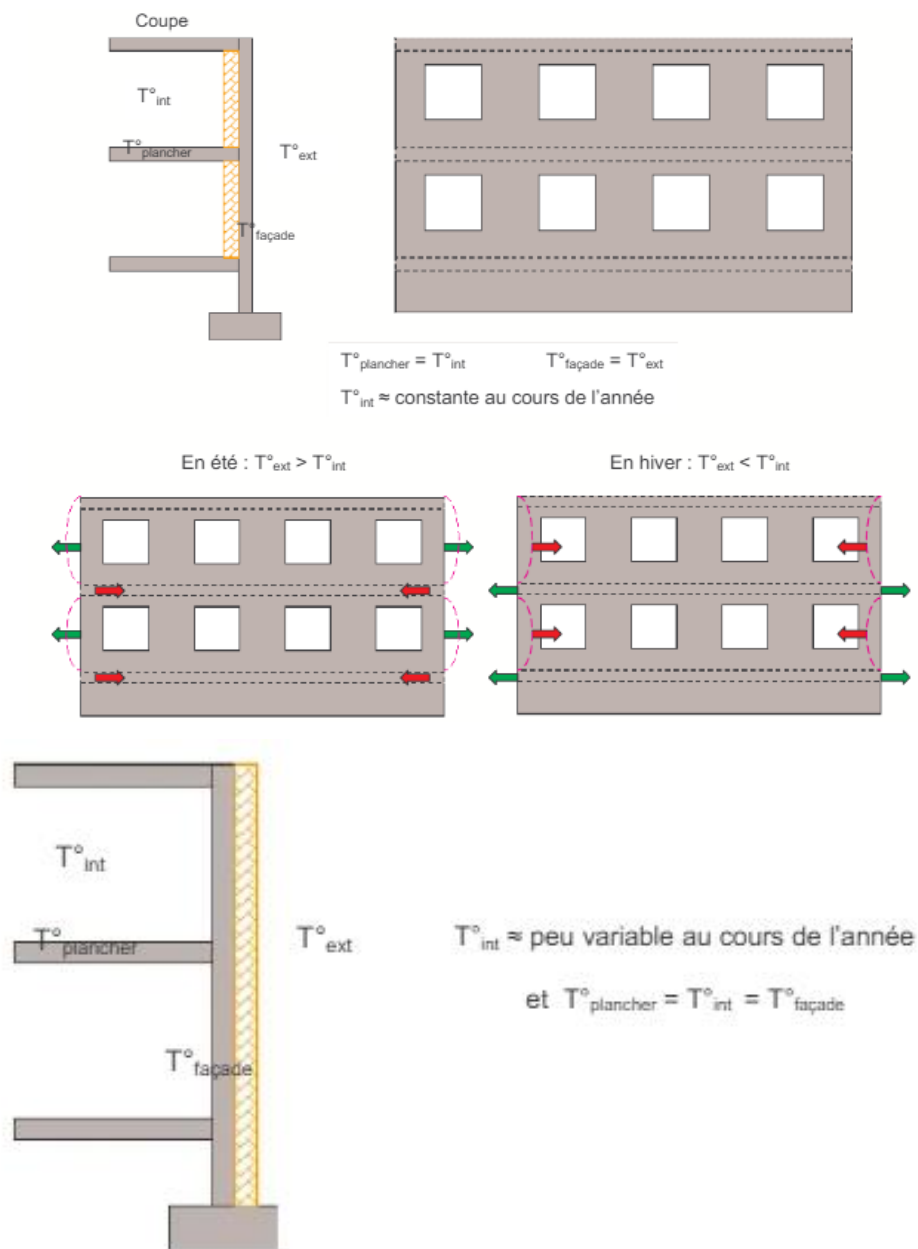


Figure 1. 17 : le comportement thermique structurel selon la position de l'isolant [3]

b. Le joint de dilatation et joint diapason

L'acier et le béton possèdent un coefficient de dilatation thermique identique (10×10^{-6}), ce qui évite des contraintes internes entre ces deux matériaux.

Un élément de 30m soumis à une variation de 35°C subit un allongement d'environ 10,5mm

$$10 \cdot 10^{-6} \times 30 \times 35 \times 1000 = 10,5_{mm}$$

Pour limiter les effets de dilatation et de retrait, la structure est fractionnée par des joints de dilatation (**Figure 1.18**). Leur espacement dépend de la conception du bâtiment et des prescriptions réglementaires : 25 m en zones sèches à forte variation thermique et 50 m en zones humides et tempérées [3].

Les éléments particulièrement exposés aux variations de température, comme les balcons ou les planchers-terrasses, nécessitent des joints diapason spécifiques.

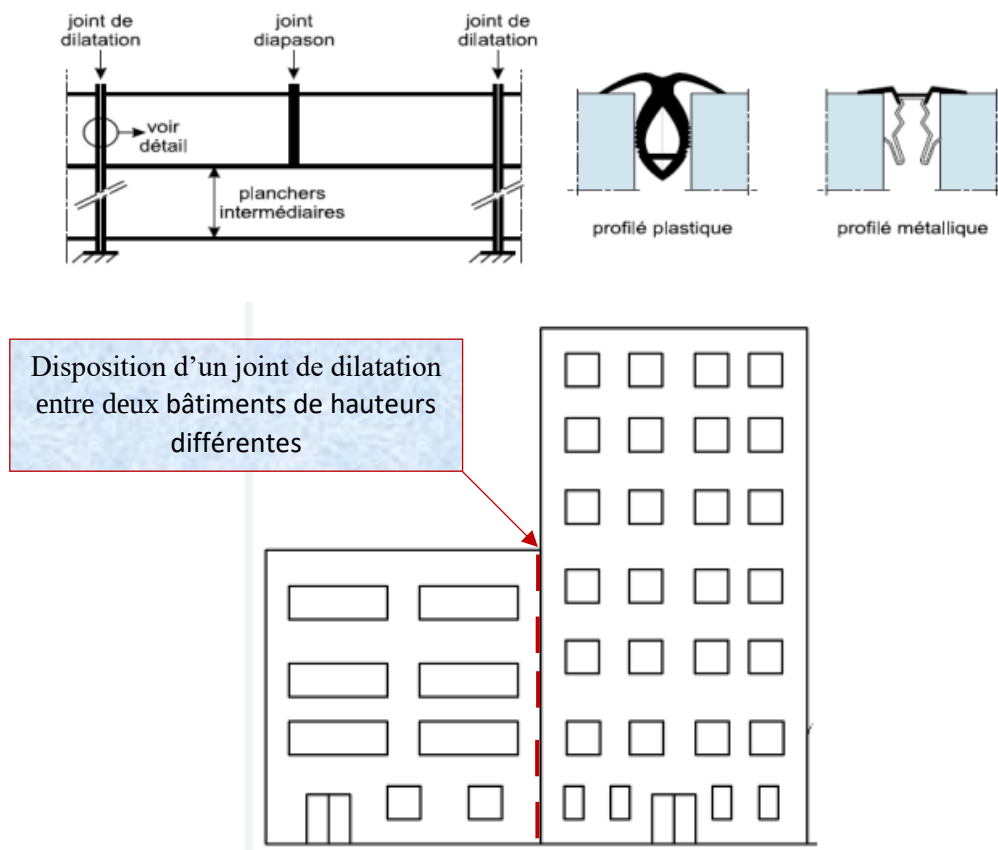


Figure 1. 18: typologies des joints et exemple d'application sur les structures

1.3.3.2. Gel-dégel

Les cycles de gel et de dégel constituent une cause importante de dégradation du béton dans les environnements soumis à de basses températures. Lorsque la température descend en dessous de 0 °C, l'eau présente dans les pores du béton se transforme en glace. La température de gel dépend de la taille des pores, l'eau contenue dans les pores les plus larges gèle en premier puis celle contenue dans les pores plus fins lorsque la température continue de diminuer.

La formation de glace s'accompagne d'une augmentation de volume, ce qui génère des pressions internes dans la structure poreuse du béton. Lorsque ces pressions dépassent la résistance en traction du matériau, elles provoquent l'apparition de microfissures internes, pouvant entraîner des gonflements et, à terme, l'éclatement du béton [9] (**Figure 1.19**).

La répétition des cycles de gel et de dégel favorise la propagation progressive de ces fissures, ce qui peut conduire à une dégradation importante, voire à la destruction de certains éléments de l'ouvrage.

La présence de sels de déverglaçage accentue ces phénomènes. Sous l'effet combiné du gel et des sels, les surfaces en béton peuvent subir un écaillage, caractérisé par le détachement de fines couches de mortier ou de fragments contenant des granulats.

L'ampleur des dégradations dépend de plusieurs facteurs, notamment [9] :

- les caractéristiques des constituants du béton (granulats et liant)
- le degré de saturation en eau du matériau
- la structure du réseau poreux
- la présence éventuelle de bulles d'air entraînées, qui peuvent limiter les pressions internes en jouant le rôle de réservoirs d'expansion pour la glace.

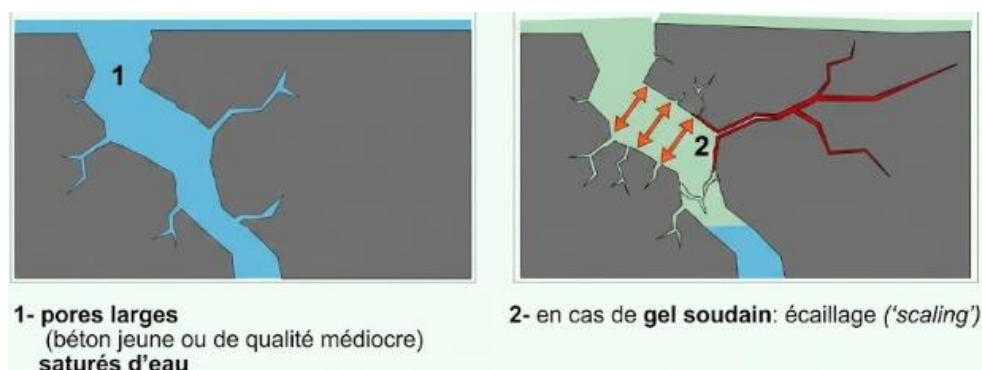


Figure 1. 19 : mécanismes de fissuration du béton sous cycles de gel-dégel [2]

1.3.3.3. Cycles humidification-séchage

Les cycles d'humidification-séchage constituent un facteur environnemental important pouvant provoquer la dégradation des matériaux cimentaires. Lors de ces cycles répétés, l'eau pénètre dans les pores du matériau pendant la phase d'humidification puis s'évapore lors du séchage, ce qui entraîne des variations de la structure poreuse et favorise l'apparition et la propagation de microfissures. Avec l'augmentation du nombre de cycles, ces phénomènes provoquent une détérioration progressive des propriétés mécaniques et une diminution de la résistance du matériau [10].

1.3.4. Causes liées à la durabilité et aux agressions chimiques

1.3.4.1. Carbonatation du béton

La carbonatation est un phénomène chimique progressif résultant de la pénétration du dioxyde de carbone (CO_2) de l'air dans les pores du béton. Ce gaz réagit principalement avec l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment pour former du carbonate de calcium.

Cette réaction entraîne une diminution du pH du béton, qui passe d'un milieu fortement alcalin (environ 13) à des valeurs plus faibles, proches de 8 à 9. Or, l'alcalinité élevée assure normalement la protection des armatures en acier en les maintenant à l'état passivé. Lorsque le front de carbonatation atteint les aciers, cette protection disparaît.

En présence d'eau et d'oxygène, les armatures deviennent alors sensibles à la corrosion. Les produits de corrosion occupent un volume supérieur à celui de l'acier initial, ce qui génère des contraintes internes dans le béton. Il en résulte l'apparition de fissures, puis éventuellement l'éclatement du béton de couverture **(Figure 1.20)**.

Ainsi, bien que la carbonatation n'affecte pas directement la résistance propre du béton, elle favorise la corrosion des armatures, ce qui compromet progressivement la durabilité et le comportement structurel de l'ouvrage [3,11].

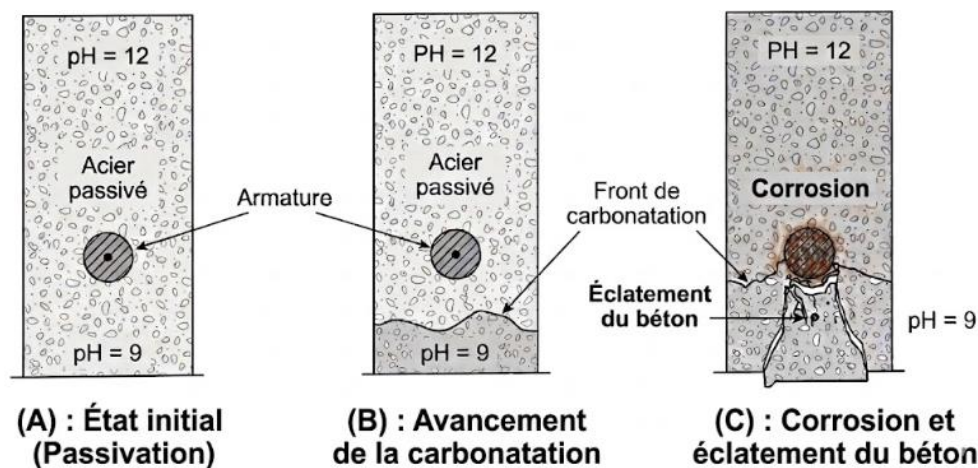


Figure 1. 20: évolution de la carbonatation du béton et impact sur les armatures [3]

1.3.4.2. L'attaque par les chlorures

Les chlorures peuvent être présents dans le béton dès sa fabrication ou pénétrer ultérieurement depuis l'environnement, notamment en atmosphère marine ou en présence de sels de déverglaçage. Leur migration à l'intérieur du béton nécessite la présence d'eau. En milieu saturé, ils progressent principalement par diffusion, tandis que dans les zones soumises à des cycles d'humidification et de séchage, leur pénétration est accélérée par des phénomènes de convection.

Une partie des ions chlorure se lie à la matrice cimentaire, alors qu'une autre fraction demeure dissoute dans la solution interstitielle. Lorsque la concentration en chlorures libres au niveau des armatures atteint un seuil critique, la couche protectrice de l'acier est détruite (**Figure 1.21**).

Il s'ensuit une corrosion électrochimique localisée des armatures. Les produits de corrosion, plus volumineux que l'acier initial, exercent des pressions internes sur le béton d'enrobage. Ces contraintes provoquent l'apparition de fissures, pouvant évoluer vers l'éclatement du béton et une dégradation progressive de l'élément en béton armé [3,9].



Figure 1. 21: dégradation du béton sous l'action des chlorures [12]

1.3.4.3. L'attaque sulfatique

L'attaque sulfatique constitue une cause importante de dégradation du béton. Elle résulte de la réaction entre les ions sulfates et certains constituants du ciment, notamment les aluminates. Ces réactions conduisent à la formation de composés tels que l'ettringite secondaire, voire dans certains cas la thaumasite, susceptibles de provoquer des phénomènes expansifs.

Les sulfates peuvent être d'origine interne ou externe. Lorsqu'ils proviennent des matériaux constitutifs du béton (granulats, ciment ou produits d'hydratation), ils peuvent d'abord former du gypse, puis réagir avec les aluminates pour générer une ettringite différée. Ce phénomène apparaît notamment dans des éléments ayant subi des élévations importantes de température au jeune âge. Les réactions sont lentes et peuvent se manifester plusieurs années après la mise en service de l'ouvrage.

Dans le cas d'une origine externe, les sulfates présents dans les sols ou les eaux pénètrent à travers le réseau poreux ou les fissures existantes. L'attaque progresse alors de la surface vers l'intérieur du béton selon un front de dégradation.

La formation de produits expansifs engendre des contraintes internes qui provoquent la fissuration du béton, puis son éclatement et sa désagrégation progressive (**Figure 1.22**). Les fissures facilitent ensuite la pénétration de nouveaux agents agressifs, ce qui accélère l'évolution du phénomène [3,9].



Figure 1. 22: pathologies due to sulfate attack [32]

1.3.4.4. L'attaque interne par alcali-réaction

L'alcali-réaction est un ensemble de réactions chimiques internes pouvant se produire entre certains granulats réactifs et la solution alcaline du béton. Ce phénomène apparaît lorsque plusieurs conditions sont réunies, notamment une forte alcalinité et une humidité élevée.

La réaction entraîne la formation de gels à l'intérieur du béton, localisés dans les pores, autour des granulats ou dans les microfissures existantes. En présence d'eau, ces produits absorbent l'humidité et augmentent de volume, ce qui provoque un gonflement progressif du matériau.

L'expansion génère des contraintes internes qui se superposent aux sollicitations déjà présentes dans la structure. Lorsque ces contraintes dépassent la résistance en traction du béton, un réseau de fissures se développe. Cette fissuration peut être diffuse, en maillage, et s'accompagner d'une diminution des performances mécaniques (**Figure 1.23**).

Les fissures facilitent ensuite la pénétration d'agents extérieurs, ce qui accentue progressivement la dégradation du béton [3,9].



Figure 1. 23: alcali-réaction [33]

L'ensemble des causes identifiées montre que la fissuration est rarement due à un facteur unique, mais résulte généralement de la combinaison de plusieurs mécanismes. Cette complexité justifie la nécessité d'une approche globale intégrant à la fois le diagnostic technique et l'analyse des risques.

1.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principales typologies de fissures ainsi que les mécanismes à l'origine de leur apparition dans les structures en béton armé. L'analyse de ces fissurations constitue une étape fondamentale du diagnostic structurel, en permettant d'associer chaque type de fissure à une cause probable, à un niveau de gravité et à un risque potentiel pour l'ouvrage.

Toutefois, la complexité des phénomènes observés nécessite une approche complémentaire basée sur l'évaluation et la hiérarchisation des risques, afin de définir des priorités d'intervention adaptées.

Ainsi, ce chapitre constitue une base essentielle pour l'étude de la gestion des risques qui sera développée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

Gestion des risques

2.1. Introduction

Le chapitre précédent a permis de présenter les différentes typologies des fissures ainsi que les principales causes responsables de leur apparition dans les ouvrages. Cette étude a mis en évidence que les fissures ne constituent pas uniquement des désordres visibles, mais également des indicateurs révélateurs de dysfonctionnements pouvant compromettre la durabilité, la stabilité et la sécurité des structures. La compréhension de ces phénomènes représente ainsi une étape fondamentale pour mieux appréhender les risques associés aux ouvrages de construction.

Face aux conséquences potentielles des fissures sur la sécurité et la durabilité des ouvrages, la mise en place d'une démarche efficace de gestion des risques devient indispensable afin d'identifier, d'évaluer et de maîtriser les situations critiques. Dans cette perspective, l'utilisation d'outils et de méthodes adaptés permet d'anticiper les défaillances, de réduire les incertitudes et d'améliorer la prise de décision.

Ce chapitre présentera ainsi les principes fondamentaux du management des risques, les différentes étapes du processus de gestion des risques ainsi que les principaux outils et techniques utilisés pour l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques dans le domaine des ouvrages et des structures.

2.2. Définitions du risque

Le risque ne possède pas une définition unique, car sa signification varie selon le contexte et le domaine d'étude considérés.

D'après la norme ISO 31000 : 2018 : « Un risque est l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs, c'est-à-dire la possibilité qu'il y ait un écart positif (opportunité) ou négatif (menace) par rapport à une attente » [21].

Selon le dictionnaire le Robert 2017 : « un danger éventuel plus ou moins prévisible », et dans le dictionnaire Larousse 2018 est défini comme suit [22] :

- « Un danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé »
- « Danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé »
- « Fait de s'engager dans une action qui pourrait apporter un avantage, mais qui comporte l'éventualité d'un danger ».

Dans le dictionnaire de la langue philosophique le risque est : « Danger ou péril dans lequel l'idée de hasard est accusée, mais avec la perspective de quelque avantage possible. C'est en vue de ces avantages que l'homme assume des risques, mais, d'ordinaire, tout en s'assurant le plus possible contre eux. » [23].

Au travers des définitions précédentes, nous avons vu que le risque se fonde sur l'interaction de deux éléments essentiels : le danger et l'élément exposé. Un seul de ces paramètres n'est pas suffisant pour définir un risque. Un danger ne devient source de risque qu'à partir du moment où une cible y est soumise, tandis qu'une cible non exposée à un danger ne peut être considérée comme menacée. Ainsi, la conjonction d'un danger et d'une cible génère une situation peut être dangereuse, qui peut donner lieu à un événement indésirable ayant des effets nocifs.

2.3. Définition de la gestion du risque

La gestion des risques est une approche complète qui inclut l'évaluation des risques, la prise de décision via l'élaboration d'une stratégie d'intervention, la mise en œuvre des mesures de traitement adaptées et le suivi continu de leur efficacité [24]. Dans le cadre de cette étude, la gestion des risques est appliquée spécifiquement aux désordres liés à la fissuration, afin d'orienter les décisions de réhabilitation en fonction du niveau de criticité.

2.4. Processus de la gestion du risque

Dans le cas des structures fissurées, ce processus permet de passer de l'observation des désordres à la hiérarchisation des interventions en fonction du niveau de risque.

2.4.1. Identification des risques

L'identification des risques consiste à rechercher, collecter et caractériser les différents éléments constitutifs du risque. Ce processus tient compte du système à l'étude, de ses limites et de son milieu d'évolution. Il s'appuie principalement sur l'analyse des fonctions à assurer, des sources de risque et des instabilités existantes, afin de servir de base à une Analyse plus approfondie des risques éventuels.

Dans ce cadre, cette démarche permet notamment de :

- Déterminer les sources de risque et les domaines susceptibles d'être affectés
- Recenser les événements pouvant influencer le projet ainsi que leurs causes et conséquences potentielles
- Identifier les dangers, les cibles exposées et les menaces correspondantes

- Évaluer le risque selon la probabilité qu'il se produise et la gravité de ses conséquences
- Effectuer une Analyse Préliminaire des Risques (APR) par des méthodes telles que des check-lists, des séances de brainstorming, des logiciels spécialisés ou des outils préconisés par la norme ISO 31010 :2019 [26].

2.4.2. Analyse du risque

L'analyse des risques représente une étape indispensable de la démarche globale de gestion du risque, elle se situe après la phase d'analyse. Elle a pour but d'expliquer le phénomène observé par la détermination de ses causes, de ses conséquences possibles et des interactions et réactions en chaîne qui peuvent lui être associées. Cette approche permet de modéliser les liens entre les origines du risque et leurs impacts sur les objectifs du projet, de façon à anticiper les événements indésirables et leurs effets éventuels.

L'estimation du risque consiste à évaluer la probabilité de survenue du phénomène (approche qualitative ou quantitative) et à apprécier la gravité des conséquences possibles. Les résultats obtenus servent ensuite de base à la prise de décision, en intégrant non seulement le niveau de risque estimé, mais aussi les dimensions sociales, environnementales et économiques associées.

On n'a néanmoins pas de méthode unique face à la modélisation des risques. Les outils et méthodes utilisés diffèrent selon les buts recherchés, les rôles et responsabilités des acteurs concernés, les caractéristiques spécifiques du projet, comme le coût, les délais ou l'organisation. Certains risques peuvent être, par ailleurs, fortement augmentés par d'autres et c'est la formalisation hiérarchique de ces risques qui permet de privilégier les discussions qualité entre toutes les parties prenantes et d'acquiescer ainsi une compréhension plus globale et moins fragmentée de la situation considérée.

2.4.3.Évaluation du risque

Cette étape du processus de gestion des risques suit la phase d'analyse et a pour but de soutenir la décision en intégrant, de façon explicite ou implicite, des critères d'évaluation et des jugements de valeur. La dernière étape est la comparaison entre le niveau de risque obtenu par la méthode d'analyse et les niveaux d'acceptabilité des risques définis préalablement dans le contexte de l'étude, puisque la dernière question à se poser est celle de la tolérance du risque.

Cette démarche intègre également les impacts sociaux, environnementaux et économiques associés aux risques identifiés.

On évalue généralement un risque à partir de deux paramètres de base : la probabilité et la gravité. La vraisemblance exprime la probabilité d'occurrence de l'événement redouté et la gravité la magnitude des impacts possibles qui pourraient en résulter. La réunion de ces deux facteurs permet d'estimer la criticité du risque, reprise comme son niveau global :

$$\text{Risque} = \text{Criticité} = \text{Vraisemblance} \times \text{Gravité} [26]$$

Cette évaluation se présente généralement sous forme matricielle, ce qui facilite la visualisation, la hiérarchisation et le positionnement des risques identifiés.

2.5. Traitement des risques

Après avoir identifié, analysé et évalué les risques, il est nécessaire de définir des stratégies adaptées pour les traiter. Plusieurs approches peuvent alors être envisagées selon la nature et l'importance du risque, notamment l'acceptation, la réduction, le partage, le transfert ou l'événement du risque.

Les mesures de réduction consistent principalement à supprimer ou à limiter les facteurs générateurs du risque. Cela peut se faire par l'abandon de l'activité dangereuse, la suppression de la source de risque ou de la cible exposée, et par la mise en place de dispositifs de surveillance. D'autres mesures cherchent aussi à diminuer soit la probabilité de survenue du risque par des actions préventives, soit la gravité des conséquences par des dispositifs de protection.

Certains stratagèmes reposent, par ailleurs, sur le financement du risque par la mise en partage des responsabilités entre plusieurs parties dans un cadre contractuel ou par le transfert de la gestion du risque à un organisme spécialisé tel que les compagnies d'assurance.

Le traitement des risques reste étroitement dépendant du management du projet et a une influence directe sur la maîtrise des coûts. Les risques considérés comme acceptables peuvent donc faire l'objet de provisions financières, lorsque leur traitement n'est pas justifié au regard de leur impact. La surveillance de certains risques peut également nécessiter des dépenses spécifiques telles que l'instrumentation, la veille ou le gardiennage. Enfin, on peut élaborer des plans de réponse adaptés pour mieux gérer les risques retenus.

2.6. Les risques géotechniques

Les incertitudes associées aux paramètres géotechniques constituent l'une des principales sources de risques dans le domaine de la géotechnique. À cet effet, une classification des risques géotechniques peut être établie selon leur origine. Celle-ci distingue principalement deux catégories [25] : les risques géotechniques d'origine naturelle, tels que les mouvements de terrain, et les risques géotechniques d'origine anthropique, résultant des activités et interventions humaines.

Les différentes classifications proposées dans la littérature reposent généralement sur une organisation similaire, fondée sur une subdivision en deux ou trois grandes catégories. Sur la base de ces approches, il est possible de représenter schématiquement la classification des risques géotechniques de la manière suivante **(Figure 2.1)** et **(Figure 2.2)**.

Dans le contexte de cette étude, les risques géotechniques concernés sont principalement liés aux tassements différentiels du sol, susceptibles de provoquer des fissurations structurelles et d'affecter la stabilité de l'ouvrage.

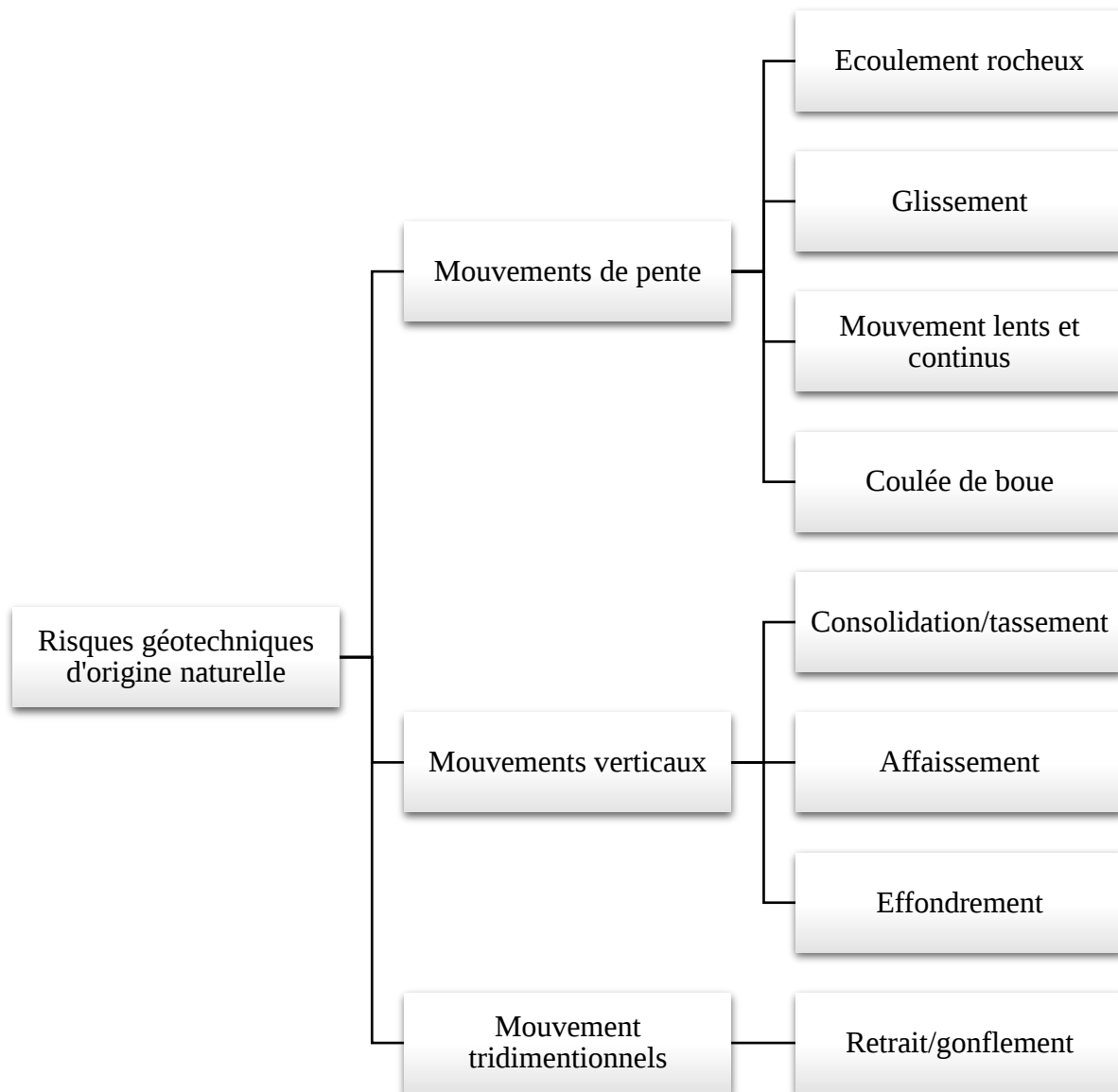


Figure 2. 1: classification des risques géotechniques : catégorie N°01

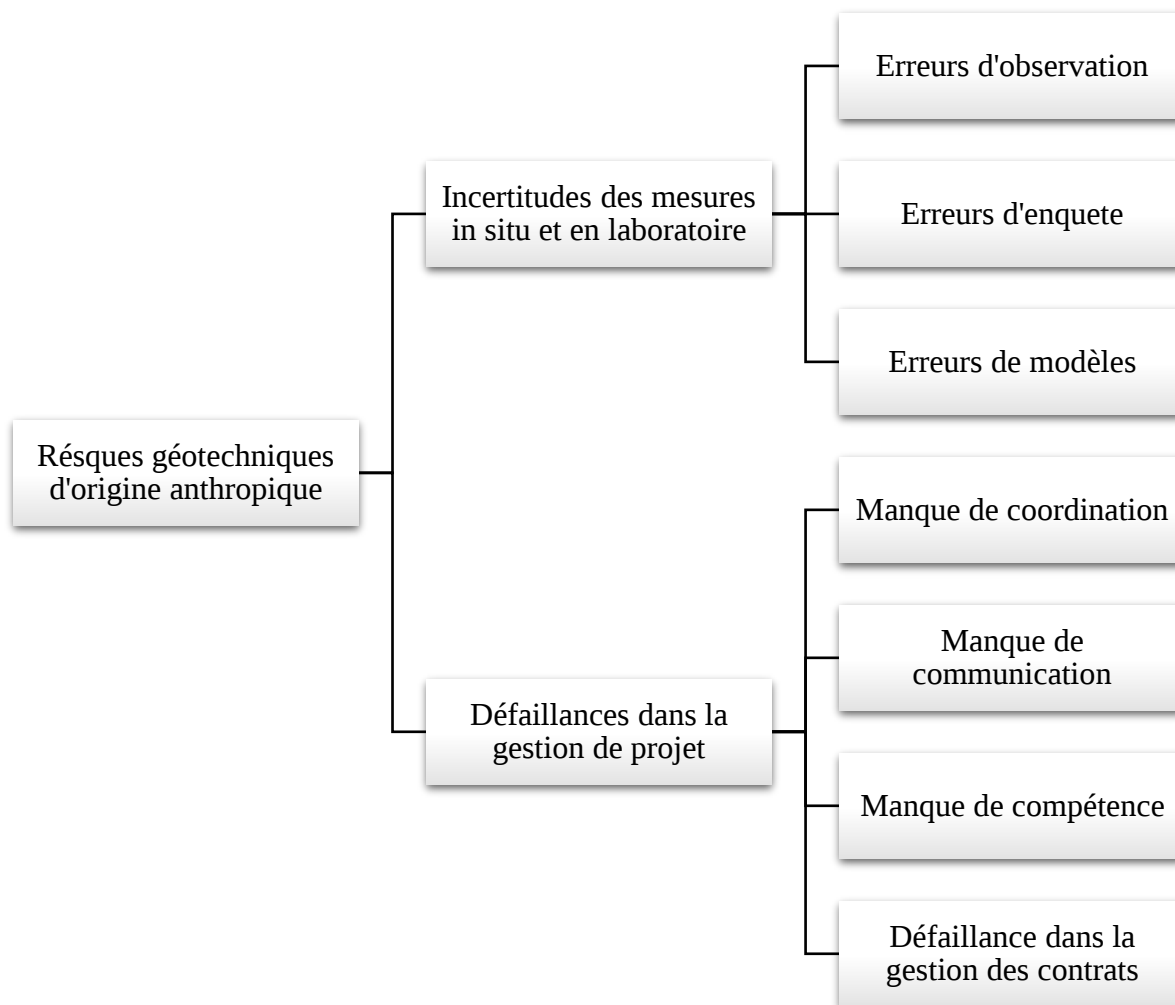


Figure 2. 2: classification des risques géotechniques : catégorie N°02

2.7. Outils et méthodes de la gestion des risques

La norme ISO 31010 réunit 41 outils et techniques qui ont pour but de soutenir le processus d'évaluation et de gestion des risques. Ces méthodes permettent d'identifier, d'analyser, d'évaluer et de traiter les risques pouvant affecter un projet, une activité ou un ouvrage [26]. Elles constituent également un support important à la prise de décision en facilitant la compréhension des sources de danger, des causes potentielles ainsi que des conséquences associées aux événements redoutés. Cette norme présente des techniques qui comprennent diverses approches, allant des méthodes qualitatives qui reposent sur l'expertise et le jugement professionnel, aux méthodes quantitatives qui sont fondées sur des analyses probabilistes et statistiques.

Par ailleurs, la norme ISO 31010 expose également dans quelles étapes du processus de management des risques les différentes techniques d'évaluation des risques sont applicables. Chaque outil a un champ d'utilisation précis en fonction des objectifs de l'analyse et de la nature des risques étudiés. Ainsi, le niveau de pertinence et d'utilisation des principales techniques proposées par la norme dans le cadre de la gestion des risques est illustré par le tableau suivant :

Tableau 2. 1: applicabilité des techniques aux processus ISO 31000 [21]

Outils et techniques	Processus d'évaluation des risques				
	Identification des risques	Analyse du risque			Évaluation du risque
		Conséquence	Vraisemblance	Niveau de risque	
ALARP, ALARA et SRAIRP	NA	NA	NA	NA	FA
Analyse bayésienne	NA	NA	FA	NA	NA
Réseaux bayésiens	NA	NA	FA	NA	FA
Analyse "nœud papillon"	A	FA	A	A	A
"Brainstorming"	FA	A	NA	NA	NA
Analyse d'impact sur l'activité	A	FA	NA	NA	NA
Cartographie causale	A	A	NA	NA	NA
Analyse causes/conséquences	A	FA	FA	A	A
Listes de contrôle, classification et taxonomies	FA	NA	NA	NA	NA
Approche cindynique	FA	NA	NA	NA	NA
Matrice conséquence/vraisemblance	NA	A	A	FA	A
Analyse cout/bénéfice	NA	FA	NA	NA	FA
Analyse d'impacts croisés	NA	NA	FA	NA	NA
Analyse par arbre de décision	NA	FA	FA	A	A
Technique Delphi	FA	NA	NA	NA	NA
Analyse par arbre d'évènement	NA	FA	A	A	A

Analyse des modes de défaillances et de leurs effets	FA	FA	NA	NA	NA
Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité	FA	FA	FA	FA	FA
Analyse par arbre de panne	A	NA	FA	A	A
Diagrammes F/N	A	FA	FA	A	FA
Théorie des jeux	A	FA	NA	NA	FA
Études de danger et d'exploitabilité (HAZOP)	FA	A	NA	NA	NA
Analyse de danger-points critiques pour leur maîtrise (HACCP)	FA	FA	NA	NA	FA
Analyse de fiabilité humaine	FA	FA	FA	FA	A
Ishikawa (en arrêtes de poisson)	FA	A	NA	NA	NA
Méthode LOPA	A	FA	A	A	NA
Analyse de Markov	A	A	FA	NA	NA
Simulation de Monte-Carlo	NA	A	A	A	FA
Analyse à critères multiples (ACM)	A	NA	NA	NA	FA
Technique des groupes nominaux	FA	A	A	NA	NA
Diagrammes de Pareto	NA	A	A	A	FA
(PIA/DPIA) Analyse d'impact sur la vie privée/Analyse d'impact sur la protection des données	A	FA	A	A	FA
Maintenance basée sur la fiabilité	A	A	A	A	FA
Indices de risque	NA	FA	FA	A	FA
Courbes en S	NA	A	A	FA	FA
Analyse de scénario	FA	FA	A	A	A
Entretiens structurés ou semi-structurés	FA	NA	NA	NA	NA
Méthode SWIFT ("Que se passerait-il si ?")	FA	FA	A	A	A

Enquêtes	FA	NA	NA	NA	NA
Appréciation du risque toxicologique	FA	FA	FA	FA	FA
Valeur en risque (Var)	NA	A	A	FA	FA
A: applicable; FA: fortement applicable; NA: non-applicable.					

Selon le tableau d'applicabilité de la norme ISO 31010, l'utilisation de la méthode AMDEC est tout à fait adéquate pour cette étude, car elle est très applicable lors des étapes d'identification, d'analyse et d'évaluation des risques. Cette méthode convient également aux études de pathologies structurelles et de défaillances techniques, puisqu'elle permet d'analyser les causes des désordres observés, leurs effets sur l'ouvrage ainsi que leur niveau de criticité. L'AMDEC répond donc de façon efficace aux objectifs de cette étude de cas liés à l'évaluation et à la hiérarchisation des risques affectant la structure.

2.8. A.M.D.E.C

2.8.1. Généralités sur la méthode

L'AMDEC, qui signifie Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité, est une technique d'analyse des risques décrite dans la norme ISO 31010. Elle sert à identifier les défaillances potentielles d'un système, à en évaluer les conséquences et à déterminer leur niveau de criticité.

Cette méthode est fondée sur une logique préventive qui permet d'anticiper les dérèglements susceptibles d'affecter le fonctionnement d'un système, d'un équipement ou d'un processus. Elle aide à maîtriser les risques en identifiant les éléments critiques qui exigent des mesures de prévention ou de correction.

L'AMDEC permet essentiellement de :

- Identifier les modes de défaillance
- Analyser les effets des défaillances
- Évaluer la criticité des risques
- Hiérarchiser les défaillances
- Définir les actions correctives adaptées

2.8.2. Principes fondamentaux de la méthode AMDEC

2.8.2.1. Mode de défaillance

Le mode de défaillance correspond au moyen par lequel un élément peut perdre sa capacité à assurer la fonction attendue par exemple : rupture ; fissuration ; corrosion ; obstruction ; déformation.

2.8.2.2. Effet de défaillance

L'effet de défaillance correspond aux conséquences du dysfonctionnement du système ou du composant considéré.

Les effets peuvent entraîner :

- Une perte de performance
- Une diminution de la sécurité
- Une dégradation du fonctionnement
- Un arrêt du système.

2.8.2.3. Criticité

La criticité indique le degré d'importance du risque que représente une défaillance. Elle permet de classer les défaillances en fonction de leur gravité pour définir les priorités d'intervention.

L'évaluation de la criticité repose généralement sur :

- La gravité
- La probabilité
- La détectabilité.

2.8.3. Objectifs de la méthode AMDEC

La méthode AMDEC poursuit plusieurs objectifs dans le cadre de la gestion des risques.

- Identification des défaillances potentielles
- Prévention des risques
- Amélioration de la fiabilité
- Aide à la prise de décision
- Réduction des conséquences des défaillances

2.8.4. Démarche d'application de la méthode AMDEC

La mise en œuvre de la méthode AMDEC suit une démarche structurée comprenant plusieurs étapes.

- Définition du système
- Identification des modes de défaillance
- Analyse des causes et effets
- Évaluation de la criticité
- Définition des actions

La criticité est calculée par la relation suivante :

$$C = G \times P \times D$$

Avec :

C : Criticité

G : Gravité

P : Probabilité

D : Détectabilité

2.8.5. Paramètres d'évaluation de l'AMDEC

2.8.5.1. Gravité

La gravité correspond à l'importance des conséquences qu'entraîne une défaillance, elle est classée selon une échelle d'évaluation présentée dans le tableau suivant :

Tableau 2. 2: les niveaux de l'évaluation de la gravité [26]

NIVEAU	DESCRIPTION
1	Faible
2	Modérée
3	Importante
4	Très importante
5	Critique

2.8.5.2. Probabilité

La probabilité est l'occurrence ou la fréquence d'apparition de la défaillance, elle est classée selon une échelle d'évaluation présentée dans le tableau suivant :

Tableau 2. 3: les niveaux de l'évaluation de la probabilité [26]

NIVEAU	DESCRIPTION
1	Très rare
2	Rare
3	Occasionnelle
4	Fréquente
5	Très fréquente

2.8.5.3. Détectabilité

La détectabilité correspond à la capacité à détecter une défaillance avant que ses conséquences n'apparaissent, elle est classée selon une échelle d'évaluation présentée dans le tableau suivant:

Tableau 2. 4: les niveaux de l'évaluation de la détectabilité [26]

NIVEAU	DESCRIPTION
1	Très facilement détectable
2	Facilement détectable
3	Moyennement détectable
4	Difficilement détectable
5	Non détectable

2.8.5.4. Exemple de calcul de la criticité :

Gravité = 4

Probabilité = 3

Détectabilité = 2

$$C = 4 \times 3 \times 2 = 24$$

Après le calcul de la criticité, il faut interpréter les valeurs obtenues afin de déterminer l'importance des risques identifiés. Cette interprétation permet de classer les défaillances en fonction de leur criticité et de

définir les priorités d'intervention ainsi que les actions correctives à mettre en œuvre. On présente dans le tableau suivant les niveaux d'interprétation de la criticité.

Tableau 2. 5 : l'interprétation de la criticité [26]

Valeur de criticité	Niveau de risque	Interprétation
1-10	Faible	Risque acceptable
11-30	Moyen	Surveillance nécessaire
31-60	Elevé	Action corrective recommandée
>60	Critique	Intervention immédiate nécessaire

2.8.6. L'AMDEC dans l'évaluation des risques

D'après la norme ISO 31010, l'AMDEC est une méthode d'évaluation des risques particulièrement adaptée à l'étude des défaillances techniques des systèmes, équipements ou procédés [26]. Cette démarche repose sur une approche préventive visant à identifier les modes de défaillance avant leur survenue afin de limiter leurs conséquences.

Elle permet d'identifier les risques, d'analyser les modes de défaillance ainsi que leurs causes, et d'évaluer leurs effets sur le système étudié. L'AMDEC permet également d'estimer le niveau de criticité des défaillances à partir de critères tels que la gravité, la probabilité et la détectabilité.

Une fois cette évaluation réalisée, les risques peuvent être classés par ordre d'importance afin de hiérarchiser les interventions nécessaires. Ainsi, la mise en œuvre de cette méthode favorise la définition d'actions adaptées visant à améliorer la sécurité, la fiabilité et la durabilité du système étudié.

Dans le cadre de ce travail, la méthode AMDEC est appliquée aux pathologies liées à la fissuration des structures en béton armé. Elle permet d'identifier les modes de défaillance associés aux désordres observés, d'évaluer leur criticité et de hiérarchiser les risques afin de définir les priorités d'intervention en matière de réhabilitation.

Ainsi, l'AMDEC constitue un outil essentiel reliant le diagnostic des fissures à la prise de décision, en orientant le choix des solutions en fonction du niveau de risque identifié.

2.9. Processus de sélection des experts

La méthode AMDEC, complétée par l'approche qualitative de type Hallowell, repose en grande partie sur le recours à des experts pour l'identification et l'évaluation des risques. La fiabilité des résultats dépend ainsi fortement de la qualité des jugements formulés par ces experts. Dans le cadre de cette étude, les experts sollicités sont des professionnels du domaine du génie civil, impliqués directement ou indirectement dans des opérations de diagnostic et de réhabilitation des ouvrages. Il s'agit notamment d'ingénieurs exerçant au sein du CDE (Centre de Développement de l'Équipement), ayant participé aux travaux de réhabilitation du projet étudié, ainsi que d'enseignants chercheurs spécialisés dans la pathologie des structures.

Le choix de ces experts repose principalement sur les critères suivants :

- expérience professionnelle dans le domaine des structures en béton armé,
- implication dans des projets réels de diagnostic et de réhabilitation,
- maîtrise des problématiques liées aux fissurations et à la durabilité des ouvrages,
- capacité à évaluer les risques et à proposer des solutions techniques adaptées.

Contrairement à une approche purement théorique basée sur un système de notation formel, la sélection des experts dans ce travail s'appuie sur leur expérience réelle et leur implication dans le domaine étudié, garantissant ainsi la pertinence et la crédibilité des évaluations.

Ainsi, l'intervention des experts permet d'apporter une expertise de terrain indispensable à l'analyse des pathologies observées et constitue un élément clé dans la validation des résultats obtenus par la méthode AMDEC.

Dans ce contexte, le recours à une approche basée sur le jugement d'experts apparaît nécessaire, ce qui justifie l'utilisation de la méthode Hallowell présentée ci-après.

2.10. La méthode Hallowell — évaluation qualitative des risques par jugement d'experts structuré

2.10.1. Contexte et justification

Dans le domaine de la réhabilitation des structures en béton armé, l'évaluation des risques est souvent confrontée à un manque de données fiables, ce qui limite l'utilisation des approches purement quantitatives telles que la méthode AMDEC [25].

Dans ce contexte, le recours à une approche qualitative basée sur le jugement d'experts apparaît comme une alternative pertinente. La méthode Hallowell repose sur l'évaluation des risques à partir de l'expérience et des compétences des experts, ce qui permet d'analyser les situations où les données sont incertaines ou insuffisantes [27].

2.10.2. Définition et fondements scientifiques

La méthode Hallowell repose sur le principe d'évaluation qualitative du risque basée sur le jugement d'experts, formalisée par Hallowell et Gambatese (2010) [27].

Cette méthode est particulièrement adaptée aux situations caractérisées par :

- l'absence de données statistiques fiables,
- une incertitude élevée sur l'état réel de la structure,
- la complexité des pathologies observées,
- et la nécessité de s'appuyer sur l'expérience des experts.

Dans ces conditions, le recours au jugement expert structuré représente une alternative scientifiquement défendable et reconnue par la norme ISO 31010 : 2019 [26] et les principes du management du risque définis par l'ISO 31000 [21].

2.10.3. Niveaux de classification qualitative

La méthode Hallowell permet de classer les risques selon trois niveaux de criticité, comme illustré dans le tableau suivant [27] :

Tableau 2. 6: niveaux de classification qualitative Hallowell

Niveau	Signification	Impact sur la structure	Action requise
CRITIQUE	Risque élevé — menace sur la sécurité structurelle ou la sécurité des usagers	Défaillance probable avec conséquences graves ou catastrophiques	Action prioritaire immédiate avant toute autre intervention
SIGNIFICATIF	Risque modéré — impact potentiel sur la fonctionnalité ou la durabilité	Dégradation progressive pouvant évoluer vers un état critique	Planification d'intervention dans un délai défini
MINEUR	Risque faible et maîtrisé — pas d'impact significatif sur la sécurité	Désordre superficiel ou évolution très lente	Surveillance périodique et maintenance préventive

La méthode Hallowell permet ainsi de compléter l'évaluation des risques en apportant une approche qualitative basée sur l'expérience des experts, particulièrement utile lorsque les données quantitatives sont insuffisantes.

2.10.4. Application dans ce travail

Dans le cadre de ce travail, la méthode Hallowell est utilisée en complément de la méthode AMDEC afin de valider la classification des risques liés aux fissurations observées. Elle permet d'intégrer l'expertise des intervenants dans l'analyse et de renforcer la pertinence des décisions de réhabilitation.

2.10.5. Articulation entre l'AMDEC et la méthode Hallowell

L'AMDEC et la méthode Hallowell sont utilisées de manière complémentaire dans la démarche adoptée :

- L'AMDEC structure l'identification des modes de défaillance et permet d'évaluer leur criticité à partir des paramètres quantitatifs (gravité, probabilité, détectabilité),
- La méthode Hallowell permet de valider et d'ajuster cette évaluation à partir du jugement des experts, en apportant une dimension qualitative.

Cette complémentarité permet d'obtenir une analyse des risques à la fois structurée et adaptée aux conditions réelles du projet.

Dans le chapitre suivant, ce couplage AMDEC–Hallowell sera appliqué à l'étude de cas afin de hiérarchiser les risques et d'orienter les décisions de réhabilitation.

Ainsi, l'association des méthodes AMDEC et Hallowell permet d'obtenir une évaluation des risques à la fois structurée et réaliste, en combinant une approche quantitative et une approche qualitative.

2.11. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales du management des risques, ainsi que les méthodes retenues dans le cadre de cette étude, notamment la méthode AMDEC comme outil principal d'identification et d'évaluation des risques, et la méthode Hallowell comme approche complémentaire d'évaluation qualitative basée sur le jugement d'experts.

L'analyse des différentes méthodes issues de la norme ISO 31010 a montré que l'AMDEC constitue une approche adaptée au contexte de la réhabilitation des structures en béton armé. Son association avec la

méthode Hallowell permet de pallier le manque de données fiables en intégrant l'expertise de terrain dans l'évaluation des risques.

Ainsi, la démarche adoptée repose sur une approche combinée, permettant d'obtenir une analyse des risques à la fois structurée et réaliste, et de faciliter la hiérarchisation des interventions en fonction du niveau de criticité identifié.

Le chapitre suivant sera consacré à la méthodologie adoptée pour l'étude de cas, en détaillant les étapes de mise en œuvre de cette approche pour le diagnostic des fissurations et la définition des stratégies de réhabilitation.

CHAPITRE 3

Méthodologie et réparations

3.1. Introduction

La réhabilitation d'une structure en béton armé est une démarche complexe qui ne peut être engagée sans une méthodologie claire et rigoureusement structurée. Face à la diversité des pathologies rencontrées et à la singularité de chaque ouvrage, il est indispensable de disposer d'un cadre d'intervention cohérent, permettant de passer de l'observation des désordres jusqu'à la mise en œuvre des solutions de réparation, en passant par le diagnostic, l'évaluation des risques et le choix de la stratégie d'intervention.

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'ensemble de cette démarche méthodologique, organisée en cinq étapes successives et complémentaires. Il expose également les principales techniques d'investigation disponibles, les méthodes d'évaluation et de gestion des risques adoptées, ainsi que les techniques de réparation et de renforcement applicables aux structures en béton dégradé, en s'appuyant sur les référentiels normatifs internationaux en vigueur.

Dans le cadre de ce travail, cette démarche méthodologique est appliquée spécifiquement à l'analyse des fissurations observées dans une structure en béton armé, afin d'aboutir à une évaluation des risques et à la définition de solutions de réhabilitation adaptées.

3.2. La démarche méthodologique

L'organigramme ci-après présente de manière synthétique la démarche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude. Il permet de visualiser l'enchaînement logique des différentes étapes mises en œuvre avant leur présentation et leur développement détaillés dans les sections suivantes (**Figure 3.1**). Cette démarche méthodologique constitue le cadre général adoptée dans ce travail. Elle permet de structurer le passage du diagnostic des désordres à la prise de décision en matière de réhabilitation, en intégrant l'évaluation des risques par les méthodes AMDEC et Hallowell présentées dans le chapitre précédent.

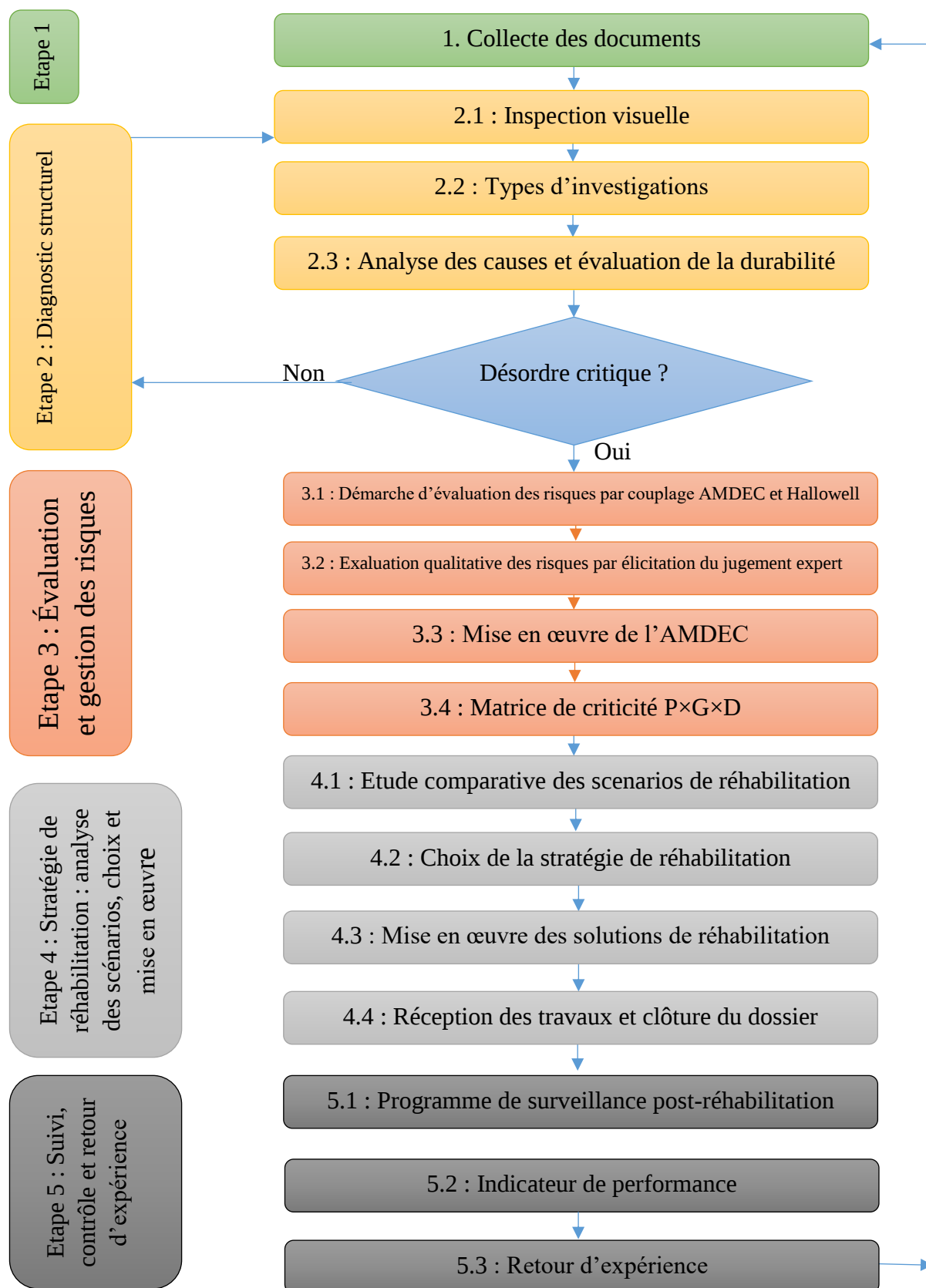


Figure 3. 1: la démarche méthodologique de réhabilitation

Cette démarche méthodologique constitue le fil conducteur de l'étude. Elle permet de relier l'observation des désordres à l'évaluation des risques puis à la prise de décision.

3.2.1. Première étape : collecte des documents

Lors de l'analyse d'un ouvrage, il est nécessaire de rassembler un ensemble d'informations le plus complet possible pour mieux comprendre ses caractéristiques et son comportement. Pour cela, il faut tenir compte des éléments suivants [13] :

- La date de construction, qui permet d'identifier les règlements de calcul appliqués et les dispositions constructives en vigueur à cette époque
- L'histoire de la structure, y compris les éventuelles modifications ou interventions
- Les plans de coffrage et de ferrailage
- Les rapports d'études ou d'expertises antérieurs
- L'orientation de la structure.

Cette étape permet d'identifier les caractéristiques initiales de l'ouvrage et de comprendre les conditions susceptibles d'avoir favorisé l'apparition des fissurations observées.

3.2.2. Deuxième étape : diagnostic structurel

3.2.2.1. Inspection visuelle

Toute enquête approfondie commence forcément par une inspection visuelle de l'ouvrage, afin de juger de son état apparent. Cette étape permet d'identifier un ensemble d'indicateurs qui révèlent des désordres, notamment :

- Fissurations et micro- fissurations : témoignant de contraintes ou de dégradations internes
- Altérations superficielles : effritement, désagrégation, surfaces alvéolaires, écaillage
- Manifestations liées à l'eau : humidité de surface, infiltrations, écoulements sur les joints et fissures
- Déformations structurelles : flèche, soulèvement, affaissement
- Corrosion des armatures : présence de taches de rouille, exposition des aciers et câbles de précontrainte
- Autres indices complémentaires : cloquage des revêtements, stagnation d'eau, variations de coloration.

L'observation visuelle est donc une étape indispensable pour orienter le diagnostic et guider les investigations ultérieures. Dans ce cadre, sa mise en œuvre repose sur un ensemble d'outils nécessaires à la réalisation d'une inspection visuelle efficace, comme :

- Appareil photo
- Mètre
- Distancemètre
- Pied à coulisse
- Fissuromètre (**Figure 3.2**)



Figure 3. 2: fissuromètre –dispositif manuel [34] et numérique

Cette inspection constitue une étape clé pour identifier les fissures, caractériser leur morphologie et orienter l'analyse des causes et des risques associés.

3.2.2.2. Types d'investigations

On distingue deux grandes catégories d'investigations : les méthodes destructives et les méthodes non destructives. Le choix des techniques d'investigation dépend ainsi de la nature des fissures observées et des informations recherchées, permettant de confirmer le diagnostic visuel et d'évaluer la gravité des désordres.

a. Investigation non-destructives

Ces méthodes permettent d'analyser une structure sans porter atteinte à son intégrité. Elles sont particulièrement adaptées aux ouvrages sensibles, notamment les monuments historiques, pour lesquels les prélèvements sont limités ou interdits. Elles sont également privilégiées lorsque la structure présente déjà des dégradations ou une fragilité, afin d'éviter toute aggravation des dommages liés aux opérations d'échantillonnage.

a.1. Sondage par marteau

Le martelage du béton est une méthode simple, peu coûteuse et relativement fiable pour détecter les zones de délamination. En heurtant une surface altérée, le changement du son émis, qui passe d'une résonance pleine de type « ping » à un son plus sourd et creux, permet de localiser et de délimiter les zones concernées.

Pour les surfaces étendues, on peut utiliser des méthodes de reconnaissance plus rapides, comme le traînage de chaîne, qui repose sur le même principe acoustique que le sondage au marteau. Ces approches restent néanmoins approximatives et ne donnent qu'une appréciation globale des dégradations. Elles conviennent donc pour une évaluation préliminaire, mais elles sont insuffisantes pour le relevé détaillé exigé dans le cadre d'interventions de réhabilitation.

a.2. Méthode échos-chocs

Grâce aux progrès récents réalisés dans le domaine de l'instrumentation et du traitement informatique, on a pu mettre au point des méthodes fiables pour détecter les vides, les fissures et autres anomalies internes du béton.

Une de ces techniques, la méthode d'« impact-écho », utilise la propagation d'ondes de compression produites par un choc mécanique. Ces ondes traversent le matériau et se réfléchissent sur les discontinuités internes ou les interfaces externes, puis sont reçues par un récepteur, le plus souvent un transducteur. Les signaux ainsi enregistrés sont transformés en spectres fréquentiels et visualisés ensuite sur un support informatique (**Figure 3.3**).

Le traitement de ces données à l'aide de logiciels spécialisés permet d'interpréter les résultats et d'estimer à la fois la présence et la profondeur probable des défauts. En effet, la vitesse de propagation des ondes, leur fréquence ou le temps de parcours permettent de déterminer la localisation des anomalies. En outre, cette méthode présente l'avantage d'être très rapide, chaque mesure ne nécessitant que quelques secondes de traitement.



Figure 3. 3: test Choc-Echo avec appareil Olson's NDE 360 [15]

a.3. Méthode de l'auscultation sonique

L'auscultation sonique est basée sur la mesure du temps mis par une onde ultrasonore pour se propager entre un émetteur et un récepteur. L'équipement employé, muni de matériaux piézoélectriques, transforme l'énergie électrique en une onde mécanique ultrasonore, puis récupère cette onde transmise à travers le matériau en la retransformant en signal électrique. Le temps de parcours enregistré permet donc d'analyser le comportement du béton (**Figure 3.4**).

La connaissance de la distance entre les deux capteurs permet de déterminer la vitesse de propagation de l'onde. En général, une vitesse élevée est le signe d'un béton plus dense et de meilleure qualité mécanique. Cette méthode est applicable à plusieurs domaines tels que l'évaluation de l'homogénéité du matériau, la détection de fissures ou de vides internes, et l'appréciation de l'état de dégradation du béton. Elle permet aussi d'évaluer la profondeur des fissures superficielles et d'approcher la résistance à la compression, par comparaison avec des bétons de référence.

Pour que les ondes se transmettent bien, on met un agent de couplage entre les capteurs et la surface du béton (gel spécial ou gelée de pétrole) [15].

Voici les résultats expérimentaux obtenus par le CEBTP à l'occasion d'essais d'auscultation sonique :

Tableau 3. 1: résultats des essais d'auscultation ultrasonique réalisés sur le béton (CEBTP) [15]

Vitesse de propagation du son	Qualité estimée du béton
$V > 4000 \text{ m/s}$	Le béton est de bonne qualité et homogène
$3500 < V < 4000 \text{ m/s}$	Le béton est de qualité moyenne
$3000 < V < 3500 \text{ m/s}$	Le béton est de qualité médiocre
$V < 3000 \text{ m/s}$	Le béton est de mauvaise qualité

Cette technique est également particulièrement intéressante pour l'évaluation non destructive des fissures réparées par injection de résine époxydique. L'idée est de comparer les vitesses de propagation relevées le long de la zone réparée avec celles obtenues sur une partie saine du béton. Une réparation efficace se caractérise par des vitesses de transit voisines de celles d'un matériau non fissuré.

En outre, les recommandations de l'ASTM indiquent qu'il existe une corrélation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonores et la résistance à la compression du béton, avec une précision généralement de l'ordre de $\pm 20 \%$ [15].



Figure 3. 4: l'auscultation sonique des bétons [15]

a.4. Le scléromètre

L'essai sclérométrique utilise la relation qui existe entre la dureté superficielle du béton et sa résistance à la compression. L'idée est de faire jaillir, à l'aide d'un piston muni d'un ressort, une masse sur la surface du matériau, qui rebondit plus ou moins, ce qui est mesuré par le déplacement d'un index sur une échelle graduée. Plus le rebond est ample, plus la dureté du béton est grande. **(Figure 3.5)**

Selon les recommandations de l'ASTM, il faut effectuer au moins dix mesures sur l'élément étudié pour garantir la fiabilité des résultats. L'indice sclérométrique correspondant est en général établi sur la base de la moyenne des valeurs obtenues et à l'aide de abaques d'interprétation.

Il faut toutefois noter que les résultats peuvent être influencés par plusieurs facteurs, dont la résistance réelle du béton, l'orientation de l'appareil au cours de l'essai, ainsi que le degré d'homogénéité du matériau [15].



Figure 3. 5: scléromètre – mesure de la dureté d’une surface béton [35]

a.5. Le relevé du ferrailage

Le relevé des armatures peut se faire à l'aide d'un pachomètre, comme le dispositif de type FerroScan, qui est un équipement portable destiné à l'auscultation non destructive des structures en béton armé. Cet appareil permet de déterminer avec précision la position des barres d'armature, d'évaluer l'épaisseur d'enrobage et d'estimer leur diamètre **(Figure 3.6)**.

Il fonctionne en émettant un champ magnétique, dont les perturbations sont détectées lorsqu'il rencontre des éléments métalliques. Les caractéristiques des armatures influent directement sur les variations du signal électromagnétique qui sont enregistrées.

En effet, plus le diamètre des barres est grand, plus le signal est intense, alors que plus l'épaisseur d'enrobage est élevée, moins le signal est intense.

Ainsi, la profondeur d'investigation de ce type de dispositif reste limitée à environ 10 à 15 cm, selon les caractéristiques du béton et la nature des armatures.

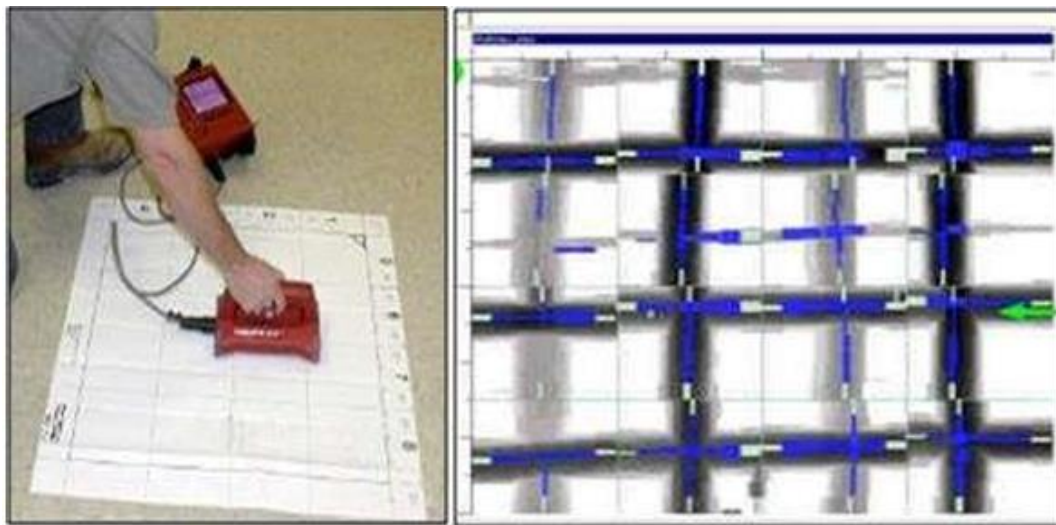


Figure 3. 6: détection par fenêtrage et résultats [15]

b. Investigations destructives

On a recours aux investigations destructives lorsqu'il faut prélever des échantillons de matériau pour déterminer leurs propriétés géométriques, mécaniques et chimiques. Elles donnent également accès aux parties internes ou sous-jacentes de la structure. Ainsi, ce type d'intervention permet d'évaluer l'état de dégradation en profondeur et d'apprécier l'étendue des pathologies affectant l'ouvrage.

b.1. Le potentiel de corrosion

La corrosion des armatures d'acier dans le béton engendre une différence de potentiel entre zones anodiques et cathodiques, mise en évidence par la méthode de la demi-cellule. Celle-ci consiste à mesurer le potentiel

entre une électrode de référence cuivre/sulfate de cuivre placée en surface du béton et les armatures, à l'aide d'un voltmètre à haute impédance (**Figure 3.7**).

Selon la norme ASTM C876-91, les valeurs mesurées permettent d'estimer la probabilité de corrosion :

- Pour $E \geq -200 \text{ mV}$: la probabilité de corrosion est faible (inférieure à 10 %)
- Pour $-350 \text{ mV} < E < -200 \text{ mV}$: la corrosion est incertaine (probabilité d'environ 50 %)
- Pour $E < -350 \text{ mV}$: la corrosion est très probable (supérieure à 50 %, pouvant atteindre 90 %).

Les résultats peuvent être influencés par plusieurs facteurs tels que l'humidité de surface, la présence de chlorures ou la carbonatation, modifiant les valeurs mesurées.

Malgré certaines limites, notamment l'impossibilité de détecter la corrosion des armatures discontinues ou des câbles de précontrainte, cette méthode reste largement utilisée en raison de sa simplicité, de sa rapidité et de son faible coût.



Figure 3. 7: mesure du potentiel de corrosion [12]

b.2. Test au contenu de chlorure

Pour évaluer la teneur en ions chlorure du béton, il faut prélever des échantillons directement sur la structure. Cette opération peut être faite soit par forage avec récupération de la poudre au moyen d'un marteau à percussion rotative (de préférence électrique), soit par carottage suivi d'un broyage du matériau en laboratoire. On recueille ensuite les échantillons pulvérisés dans des contenants propres et on aspire soigneusement les cavités de prélèvement. L'analyse de ces prélèvements est faite par des méthodes chimiques appropriées.

En outre, on peut différencier les chlorures déjà présents lors de l'utilisation du béton de ceux qui y ont pénétré par la suite, en comparant les concentrations mesurées à différentes profondeurs dans l'élément étudié. En effet, les chlorures d'origine interne présentent généralement une répartition homogène, alors que les apports externes se caractérisent par des concentrations plus élevées à la surface et décroissantes vers l'intérieur du béton [15].

b.3. Test à la carbonatation

La première étape de la détermination de la profondeur de carbonatation consiste à exposer une surface fraîche de béton. L'opération peut se faire par carottage, puis fractionnement de l'échantillon à la masse et au burin pour exposer une section interne intacte. On repère ensuite la localisation du front de carbonatation par application d'un indicateur acido-basique sur la surface ainsi obtenue. Cet indicateur change de couleur autour d'un pH égal à 10 et permet donc de distinguer la zone carbonatée de la zone saine.

La solution de phénolphtaléine est le réactif le plus couramment employé : elle colore le béton en rose rouge si le pH est supérieur à 10, mais reste incolore si le pH est inférieur (**Figure 3.8**).



Figure 3. 8: carbonatation sur carotte [12]

Il est également intéressant de confronter les profondeurs de carbonatation mesurées avec l'épaisseur d'enrobage des armatures déterminée à l'aide d'un pachomètre [15]. En répétant les mesures on peut donc tracer une courbe qui représente cette relation (**Figure 3.9**).

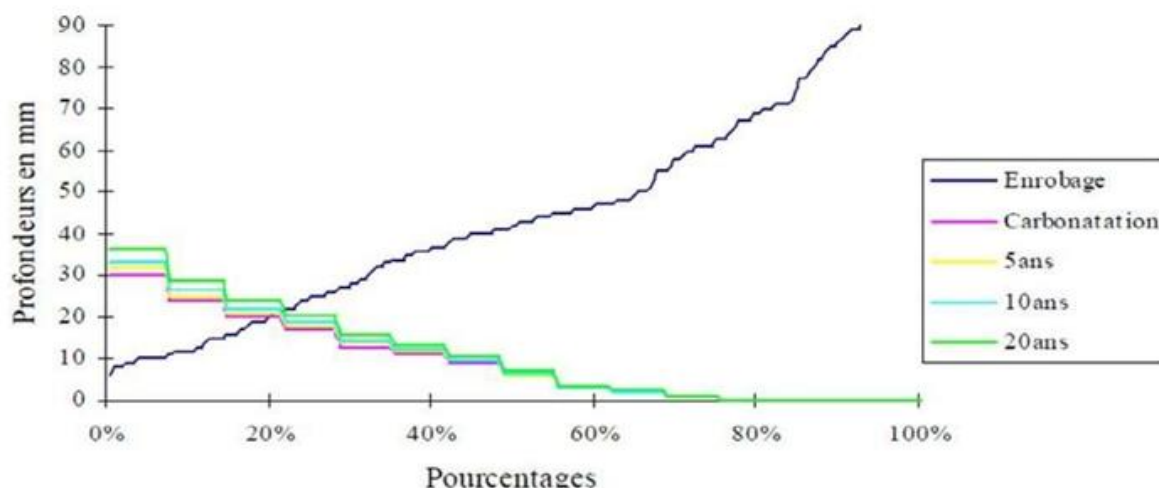


Figure 3. 9: graphique enrobage-carbonatation [15]

b.4. Carottage des éléments en béton armé

Le carottage du béton armé est une technique d'investigation polyvalente qui répond à plusieurs objectifs. Il facilite notamment, dans le cas de dallages, l'accès au sol porteur pour réaliser des essais géotechniques in situ tels que les essais au pénétromètre dynamique ou à la tarière. Ces études ont pour but de caractériser les propriétés du sol dans le cadre des opérations de réhabilitation ou de restructuration des ouvrages.

En outre, la prise de carottes permet d'évaluer les caractéristiques mécaniques et chimiques du béton. Des essais de compression sur ces échantillons permettent d'évaluer la résistance du matériau, tandis que des analyses chimiques et microscopiques permettent d'identifier la nature des constituants et leurs proportions. Grâce à ces informations, on peut déterminer le type de ciment utilisé ainsi que le rapport eau/ciment.

Le carottage permet aussi de caractériser la stratigraphie des éléments, en déterminant l'épaisseur des différentes couches constitutives (revêtement, chape, béton, ...).

La norme NF EN 13791 (septembre 2007) présente deux méthodes pour évaluer sur place la résistance à la compression des structures et éléments préfabriqués en béton. Le choix de la méthode dépend du nombre de carottes prélevées, mais, quel que soit le cas, elle permet d'estimer la classe de résistance du béton.

Cette technique nécessite d'utiliser une carotteuse et d'identifier au préalable le ferrailage pour éviter d'inclure des armatures dans les échantillons (**Figure 3.10**). En effet, la présence d'acier dans une carotte peut, d'une part, compromettre l'intégrité de la structure si les armatures jouent un rôle porteur significatif,

et d'autre part, fausser les résultats des essais de compression. Pour les mêmes raisons, il convient d'éviter les prélèvements au droit des fissures, qui risquent d'altérer la représentativité des mesures [12].



Figure 3. 10: carottage du béton armé [12]

b.5. Prélèvement d'acier

Le relevé des armatures métalliques est une opération tout à fait pertinente, notamment dans le cadre d'un recalcul de structure, où la connaissance précise des aciers en place est indispensable. L'échantillonnage permet ainsi d'identifier la nature des armatures (aciers à haute adhérence, aciers lisses, barres TOR, etc.) ainsi que leurs propriétés mécaniques, notamment la limite d'élasticité.

Ces données sont nécessaires pour évaluer la capacité de charge de l'élément considéré et pour fixer les charges admissibles. Elles permettent aussi de guider les choix de renforcement, qu'il s'agisse de l'emploi de matériaux composites tels que les fibres de carbone ou de l'adjonction d'armatures complémentaires, de manière à répondre aux exigences fonctionnelles et de sécurité de l'ouvrage.

En pratique, le prélèvement s'effectue par sciage des barres d'acier, après retrait du béton environnant. On conseille d'intervenir sur des zones non altérées, pour éviter tout risque d'affaiblissement local de la structure (**Figure 3.11**).

Dans certains cas pathologiques, notamment en cas de corrosion des armatures, des prélèvements ciblés peuvent également être effectués dans les zones dégradées. Cette approche permet d'évaluer le niveau

d'avancement de la corrosion et la section résiduelle d'acier encore fonctionnelle. Ces données sont primordiales pour déterminer l'ampleur des travaux de réparation, en particulier pour calculer la quantité de ferrailage à ajouter afin de rétablir au moins la section initiale indispensable au bon fonctionnement de l'élément structurel [12].



Figure 3. 11: prélèvement d'aciers [12]

3.2.2.3. Analyse des causes et évaluation de la durabilité

L'analyse des causes et l'évaluation de la durabilité des structures en béton armé constituent une étape fondamentale de la démarche de diagnostic. Elle vise à identifier l'origine des désordres observés et à estimer la capacité résiduelle de l'ouvrage à assurer ses performances structurelles dans le temps.

L'analyse des causes consiste à déterminer les mécanismes de dégradation responsables des pathologies observées. Les principaux mécanismes recensés dans la littérature sont la corrosion des armatures induite par la carbonatation ou la pénétration des chlorures, la réaction alcali-granulats, l'attaque sulfatique, les effets du gel-dégel et les sollicitations mécaniques excessives [28]. La carbonatation du béton, en abaissant le pH de la solution interstitielle en dessous de 9, détruit la couche passive protégeant les armatures et constitue l'un des facteurs de dégradation les plus répandus dans les structures existantes [28]. Les effets des cycles humidification-séchage sur la durabilité du béton, notamment en présence de granulats recyclés, ont par ailleurs été documentés récemment [10].

L'évaluation de la durabilité permet ensuite d'apprécier l'évolution de ces dégradations et leur impact sur la durée de vie résiduelle de la structure. Elle repose sur des modèles de performance et de durée de vie définis par les référentiels normatifs internationaux, notamment les principes généraux sur la durabilité des structures établis par la norme ISO 13823 [30], et le fib Model Code 2010 qui fournit un cadre de calcul probabiliste de la durée de vie des ouvrages en béton [29].

Les stratégies de protection et de réparation sont quant à elles encadrées par la norme européenne NF EN 1504-9 [19], qui définit les principes d'intervention selon la nature et l'origine des dégradations identifiées, et oriente le choix des techniques de traitement vers les solutions les plus adaptées à chaque pathologie.

3.2.3. Troisième étape : évaluation et gestion des risques

Cette étape constitue le lien direct entre le diagnostic des fissurations et la prise de décision. Elle permet d'évaluer les risques associés aux désordres observés en appliquant les méthodes AMDEC et Hallowell présentées précédemment.

3.2.3.1. Démarche d'évaluation des risques par couplage AMDEC — Hallowell

Dans cette étape, l'évaluation des risques repose sur une approche combinée permettant d'assurer à la fois une analyse structurée et une validation qualitative. La méthode AMDEC est utilisée pour identifier les modes de défaillance et évaluer leur criticité, tandis que la méthode Hallowell permet de valider cette évaluation à partir du jugement des experts.

Dans le cadre de cette étude, l'évaluation des risques repose sur une combinaison de deux approches complémentaires : la méthode AMDEC, qui permet d'identifier et d'analyser les modes de défaillance, et la méthode Hallowell, qui permet de classer les risques identifiés selon leur niveau de criticité à partir du jugement des experts. La matrice $\mathbf{P} \times \mathbf{G} \times \mathbf{D}$ peut être utilisée comme outil complémentaire lorsque des données fiables sont disponibles.

Les méthodes AMDEC et Hallowell sont utilisées de manière complémentaire : l'AMDEC structure l'identification des risques, tandis que la méthode Hallowell permet d'en assurer l'évaluation qualitative à partir du jugement des experts. Cette complémentarité permet d'obtenir une analyse cohérente et adaptée aux conditions réelles du projet.

Cette démarche constitue une base essentielle pour la hiérarchisation des risques et l'orientation des décisions de réhabilitation qui seront appliquées dans l'étude de cas.

3.2.3.2. Évaluation qualitative des risques par la méthode Hallowell

Cette évaluation qualitative est réalisée selon la méthode Hallowell présentée dans le chapitre précédent, en s'appuyant sur l'expérience et l'expertise des intervenants. Elle consiste à classer les risques identifiés en fonction de leur niveau de criticité (critique, significatif ou mineur), sur la base du jugement des experts impliqués dans l'étude.

Dans le cadre de ce travail, cette évaluation a été réalisée en collaboration avec des ingénieurs du CDE impliqués dans la réhabilitation de l'ouvrage, ainsi que des enseignants spécialisés en génie civil, ce qui permet de garantir la pertinence et la fiabilité des jugements formulés.

Cette approche permet de compléter l'évaluation des risques en apportant une analyse qualitative basée sur l'expérience des experts, particulièrement utile lorsque les données sont insuffisantes ou incertaines.

Les niveaux de criticité ainsi obtenus permettent d'établir une première hiérarchisation des désordres, qui servira de base à la définition des priorités d'intervention dans le chapitre suivant.

3.2.3.3. Mise en œuvre de l'AMDEC

Dans cette étape, la méthode AMDEC est appliquée aux désordres observés lors du diagnostic afin d'identifier les modes de défaillance associés aux différentes pathologies. Chaque mode de défaillance est analysé en termes de causes, d'effets et de conséquences sur la structure, puis évalué à l'aide des paramètres de gravité, de probabilité et de détectabilité.

L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) constitue l'outil central d'identification systématique des risques dans la démarche méthodologique retenue.

Développée initialement dans le domaine aéronautique et aérospatial, elle a progressivement été adoptée dans le génie civil pour structurer de façon exhaustive le recensement des modes de défaillance potentiels d'un ouvrage, de leurs effets sur la sécurité et la fonctionnalité de la structure, ainsi que de leurs causes sous-jacentes [24,25]. Son application à la réhabilitation des structures en béton armé s'inscrit dans la continuité des travaux menés en contexte algérien par LAKERMI (2013) et BENACHENHOU (2019), qui ont démontré la pertinence de cet outil pour des projets présentant une forte complexité et des données limitées [24,25].

Dans le cadre de cette étude, l'AMDEC est adaptée au contexte de la réhabilitation en intégrant une évaluation qualitative basée sur la méthode Hallowell. Ainsi, la classification des risques (Critique,

Significatif, Mineur) est utilisée pour remplacer la cotation numérique lorsque les données disponibles ne permettent pas une quantification fiable [27].

❖ Grille AMDEC appliquée à la réhabilitation

Le tableau suivant présente la grille AMDEC type retenue pour l'analyse des risques de l'ouvrage étudié. Pour chaque composant ou zone structurelle, sont identifiés le mode de défaillance potentiel, l'effet attendu sur la structure, le niveau de détectabilité du désordre et la classification qualitative attribuée selon le protocole Hallowell [24,27] :

Tableau 3. 2: grille AMDEC type pour la réhabilitation

à	Mode de défaillance	Effet potentiel	Détectabilité	Classification Hallowell (obligatoire)
Plancher béton armé	Rupture par cisaillement	Effondrement local	Faible	Critique
Armatures en façade	Corrosion généralisée	Perte de capacité portante	Moyenne	Critique
Fondations	Tassement différentiel	Fissurations structurelles	Faible	Significatif
Joints de dilatation	Défaut d'étanchéité	Infiltrations, dégradation	Elevée	Mineur
Revêtements extérieurs	Décollement, chute	Risque pour usages	Elevée	Significatif
Charpente bois	Attaque biologique	Perte de résistance	Moyenne	Significatif

L'attribution du niveau de criticité pour chaque mode de défaillance permet de hiérarchiser les risques et d'orienter les actions à mettre en œuvre. Les risques critiques nécessitent une intervention immédiate, les risques significatifs font l'objet d'une planification à court terme, tandis que les risques mineurs sont intégrés au programme de surveillance et de maintenance préventive. Cette grille constitue l'outil central de l'analyse des risques dans cette étude et sera appliquée dans le chapitre 4 pour évaluer les désordres observés sur l'ouvrage.

3.2.3.4. Matrice de criticité P×G×D : outil complémentaire d'évaluation quantitative

La matrice de criticité constitue un outil complémentaire permettant d'évaluer les risques de manière semi-quantitative à partir de trois paramètres fondamentaux :

- la probabilité d'occurrence (P),
- la gravité des conséquences (G),
- la détectabilité du désordre (D).

L'indice de priorité de risque (IPR) est déterminé selon la relation suivante :

$$\text{IPR} = P \times G / D$$

Cet indice permet de hiérarchiser les risques en fonction de leur niveau de criticité. Toutefois, l'utilisation de cette matrice reste conditionnée par la disponibilité de données fiables permettant une estimation objective des paramètres P, G et D. En l'absence de telles données, ce qui est fréquent dans les projets de réhabilitation des structures existantes, l'évaluation qualitative basée sur la méthode Hallowell est privilégiée. Dans le cadre de ce travail, la matrice P×G×D est utilisée uniquement comme outil complémentaire, afin d'illustrer et de consolider l'analyse des risques lorsque les conditions d'application sont réunies.

L'évaluation obtenue permet de comparer les résultats issus de l'approche quantitative avec ceux de la classification qualitative, et de confirmer la cohérence de la hiérarchisation des risques. Ainsi, la combinaison des approches AMDEC, Hallowell et de la matrice de criticité permet d'obtenir une analyse à la fois structurée, cohérente et adaptée aux conditions réelles du projet.

3.2.3.5 Exemple d'application en réhabilitation béton armé

Le tableau suivant illustre l'application de la matrice à quatre modes de défaillance représentatifs, avec vérification de la cohérence entre l'IPR calculé et la classification Hallowell [27] :

Tableau 3. 3: évaluation des modes de défaillance par la méthode AMDEC et calcul de l'IPR

Mode de défaillance	P	G	D	IPR = $P \times G / D$	Niveau	Cohérence Hallowell
Corrosion généralisée des armatures de façade (perte de section mesurée : 35 %)	4	4	2	8,0	Critique	✓ Cohérent
Fissuration active en tête de poteau (ouverture 1,2 mm au fissuromètre)	3	4	2	6,0	Significatif	✓ Cohérent
Décollement d'enduit en façade (surface limitée, hors zone de circulation)	2	2	1	4,0	Significatif	À vérifier par experts
Efflorescences en sous-sol (sans armatures exposées)	2	1	1	2,0	Mineur	✓ Cohérent

Cet exemple permet de vérifier la cohérence entre l'évaluation quantitative et la classification qualitative issue de la méthode Hallowell. En cas de divergence, le jugement des experts est privilégié, notamment lorsque les données utilisées pour le calcul sont incertaines.

L'évaluation ainsi obtenue permet de hiérarchiser les risques et d'orienter les décisions de réhabilitation en définissant les priorités d'intervention.

3.2.4. Quatrième étape : stratégie de réhabilitation : analyse des scénarios, choix et mise en œuvre

La définition de la stratégie de réhabilitation repose directement sur les résultats de l'évaluation des risques obtenus à l'étape précédente. Les interventions sont ainsi adaptées au niveau de criticité des désordres, afin d'assurer la sécurité, la durabilité et le bon fonctionnement de la structure. Ainsi, le choix des interventions repose directement sur la hiérarchisation des risques établie à l'étape précédente, en privilégiant en priorité le traitement des désordres critiques.

3.2.4.1. Etude comparative des scénarios de réhabilitation

Avant de définir la stratégie d'intervention, une analyse multicritère des scénarios de réhabilitation envisageables est conduite. Cette démarche comparative, recommandée par les référentiels normatifs de réparation des structures en béton [19], vise à sélectionner la solution offrant le meilleur compromis entre

performance technique, viabilité économique et faisabilité opérationnelle. Elle prend en compte les critères d'évaluation suivants [20] :

Tableau 3. 4 : critères d'évaluation des solutions de réhabilitation des structures dégradées

Critère d'évaluation	Description
Performance technique	Niveau de réduction du risque résiduel, durée de vie prolongée, respect des exigences normatives
Coût global	Études préalables, travaux, gestion du chantier, impact sur l'exploitation durant les travaux
Délai de mise en œuvre	Durée des travaux, phasage des interventions, contraintes liées à l'occupation de l'ouvrage
Risques propres au chantier	Instabilité provisoire, nuisances pour les riverains, risques Hygiène Sécurité Environnement
Durabilité de la solution	Durée de vie attendue de la réparation, besoins de maintenance future
Faisabilité technique	Disponibilité des matériaux et des entreprises spécialisées, accessibilité des zones à traiter

Cette analyse multicritère est directement liée aux résultats de l'évaluation des risques, les scénarios étant comparés en tenant compte du niveau de criticité des désordres et des exigences de sécurité associées.

Les scénarios types envisageables en réhabilitation structurelle sont les suivants [20,12] :

- **Réparation localisée** : traitement des désordres ponctuels sans modification du système structurel global
- **Renforcement structurel** : ajout de capacité portante par chemisage, précontrainte additionnelle ou mise en place d'une ossature mixte
- **Démolition partielle et reconstruction** : applicable aux zones structurellement non récupérables, dont l'état ne permet pas une réparation durable
- **Réhabilitation globale** : combinaison de plusieurs techniques appliquées à l'ensemble de l'ouvrage, dans le cadre d'une intervention intégrée
- **Changement d'usage** : adaptation de l'ouvrage à un programme fonctionnel différent, impliquant une mise aux normes structurelles et réglementaires.

Cette analyse comparative permet d'identifier les solutions les plus adaptées en tenant compte à la fois du niveau de risque, des contraintes techniques et des conditions d'exploitation de l'ouvrage. Les scénarios retenus doivent ainsi permettre de réduire de manière significative les risques identifiés, en particulier pour les désordres classés critiques et significatifs.

3.2.4.2.Choix de la stratégie de réhabilitation

Le choix de la stratégie de réhabilitation est directement conditionné par le niveau de criticité des désordres identifiés, et vise à garantir en priorité la sécurité structurelle et la durabilité de l'ouvrage. La stratégie retenue doit faire l'objet d'une justification technique et économique rigoureuse, formalisée dans un rapport de choix soumis au maître d'ouvrage, conformément aux recommandations de la norme NF EN 1504-9 [19] et aux pratiques professionnelles encadrées par les guides STRRES/FABEM [17] [18]. Ce rapport comprend les éléments suivants :

- Un tableau comparatif des scénarios avec notation multicritères, permettant une hiérarchisation objective des solutions
- La justification motivée du scénario retenu, au regard des critères techniques, économiques et de durabilité
- Les techniques de réhabilitation sélectionnées, accompagnées de leurs spécifications techniques détaillées
- Un plan de traitement des risques résiduels, issu du registre de risques Hallowell [27] mis à jour après évaluation des solutions.

Le tableau suivant présente les techniques couramment recommandées selon la nature des pathologies identifiées lors du diagnostic [19, 17,18] :

Tableau 3. 5: les techniques de réhabilitation recommandées

Pathologie traitée	Technique recommandée
Corrosion des armatures	Passivation électrochimique, remplacement des barres corrodées, protection cathodique par anodes sacrificielles [19]
Béton carbonaté / chloruré	Reprofilage au mortier de réparation conforme NF EN 1504, imprégnation hydrophobe [19]

Fissures actives structurelles	Injection résine époxy sous pression (classe F — NF EN 1504-5), renforcement par bandes PRFC [18]
Insuffisance de résistance	Chemisage béton armé, platebandes acier collées, renforcement par tissus de fibres de carbone [15]
Problème d'étanchéité	Membrane d'étanchéité, traitement hydrofuge de masse, injection polyuréthane expansif [17]
Tassement de foundation	Micropieux, jet-grouting, reprise en sous-œuvre par longrines [12]

Le recours à ces techniques est déterminé en fonction du type de pathologie et du niveau de risque associé. Les solutions lourdes sont ainsi privilégiées pour les désordres critiques, tandis que les interventions légères sont réservées aux désordres mineurs.

Le choix de la solution vise en priorité à traiter les désordres présentant une criticité élevée, tout en tenant compte de la faisabilité technique et économique de l'intervention.

Ainsi, la sélection des solutions de réhabilitation repose sur une approche hiérarchisée, combinant le niveau de risque identifié et les contraintes propres au projet.

3.2.4.3. Mise en œuvre des solutions de réhabilitation

La mise en œuvre des solutions de réhabilitation doit tenir compte du niveau de criticité des désordres, afin de garantir la sécurité des interventions et l'efficacité des traitements appliqués. Les interventions prioritaires concernent ainsi les désordres critiques, qui nécessitent des mesures urgentes et adaptées, tandis que les désordres mineurs peuvent être traités dans le cadre d'actions différées ou de maintenance. Elle doit également respecter les règles de l'art et les recommandations techniques, afin d'assurer la durabilité des interventions réalisées. La mise en œuvre des solutions retenues est encadrée par un Plan Qualité Chantier (PQC), établi conformément aux exigences de la norme NF P 95-103 [16] et aux prescriptions des guides STRRES/FABEM [17,18]. Ce document de référence comprend les éléments suivants :

- Un Plan d'Assurance Qualité (PAQ) définissant les points d'arrêt et les points critiques de contrôle, garantissant la conformité des travaux aux spécifications techniques retenues [16]

- Un plan de contrôle des matériaux et des techniques, incluant les essais de conformité des produits de réparation (résines, mortiers, tissus de carbone) avant et pendant leur mise en œuvre [19]
- Un plan HSE chantier intégrant la gestion des risques spécifiques à la réhabilitation : instabilité provisoire des éléments porteurs, exposition aux poussières de béton, manipulation de produits chimiques [21]
- Des modalités de suivi en cours de travaux : réunions de chantier périodiques, rapports hebdomadaires d'avancement, contrôles contradictoires entre maître d'œuvre et entreprise [20]
- Une procédure de gestion des non-conformités et des aléas techniques, permettant de tracer et de résoudre les écarts constatés par rapport aux prescriptions initiales [16].

Le respect de ces dispositions permet de réduire les risques liés à la mise en œuvre et d'assurer la pérennité des solutions adoptées.

3.2.4.4. Réception des travaux et clôture du dossier

La réception des travaux de réhabilitation constitue l'étape finale de la démarche. Elle permet de vérifier que les objectifs de réduction des risques identifiés lors de l'analyse ont été atteints et que les solutions mises en œuvre répondent aux exigences de sécurité et de durabilité de l'ouvrage. Cette étape comprend les éléments suivants, conformément aux pratiques professionnelles en vigueur [20,14] :

- Des essais de performance post-travaux : vérification des objectifs fixés en termes de résistance mécanique, d'étanchéité et de limitation des déformations, par des méthodes d'investigation comparables à celles du diagnostic initial [14].
- La levée des réserves éventuelles et l'établissement du procès-verbal de réception, actant la conformité des travaux aux spécifications contractuelles.
- L'établissement ou la mise à jour du Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE), intégrant l'ensemble des plans de récolement, des fiches techniques des produits utilisés et des résultats des essais de réception [14].
- La mise à jour du registre des risques issu de l'analyse AMDEC-Hallowell, avec confirmation des risques résiduels, définition des seuils d'alerte pour la surveillance future et planification des inspections périodiques [21].

La mise à jour du registre des risques permet d'assurer le suivi des désordres et le contrôle de la sécurité et de la durabilité de l'ouvrage dans le temps.

3.2.5. Cinquième étape : suivi, contrôle et retour d'expérience

Le suivi et le contrôle post-réhabilitation permettent d'évaluer l'efficacité des interventions réalisées et de vérifier la maîtrise des risques résiduels. Ils permettent également de confirmer la pertinence des solutions de réhabilitation mises en œuvre et d'ajuster, si nécessaire, les actions de surveillance, de maintenance ou de réhabilitation complémentaire en fonction de l'évolution de l'ouvrage.

3.2.5.1. Programme de surveillance post-réhabilitation

Le suivi post-travaux constitue la dernière phase active du cycle de réhabilitation structurelle. Il vise à vérifier la pérennité des solutions mises en œuvre, à détecter précocement toute reprise de dégradation et à alimenter le registre documentaire de l'ouvrage. Cette démarche de surveillance s'inscrit dans le cadre des principes de management du risque définis par la norme ISO 31000 :2018, qui stipule que le suivi et la révision constituent des composantes indissociables d'un processus de gestion des risques efficace [21].

Le programme de surveillance est structuré selon une fréquence d'inspection décroissante, adaptée à l'évolution prévisible du comportement de l'ouvrage après travaux, conformément aux recommandations de RINCKER (2009) [14] et de MOALIC (INSA Strasbourg) [20] :

Tableau 3. 6: programme de suivi et de contrôle post-réhabilitation des structures

Fréquence	Type de contrôle	Contenu
Mensuel (année 1)	Inspection visuelle rapide	Vérification des zones traitées, détection de nouveaux désordres apparents, contrôle photographique des points sensibles
Semestriel (années 2 à 5)	Inspection visuelle structurée	Grille d'inspection normalisée, relevé photographique systématique, mesures d'ouverture des fissures au fissuromètre [14]

Annuel (au-delà de 5 ans)	Inspection avec rapport technique	Rapport complet d'inspection, mise à jour du registre de risques AMDEC-Hallowell, recommandations d'entretien [21]
Sur événement exceptionnel	Inspection extraordinaire	Déclenchée après séisme, tempête, incident d'exploitation ou dépassement d'un seuil d'alerte instrumenté [21]

Cette gradation de la surveillance est conforme aux pratiques professionnelles encadrées par les guides STRRES/FABEM [17,18] et aux exigences du Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE), mis à jour lors de la réception des travaux [14].

La fréquence et la nature des contrôles sont ainsi adaptées au niveau de criticité des désordres traités, les zones présentant les risques les plus élevés faisant l'objet d'un suivi plus rapproché.

Ce programme de surveillance permet d'assurer un contrôle continu de l'état de l'ouvrage et de prévenir toute évolution défavorable susceptible de compromettre sa sécurité ou sa durabilité.

3.2.5.2. Indicateurs de performance

L'évaluation de l'efficacité des solutions de réhabilitation repose sur un ensemble d'indicateurs de performance définis dès la phase de réception des travaux, permettant une comparaison objective entre l'état post-travaux et les objectifs initialement fixés [20,21] :

- Taux de désordres résiduels : comparaison entre les désordres résiduels constatés lors des inspections périodiques et les objectifs de performance fixés à la réception, exprimés en termes de surface traitée, d'ouverture de fissures résiduelle ou de potentiel de corrosion mesuré [13]
- Évolution des mesures instrumentées : suivi de l'évolution temporelle des fissures (ouverture, longueur), des déformations structurelles et du potentiel de corrosion des armatures, par comparaison avec les valeurs de référence établies lors du diagnostic [15].
- Nombre et nature des non-conformités : recensement et caractérisation des non-conformités détectées en phase de suivi, avec évaluation de leur impact sur la classification de risque Hallowell [27].

- Coût de maintenance réel versus coût prévisionnel : analyse de l'écart entre les dépenses de maintenance effectivement engagées et les provisions financières établies lors de l'étude préalable, constituant un indicateur indirect de la qualité des solutions retenues [20].

Ces indicateurs permettent d'évaluer objectivement l'efficacité des solutions mises en œuvre et de réajuster, le cas échéant, la stratégie de maintenance ou de réhabilitation.

3.2.5.3. Retour d'expérience

Le retour d'expérience (REX) est conduit dans un délai de douze à vingt-quatre mois après la réception formelle des travaux. Il constitue une démarche de capitalisation des enseignements tirés de l'opération de réhabilitation, visant à améliorer la qualité des interventions futures sur des ouvrages présentant des pathologies similaires [25,20].

Le REX s'articule autour de quatre volets complémentaires :

- Bilan technique : évaluation des performances des techniques de réhabilitation employées au regard des objectifs fixés, identification des désordres non anticipés lors du diagnostic et analyse de leurs causes (mécanismes de dégradation non détectés, sous-estimation de la gravité ou inadéquation de la technique retenue) [14,20].
- Bilan de la démarche de gestion des risques : évaluation de la pertinence des classifications Hallowell établies en phase de diagnostic [27], identification des évaluations ayant nécessité une révision, et formulation de recommandations méthodologiques pour les prochaines applications de la démarche AMDEC-Hallowell sur des ouvrages similaires [25,27]
- Recommandations pour la prochaine inspection structurelle : définition des zones prioritaires à surveiller lors de la prochaine inspection quinquennale, actualisation des seuils d'alerte instrumentés et proposition d'un programme d'investigations complémentaires si nécessaire [14,21]
- Mise à jour du registre documentaire de l'ouvrage : intégration de l'ensemble des données produites lors de l'opération de réhabilitation dans le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE), garantissant la traçabilité complète de l'historique de l'ouvrage pour les interventions futures [14,20].

Le retour d'expérience permet ainsi d'améliorer de manière continue les pratiques de diagnostic, d'évaluation des risques et de réhabilitation, en renforçant la pertinence des décisions prises sur des projets similaires.

3.3. Approche générale de la réparation des ouvrages en béton

Les techniques présentées dans cette section constituent un ensemble de solutions de réparation et de renforcement pouvant être mobilisées en fonction de la nature des pathologies observées et du niveau de criticité des désordres identifiés lors des étapes précédentes.

3.3.1. Contexte et démarche de réparation

À partir des éléments disponibles, notamment le rapport de diagnostic, le maître d'ouvrage est en mesure de prendre une première décision concernant les solutions de réparation proposées. Il peut ainsi retenir tout ou partie des recommandations formulées par l'expert, puis engager une étude préliminaire des solutions sélectionnées.

La phase de réparation peut ensuite être mise en œuvre en s'appuyant sur des normes reconnues. À ce stade, le maître d'ouvrage doit définir précisément les objectifs à atteindre, qu'il s'agisse de réparation ou de renforcement, tout en tenant compte des contraintes environnementales et sociétales liées aux travaux. Dans ce contexte, la norme européenne EN 1504 constitue une référence essentielle, en proposant un cadre structuré pour la réparation des éléments en béton dégradé. Dans cette logique, la réparation ou le renforcement ne sont pas définis uniquement à partir des référentiels techniques, mais également à partir des résultats du diagnostic et du niveau de risque associé aux désordres observés.

3.3.2. Organisation des interventions de réparation

Les méthodes et principes définis par la norme reposent sur des pratiques éprouvées et des solutions ayant démontré leur efficacité sur le long terme. Toutefois, cela n'exclut pas le recours à d'autres techniques, qui peuvent s'avérer nécessaires selon les spécificités de chaque situation.

La norme EN 1504 (partie 9) regroupe les méthodes de réparation et de protection selon plusieurs principes liés principalement à :

- la dégradation du béton,
- la dégradation des armatures.

Cette organisation permet d'orienter le choix des interventions en fonction de l'origine du désordre, qu'il soit lié au béton lui-même ou à la dégradation

3.3.3. Méthodes de protection et remise en état du béton

La réparation du béton vise à stopper l'évolution des dégradations, restaurer les propriétés initiales du matériau et prévenir l'apparition de nouveaux désordres. Sa réussite dépend d'une mise en œuvre rigoureuse, accompagnée de contrôles et d'un suivi adapté.

Les principales méthodes sont les suivantes [19]. Le recours à l'une ou l'autre de ces méthodes dépend de la nature de la pathologie, de l'ampleur des dégradations et du niveau de criticité attribué lors de l'évaluation des risques.

3.3.3.1. Limitation des pénétrations extérieures

Cette approche consiste à réduire ou empêcher l'introduction d'agents nuisibles tels que l'eau, les gaz ou les substances chimiques. Elle peut être réalisée par :

- imprégnation,
- revêtement de surface (avec ou sans pontage des fissures),
- colmatage local des fissures,
- remplissage des fissures,
- transformation des fissures en joints,
- mise en place de panneaux ou membranes (**Figure 3.12**).

Ces techniques sont particulièrement adaptées aux désordres de faible à moyenne criticité, lorsque l'objectif principal est de limiter la pénétration des agents agressifs et de prévenir l'aggravation des dégradations.



Figure 3. 12: mise en œuvre d'une membrane bitumineuse d'étanchéité [36]

3.3.3.2. Maîtrise de l'humidité du béton

Elle vise à réguler la teneur en eau du béton dans une plage déterminée. Les techniques utilisées incluent :

- l'imprégnation hydrophobe
- les revêtements de surface
- les systèmes de protection ou de surrevêtement
- les traitements électrochimiques

La maîtrise de l'humidité constitue une action préventive essentielle, notamment dans les ouvrages où l'humidité représente un facteur aggravant de la corrosion des armatures et de la dégradation du béton.

3.3.3.3. Restauration des parties dégradées

Cette opération consiste à restituer la forme et la fonction initiales du béton ou à remplacer partiellement les zones dégradées. Elle peut être réalisée par :

- application manuelle de mortier
- coulage de nouveau béton
- projection de béton ou mortier
- remplacement localisé d'éléments

Ces interventions sont adaptées aux zones où les dégradations restent localisées et où la restauration de la géométrie et de la fonction de l'élément permet de prolonger sa durée de service.

3.3.3.4. Renforcement structural

Le renforcement structural permet d'augmenter ou de rétablir la capacité portante d'un élément. Il peut être assuré par :

- ajout ou remplacement d'armatures
- installation de barres dans des zones forcées
- collage de plaques
- ajout de béton ou mortier (gainage, chemisage)
- injection ou remplissage des fissures
- mise en œuvre de la précontrainte

Le renforcement structural est réservé aux situations où les désordres identifiés compromettent la capacité portante ou la stabilité de l'élément, et correspond généralement aux pathologies classées à criticité élevée ou critique.

3.3.3.5. Renforcement face aux sollicitations physiques

Cette méthode vise à améliorer la résistance du béton face aux sollicitations mécaniques ou physiques. Elle repose principalement sur :

- l'application de revêtements
- l'imprégnation

Cette approche est mobilisée lorsque la protection de surface ou l'amélioration du comportement physique du béton permet de limiter l'apparition ou la reprise des désordres.

3.3.3.6. Protection vis-à-vis des agressions chimiques

Elle a pour objectif d'augmenter la durabilité du béton face aux agressions chimiques. Les solutions consistent en :

- des revêtements de protection
- des imprégnations spécifiques

Ces techniques sont particulièrement indiquées dans les environnements agressifs, afin de renforcer la durabilité de l'ouvrage et de limiter l'évolution de pathologies liées à la carbonatation, aux chlorures ou aux sulfates.

3.3.4. Méthode de traitement des armatures métalliques

La dégradation des armatures est généralement liée à des phénomènes de corrosion, favorisés par un enrobage insuffisant, un environnement agressif ou la présence de fissures. Le choix de la méthode de traitement dépend de l'origine de cette corrosion, de son degré d'avancement et du niveau de criticité du désordre identifié lors de l'évaluation des risques. Plusieurs méthodes peuvent alors être mobilisées [19] :

3.3.4.1. Maintien ou rétablissement de l'état passif

Cette technique consiste à recréer les conditions chimiques favorables à la protection de l'acier, notamment par :

- l'augmentation de l'enrobage
- le remplacement du béton dégradé
- des traitements de ré-alkalinisation
- l'extraction des chlorures

3.3.4.2. Augmentation de la résistance électrique sue béton

Elle vise à réduire la conductivité électrique du béton en limitant sa teneur en humidité, notamment par des traitements de surface.

3.3.4.3. Régulation des phénomènes électrochimiques (cathodique)

Cette méthode agit sur les conditions électrochimiques afin d'empêcher le développement des réactions de corrosion.

3.3.4.4. Protection électrochimique des armatures

Il s'agit d'un procédé durable consistant à abaisser le potentiel électrochimique de l'armature afin de ralentir ou stopper la corrosion. Cela est réalisé par la mise en place d'une anode générant un courant de protection (Figure 3.13).

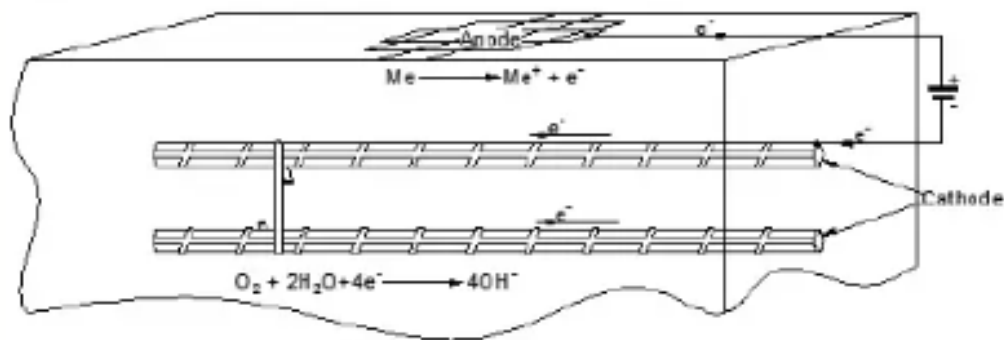


Figure 3. 13: schéma de la protection cathodique des armatures par anodes sacrificielles ou par courant imposé [15]

3.3.4.5. Traitement ciblé des zones sensibles (anodiques)

Cette technique vise à neutraliser les zones susceptibles de corroder, notamment par :

- l'application de revêtements protecteurs,
- l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion.

Ces méthodes sont mobilisées en fonction du niveau de dégradation des armatures et de leur influence sur la sécurité et la durabilité de l'ouvrage. Elles sont particulièrement importantes dans les situations où la corrosion constitue un facteur aggravant des fissurations et de la perte de capacité portante.

3.3.5. Synthèse

La durabilité des structures en béton dépend fortement de la qualité des interventions de réparation et de maintenance. Une mauvaise compréhension des mécanismes de dégradation ou un choix inadapté des techniques peut compromettre l'efficacité des réparations.

Ainsi, chaque intervention doit être fondée sur une analyse rigoureuse des désordres, une sélection appropriée des méthodes et une mise en œuvre conforme aux règles de l'art. Les techniques de réparation et de traitement des armatures présentées dans cette section constituent une base technique de référence, dont le choix dépend directement de la nature des pathologies observées et du niveau de criticité identifié lors de l'évaluation des risques.

3.4. Techniques de traitement et de réparation des fissures

Après avoir présenté les principes généraux de réparation des structures en béton, il est pertinent de s'intéresser plus en détail aux techniques spécifiques de traitement des fissures (Figure 3.14), qui constituent une intervention courante dans les ouvrages en béton. Le choix de ces techniques dépend de la nature des fissures, de leur activité et du niveau de criticité associé au désordre.

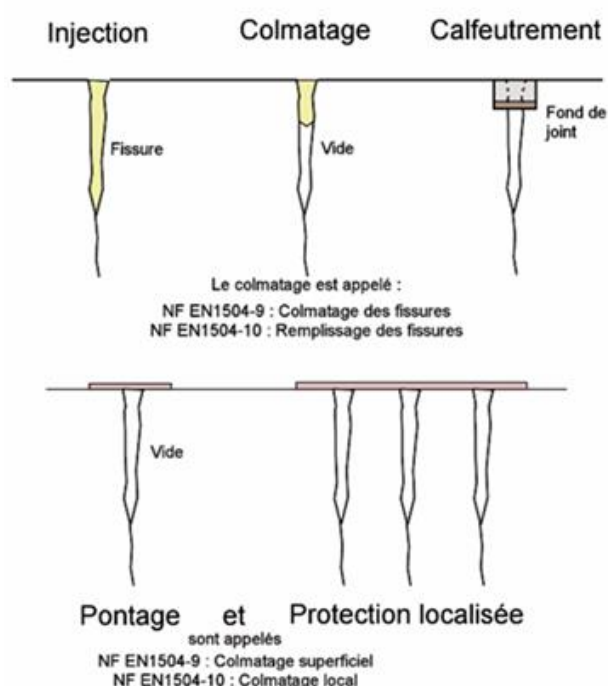


Figure 3. 14: les différentes méthodes de traitement des fissures [18]

3.4.1. L'injection des fissures

3.4.1.1. Définitions et objectifs

L'injection consiste à remplir les fissures à l'aide d'un produit permettant d'assurer une liaison mécanique ou une étanchéité entre les parties du béton. Elle s'applique aux fissures injectables, généralement d'ouverture $\geq 0,2$ mm [16].

Cette opération consiste à introduire un produit adapté afin d'assurer une continuité mécanique ou une étanchéité entre les parties du béton. Selon NF EN 1504-5, les produits d'injection peuvent : transmettre les efforts (classe F), assurer une étanchéité ductile (classe D) ou être expansifs pour bloquer les infiltrations (classe S) [18].

3.4.1.2. Produits et matériaux d'injection

Les produits d'injection se classent en deux catégories principales : les produits hydrophiles et les produits hydrophobes. Le choix dépend des conditions d'humidité et de durabilité.

Ces produits peuvent être constitués de résines (époxydes, polyuréthanes, méthacrylates...), de gels et polymères, ou encore de coulis à base de ciment ou de silicates, dont la sélection dépend des caractéristiques des fissures et de l'environnement [18].

3.4.1.3. Mise en œuvre et équipements

Les travaux d'injection nécessitent : la préparation du support et des fissures, la mise en place des équipements, le contrôle de la qualité et le suivi des performances. Avant l'injection, il est nécessaire d'identifier et nettoyer les fissures, préparer le support et mettre en place les injecteurs (Figure 3.15) [18].

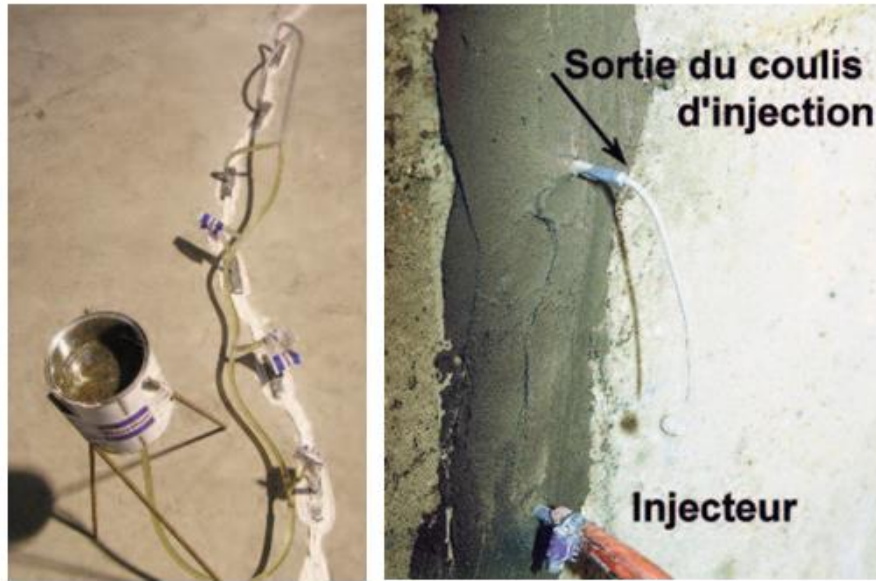


Figure 3. 15: mise en œuvre et contrôle de l'injection des fissures [18]

L'injection est particulièrement adaptée aux fissures structurelles stabilisées ou aux désordres nécessitant le rétablissement d'une continuité mécanique ou d'une étanchéité.

3.4.2. Le cachetage

Le cachetage consiste à obturer temporairement l'ouverture d'une fissure en surface afin de permettre les opérations d'injection.

Ce dernier vise à maintenir le produit injecté pendant sa mise en place et sa prise [16,18].

3.4.3. Le colmatage

Le colmatage est une technique consistant à obturer une fissure ou un vide par un remplissage partiel, sans élargissement préalable, et ne permettant pas d'assurer un renforcement structural [16]. Cette opération peut être réalisée par injection ou par d'autres procédés.

3.4.4. Le calfeutrement

3.4.4.1. Définitions

Le traitement des fissures par calfeutrement consiste à colmater en profondeur les fissures par un produit plus ou moins souple (mastic ou mortier) pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides risquant de bloquer le mouvement des fissures. Il s'applique aux fissures qui ne mettent pas en jeu la résistance de la structure [17] (**Figure 3.16**).

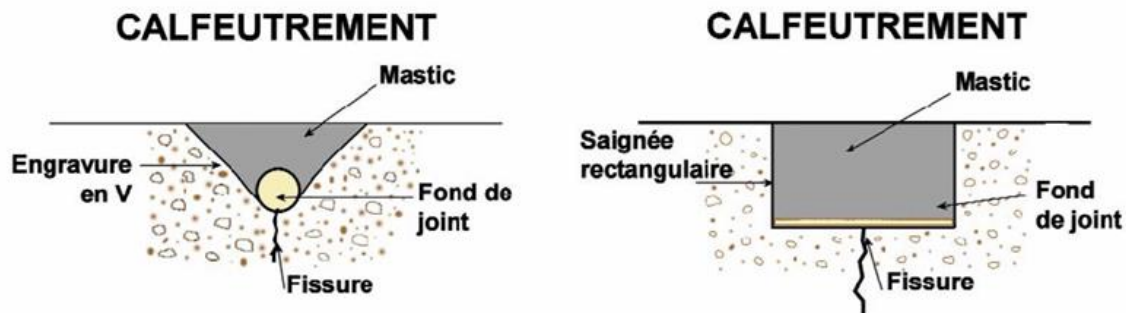


Figure 3. 16: schéma de calfeutrement des fissures par ouverture en V et en section rectangulaire [17]

3.4.4.2. Mise en œuvre du calfeutrement

La mise en œuvre du calfeutrement est une opération rigoureuse qui se déroule en plusieurs phases séquentielles. Cette démarche débute par une préparation du support par une préparation du support par rainurage (A), suivie de l'insertion du fond de joint (B) et de masquage ou délimitation de la zone traitée (C). Ensuite, on procède à l'application du mortier de calfeutrement (D), avant de terminer par le lissage et la finition de réparation (E).

L'ensemble de ce processus est explicité dans la (**Figure 3.17**) :



Figure 3. 17: mise en œuvre du calfeutrement [17]

3.4.4.3. Préparation et choix des produits

Le choix des produits dépend : de la durée pratique d'utilisation, de la compatibilité avec l'humidité, des conditions thermiques, de la compatibilité avec le support, des propriétés mécaniques et du comportement au vieillissement [17].

3.4.5. Le pontage et la protection localisée

3.4.5.1. Définitions

Le traitement des fissures par pontage et protection localisée consiste à recouvrir en surface des fissures par un produit permettant de rétablir une étanchéité ou d'empêcher la pénétration de matières solides. La protection localisée traite une zone fissurée de surface limitée au moyen de revêtements adaptés (**Figure 3.18**), sans armature systématique [17].

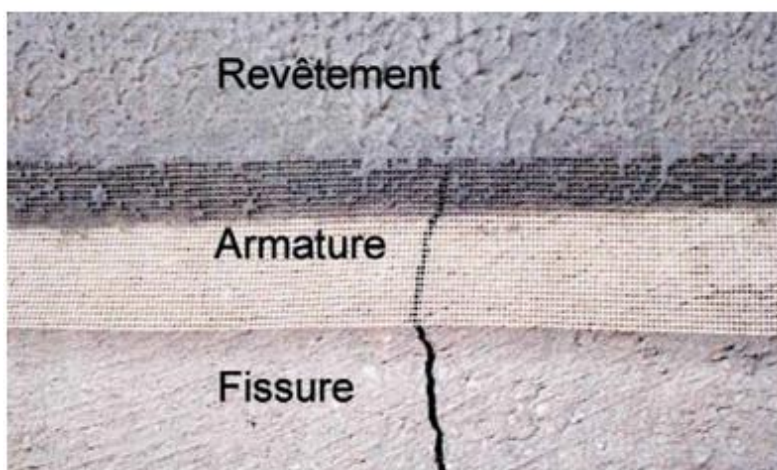


Figure 3. 18: pontage d'une fissure intégrant une armature de renforcement [17]

3.4.5.2. Familles de produits et réalisation

Les systèmes de pontage se divisent en trois grandes catégories : ceux comportant une armature textile intégrée, ceux basés sur l'utilisation d'une feuille associée à un adhésif, ainsi que les dispositifs de protection localisée sans armature. Leur mise en œuvre suit généralement un processus comprenant l'application d'une couche de liant, la pose de l'élément de renforcement (armature ou feuille) (Figure 3.19), puis l'ajout d'une couche de finition. Une préparation soignée du support, notamment par un nettoyage adéquat, est essentielle afin d'assurer une bonne adhérence du système [17].

Ces méthodes sont adaptées aux fissures de surface ou aux zones localisées nécessitant une protection complémentaire sans intervention lourde sur l'élément porteur.



Figure 3. 19: l'élément de renforcement (armature) [17]

3.4.6. La protection généralisée

Selon la norme NF P95-103, la protection généralisée correspond à l'ensemble des traitements appliqués sur tout ou partie des surfaces en béton dans le but de réduire la pénétration de l'eau, des gaz ainsi que des agents agressifs et d'améliorer la durabilité de la structure [16].

La protection généralisée constitue une solution préventive visant à améliorer la durabilité de l'ouvrage en limitant l'action des agents agressifs sur l'ensemble des surfaces exposées.

3.4.7. Autres techniques et dispositions communes

3.4.7.1. Joint de dilatation

La création d'un joint de dilatation consiste à réaliser une coupure dans la structure afin de dissocier deux parties aux comportements différents (Figure 3.20). Elle nécessite une étude de la stabilité et de la résistance [17].

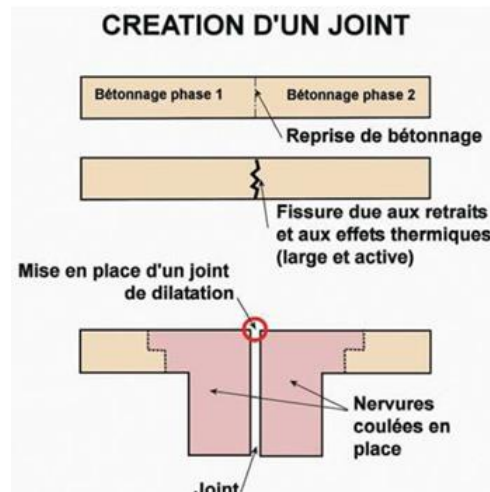


Figure 3. 20: schéma de principe de réalisation d'un joint de dilatation [17]

3.4.7.2. Traitement en présence d'eau

Avant calfeutrement ou pontage, les venues d'eau doivent être stoppées par : injection de produits hydrogonflants ou colmatage avec ciment à prise rapide [17].

3.4.7.3. Travaux de finition

Après traitement, les surfaces doivent être remises en état par élimination des excès de matériaux et application éventuelle d'un revêtement de protection [17].

3.5. Méthodes complémentaires de renforcement du béton

Les méthodes présentées dans cette section sont mobilisées lorsque les réparations courantes ne suffisent plus à garantir la stabilité ou la capacité portante de l'ouvrage, notamment pour les désordres classés à criticité élevée ou critique.

3.5.1. Le ragréage manuel et le béton projeté

3.5.1.1. Le ragréage

Cette méthode est privilégiée pour des interventions sur de petites surfaces. Bien qu'elle nécessite peu d'équipements lourds, elle demande une main-d'œuvre importante et un temps d'exécution plus long. Elle consiste à reconstituer manuellement l'enrobage à l'aide d'un mortier de réparation spécifique (**Figure 3.21**).

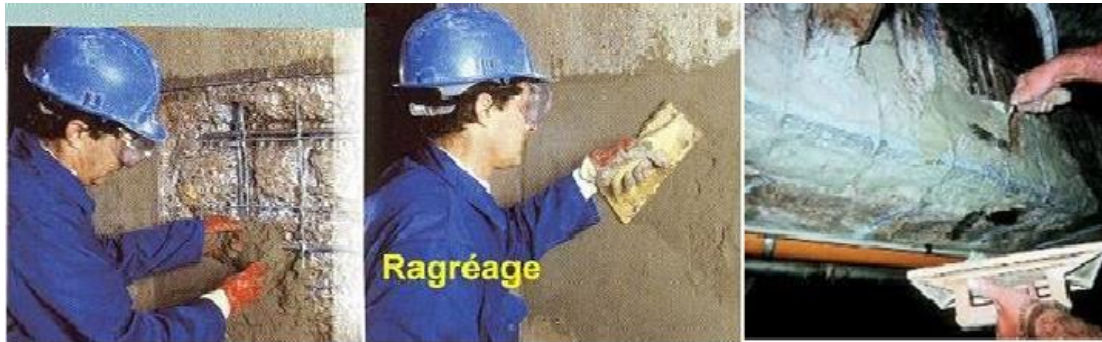


Figure 3. 21: mise en œuvre d'un ragréage manuel au mortier de réparation [12]

3.5.1.2. Le béton projeté

Plus adapté aux grandes surfaces, cette technique est rapide mais exige un matériel spécialisé. On distingue deux procédés :

a. Voie sèche

L'eau est ajoutée au niveau de la lance. Cette méthode permet d'obtenir une résistance mécanique élevée (faible rapport E/C) mais génère beaucoup de poussière et peut aggraver les supports fragiles [20] (**Figure 3.22**).

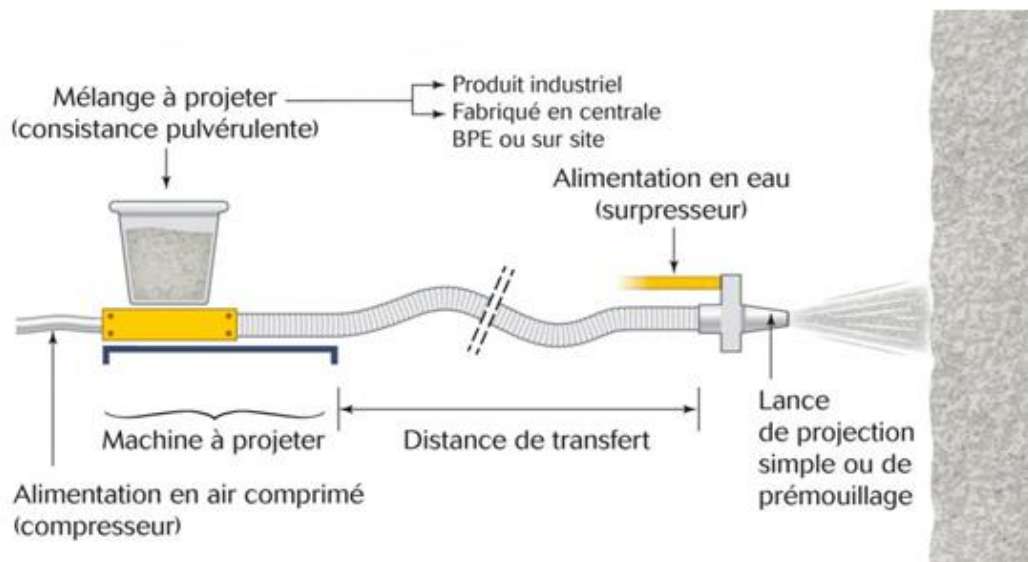


Figure 3. 22: schéma projection de béton par voie sèche [40]

b. Voie humide

L'eau est introduite dès le malaxage. Cette méthode permet notamment l'application de produits passivants sur les aciers, car la projection est moins violente que par voie sèche [20] (**Figure 3.23**).

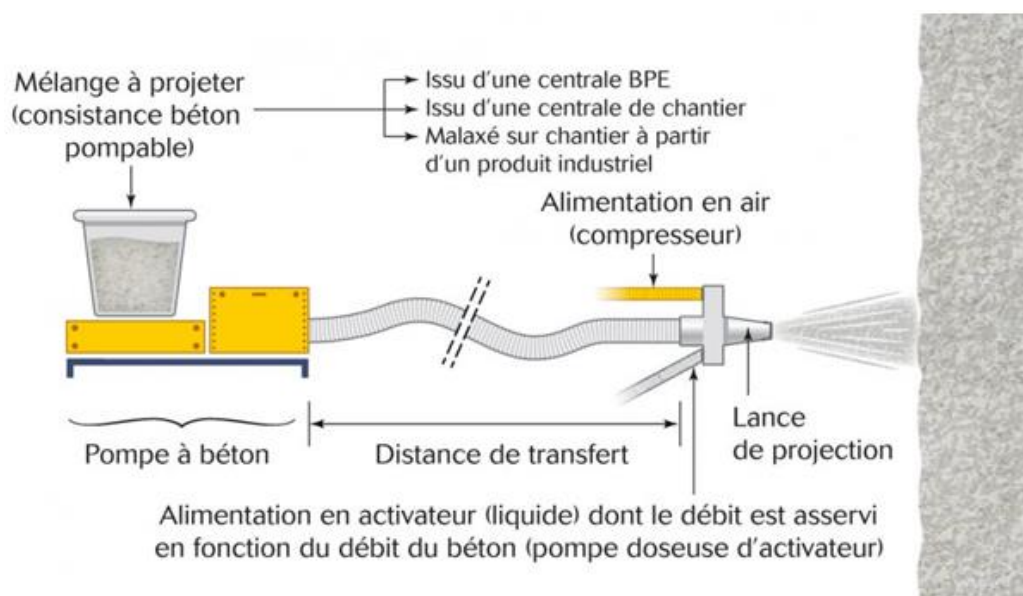


Figure 3. 23: schéma projection par voie humide [40]

Le tableau suivant présente une analyse comparative des méthodes de remplacement du béton par ragréage manuel et par béton projeté :

Tableau 3. 7: comparaison technique entre le ragréage et le béton projeté [15]

	Remplacement du béton par ragréage avec passivant	Remplacement du béton par béton projeté
Avantages	• Petites destructions localisées de béton, pas de risque de déstabilisation de la structure. • Adapté aux petites surfaces.	• Mise en place du mortier de réparation plus rapide. • Béton moins poreux, donc moins sensible aux chlorures. • Adapté aux grandes surfaces.

Inconvénients	• Beaucoup de main d'œuvre nécessaire. • Délais plus long. • Nécessite un revêtement imperméabilisant	• Risque de déstabilisation suite à une enlèvement importante du béton. • Surcharges possibles => recalcul de la structure. • Pas adapté aux petites surfaces.
Contraintes phase travaux	• Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée.	• Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée.
Durée de vie estimée	• Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. • Limité par rapport à la présence de chlorures. • Améliorée si protection complémentaire.	• Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. • Limité par rapport à la présence de chlorures. • Améliorée si protection complémentaire.

Le choix entre le ragréage manuel et le béton projeté dépend ainsi de l'étendue des dégradations, de l'accessibilité des zones à traiter et du niveau de risque associé à la perte d'enrobage ou à la corrosion des armatures.

3.5.2. Protocole de préparation et traitement des aciers

Avant toute application (ragréage ou projection), un protocole rigoureux doit être suivi pour garantir la durabilité de la réparation. Le respect de ce protocole conditionne directement la durabilité de la réparation et la maîtrise du risque de réapparition des désordres liés à la corrosion.

3.5.2.1. Préparation du support

Il est impératif d'éliminer les zones non cohérentes (béton décollé, fissuré, épaufré ou ségrégué).

3.5.2.2. Traitement de la corrosion

Les armatures doivent être dégagées jusqu'à atteindre une zone saine. Après nettoyage, si la perte de section est trop importante, l'acier doit être remplacé par soudage ou scellement d'une barre équivalente.

3.5.2.3. Protection des armatures

L'application d'un agent passivant (pinceau, brossage) ou l'ajout d'inhibiteurs de corrosion dans le mortier permet de protéger durablement les aciers.

3.5.2.4. Exigences techniques

Le matériau de réparation (béton ou mortier) doit présenter une adhérence élevée, une montée en résistance rapide, et une imperméabilité aux agents agressifs, conformément à la norme **(NF P 18-840)**.

Le respect de ce protocole conditionne directement la durabilité de la réparation et la maîtrise du risque de réapparition des désordres liés à la corrosion.

3.5.3. Renforcement par tissus de fibres de carbone

3.5.3.1. Composition

Cette solution composite (tissu + résine) est utilisée pour renforcer des structures en béton, bois ou métal. Elle se distingue par une haute résistance mécanique pour une masse très faible **(Figure 3.24)** [20].

3.5.3.2. Mise en œuvre

- Le support doit être préalablement assaini (élimination des parties dégradées par sablage ou burinage).
- La résine est appliquée sur le béton, puis le tissu est posé sans plis ni étirements.
- Un marouflage est indispensable pour imprégner la fibre et évacuer les bulles d'air.
- Une couche de fermeture est appliquée immédiatement après, suivie d'une protection incendie pour respecter les normes de sécurité.

3.5.3.3. Dimensionnement

Le nombre de couches et l'orientation des fibres doivent être définis par un Bureau d'Études spécialisé [20]. Cette technique est particulièrement adaptée aux éléments présentant une insuffisance de résistance ou nécessitant un renforcement localisé sans ajout de masse significatif.



Figure 3. 24: renforcement d'une structure en béton par feuille de fibres de carbone [15]

3.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la méthodologie adoptée pour le diagnostic et la réhabilitation des structures en béton armé. La démarche proposée repose sur une approche progressive allant de la collecte des informations jusqu'à la définition des stratégies d'intervention.

L'intégration des méthodes AMDEC et Hallowell permet d'assurer une évaluation et une hiérarchisation des risques, en combinant une analyse structurée avec l'expertise des intervenants. Les techniques de réparation et de renforcement présentées constituent un ensemble de solutions adaptées aux différentes pathologies, dont le choix dépend directement de la nature des désordres et de leur niveau de criticité.

Par ailleurs, les techniques d'investigation exposées, qu'elles soient non destructives ou destructives, offrent les moyens nécessaires pour caractériser avec précision l'état réel de l'ouvrage. La démarche d'évaluation des risques par couplage AMDEC–Hallowell, complétée le cas échéant par la matrice de criticité $P \times G \times D$, permet quant à elle de hiérarchiser de manière rigoureuse les interventions à mener.

Enfin, les techniques de réparation présentées, allant du traitement des fissures par injection ou calfeutrement jusqu'au renforcement par béton projeté ou par fibres de carbone, constituent un ensemble de solutions éprouvées, dont le choix doit toujours être guidé par les conclusions du diagnostic. Cette méthodologie trouve tout son sens dans son application à un cas concret.

Le chapitre suivant sera ainsi consacré à l'étude de cas, dans laquelle l'ensemble de la démarche développée ici sera appliqué à un ouvrage réel afin de proposer des solutions de réhabilitation adaptées.

CHAPITRE 4

Étude de cas – diagnostic et propositions de réhabilitation de l'école primaire Benamar Mosteghanemi

4.1. Introduction

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons entrepris une étude de cas portant sur une structure réelle présentant divers désordres affectant principalement ses éléments en béton armé.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des chapitres précédents, en appliquant concrètement la méthodologie de diagnostic et les techniques de réparation étudiées. Il vise à établir un diagnostic détaillé de l'état de l'ouvrage, à analyser les causes des pathologies observées, puis à proposer des solutions de réparation et de renforcement adaptées.

Le choix de cette structure a été orienté dans le cadre de notre stage effectué au sein de CDE de Tlemcen, qui nous a dirigés vers cet établissement en raison de son état de dégradation avancé.

Une visite technique sur site a été réalisée le 19 avril 2026, nous permettant d'effectuer un relevé visuel des désordres et de recueillir les informations nécessaires à l'élaboration de ce diagnostic. Ce chapitre a ainsi pour objectif de mettre en application la démarche développée dans les chapitres précédents, en reliant l'identification des fissurations et des pathologies observées à l'évaluation des risques puis au choix des solutions de réhabilitation adaptées.

4.2. Présentation générale du projet

L'étude concerne l'école primaire Benamar Mosteghanemi, située à Djamaa Sakhra, à environ 6 km au sud de Ghazaouet, dans la wilaya de Tlemcen (**Figure 4.1**).

L'établissement est constitué de plusieurs blocs construits à différentes périodes, ce qui engendre une hétérogénéité au niveau des matériaux, des techniques de construction et de l'état de conservation.

L'ouvrage est subdivisé en quatre blocs principaux indépendants 'A, B, C et D' (**Figure 4.2**) :

- **Bloc A** : construit en 1954 et mis en service en 1955. Une partie est réalisée en maçonnerie de pierre (A1) (**Figure 4.3**), suivie d'une extension en béton armé (A2).
- **Bloc B** : construit au début des années 1980, sur un terrain initialement remblayé (**Figure 4.4**).
- **Bloc C** : réalisé après le bloc B, en parallèle avec la construction du mur de soutènement.
- **Bloc D** : construit après 1985, représentant la partie la plus récente mais également la plus dégradée (**Figure 4.5**).

Cette diversité constructive et chronologique confère à l'ouvrage un caractère particulièrement intéressant pour l'étude, dans la mesure où elle permet d'observer, au sein d'un même établissement scolaire, plusieurs types de pathologies et de mécanismes de dégradation liés à des matériaux, des périodes de réalisation et des conditions d'exploitation différentes.



Figure 4. 1: vue satellitaire de l'emplacement de l'école primaire de Jamaa Sakhra [41]

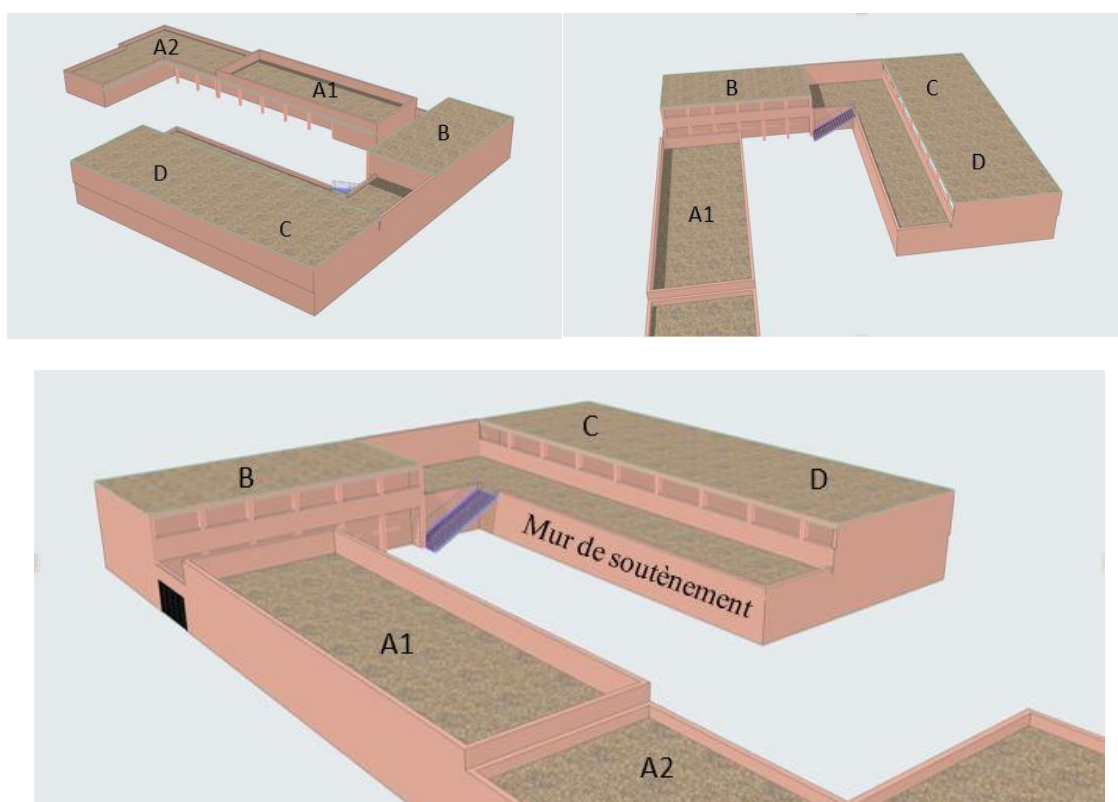


Figure 4. 2: représentation 3D des blocs pédagogiques de l'école réalisée sous Revit



Figure 4. 3: bloc A – partie ancienne réalisée en maçonnerie de pierre A1 [43]



Figure 4. 4: façade principale du bloc pédagogique B réalisée en béton [43]



Figure 4. 5 : vue d'ensemble des blocs pédagogiques C et D réalisés en béton [43]

4.3. Analyse pathologique de l'ouvrage et identification des désordres

Le diagnostic a reposé principalement sur une inspection visuelle complétée par une analyse des désordres observés.

Les paramètres étudiés sont :

- localisation des fissures,
- ouverture et évolution,
- présence d'humidité,
- état des armatures,
- déformations visibles.

4.3.1. Bloc A

Le bloc A (A1 et A2), correspondant à la partie la plus ancienne de l'établissement, présente un état structurel globalement satisfaisant.

Cependant, certains désordres localisés ont été identifiés lors des inspections visuelles :

- Présence de traces de corrosion au niveau des plafonds, se manifestant par des taches orangées, indiquant un début d'altération des armatures. **(Figure 4.6)**



Figure 4. 6 : indices de corrosion des armatures dans la partie 1 de bloc A [43]

- Désordres liés à l'humidité visible au niveau des parois intérieures caractérisées par des traces d'infiltration marquées et des phénomènes de remontées capillaires constatés spécifiquement sur la partie A2 du bloc. **(Figure 4.7)**



Figure 4. 7: pathologies liées à l'humidité - traces au plafond de la partie A2 et remontées capillaires en partie inférieure de mur d'ancienne cantine [43]

4.3.1.1. Identification synthétique des pathologies observées

- **Pathologie** : corrosion superficielle localisée au niveau des plafonds et désordres liés à l'humidité sur les parois intérieures.
- **Cause probable** : infiltration d'eau prolongée et remontées capillaires favorisant le développement de la corrosion des armatures.
- **Impact structurel** : altération progressive de l'enrobage et diminution locale de la durabilité du béton.
- **Niveau de gravité** : moyen.
- **Risque associé** : aggravation de la corrosion et propagation des désordres en l'absence de traitement.
- **Action recommandée** : traitement des infiltrations, réparation localisée des zones affectées et protection préventive des armatures.

Ces désordres relèvent d'une criticité modérée. Ils affectent principalement la durabilité de l'ouvrage et justifient une intervention programmée, sans caractère d'urgence structurelle immédiate, mais avec nécessité d'un traitement préventif afin d'éviter leur aggravation.

4.3.2. Bloc B

Le bloc B présente des désordres plus marqués, pouvant affecter directement son comportement structurel et sa stabilité à long terme. Les investigations menées sur ce bloc révèlent les points critiques suivants :

- Présence de fissures diagonales traversantes au niveau des murs, visibles de manière flagrante sur les deux faces des parois. **(Figure 4.8)**



Figure 4. 8: fissures diagonales visibles sur les deux faces du mur [43]

- Fissuration et éclatement du béton au niveau des poteaux, signalant une concentration de contraintes anormales sur les éléments porteurs. Les poteaux de ce bloc sont de section circulaire, avec un diamètre de $\varnothing$ 30 cm. **(Figure 4.9)**



Figure 4. 9: fissurations du béton au niveau des poteaux [43]

- Implantation sur un terrain remblayé, facteur géotechnique majeur pouvant engendrer des tassements différentiels sous la structure.

4.3.2.1. Identification synthétique des pathologies observées

- **Pathologie** : fissures diagonales traversantes au niveau des murs accompagnées d'un éclatement du béton sur certains poteaux.
- **Cause probable** : tassement différentiel du remblai de fondation associé à l'infiltration d'eau et à une concentration anormale des contraintes.
- **Impact structurel** : perturbation du transfert des charges et affaiblissement local des éléments porteurs.
- **Niveau de gravité** : élevé.
- **Risque associé** : évolution des fissures et perte progressive de stabilité à long terme.
- **Action recommandée** : surveillance instrumentée des fissures, vérification des fondations et réparation structurale des éléments fissurés.

La nature traversante des fissures et l'atteinte des poteaux confèrent à ces désordres une criticité élevée, nécessitant une intervention prioritaire à court terme après vérification approfondie des causes

4.3.3. Bloc C

Le bloc C présente plusieurs pathologies, principalement liées à une présence d'humidité chronique et non maîtrisée :

- Infiltration d'eau au niveau des murs du rez-de-chaussée, provoquée directement par l'absence de coupure étanche entre le sol extérieur et les parois de l'ouvrage.

- Gonflement de la plateforme, un phénomène directement lié à la présence et à la stagnation d'eau infiltrée sous le dallage (**Figure 4.10**).



Figure 4. 10: gonflement du revêtement de sol dû aux infiltrations d'eau [43]

- La fissuration des poteaux, ainsi que celle observée sur les poutres, indique que l'action prolongée de l'humidité a déclenché un phénomène de corrosion des armatures. Le gonflement des aciers oxydés génère des pressions internes qui induisent des désordres mécaniques. Les sections des poteaux sont de $\varnothing$ 30 cm au rez-de-chaussée et de 23×23 cm à l'étage (**Figure 4.11**). Tandis que les poutres affectées montrent des fissures longitudinales caractéristiques de ce même phénomène (**Figure 4.12**).

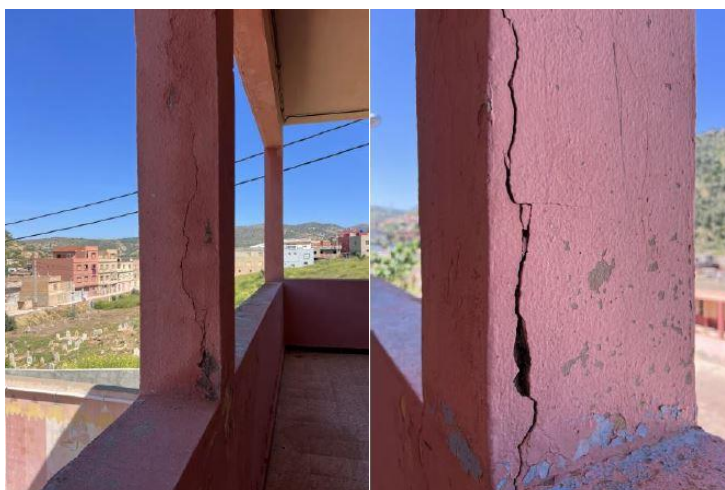


Figure 4. 11: fissurations avancées des poteaux de 1er étage Bloc C [43]



Figure 4. 12: fissurations longitudinales de poutres en béton armé induites par la corrosion des armatures Bloc C [43]

- Traces d'humidité relevées au niveau des plafonds, indiquant des problèmes potentiels d'infiltration d'eau par la dalle. **(Figure 4.13)**



Figure 4. 13: traces d'humidité observées au niveau du plafond du bloc C [43]

4.3.3.1 Identification synthétique des pathologies observées

- **Pathologie** : fissuration des poteaux et des poutres en béton armé avec présence de corrosion des armatures, infiltration d'eau au niveau des murs du rez-de-chaussée, gonflement localisé de la plateforme et traces d'humidité observées au niveau des plafonds.
- **Cause probable** : carbonatation du béton favorisée par l'humidité prolongée, absence de coupure étanche entre le sol extérieur et les parois, stagnation des eaux infiltrées sous le dallage ainsi qu'infiltration d'eau par la dalle.
- **Impact structurel** : diminution de la section résistante des armatures, affaiblissement de l'adhérence acier-béton, dégradation progressive des parois du rez-de-chaussée, soulèvement local du dallage et altération du béton au niveau des plafonds.
- **Niveau de gravité** : élevé.
- **Risque associé** : perte progressive de capacité portante des éléments porteurs, aggravation des infiltrations, propagation de la corrosion et déformation supplémentaire de la plateforme.
- **Action recommandée** : dégagement et réparation des zones fissurées, traitement anticorrosion des armatures, mise en place d'une coupure étanche adaptée, amélioration du drainage périphérique, reprise du dallage affecté et traitement des infiltrations au niveau de la dalle.

La combinaison de la corrosion, des fissurations des éléments porteurs et des infiltrations d'eau traduit un désordre évolutif à criticité élevée, dont l'aggravation pourrait compromettre progressivement la capacité portante des éléments concernés.

4.3.4. Bloc D

Le bloc D constitue la zone la plus critique de l'ouvrage, présentant des dégradations structurelles particulièrement avancées qui compromettent la stabilité locale et la sécurité globale de cette partie de l'établissement. L'analyse visuelle détaillée a permis d'identifier plusieurs pathologies majeures :

- Effondrement partiel d'une grande surface de plafond au premier étage, laissant apparaître les armatures métalliques qui sont soumises à une corrosion directe. **(Figure 4.14)**



Figure 4. 14: effondrement partiel du plafond avec armatures apparentes au premier étage [43]

- Désordre sur les poteaux courts situés au premier étage, qui montrent des signes avancés de fissuration et de dégradation, mettant gravement en péril la stabilité locale de la structure. (**Figure 4.15**)



Figure 4. 15: Fissurations des poteaux courts au premier étage du bloc D [43]

- Dégradation sévère des poteaux de la cage d'escalier, caractérisée par un éclatement important du béton et des armatures fortement visibles et corrodées. Les caractéristiques géométriques de 22×22 cm à l'étage et des poteaux circulaires de diamètre Ø30 cm au rez-de-chaussée. **(Figure 4.16)**



Figure 4. 16: éclatement du béton et mise à nu des armatures des poteaux de la cage d'escalier [43]

- Problèmes d'étanchéité récurrents, se manifestant par des taches d'humidité étendues d'enduit au niveau des murs et du plafond de la cage d'escalier. **(Figure 4.17)**



Figure 4. 17: dégradations liées à l'humidité et décollement de l'enduit dans la cage d'escalier [43]

- Eclatement localisé de joint constaté sur une partie de la façade extérieure du bloc. (**Figure 4.18**)

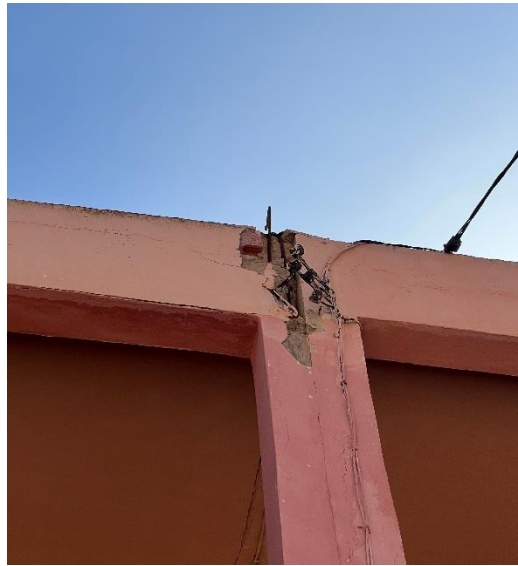


Figure 4. 18: éclatement localisé du joint [43]

4.3.4.1. Identification synthétique des pathologies observées

- **Pathologie** : dégradation structurelle avancée caractérisée par effondrement partiel du plafond, fissuration des poteaux courts et éclatement du béton avec armatures apparentes.
- **Cause probable** : corrosion avancée des armatures, infiltration d'eau répétée et vieillissement structurel aggravé.
- **Impact structurel** : réduction significative de la capacité portante et altération majeure de la stabilité locale.
- **Niveau de gravité** : très élevé / critique.
- **Risque associé** : instabilité locale et menace directe sur la sécurité des usagers.
- **Action recommandée** : intervention urgente, sécurisation immédiate, réparation lourde et renforcement structurel prioritaire.

Au regard de l'effondrement partiel observé et de l'atteinte sévère des éléments porteurs, ce bloc correspond au niveau de criticité le plus élevé et nécessite des mesures conservatoires immédiates.

4.3.5. Mur de soutènement

Le mur de soutènement, réalisé aux alentours des années 1980, présente également des désordres significatifs qui nuisent à sa fonction principale de rétention des terres :

- Apparition initiale de fissures ayant conduit antérieurement à un renforcement par contreforts, confirmant la vulnérabilité historique de l'ouvrage face aux poussées hydrostatiques ou des terres (**Figure 4.19**).



Figure 4. 19: mur de soutènement et système de renforcement par contreforts [43]

- Dégradation actuelle des contreforts de renforcement, qui ne parviennent plus à assurer pleinement leur rôle de stabilisation.
- Éclatement de l'enrobage avec mise à nu des armatures, résultant d'une corrosion avancée des aciers due à l'exposition directe aux intempéries et à l'humidité constante du sol. (**Figure 4.20**)



Figure 4. 20: dégradation des contreforts avec fissuration et éclatement de l'enrobage [43]

4.3.5.1. Identification synthétique des pathologies observées

- **Pathologie** : fissuration du voile et dégradation des contreforts avec éclatement de l'enrobage.
- **Cause probable** : poussée des terres et pression hydrostatique combinées à l'humidité permanente.
- **Impact structurel** : réduction de la stabilité du mur et baisse de l'efficacité de retenue.
- **Niveau de gravité** : critique.
- **Risque associé** : déplacement progressif du mur ou rupture partielle.
- **Action recommandée** : réhabilitation des contreforts, reprise des zones éclatées, protection des armatures et vérification globale de stabilité.

Compte tenu de son rôle essentiel dans la stabilité des terres de soutènement, la dégradation de cet ouvrage doit être considérée comme un risque critique nécessitant une intervention prioritaire.

4.3.6. Eléments secondaires

D'autres anomalies et pathologies de surface ont été relevées sur les dépendances et parties annexes de l'établissement :

- Défauts d'étanchéité et pente de carrelage incorrecte au niveau des sanitaires. Bien que ces derniers présentent un bon état structural global, ces malfaçons entravent l'évacuation normale des eaux vers le regard, provoquant des stagnations préjudiciables.
- Présence d'une section hybride (forme : Carré + Demi-cercle) qui affiche d'importantes fissures ainsi qu'un éclatement marqué de son enduit (**Figure 4.21**). Ces indices architecturaux sont les signes visibles d'un défaut de liaison originel et d'une instabilité locale de la structure.



Figure 4. 21: dégradation d'un poteau à section hybride [43]

- Fissures observées sur les murs extérieurs, affectant l'esthétique générale et l'imperméabilité des façades de l'établissement. (Figure 4.22)



Figure 4. 22: dégradations sur les murs extérieurs de l'école [43]

4.3.6.1. Identification synthétique des pathologies observées

- **Pathologie** : fissuration localisée et dégradation de surface sur les éléments annexes.
- **Cause probable** : défauts d'exécution, infiltrations d'eau et vieillissement des revêtements.
- **Impact structurel** : impact limité sur la stabilité globale mais diminution de la durabilité et de la qualité d'exploitation.
- **Niveau de gravité** : moyen.
- **Risque associé** : aggravation progressive des désordres et dégradation esthétique/fonctionnelle.

- **Action recommandée** : reprise locale des fissures, amélioration de l'étanchéité et maintenance préventive régulière.

Ces désordres ne compromettent pas directement la stabilité globale de l'établissement, mais doivent être traités afin de préserver la durabilité, l'exploitation et l'état général de l'ouvrage.

4.3.7. Classification de l'état des différents blocs

L'analyse visuelle des différents éléments de l'établissement a permis d'établir une classification qualitative de leur état de conservation. Cette classification repose sur l'importance des désordres observés, leur étendue ainsi que leur influence potentielle sur la stabilité, la durabilité et la fonctionnalité de l'ouvrage.

Tableau 4. 1: classification de l'état des différents blocs

Elément	Niveau d'état	Appréciation
Bloc A	2	Etat moyen
Bloc B	3	Mauvais état
Bloc C	3	Mauvais état
Bloc D	4	Etat critique
Mur de soutènement	4	Etat critique
Eléments secondaires	2	Etat moyen

Cette classification met en évidence une dégradation variable selon les zones de l'établissement. Les blocs D et le mur de soutènement présentent les niveaux de dégradation les plus importants et nécessitent une attention particulière dans la suite de l'analyse. À l'inverse, le bloc A et les éléments secondaires présentent principalement des désordres localisés affectant davantage la durabilité et l'exploitation que la stabilité globale de l'ouvrage.

4.3.8. Tableau de décision de réhabilitation des désordres observés

À l'issue de l'analyse visuelle et de l'identification des différentes pathologies relevées au niveau des blocs étudiés, du mur de soutènement ainsi que des éléments secondaires, il apparaît nécessaire d'établir une synthèse permettant de hiérarchiser les désordres selon leur niveau de criticité et les risques associés.

Dans cette optique, le tableau suivant présente les principales dégradations observées, leur impact potentiel sur la structure et la durabilité de l'ouvrage, ainsi que les interventions de réhabilitation recommandées afin d'assurer la sécurité, le bon fonctionnement et la pérennité de l'établissement.

Tableau 4. 2: décision de réhabilitation des désordres observés au niveau du cas d'étude

Désordre observé	Risque concerné	Criticité	Solution proposée	Justification
Fissuration des poteaux en béton armé	Structure	Élevée	Réparation des fissures et traitement anticorrosion des armatures	Préserver la capacité portante et limiter l'évolution de la corrosion
Fissuration des poutres	Structure	Élevée	Injection des fissures et réparation localisée du béton dégradé	Restaurer la continuité mécanique des éléments porteurs
Corrosion apparente des armatures	Structure / durabilité	Élevée	Dégagement des armatures, passivation et reconstitution du béton	Éviter la perte de section résistante
Infiltration d'eau au niveau des murs du rez-de-chaussée	Durabilité	Élevée	Mise en place d'une étanchéité adaptée et amélioration du drainage	Limiter les remontées d'humidité et préserver les parois
Gonflement de la plateforme	Structure / exploitation	Élevée	Reprise du dallage et amélioration de l'évacuation des eaux	Éviter l'aggravation des soulèvements
Traces d'humidité au plafond	Durabilité	Moyenne à élevée	Traitement de l'étanchéité de la dalle et réparation des zones dégradées	Prévenir l'infiltration continue
Fissuration des murs	Sécurité / durabilité	Moyenne	Réparation des fissures et reprise des enduits	Limiter la propagation des dégradations
Dégradation du mur de soutènement	Structure	Élevée	Réhabilitation localisée et renforcement	Assurer la stabilité de retenue des terres
Défauts d'étanchéité et pente de carrelage incorrecte au niveau des sanitaires	Durabilité / exploitation	Moyenne	Reprise de l'étanchéité et correction de la pente du carrelage	Assurer l'évacuation normale des eaux et éviter les stagnations préjudiciables
Fissuration et éclatement de l'enduit au niveau de la section hybride (carré + demi-cercle)	Sécurité / durabilité	Élevée	Réparation des fissures, reprise de l'enduit et renforcement local si nécessaire	Stabiliser la zone affectée et limiter l'évolution des désordres liés au défaut de liaison

Fissures observées sur les murs extérieurs	Durabilité / esthétique	Moyenne	Traitement des fissures et réfection localisée des façades	Préserver l'imperméabilité des façades et améliorer l'état général de l'ouvrage
--	-------------------------	---------	--	---

4.4. Processus de gestion des risques par couplage AMDEC–Hallowell

4.4.1. Identification des risques

L'identification des risques constitue la première étape du processus de gestion des risques. Elle consiste à recenser les pathologies observées lors du diagnostic visuel puis à déterminer les mécanismes susceptibles d'affecter la sécurité, la stabilité et la durabilité de l'établissement.

L'identification a été réalisée à partir des observations effectuées sur les blocs A, B, C et D, ainsi que sur le mur de soutènement et les éléments secondaires. Les désordres relevés concernent principalement des phénomènes de corrosion des armatures, de fissuration, d'infiltration d'eau, de perte d'adhérence béton–acier, de déformation des supports et de dégradation locale des éléments porteurs. L'objectif est d'identifier les zones présentant les niveaux de risque les plus élevés afin de prioriser les interventions. Cette identification constitue la base de l'analyse AMDEC, dans laquelle chaque désordre observé est interprété comme un mode de défaillance potentiel pouvant affecter la sécurité, la durabilité ou la stabilité de l'ouvrage.

4.4.2. Sélection des experts

La sélection des experts constitue une étape importante dans l'application de la méthode AMDEC, car la qualité de l'évaluation dépend en grande partie de l'expérience et des compétences des personnes sollicitées. Dans le cadre de cette étude, les experts retenus ont été choisis en fonction de leur connaissance des structures en béton armé, de la pathologie des ouvrages et des opérations de réhabilitation. Le tableau suivant présente les profils des experts ayant participé à l'analyse.

Tableau 4. 3: profils des experts sélectionnés

Profils	Nombre
Ingénieurs de CDE	2
Ingénieur étranger	1
Enseignants	2
Architecte	1

4.4.3. Analyse et évaluation des risques par la méthode AMDEC

Les critères de gravité (G), de probabilité d'apparition (P) et de détectabilité (D), ainsi que leurs échelles d'évaluation respectives, ont été présentés dans le chapitre II. Les mêmes principes ont été retenus dans le cadre de cette étude pour l'évaluation de la criticité des risques identifiés.

$$C = G \times P \times D$$

Avec :

C : criticité

G : gravité

P : probabilité d'apparition

D : détectabilité

Les niveaux de gravité, de probabilité et de détectabilité ont été attribués sur la base du jugement d'ingénierie, à partir des observations visuelles réalisées sur site et des principes généraux de la méthode AMDEC.

Tableau 4. 4 : AMDEC (exemple d'étude de cas)

Elément	Pathologie	Cause principale	Effet	G	P	D	C
Bloc A	Corrosion localisée plafond	Infiltration d'eau + humidité	Dégradation progressive des armatures	3	3	2	18
Bloc A	Remontées capillaires et humidité	Absence/défaillance d'étanchéité	Altération des parois	2	4	2	16
Bloc B	Fissures diagonales traversantes	Tassements différentiels du remblai	Désordre structurel global	5	4	4	80
Bloc B	Fissuration + éclatement poteaux	Concentration de contraintes + mouvement support	Réduction capacité portante	5	4	3	60
Bloc C	Infiltration murs RDC	Absence coupure étanche	Dégradation progressive	3	4	2	24
Bloc C	Gonflement plateforme	Stagnation d'eau sous dallage	Soulèvement et instabilité locale	4	4	4	64
Bloc C	Corrosion armatures poteaux	Humidité prolongée	Fissuration et perte section acier	5	4	3	60
Bloc C	Fissuration poutres	Corrosion interne	Diminution rigidité	5	4	4	80
Bloc C	Humidité plafonds	Défaut étanchéité dalle	Dégradation progressive	3	4	2	24
Bloc D	Effondrement partiel plafond	Corrosion avancée + perte cohésion	Danger immédiat	5	5	5	125

Bloc D	Dégradation poteaux courts	Concentration d'efforts	Risque d'instabilité locale	5	5	4	100
Bloc D	Dégradation poteaux cage escalier	Corrosion + éclatement béton	Affaiblissement structurel	5	5	4	100
Bloc D	Problèmes d'étanchéité	Infiltration récurrente	Accélération dégradation	3	5	2	30
Bloc D	Éclatement joints façade	Vieillissement + humidité	Dégradation enveloppe	2	3	2	12
Mur soutènement	Fissuration + contreforts dégradés	Pression terres + eau	Risque perte stabilité	5	4	5	100
Mur soutènement	Corrosion armatures	Humidité permanente	Diminution résistance	5	4	4	80
Éléments secondaires	Défaut étanchéité sanitaires	Mauvaise pente	Stagnation eau	2	4	2	16
Éléments secondaires	Section hybride fissurée	Défaut liaison structurelle	Instabilité locale	4	4	3	48
Éléments secondaires	Fissures façades	Retrait + vieillissement	Perte imperméabilité	2	3	2	12

L'analyse issue de l'AMDEC permet ainsi de transformer les observations du diagnostic en une hiérarchisation structurée des désordres, facilitant la définition des priorités d'intervention.

4.4.4. Hiérarchisation des risques

L'évaluation par AMDEC met en évidence une répartition non uniforme des risques au sein de l'établissement.

Une échelle de criticité a été définie dans le cadre de cette étude afin d'interpréter les résultats de l'AMDEC. Cette classification permet de hiérarchiser les risques selon leur niveau d'importance.

Les désordres les plus critiques concernent principalement :

4.4.4.1. Niveau 1 – risque critique

- Effondrement partiel du plafond — Bloc D
- Dégradation des poteaux courts — Bloc D
- Dégradation des poteaux de la cage d'escalier — Bloc D
- Instabilité du mur de soutènement
- Fissures traversantes du bloc B
- Fissuration des poutres du bloc C

Ces éléments nécessitent une **intervention immédiate**, avec mesures conservatoires et vérification structurelle approfondie.

4.4.4.2. Niveau 2 – risques élevés

- Corrosion des poteaux — Bloc C
- Gonflement plateforme — Bloc C
- Éclatement des poteaux — Bloc B

Intervention prioritaire à court terme.

4.4.4.3. Niveau 3 – risques modérés à faibles

- Humidité
- Défauts d'étanchéité
- Fissures superficielles
- Désordres des éléments secondaires

Traitement dans le cadre d'un programme de maintenance.

4.4.4.4. Registre synthétique des risques

Le registre des risques constitue une synthèse des principaux désordres identifiés au sein de l'établissement. Il permet de regrouper les risques les plus significatifs ainsi que les actions correctives prioritaires associées.

Tableau 4. 5: registre synthétique des risques et actions correctives proposées

N°	Zone concernée	Risque identifié	Niveau de risque	Action corrective proposée
1	Bloc D	Effondrement partiel du plafond	Critique	Renforcement et réparation immédiate
2	Bloc D	Dégradation des poteaux courts	Critique	Chemisage et confortement
3	Bloc D	Dégradation des poteaux de la cage d'escalier	Critique	Réhabilitation structurelle
4	Mur de soutènement	Perte potentielle de stabilité	Critique	Renforcement des contreforts
5	Bloc B	Tassements différentiels	Élevé	Surveillance et confortement
6	Bloc C	Corrosion des armatures	Élevé	Traitement anticorrosion et réparation
7	Bloc A	Humidité et remontées capillaires	Modéré	Réfection de l'étanchéité

Cette hiérarchisation constitue le fondement de la stratégie de réhabilitation proposée, en distinguant clairement les interventions urgentes des interventions programmables.

4.5. Proposition des solutions de réhabilitation et mesures préventives

Au regard des désordres observés au niveau des différents blocs de l'établissement, plusieurs interventions de réhabilitation peuvent être envisagées afin de restaurer les performances structurelles de l'ouvrage, d'assurer la sécurité des usagers et de limiter l'évolution des pathologies.

4.5.1. Traitement des problèmes d'humidité et d'étanchéité

Afin de limiter les infiltrations d'eau et les remontées capillaires observées principalement dans les blocs A, C et D, les interventions suivantes sont recommandées :

- Réfection des systèmes d'étanchéité des toitures et terrasses
- Mise en place d'un système de drainage périphérique
- Réalisation d'une barrière étanche contre les remontées capillaires

- Réparation des zones dégradées par ragréage des surfaces altérées
- Amélioration de l'aération des locaux afin de réduire l'humidité stagnante

Ces interventions concernent principalement les blocs A, C et D, où les phénomènes d'humidité et d'infiltration jouent un rôle aggravant dans l'évolution des désordres observés.

4.5.2. Traitement des fissures

Les fissures observées au niveau des murs, poutres et poteaux nécessitent des traitements adaptés selon leur nature et leur gravité :

4.5.2.1. Fissures non structurelles

- Ouverture et colmatage des fissures superficielles
- Injection de résine pour les fissures fines
- Pontage armé dans les zones localisées

4.5.2.2. Fissures structurelles

- Injection sous pression des fissures traversantes
- Mise en place d'agrafes métalliques dans les zones fortement fissurées
- Surveillance périodique de l'évolution des fissures actives

Le choix du traitement dépend du caractère structurel ou non des fissures ainsi que de leur évolution, les fissures traversantes ou actives nécessitant des interventions plus lourdes et un suivi renforcé.

4.5.3. Réhabilitation des éléments en béton armé dégradés

Les éléments présentant un éclatement du béton et une corrosion des armatures nécessitent des travaux de réparation adaptés.

4.5.3.1. Traitement des armatures corrodées

- Décapage et nettoyage des armatures oxydées
- Application d'un produit anticorrosion
- Reconstitution de l'enrobage au mortier de réparation

4.5.3.2. Réparation des zones éclatées

- Ragréage des surfaces dégradées
- Utilisation du béton projeté pour les zones fortement détériorées
- Reprise locale des parties instables

Ces solutions sont particulièrement adaptées aux zones affectées par la corrosion des armatures et l'éclatement du béton, notamment dans les blocs C et D.

4.5.4. Renforcement structurel des éléments critiques

Compte tenu de l'état avancé de dégradation observé dans le bloc D et au niveau du mur de soutènement, des techniques de renforcement structurel sont recommandées.

4.5.4.1. Chemisage des poteaux

Le chemisage en béton armé peut être envisagé pour les poteaux fortement dégradés, notamment :

- les poteaux courts du premier étage,
- les poteaux de la cage d'escalier,
- les éléments présentant une section insuffisante.

Cette technique permet d'augmenter la capacité portante, d'améliorer le confinement du béton et de restaurer la stabilité structurale.

4.5.4.2. Renforcement du mur de soutènement

- Réhabilitation des contreforts dégradés
- Reprise des zones d'éclatement
- Protection des armatures exposées
- Vérification de la stabilité globale du mur

Ces interventions correspondent aux désordres classés à criticité élevée ou critique dans l'analyse AMDEC, et visent à restaurer la stabilité et la capacité portante des éléments les plus vulnérables.

4.5.5. Mesures préventives et gestion des risques

Afin d'éviter la réapparition des désordres et d'assurer la durabilité de l'ouvrage, il est recommandé de :

- Mettre en place un programme d'inspection périodique
- Assurer un entretien régulier des systèmes d'évacuation des eaux
- Contrôler l'évolution des fissures par suivi instrumenté
- Limiter les infiltrations d'eau
- Réaliser des interventions préventives avant aggravation des désordres
- Effectuer une surveillance particulière des zones implantées sur remblai

Ces mesures préventives complètent les réparations curatives et s'inscrivent dans une logique de gestion durable des risques à l'échelle de l'établissement.

4.5.6. Priorisation des interventions

Au regard des résultats obtenus lors de l'analyse des risques, les interventions de réhabilitation peuvent être hiérarchisées selon leur degré d'urgence afin d'optimiser les actions de réparation et de sécurisation de l'ouvrage. Cette priorisation traduit directement les résultats de l'analyse des risques en décisions opérationnelles, en distinguant les interventions urgentes de celles pouvant être programmées à court et moyen terme.

4.5.6.1. Interventions urgentes

Les interventions les plus prioritaires concernent les éléments présentant un niveau de criticité élevé susceptible d'affecter directement la stabilité et la sécurité de l'établissement :

- Effondrement partiel du plafond du bloc D
- Dégradation des poteaux courts du bloc D
- Dégradation des poteaux de la cage d'escalier
- Dégradation du mur de soutènement.

4.5.6.2. Interventions à court terme

Ces interventions visent à limiter l'évolution des désordres structurels et à prévenir leur aggravation :

- Fissures traversantes du bloc B
- Corrosion des armatures des poteaux et poutres du bloc C
- Gonflement de la plateforme du bloc C.

4.5.6.3. Interventions à moyen terme

Elles concernent principalement les désordres affectant la durabilité et le confort d'exploitation de l'ouvrage :

- Défauts d'étanchéité
- Pathologies liées à l'humidité
- Fissures de façade
- Désordres des éléments secondaires.

4.6. Conclusion

Ce chapitre a permis d'appliquer la démarche méthodologique développée dans les chapitres précédents à un cas réel de structure présentant des désordres multiples. L'analyse des différents blocs de l'établissement a mis en évidence des pathologies variées, principalement liées à l'action combinée de l'humidité, de la corrosion des armatures, de conditions de fondation défavorables et de défauts d'exécution.

L'application de la méthode AMDEC, complétée par le jugement des experts, a permis de transformer les observations du diagnostic en une évaluation structurée des risques, conduisant à une hiérarchisation claire des désordres selon leur niveau de criticité.

Sur cette base, des solutions de réhabilitation et des mesures préventives ont été proposées, avec une priorisation des interventions distinguant les actions urgentes des interventions programmables à court ou moyen terme.

Ainsi, ce chapitre apporte une réponse concrète à la problématique du mémoire, en montrant comment l'identification des fissurations et des pathologies observées peut être reliée à l'évaluation des risques et au choix de stratégies de réhabilitation adaptées.

Nous avons aussi établi des fiches de diagnostic en annexe, une fiche par étape de diagnostic. Les essais sont regroupés dans une grille unique afin de faciliter la synthèse, la hiérarchisation des risques et la décision finale.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail consacré au diagnostic et à la réhabilitation des structures en béton armé fissurées, il apparaît que la compréhension des pathologies constitue une étape essentielle pour garantir la sécurité, la durabilité et la pérennité des ouvrages.

L'étude menée dans le premier chapitre a permis de mettre en évidence que les fissures représentent des manifestations fréquentes dont l'origine peut être multiple : mécanique, physique, environnementale ou chimique. Leur observation et leur interprétation constituent un outil fondamental pour comprendre le comportement de la structure et orienter le diagnostic vers l'identification des causes réelles des désordres.

Le deuxième chapitre a montré que la gestion des risques représente un complément indispensable au diagnostic technique. L'utilisation de la méthode AMDEC, associée à l'approche qualitative par jugement d'experts, a permis de structurer l'analyse, de hiérarchiser les situations critiques et de faciliter la prise de décision dans un contexte marqué par les incertitudes liées à l'état réel des ouvrages.

Le troisième chapitre a présenté une méthodologie cohérente intégrant les étapes de collecte d'informations, d'investigation, d'évaluation des risques et de définition des stratégies de réparation et de renforcement. Il a également mis en évidence la diversité des techniques disponibles et l'importance de choisir les interventions en fonction des résultats du diagnostic et des spécificités de chaque structure.

L'étude de cas menée sur l'école primaire Benamar Mosteghanemi a permis de mettre en application concrète l'ensemble de cette démarche. Le diagnostic réalisé a révélé plusieurs pathologies de niveaux de criticité variables affectant les différents blocs de l'établissement. L'évaluation des risques a permis de distinguer les désordres nécessitant des interventions urgentes de ceux pouvant être programmés à court ou moyen terme. Des propositions de réhabilitation et des mesures préventives adaptées ont ainsi été formulées afin d'améliorer les conditions de sécurité et de prolonger la durée de service de l'ouvrage.

En définitive, ce travail confirme que la réussite d'une opération de réhabilitation repose sur une approche globale associant l'analyse des pathologies, l'évaluation rigoureuse des risques et le choix raisonné des techniques d'intervention. Dans le contexte algérien, où une part importante du patrimoine bâti nécessite aujourd'hui des actions de maintenance et de réhabilitation, cette démarche représente un outil utile d'aide à la décision et une contribution à la valorisation durable des ouvrages existants.

Annexes

FICHES TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC

*Outils opérationnels pour l'évaluation des désordres dans les ouvrages en
béton et en maçonnerie*

Sommaire

- **Fiche 0 :** Contexte de l'ouvrage et historique
- **Fiche 1:** Inspection visuelle
- **Fiche 2 :** Investigations complémentaires : END, ESD et essais de laboratoire
- **Fiche 3:** Analyse AMDEC-Hallowell
- **Fiche 4:** Suivi post-travaux
- **Fiche 5 :** Synthèse globale et décision

FICHE 0 - CONTEXTE DE L'OUVRAGE ET HISTORIQUE

Objectif : recueillir les informations générales nécessaires à l'interprétation des désordres observés.

Projet / ouvrage :

Adresse / localisation :

Date de visite :

Inspecteur / organisme :

Année approximative de construction:

Documents disponibles:

☐ Plans	☐ Rapports précédents	☐ Photos anciennes
☐ Étude géotechnique	☐ Dossier de maintenance	☐ Aucun document disponible

1. Type et usage de l'ouvrage

☐ Béton armé	☐ Maçonnerie
☐ Structure mixte	☐ Pierre
☐ Habitation	☐ Bâtiment industriel
☐ Équipement public	☐ Infrastructure
☐ Ouvrage hydraulique	☐ Autre :

2. Historique connu

☐ Travaux récents	☐ Réparations antérieures
☐ Infiltrations anciennes	☐ Sinistre
☐ Changement d'usage	☐ Absence d'entretien
☐ Présence ancienne d'humidité	☐ Autre :

3. Environnement et exposition

☐ Sol humide	☐ Nappe proche
☐ Mauvais drainage	☐ Forte exposition aux pluies
☐ Atmosphère marine	☐ Pollution industrielle
☐ Zone gel-dégel	☐ Ventilation insuffisante
☐ Autre :	

Commentaires / éléments importants :

FICHE 1 - INSPECTION VISUELLE

Objectif : localiser, décrire, mesurer et coter les désordres visibles avant de choisir les investigations complémentaires.

Projet / ouvrage :

Adresse / localisation :

Date et heure :

Inspecteur :

Zone inspectée :

Conditions de visite

☐ Sec	☐ Pluie récente	☐ Humide
☐ Vent fort	☐ Température élevée	☐ Autre :

1. Localisation du désordre

☐ Dalle	☐ Mur
☐ Poteau	☐ Poutre
☐ Fondation	☐ Façade
☐ Balcon	☐ Toiture-terrasse
☐ Sous-sol	☐ Autre :

Niveau / étage / repère :

Orientation :

Surface affectée estimée en m² :

Repère photo / plan :

2. Désordres observés

☐ Humidité visible	☐ Remontée capillaire
☐ Taches sombres	☐ Efflorescences / sels

☐ Décollement d'enduit	☐ Cloquage peinture
☐ Fissures	☐ Éclatement du béton
☐ Corrosion apparente	☐ Désagrégation
☐ Moisissures	☐ Infiltration ponctuelle
☐ Déformation	☐ Autre :

3. Mesures rapides du désordre

Paramètre	Valeur mesurée / estimée	Observation
Longueur de fissure	 cm / m	
Ouverture maximale	 mm	
Hauteur de remontée d'humidité	cm	
Surface affectée	 m ²	
Profondeur apparente	Faible / moyenne / importante	

4. Cotation visuelle

☐ Niveau 1 — Faible	☐ Niveau 2 — Modéré
☐ Niveau 3 — Élevé	☐ Niveau 4 — Critique

☐ Stable	☐ Récente	☐ Évolutive
☐ Ancienne	☐ Non déterminée	

☐ Présence d'eau liquide	☐ Traces seulement
☐ Pas d'eau liquide	☐ Présence de sels
☐ Sels à confirmer	

5. Hypothèse initiale et suite recommandée

☐ Capillarité	☐ Infiltration	☐ Condensation
☐ Défaut drainage	☐ Fissuration	☐ Corrosion
☐ Carbonatation	☐ Chlorures	☐ Autre :

☐ Surveillance	☐ END / mesures in situ
☐ Essais semi-destructifs	☐ Carottage
☐ Réparation urgente	☐ Étude complémentaire

Description détaillée:

FICHE 2 - INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES : END, ESD ET ESSAIS DE LABORATOIRE

Objectif : sélectionner les outils pertinents, noter les résultats essentiels, préciser les limites de mesure et conclure sans créer une fiche séparée pour chaque essai.

Projet / zone :

Date :

Opérateur :

Matériau :

Hypothèse à vérifier :

1. Conditions de mesure

Température ambiante en °C :

Humidité relative ambiante en % :

État de surface :

Présence de revêtement / peinture / enduit :

Présence visible de sels :

2. Essais non destructifs END

☐ Humidimètre capacitif/résistif	☐ Thermographie infrarouge
☐ Scléromètre	☐ Auscultation sonique / ultrasonique
☐ Radar GPR	☐ Potentiel de corrosion des armatures
☐ Résistivité électrique	☐ Cartographie visuelle et photographique

3. Essais semi-destructifs ou destructifs ESD/ED

☐ Profondeur de carbonatation par phénolphthaléine	☐ Prélèvement de poudre pour chlorures / sels
☐ Carottage	☐ Essai d'arrachement
☐ Ouverture locale pour inspection	☐ Autre :

4. Essais de laboratoire

☐ Essai de pénétration d'eau sous pression	☐ Absorption capillaire
☐ Porosité ouverte accessible à l'eau	☐ Perméabilité à l'eau
☐ Teneur en chlorures	☐ Analyse des sels
☐ Masse volumique apparente	☐ Résistance en compression sur carotte

5. Grille unique de saisie des résultats

Outil / essai	Objectif	Zone / points	Résultat brut	Interprétation	Fiabilité / limites	Suite

6. Conclusion des investigations

☐ Résultats cohérents avec l'inspection visuelle	☐ Résultats partiellement cohérents
☐ Résultats non cohérents	☐ Besoin d'investigations complémentaires

Hypothèse retenue :

☐ Criticité faible	☐ Criticité moyenne
☐ Criticité élevée	☐ Criticité critique

☐ Aucune investigation	☐ Carottage	☐ Essai de laboratoire
☐ Analyse chimique	☐ Monitoring	☐ Autre :

FICHE 3 - ANALYSE AMDEC — HALLOWELL

Objectif : hiérarchiser les risques selon la gravité, la probabilité et la détectabilité afin de prioriser les actions.

Projet / ouvrage :

Élément étudié :

Zone :

Responsable :

Date :

1. Échelle de cotation

Paramètre	1	3	5
Gravité G	Effet négligeable	Durabilité affectée	Risque critique / structural
Probabilité P	Très improbable	Possible	Très probable / observé
Détectabilité D	Très détectable	END simple nécessaire	Difficilement détectable

Indice de criticité : $IC = G \times P \times D$

2. Analyse du mode de défaillance

Désordre / mode de défaillance :

Cause probable :

Effet possible :

G :

P :

D :

$IC = G \times P \times D$:

☐ Faible : $IC = 1$ à 10	☐ Modéré : $IC = 11$ à 30
☐ Élevé : $IC = 31$ à 60	☐ Critique : $IC > 60$

3. Décision et priorité

☐ P1 — Intervention urgente	☐ P2 — Intervention à court terme
☐ P3 — Intervention programmée	☐ P4 — Simple surveillance

☐ Surveillance	☐ Diagnostic complémentaire
☐ Intervention planifiée	☐ Intervention prioritaire

☐ Confiance faible	☐ Confiance moyenne	☐ Confiance élevée

Responsable / délai :

FICHE 4 - SUIVI POST-TRAVAUX

Objectif : contrôler l'efficacité de la solution mise en œuvre, comparer avec l'état initial et définir des seuils d'alerte simples.

Projet / zone traitée :

Désordre initial :

Date des travaux :

Entreprise / intervenant :

Responsable du suivi :

☐ Drainage	☐ Barrière capillaire	☐ Injection
☐ Hydrofuge	☐ Étanchéité	☐ Ventilation
☐ Réparation béton	☐ Traitement anticorrosion	☐ Autre :

1. État initial avant travaux

Paramètre	Valeur initiale	Unité / observation
Humidité initiale		% ou unité appareil
Largeur de fissure initiale		mm
Résistivité initiale		kΩ.cm
Potentiel de corrosion initial		mV
Surface affectée initiale		m ²
Photos de référence	Oui / Non	Repères :

2. Paramètres à suivre

☐ Humidité	☐ Température	☐ Fissuration
☐ Réapparition des sels	☐ Potentiel de corrosion	☐ Résistivité
☐ Décollement d'enduit	☐ Performance thermique	☐ Autre :

3. Fréquence de contrôle

☐ 1 mois	☐ 3 mois	☐ 6 mois	☐ 12 mois
☐ Chaque année	☐ Après fortes pluies	☐ Après saison humide	☐ Autre :

4. Seuils d'alerte

Paramètre	Valeur acceptable	Seuil d'alerte	Action si dépassement
Humidité	Stable ou en baisse	Augmentation > 10 %	Recherche de cause / nouvelle mesure
Fissure	Stabilisée	Ouverture ou extension visible	Pose de témoin / expertise
Sels	Absence de réapparition	Efflorescences nouvelles	Analyse sels / humidité
Corrosion	Valeurs stables	Évolution défavorable	Contrôle armatures / protection

5. Tableau de suivi

Date	Zone	Paramètre mesuré	Résultat	État initial	Évolution	Action	Responsable
					Stable / amélioration / dégradation		
					Stable / amélioration / dégradation		
					Stable / amélioration / dégradation		
					Stable / amélioration / dégradation		
					Stable / amélioration / dégradation		

FICHE 5 - SYNTHÈSE GLOBALE ET DÉCISION

Objectif : résumer le diagnostic et transformer les observations en décision opérationnelle.

Projet / ouvrage :

Date du diagnostic :

Responsable :

1. Désordres principaux

Désordre 1 :

Désordre 2 :

Désordre 3 :

2. Causes probables

☐ Capillarité	☐ Infiltration
☐ Condensation	☐ Défaut drainage
☐ Porosité élevée	☐ Carbonatation
☐ Chlorures	☐ Fissuration
☐ Défaut d'étanchéité	☐ Autre :

Diagnostic principal :

Diagnostics secondaires possibles :

3. Résultats clés

Inspection visuelle :

Investigations complémentaires :

AMDEC :

Niveau de confiance du diagnostic :

☐ Risque faible	☐ Risque modéré
☐ Risque élevé	☐ Risque critique

4. Actions recommandées

Actions à court terme :

Actions à moyen terme :

Actions à long terme / surveillance :

5. Décision finale

☐ Surveillance	☐ Essais complémentaires
☐ Réparation localisée	☐ Traitement global
☐ Intervention urgente	☐ Clôture du dossier

Niveau de risque	Orientation décisionnelle
Faible	Surveillance simple
Modéré	Investigations complémentaires ou réparation localisée
Élevé	Intervention programmée avec suivi
Critique	Intervention prioritaire ou urgente

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Laassab Amina, Bellal Oumelkher. « Causes et effets de la fissuration des constructions en zone aride, cas d'étude à Adrar ». Mémoire de fin d'études, Université Ahmed Draia, Adrar, Spécialité Génie Civil.
- [2] Dahmoune Hadjer, Osman Hafsa. « Techniques de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé ». Mémoire de fin d'études, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Spécialité Génie Civil.
- [3] Lissandre Laure. « Analyse de la fissuration des bétons et des techniques de mise en œuvre en vue d'optimiser la réalisation des ouvrages ». Mémoire de Master, INSA de Strasbourg, Spécialité Génie Civil.
- [4] CSTB – AQC. « Pathologie des façades ». Centre Scientifique et Technique du Bâtiment / Agence Qualité Construction, Paris, Juin 2011.
- [6] Khohbizi Sena. « Réhabilitation des structures en béton armé ». Mémoire de fin d'études, Université 08 Mai 1945, Guelma, 2017.
- [8] BAEL 91 révisé 99. « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites ». Article A.7.1 : Enrobage des armatures. Fascicule n°62, Titre 1er, Section 1. Édition révisée, Février 2000.
- [9] De Larrard François. « Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux ». Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2002.
- [12] Sahari Oubaida, Djenane Kheireddine. « Solutions techniques pour la réparation et le renforcement des constructions en béton ». Mémoire de fin d'études, Université Yahia Farès, Médéa.
- [13] Boussour Ali, Melouane Mohamed. « Évaluation du béton armé dégradé par la corrosion, Région Médéa ». Mémoire de Master en Génie Civil, Université Dr Yahia Farès de Médéa, Faculté des Sciences et de la Technologie, 2014/2015.

[14] Rincker Valentine. « Diagnostic des structures existantes : du relevé visuel au confortement des ouvrages en passant par les moyens d'investigation des structures en béton ». Mémoire de Master, INSA de Strasbourg, 2009.

[15] ISAE – Cnam Liban. « Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé ». Mémoire de Master, Institut Supérieur des Arts et de l'Environnement (ISAE), en partenariat avec le Conservatoire National des Arts et Métiers (Cnam), Liban.

[16] AFNOR. NF P 95-103. « Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie — Traitement des fissures — Terminologie et classification ». AFNOR, Paris.

[17] STRRES / FABEM 2. « Traitement des fissures ». Guide technique du Syndicat National des Entrepreneurs Spécialistes de Travaux de Réparation et Renforcement de Structures (STRRES), Fascicule FABEM 2.

[18] STRRES / FABEM 3. « Injection des fissures ». Guide technique STRRES, Fascicule FABEM 3.

[19] AFNOR. NF EN 1504-9. « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton — Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité — Partie 9 : Principes généraux d'utilisation des produits et systèmes ». AFNOR, Paris.

[20] Moalic Lorry-Alan. « Réhabilitation d'ouvrages en béton armé : Du diagnostic au confortement ». Mémoire de Master, INSA de Strasbourg, Spécialité Génie Civil.

[21] AFNOR. NF ISO 31000. « Management du risque — Principes et lignes directrices ». AFNOR, Paris, Juin 2018.

[22] Larousse. Dictionnaire LAROUSSE. Éditions Larousse, Paris, 2018.

[23] Foulquié Paul, Saint-Jean Raymond. Dictionnaire de la langue philosophique. Presses Universitaires de France (P.U.F.), Collection « Les Grands Dictionnaires des P.U.F. », Paris, 1962, XV + 776 p.

- [24] Lakermi A. « Management des risques géotechniques dans un projet routier par la méthode AMDEC et MADS-MOSAR : cas de la bretelle principale "A" de l'échangeur de la RN02 ». Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Tlemcen, 2013.
- [25] Benachenhou K. A. « Approche systémique du management des risques dans l'ingénierie géotechnique — Pour une interopérabilité des acteurs dans l'environnement algérien ». Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Tlemcen, 2019.
- [26] AFNOR. NF ISO 31010. « Management du risque — Techniques d'évaluation des risques ». AFNOR, Paris, 2019.
- [27] Hallowell M., Gambatese J. « Qualitative Research: Application of the Delphi Method to CEM Research ». Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 2010.
- [28] Neville A.M. (1995). Properties of Concrete. 4ème édition. Longman Scientific & Technical, Londres.
- [29] fib Model Code 2010. Model Code for Concrete Structures. Fédération Internationale du Béton, Lausanne.
- [30] ISO 13823:2008. Principes généraux sur la conception des structures pour la durabilité. ISO, Genève.
- [34] Kehli Nisrin, 2024, photographie d'une pathologie, bloc administratif faculté de technologie Tlemcen
- [35] Kehli Nisrin, 2026, bloc administratif CTC -Tlemcen
- [36] Kehli Nisrin, 2026, photographie d'une pathologie, bloc administratif faculté de technologie Tlemcen
- [42] Kehli Nisrin, 2026, photographie d'une pathologie, bloc administratif CDE -Tlemcen
- [43] Kehli Nisrin, 2026, bloc administratif école primaire Jamaa sakhra

WEBOGRAPHIE

- [5] Expert Ravalement. « Les différents types de fissures : causes et solutions ». Disponible sur : <https://www.expert-ravalement.fr/les-differents-types-de-fissure-de-maison/#les-principaux-types-de-fissures> [Consulté en 2026].
- [7] Guiraud Patrick. « Notions sur les retraits du béton ». Infociments, 2020. Disponible sur : <https://www.infociments.fr> [Consulté en 2026].
- [10] Huang et al. « Impact of Wet–Dry Cycles on the Durability and Degradation Mechanisms of Recycled Aggregate Concrete With Varying Replacement Percentages ». Advances in Civil Engineering, Wiley Online Library, 2025. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/adce/5560054> [Consulté en 2026].
- [11] PaveBéton. « Quels sont les effets de la carbonatation sur la structure en béton armé ? ». Disponible sur : <https://www.pavebeton.fr/quels-sont-les-effets-de-la-carbonatation-sur-la-structure-en-beton-arme/> [Consulté en 2026].
- [31] 123RF. Fissure verticale dans un mur en béton armé. Image de banque de photos. Disponible sur : <https://previews.123rf.com/images/goldfinch4ever/goldfinch4ever1411/goldfinch4ever14110065/33657938-vertical-crack-in-concrete-wall-background-metaphor.jpg> [Consulté en 2026].
- [32] Gasser Anne-Charlotte. « Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton — Approche performantielle et évolutions normatives : Principales agressions et attaques du béton ». Présentation technique, CEREMA / Nantes Métropole, École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Marne-la-Vallée, 23 octobre 2014. Disponible sur : https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/02-GASSER-141022_Agressions_attaques_beton_approche_performantielle_ENPC.pdf [Consulté en 2025].
- [33] GEOS Laboratories France. « Alkali-réaction — Pathologies du béton ». Laboratoire européen d'essais sur matériaux de construction. Disponible sur : <https://www.geos-laboratories.fr> [Consulté en 2026].

[37] **Association béton Québec.** *Techno-béton no 5 : Les fissures de retrait plastique.* Agriréseau, 23 mars 2007. Disponible sur : [Agriréseau – Techno-béton no 5 : Les fissures de retrait plastique](#) [consulté en 2026].

[38] Artisan Béton. « Vibration du béton ». Disponible sur : <https://www.artisanbeton.fr> [Consulté en 2026].

[39] Shutterstock. « Fissure verticale au joint entre un poteau en béton armé et un mur de maçonnerie en briques ». Disponible sur : <https://www.shutterstock.com/fr/image-photo/crack-concrete-brick-wall-2692478743> [Consulté en 2026].

[40] Infociments / Cimbéton. « Projection de béton par voie sèche et par voie humide ». Disponible sur : <https://www.infociments.fr> [Consulté en 2026].

[41] Google Earth. Image satellite. Disponible sur : <https://earth.google.com> [Consulté en 2026].