

Cours Pathologies et réhabilitation des structures

Master 2 en Génie Civil semestre 3

Réalisé par Dr. Rofia ABADA, HDR

Centre universitaire Abdelhafid Boussouf Mila

Institut des sciences et technologies

Département de Génie Civil et Hydraulique

Semestre :3

Unité d'enseignement : UED 2.1

Matière1 : Pathologieset réhabilitation des structures

VHS : 22h30 (Cours : 1h30)

Crédits : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Comprendre les pathologies des constructions pour pouvoir réparer

Connaissances préalables recommandées :

MDC, liants minéraux, Technologie du béton

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Evaluation et diagnostic des structures en béton

Chapitre 2 : Principales pathologies des constructions

Chapitre 3 : Méthodes d'auscultation des constructions

Chapitre 4 : Les principaux matériaux de réparation

Chapitre 5 : Les principales techniques de réparation

Chapitre 6 : Renforcement des constructions

Chapitre 7 : Surveillance et entretien des constructions

Mode d'évaluation :

Examen: 100%.

Références bibliographiques :

- [1]- **Bruno GODART.** MAINTENANCE, PATHOLOGIE ET RÉPARATION DES OUVRAGES - MPREP
- [2]- **Michel LOR.** Pathologie, diagnostic, prévention et maintenance des structures
- [3]- **Luc COURARD, Benoît BISSONNETTE.** Réparation des ouvrages en béton armé- Partie 1 : pathologies et diagnostic. 2016.
- [4]- **B. GODART – LCPC .** Les techniques d'auscultation des ouvrages en beton arme
- [5]- Italcementi Group Pathologies du beton
- [6]- **AFGC – CEFRACOR.** Rehabilitation du beton arme degrade par la corrosion

Table des matières

Chapitre 1 : Evaluation et diagnostic des structures en béton	5
1-1. Objectifs de l'évaluation et du diagnostic	7
1- 2. Méthodologies d'évaluation	7
1-3. Principaux désordres des structures en béton	8
1-4. Étapes du diagnostic	8
1-5. Normes et réglementations	9
d) Autres pathologies	9
1-6. Outils numériques et technologies modernes	9
Chapitre 2 : Principales pathologies des constructions	10
2-1. Introduction aux pathologies	11
2-2. Principales pathologies du béton armé	11
a) Fissuration	11
b) Corrosion des armatures	11
c) Dégradations chimiques	11
3. Pathologies des autres matériaux	12
4. Facteurs aggravants	12
5. Diagnostic des pathologies	13
6. Prévention et recommandations	13
Chapitre 3 : Méthodes d'auscultation des constructions	14
3-1. Définition et objectifs de l'auscultation	15
3-2. Types de méthodes d'auscultation	15
a) Méthodes non destructives (END)	15
b) Méthodes semi-destructives ou destructives	16
3-3. Instrumentation et suivi à long terme	16
3-4. Étapes de l'auscultation	17
3-5. Normes et bonnes pratiques	17
3-6. Avancées technologiques	17
Chapitre 4 : Les principaux matériaux de réparation	18
4-1. Matériaux de base pour la réparation	19
4-2. Matériaux métalliques	19
4-3. Matériaux pour réparations spécifiques	19
4-4. Matériaux avancés	19
4-5. Critères de sélection des matériaux	20
Chapitre 5 : Les principales techniques de réparation	21
5-1. Introduction aux techniques de réparation	22

5-2. Principales pathologies des structures.....	22
5-3. Techniques de réparation par matériau	23
a. Béton	23
b. Acier.....	23
c. Bois.....	23
d. Maçonnerie	24
5-4. Méthodologie et procédures.....	24
5-5. Études de cas et exemples pratiques	24
5-6. Considérations pratiques et réglementaires.....	25
Chapitre 6 : Renforcement des constructions.....	26
6-1. Renforcement des structures en béton.....	27
6-2. Renforcement des structures métalliques et en acier	27
6-3. Renforcement des structures en bois.....	27
6-4. Renforcement des fondations et des sols	28
6-5. Renforcement parasismique et global	28
6-6. Étapes et considérations générales	28
Chapitre 7 : Surveillance et entretien des constructions.....	29
7-1 Objectifs de la surveillance et de l'entretien :.....	30
7-2 Surveillance des constructions :	30
7-3 Types d'inspections :	30
7-4 Outils et technologies :.....	30
7-5 Entretien des constructions :	30
7-6 Gestion des données et documentation :	30
7-7 Aspects réglementaires et normes :.....	31
7-8 Exemples de bonnes pratiques :	31
7-9 Risques et gestion des défaillances :	31

Introduction générale

Les chapitres 1 à 7 offrent une exploration complète et structurée des aspects essentiels liés à l'évaluation, la maintenance, la réparation et le renforcement des structures de construction, avec un accent particulier sur les ouvrages en béton, acier, bois et maçonnerie. Ces chapitres abordent les étapes clés du cycle de vie d'une structure : depuis le diagnostic initial (chapitre 1) et l'identification des pathologies (chapitre 2), en passant par les techniques d'auscultation (chapitre 3), le choix des matériaux de réparation (chapitre 4), les méthodes de réparation (chapitre 5), le renforcement structurel (chapitre 6), jusqu'à la surveillance et l'entretien à long terme (chapitre 7). Ces sujets, fondamentaux en génie civil, visent à garantir la sécurité des usagers, prolonger la durabilité des ouvrages et optimiser leur fonctionnalité face aux défis environnementaux, mécaniques et réglementaires. En combinant des approches théoriques, des techniques pratiques et des technologies modernes comme le BIM ou les capteurs IoT, ces chapitres fournissent un cadre méthodologique rigoureux pour les ingénieurs, les gestionnaires d'infrastructures et les décideurs. Que ce soit pour des bâtiments, des ponts, des tunnels ou des barrages, l'objectif commun est de maintenir l'intégrité structurelle tout en respectant les normes internationales (Eurocodes, ASTM, etc.) et en minimisant les coûts et impacts environnementaux.

Chapitre 1 : Evaluation et diagnostic des structures en béton

Le chapitre 1, intitulé Évaluation et diagnostic des structures en béton, traite des méthodes et des processus utilisés pour analyser l'état des structures en béton, identifier les pathologies, et évaluer leur performance et leur sécurité. Ce sujet est fondamental en génie civil, notamment pour garantir la durabilité et la sécurité des ouvrages comme les bâtiments, ponts, barrages ou tunnels. Voici un résumé structuré des points généralement abordés dans un tel chapitre, basé sur les pratiques courantes en ingénierie des structures. Si vous avez un contexte spécifique (par exemple, un manuel, une norme, ou un type d'ouvrage précis)

1-1. Objectifs de l'évaluation et du diagnostic

Évaluation : Vérifier la capacité d'une structure à remplir ses fonctions (sécurité, stabilité, durabilité) dans des conditions d'utilisation actuelles ou futures.

Diagnostic : Identifier les causes des dégradations ou anomalies observées pour proposer des solutions de réparation ou de renforcement.

Les objectifs incluent :

- Assurer la sécurité des utilisateurs.
- Prolonger la durée de vie de la structure.
- Optimiser les coûts d'entretien ou de réhabilitation.

1- 2. Méthodologies d'évaluation

L'évaluation des structures en béton suit un processus systématique :

Inspection visuelle : Observation des signes de dégradation (fissures, corrosion, délamination, etc.).

Relevés documentaires : Analyse des plans, rapports de construction, et historiques d'entretien.

Essais non destructifs (END) :

- Ultrasons pour détecter les vides ou défauts internes.
- Sclérométrie pour estimer la résistance du béton.
- Radar pour localiser les armatures ou défauts.

Essais destructifs (si nécessaire) :

- Carottage pour analyser la composition et la résistance du béton.
- Tests en laboratoire pour évaluer la carbonatation ou la pénétration des chlorures.

Mesures instrumentales :

Capteurs pour surveiller les déformations, vibrations ou contraintes.

1-3. Principaux désordres des structures en béton

Les dégradations courantes incluent :

Fissuration : Due à des contraintes mécaniques, thermiques ou au retrait.

Corrosion des armatures : Causée par la carbonatation ou la pénétration de chlorures.

Dégradation chimique : Attaque par sulfates, réaction alcali-granulat (RAG).

Fatigue : Dans les structures soumises à des charges cycliques (ponts, par exemple).

Défauts de construction : Mauvaise mise en œuvre, béton de mauvaise qualité.

Pathologie	Cause	Description
Fissuration	Contraintes mécaniques, thermiques ou retrait	Apparition de fissures dues à des efforts excessifs (surcharge, séisme), variations de température ou retrait du matériau (ex. : béton lors du durcissement).
Corrosion des armatures	Carbonatation ou pénétration de chlorures	Dégradation des armatures en acier dans le béton due à la baisse du pH (carbonatation) ou à l'exposition à des agents corrosifs comme les chlorures (milieux marins, sels de déverglaçage).
Dégradation chimique	Attaque par sulfates, réaction alcali-granulat (RAG)	Altération du béton par des réactions chimiques : les sulfates forment des composés expansifs (ettringite) ; la RAG provoque des gonflements par réaction entre les alcalis du ciment et certains granulats.
Fatigue	Charges cycliques	Dégradation progressive des matériaux (ex. : acier, béton) sous l'effet de charges répétées, courante dans les ponts ou structures soumises à des vibrations.
Défauts de construction	Mauvaise mise en œuvre, béton de mauvaise qualité	Problèmes liés à des erreurs lors de la construction : mauvais dosage du béton, compactage insuffisant, positionnement incorrect des armatures, ou matériaux non conformes.

1-4. Étapes du diagnostic

Collecte de données : Historique, conditions environnementales, charges appliquées.

Analyse des symptômes : Identifier les types et l'ampleur des désordres.

Modélisation et calculs : Vérification de la capacité portante à l'aide de logiciels ou de calculs manuels.

Conclusion et recommandations : Proposition de solutions (réparation, renforcement, démolition partielle).

Étape	Description	Objectif
Collecte de données	Historique, conditions environnementales, charges appliquées	Rassembler les informations sur l'ouvrage (plans, matériaux, historique des interventions) et son environnement (exposition à l'humidité, sel, charges appliquées) pour comprendre le contexte.
Analyse des symptômes	Identifier les types et l'ampleur des désordres	Examiner les pathologies visibles ou mesurées (fissures, corrosion, déformations) pour déterminer leur nature, leur gravité et leur étendue.
Modélisation et calculs	Vérification de la capacité portante à l'aide de logiciels ou de calculs manuels	Évaluer la résistance résiduelle de la structure par des modèles numériques (ex. : éléments finis) ou des calculs manuels pour vérifier sa sécurité et sa stabilité.
Conclusion et recommandations	Proposition de solutions (réparation, renforcement, démolition partielle)	Fournir un diagnostic final avec des recommandations adaptées : réparations ciblées, renforcement structurel ou, dans les cas extrêmes, démolition partielle.

1-5. Normes et réglementations

L'évaluation et le diagnostic doivent respecter des normes locales ou internationales, comme :

- Eurocodes (en Europe) pour le calcul des structures.
- Normes ASTM ou ACI (aux États-Unis).
- Réglementations locales pour la sécurité des ouvrages (par exemple, en France, les recommandations du CEREMA ou de l'AFGC).

d) Autres pathologies

- Fatigue : Dégradation due à des charges cycliques répétées (ponts, dalles routières).
- Gel-dégel : Éclatement du béton sous l'effet de l'expansion de l'eau gelée dans les pores.
- Défauts de mise en œuvre : Ségrégation, nids de gravier, mauvaise vibration du béton.

1-6. Outils numériques et technologies modernes

- Utilisation de la modélisation BIM (Building Information Modeling) pour une gestion intégrée des données.
- Capteurs IoT pour un suivi en temps réel.
- Intelligence artificielle pour prédire les dégradations à partir des données collectées.

Chapitre 2 : Principales pathologies des constructions

Le chapitre 2, intitulé Principales pathologies des constructions, se concentre sur les différents types de dégradations affectant les ouvrages de construction (bâtiments, ponts, infrastructures, etc.), en particulier celles touchant les matériaux comme le béton, l'acier, le bois ou la maçonnerie. Ce chapitre vise à identifier, décrire et expliquer les causes des pathologies, ainsi que leurs impacts sur la sécurité, la durabilité et la fonctionnalité des structures. Voici un résumé structuré des points généralement abordés dans ce type de chapitre, basé sur les principes du génie civil. Si vous avez un contexte précis (par exemple, un matériau spécifique, une norme, ou un type d'ouvrage).

2-1. Introduction aux pathologies

Les pathologies des constructions désignent les dégradations ou dysfonctionnements qui compromettent la sécurité, la durabilité ou la fonctionnalité d'une structure. Ces désordres peuvent résulter de :

Facteurs internes : défauts de conception, matériaux de mauvaise qualité, erreurs de mise en œuvre.

Facteurs externes : conditions environnementales (humidité, température), charges excessives, agressions chimiques.

Vieillesse naturelle ou usage prolongé.

2-2. Principales pathologies du béton armé

a) Fissuration

Causes :

- Retrait hydraulique (séchage du béton).
- Retrait thermique (variation de température).
- Surcharges mécaniques ou efforts non prévus.
- Corrosion des armatures (poussée des produits de corrosion).

Types :

- Fissures de flexion ou de traction (structurelles).
- Fissures de retrait (non structurelles).

Conséquences : Risque d'infiltration d'eau, accélération de la corrosion.

b) Corrosion des armatures

- Mécanisme
- Carbonatation : Réaction du CO_2 avec le béton, réduisant son pH et exposant les armatures à la corrosion.
- Pénétration des chlorures : Provenant de sels de déverglaçage ou d'environnements marins.

Signes : Éclatement du béton, taches de rouille, fissuration en surface.

Conséquences : Perte de section des armatures, réduction de la capacité portante.

c) Dégradations chimiques

- Réaction alcali-granulat (RAG) :
- Réaction chimique entre les alcalis du ciment et certains granulats, provoquant un gonflement.

Symptômes : Fissures en toile d'araignée, éclatements.

- Attaque par sulfates : Réaction avec des sulfates (sols ou eaux agressives), entraînant la formation d'étrangéité ou de gypse.

Symptômes : Gonflement, désagrégation du béton.

- Attaque acide : Dissolution du béton par des acides (par exemple, eaux industrielles).

3. Pathologies des autres matériaux

Bien que le béton soit central, d'autres matériaux peuvent être affectés :

Acier : Corrosion, fatigue, déformation plastique.

Bois : Pourrissement, attaques biologiques (insectes, champignons).

Maçonnerie : Fissures dues à des tassements, dégradation par l'humidité.

Matériau	Pathologie	Description
Acier	Corrosion	Dégradation de l'acier due à l'exposition à l'humidité, à l'air salin ou à des agents chimiques, entraînant une perte de section et une réduction de la résistance.
Acier	Fatigue	Apparition de fissures progressives sous l'effet de charges cycliques répétées (ex. : vibrations sur les ponts), pouvant mener à une rupture brutale.
Acier	Déformation plastique	Modification permanente de la forme sous des charges excessives, affectant la stabilité et l'intégrité de la structure.
Bois	Pourrissement	Dégradation due à l'humidité favorisant la pourriture (sèche ou humide), réduisant la résistance mécanique et l'intégrité du bois.
Bois	Attaques biologiques (insectes, champignons)	Domages causés par des insectes (termites, capricornes) ou des champignons, entraînant une perte de matière et une fragilisation.
Maçonnerie	Fissures dues à des tassements	Fissures provoquées par des mouvements différentiels du sol, affectant l'intégrité structurelle des murs en pierre ou brique.
Maçonnerie	Dégradation par l'humidité	Altération due à l'infiltration d'eau ou aux remontées capillaires, causant efflorescence, érosion ou gel-dégel dans les matériaux poreux.

4. Facteurs aggravants

Conditions environnementales : Exposition à l'humidité, sel, polluants.

Mauvaise conception : Sous-estimation des charges, absence de joints de dilatation.

Entretien insuffisant : Manque de maintenance préventive.

5. Diagnostic des pathologies

Observation visuelle : Identification des symptômes (fissures, taches, efflorescences).

Essais sur site : Mesure de la profondeur de carbonatation (test à la phénolphthaléine).

- Analyse des chlorures.
- Tests de résistance (scléromètre, carottage).

Analyse en laboratoire : Étude des échantillons pour confirmer les causes chimiques ou mécaniques.

6. Prévention et recommandations

Conception : Utilisation de béton adapté (classe d'exposition, enrobage suffisant des armatures).

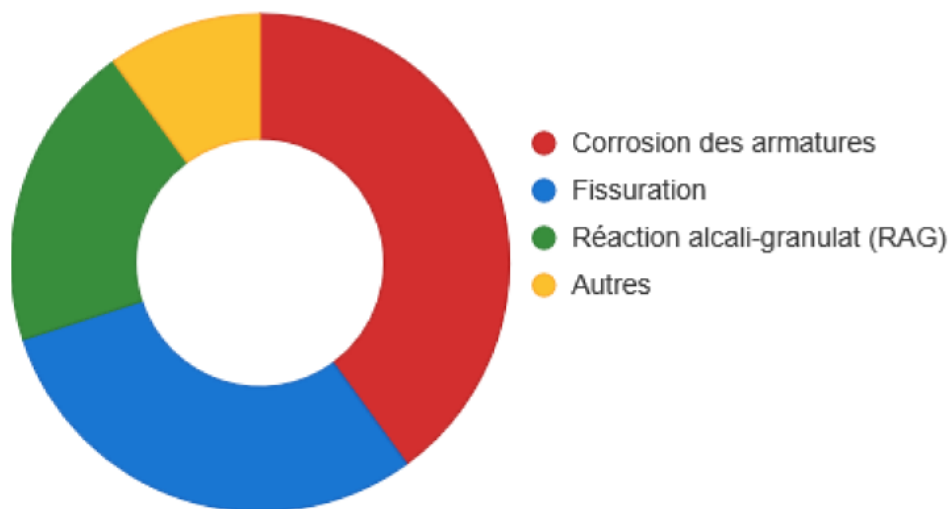
Matériaux : Choix de granulats non réactifs, ciments résistants aux sulfates.

Entretien : Inspections régulières, protection des surfaces (revêtements, drainage).

Exemple illustratif

Si l'on considère la fréquence des pathologies dans les structures en béton, les données typiques montrent que la corrosion des armatures et la fissuration sont les plus courantes.

Répartition des pathologies des structures en béton



Chapitre 3 : Méthodes d'auscultation des constructions

Le chapitre 3, intitulé Méthodes d'auscultation des constructions, se concentre sur les techniques et outils utilisés pour évaluer l'état des structures (bâtiments, ponts, tunnels, etc.) sans nécessairement les endommager. L'auscultation vise à détecter les pathologies, surveiller les performances et garantir la sécurité des ouvrages. Ce chapitre détaille les approches non destructives, semi-destructives et parfois destructives, ainsi que les technologies modernes employées. Voici un résumé structuré des points typiquement abordés, basé sur les pratiques courantes en génie civil. Si vous avez un contexte spécifique (par exemple, un type d'ouvrage ou une norme).

3-1. Définition et objectifs de l'auscultation

L'auscultation consiste à examiner une structure pour évaluer son état, identifier les désordres, et mesurer ses performances (résistance, déformations, etc.).

Les objectifs incluent :

- Détecter les pathologies (fissures, corrosion, dégradations chimiques).
- Vérifier la conformité aux normes (Eurocodes, ACI, etc.).
- Évaluer la capacité portante et la durabilité.
- Planifier les interventions (réparation, renforcement).

3-2. Types de méthodes d'auscultation

Les méthodes d'auscultation se divisent en deux grandes catégories : non destructives et destructives. Une combinaison des deux est souvent utilisée pour un diagnostic complet.

a) Méthodes non destructives (END)

Ces techniques permettent d'évaluer la structure sans l'endommager. Elles sont privilégiées pour leur rapidité et leur coût modéré.

Inspection visuelle :

- Observation des signes visibles : fissures, taches de rouille, efflorescences, délamination.
- Utilisation d'outils simples (loupes, endoscopes) ou de drones pour les zones difficiles d'accès.

Sclérométrie :

- Mesure de la dureté du béton à l'aide d'un scléromètre (marteau de Schmidt).
- Estimation de la résistance en compression.

Limites : Résultats influencés par la texture de surface ou l'humidité.

Ultrasons :

- Propagation d'ondes ultrasonores pour détecter les vides, fissures internes ou hétérogénéités.
- Mesure de la vitesse des ondes pour estimer la qualité du béton.
- Radar géotechnique (GPR) :
- Utilisation d'ondes électromagnétiques pour localiser les armatures, détecter les vides ou mesurer l'épaisseur des éléments.

Applications : Ponts, dalles, murs.

Potentiel de corrosion :

- Mesure du potentiel électrochimique pour évaluer le risque de corrosion des armatures.
- Utile pour détecter les zones affectées par la carbonatation ou les chlorures.

Thermographie infrarouge :

- Détection des variations de température pour identifier les défauts (vides, infiltrations d'eau, délamination).

Applications : Inspection des façades ou des tabliers de pont.

Acoustique (écoute des vibrations) :

- Analyse des fréquences naturelles pour détecter des changements structurels (fissures, perte de rigidité).

Mesures de déformation :

- Utilisation de capteurs (jauge de déformation, inclinomètres, extensomètres) pour surveiller les déplacements ou les contraintes.

b) Méthodes semi-destructives ou destructives

Ces méthodes impliquent un prélèvement ou une altération mineure de la structure.

Carottage : Prélèvement d'échantillons cylindriques pour analyser la composition, la résistance ou la profondeur de carbonatation.

Tests en laboratoire : Résistance à la compression, analyse chimique (chlorures, sulfates).

Test de carbonatation : Application de phénolphthaléine sur un échantillon frais pour mesurer la profondeur de carbonatation (zone où le pH du béton est réduit).

Prélèvements pour analyse chimique : Analyse des teneurs en chlorures, sulfates ou alcalis pour diagnostiquer les réactions chimiques (RAG, attaque par sulfates).

Test de charge : Application de charges contrôlées pour évaluer la réponse de la structure (déformations, fissuration).

Utilisé pour les ponts ou les bâtiments avant leur mise en service ou après réparation.

3-3. Instrumentation et suivi à long terme

Capteurs intégrés : Capteurs de contrainte, de température, d'humidité ou de corrosion insérés dans la structure.

Applications : Suivi en temps réel des ponts, barrages ou bâtiments.

Systèmes IoT (Internet des Objets) :

- Collecte de données en continu via des réseaux de capteurs connectés.
- Analyse prédictive pour anticiper les dégradations.

Modélisation numérique : Utilisation de logiciels (BIM, éléments finis) pour corréler les données d'auscultation avec les calculs structurels.

3-4. Étapes de l'auscultation

Planification :

- Étude des plans, historique de la structure, conditions d'exploitation.
- Définition des zones critiques à inspecter.

Inspection préliminaire : Observation visuelle pour identifier les zones à risque.

Mesures et tests : Combinaison de méthodes END et destructives selon les besoins.

Analyse des données : Interprétation des résultats (comparaison avec les normes, calculs de capacité portante).

Rapport et recommandations : Diagnostic des pathologies, propositions d'actions (réparation, renforcement, suivi).

3-5. Normes et bonnes pratiques

Les méthodes d'auscultation doivent respecter des normes internationales ou locales :

- **Eurocode 2 :** Conception et évaluation des structures en béton.
- **Normes ASTM** (ex. ASTM C876 pour le potentiel de corrosion).
- **Recommandations AFGC** (en France) pour l'inspection des ouvrages.
- **CEREMA :** Guides pour l'auscultation des ponts et bâtiments.

3-6. Avancées technologiques

Drones et robotique : Inspection des zones inaccessibles (piles de pont, façades élevées).

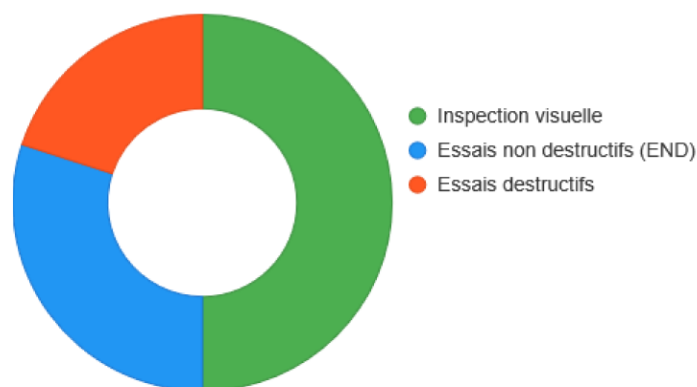
Intelligence artificielle : Analyse des données d'auscultation pour prédire les dégradations.

Réalité augmentée : Superposition des données d'auscultation sur les modèles 3D (BIM).

Exemple illustratif

Pour illustrer, on pourrait représenter graphiquement la répartition des méthodes d'auscultation utilisées selon le type de structure (par exemple, 50 % inspection visuelle, 30 % END, 20 % destructif pour un pont).

Répartition des méthodes d'auscultation pour un pont



Chapitre 4 : Les principaux matériaux de réparation

Le chapitre 4, intitulé Les principaux matériaux de réparation, se concentre sur les matériaux utilisés pour réparer, renforcer ou restaurer les structures de construction endommagées (bâtiments, ponts, tunnels, etc.), en particulier celles en béton, acier, bois ou maçonnerie. Ce chapitre détaille les caractéristiques, applications, avantages et limites des matériaux couramment employés pour traiter les pathologies identifiées lors des diagnostics ou auscultations. Voici un résumé structuré des points typiquement abordés, basé sur les pratiques courantes en génie civil. Si vous avez un contexte spécifique (par exemple, un type d'ouvrage, un matériau précis ou une norme), merci de le préciser pour une réponse plus ciblée.

4-1. Matériaux de base pour la réparation

Ciment et mortier : Utilisés pour réparer des structures en béton ou en maçonnerie. Les mortiers à base de ciment Portland, de chaux ou de résines sont fréquents pour colmater fissures ou restaurer des surfaces.

Béton de réparation : Spécialement formulé pour réparer des structures en béton, avec des propriétés comme une prise rapide ou une haute résistance.

Résines époxy : Très utilisées pour des réparations structurales ou pour coller des matériaux (métal, béton, bois). Elles offrent une forte adhérence et résistance aux contraintes mécaniques.

Polymères et composites : Les polymères comme les polyuréthanes ou les composites renforcés (fibre de verre, fibre de carbone) sont employés pour des réparations légères et durables, notamment dans l'automobile ou l'aéronautique.

4-2. Matériaux métalliques

Soudure et alliages : Les métaux d'apport (acier, aluminium, cuivre) sont utilisés pour réparer des pièces métalliques par soudage (TIG, MIG, arc électrique).

Patches métalliques : Plaques ou pièces métalliques utilisées pour renforcer ou remplacer des sections endommagées.

Revêtements anti-corrosion : Peintures ou enduits spéciaux pour protéger les métaux réparés contre la rouille ou l'oxydation.

4-3. Matériaux pour réparations spécifiques

Colles et mastics : Les mastics silicone ou acrylique sont utilisés pour des réparations étanches (toitures, joints). Les colles structurales servent à assembler des pièces sans fixation mécanique.

Matériaux d'étanchéité : Membranes bitumineuses, bandes d'étanchéité ou mousses expansives pour réparer des fuites ou des infiltrations.

Bois et dérivés : Panneaux de bois, résines de remplissage ou mastics pour réparer des structures en bois ou des meubles.

4-4. Matériaux avancés

Nanomatériaux : Utilisés dans des applications de pointe pour renforcer ou réparer à l'échelle microscopique.

Matériaux auto-réparants : Polymères ou bétons capables de se régénérer face à des microfissures, souvent utilisés dans des environnements exigeants.

4-5. Critères de sélection des matériaux

Compatibilité : Le matériau doit être compatible avec le support à réparer (ex. : béton sur béton, métal sur métal).

Résistance mécanique et environnementale : Résistance aux charges, à l'humidité, aux UV ou aux produits chimiques.

Facilité d'application : Certains matériaux nécessitent des outils spécifiques ou des conditions contrôlées (température, humidité).

Durabilité : La réparation doit garantir une longévité comparable à celle de la structure d'origine.

Chapitre 5 : Les principales techniques de réparation

Le chapitre 5, intitulé Les principales techniques de réparation, se concentre sur les méthodes et procédures utilisées pour réparer les structures de construction endommagées (bâtiments, ponts, tunnels, etc.) afin de restaurer leur intégrité structurale, leur durabilité et leur fonctionnalité. Ce chapitre détaille les approches adaptées aux différentes pathologies identifiées (fissures, corrosion, déformations, etc.) et aux matériaux concernés (béton, acier, bois, maçonnerie)

5-1. Introduction aux techniques de réparation

Présentation des objectifs des réparations structurelles :

Sécurité : garantir que la structure reste stable et sans risque pour les usagers.

Durabilité : prolonger la durée de vie de la structure face aux agressions environnementales (humidité, produits chimiques, variations climatiques).

Fonctionnalité : restaurer la capacité de la structure à remplir son rôle (par exemple, un pont doit supporter les charges de trafic, un bâtiment doit être habitable).

L'importance d'un diagnostic précis avant toute intervention, est basé sur une inspection visuelle, des tests non destructifs (ultrasons, radar, etc.) et des analyses des causes des pathologies (surcharge, vieillissement, défaut de conception, etc.).

5-2. Principales pathologies des structures

Le chapitre détaille les types de dommages les plus courants affectant les structures de construction, avec leurs causes et impacts :

Fissures :

Types : fissures actives (évolutives) ou passives (stables), superficielles ou traversantes.

Causes: contraintes mécaniques (surcharge, tassement), thermiques (variations de température), chimiques (réactions alcali-granulats).

Conséquences : réduction de la résistance, infiltration d'eau, corrosion des armatures.

Corrosion :

Acier : oxydation due à l'exposition à l'humidité ou aux chlorures (par exemple, dans les structures côtières).

Béton armé : carbonatation ou attaque par chlorures, entraînant l'éclatement du béton autour des armatures.

Déformations :

Causes : tassement différentiel, surcharge, fatigue des matériaux, ou défauts de conception.

Exemples : flèche excessive dans les poutres, déformation des dalles ou des murs.

Autres pathologies :

- Désordres chimiques (attaque sulfatique, efflorescence).
- Dégradations biologiques (moisissures, insectes pour le bois).
- Usure mécanique ou érosion (par exemple, abrasion des piles de ponts par les courants).

5-3. Techniques de réparation par matériau

Le chapitre détaille les méthodes de réparation adaptées aux principaux matériaux de construction, en tenant compte des spécificités des pathologies.

a. Béton

Colmatage des fissures

- **Injection de résine époxy** : pour les fissures actives, afin de restaurer la continuité structurale.
- **Injection de coulis de ciment** : pour les fissures plus larges ou dans des structures massives.

Application de mortiers spéciaux : pour les fissures superficielles, avec des produits hydrofuges pour prévenir les infiltrations.

Renforcement

- **Fibre de carbone (PRFC)** : application de tissus ou de lamelles de carbone pour augmenter la résistance à la traction ou au cisaillement.
- **Ajout d'armatures supplémentaires** : pose de barres d'acier ou de tirants.

Protection contre la corrosion

- **Passivation des armatures** : application de couches protectrices (inhibiteurs de corrosion).
- **Re-alcalinisation ou désalinisation** : pour contrer la carbonatation ou l'attaque par chlorures.

Réparation des surfaces

- **Reprofilage** : application de mortiers de réparation pour restaurer la géométrie des éléments endommagés.
- **Revêtements protecteurs** : peintures ou membranes pour protéger contre les agressions environnementales.

b. Acier

Traitement de la corrosion

- **Sablage ou grenaillage** : pour éliminer la rouille.
- **Application de peintures anti-corrosion** : couches riches en zinc ou époxy.
- **Protection cathodique** : pour les structures exposées à des environnements agressifs (par exemple, piles de ponts en milieu marin).

Renforcement

- **Ajout de plaques ou profilés métalliques** : boulonnés ou soudés pour augmenter la capacité portante.
- **Remplacement partiel** : pour les éléments trop endommagés.
- **Réparation des soudures** : inspection et reprise des soudures défectueuses.

c. Bois

Réparation des dégradations biologiques

- **Traitement fongicide ou insecticide** : pour éliminer les moisissures ou insectes xylophages.
- **Consolidation** : injection de résines pour renforcer les zones affaiblies.

Remplacement partiel

- **Prothèses en bois ou en métal** : pour remplacer les parties pourries ou endommagées.
- **Renforcement par lamelles collées** : pour augmenter la résistance mécanique.

Protection : application de vernis, lasures ou traitements hydrofuges pour prévenir l'humidité.

d. Maçonnerie

- **Rejointoiement** : remplacement des joints détériorés par du mortier adapté.
- **Injection de coulis** : pour consolider les murs fissurés ou désolidarisés.
- **Renforcement par tirants** : installation de tirants métalliques pour stabiliser les murs ou voûtes.
- **Remplacement d'éléments** : substitution de briques ou pierres endommagées.

5-4. Méthodologie et procédures

Le chapitre décrit une méthodologie standard pour la mise en œuvre des réparations :

Diagnostic :

- Inspections visuelles et instrumentales (endoscopie, ultrasons, etc.).
- Analyse des causes (calculs structuraux, tests de matériaux).

Choix de la technique :

- Basé sur la pathologie, le matériau, l'environnement et les contraintes d'exploitation (par exemple, un pont en service nécessite des solutions rapides et peu invasives).

Préparation :

- Nettoyage des surfaces, élimination des matériaux dégradés, mise en sécurité du chantier.

Application :

- Étapes précises pour chaque technique (par exemple, injection sous pression, pose de fibres de carbone).
- Respect des normes et recommandations (Eurocodes, normes nationales).

Contrôle qualité :

- Tests post-réparation (essais de charge, contrôle des fissures, etc.).
- Suivi à long terme pour vérifier la durabilité des réparations.

5-5. Études de cas et exemples pratiques

Le chapitre inclut des études de cas illustrant l'application des techniques :

- Réparation d'un pont en béton armé avec corrosion des armatures : nettoyage, passivation, pose de fibres de carbone.
- Consolidation d'un bâtiment historique en maçonnerie : injection de coulis et installation de tirants.

- Restauration d'une charpente en bois dans un bâtiment ancien : traitement insecticide et remplacement partiel des poutres.

5-6. Considérations pratiques et réglementaires

Normes et réglementations : respect des normes locales et internationales (Eurocodes, ACI, etc.).

Sécurité sur le chantier : mesures pour protéger les ouvriers et les usagers.

Impact environnemental : choix de matériaux durables et réduction des déchets.

Coût et planification : évaluation des coûts des réparations et optimisation des délais pour minimiser les perturbations.

Chapitre 6 : Renforcement des constructions

Le chapitre 6, intitulé Renforcement des constructions, aborde probablement les méthodes et techniques destinées à améliorer la résistance, la stabilité et la durabilité des structures existantes, en complément des chapitres précédents sur les matériaux et techniques de réparation. Ce sujet est central en génie civil et en ingénierie structurelle, particulièrement pour adapter les bâtiments aux nouvelles normes (sismiques, environnementales) ou corriger des dégradations dues au temps, aux charges excessives ou aux événements imprévus. Voici un aperçu des principales approches, basé sur des pratiques courantes en construction.

6-1. Renforcement des structures en béton

Collage de composites (FRP - Fibre Renforcée Polymère) : Application de plaques ou de tissus en fibres de carbone ou de verre, collés sur les surfaces pour augmenter la résistance en flexion, en cisaillement ou au confinement. Cette technique est légère, non invasive et idéale pour les ponts ou bâtiments endommagés.

Précontrainte additionnelle : Introduction de câbles ou de barres post-tendues pour compenser les efforts de traction et restaurer la capacité portante des poutres ou dalles.

Béton projeté (gunitage ou voie sèche) : Projection de béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) pour renforcer les surfaces dégradées ou confiner les éléments structuraux.

Ajout d'éléments en béton armé : Chemisage de poteaux ou intégration de nouveaux portiques pour réparer les dommages sismiques ou corrosifs.

6-2. Renforcement des structures métalliques et en acier

Ajout de contreventements et portiques : Installation de profilés tubulaires ou de cornières en acier pour améliorer la stabilité latérale, particulièrement en zones sismiques.

Renforcement par soudures ou boulonnages : Ajout de plaques ou de raidisseurs pour rigidifier les assemblages et contrer la corrosion ou les fissures.

Revêtements et protections : Application de systèmes anti-corrosion (galvanisation ou époxy) combinés à des renforcements mécaniques pour prolonger la vie des structures.

6-3. Renforcement des structures en bois

Renforcement mécanique : Utilisation de connecteurs métalliques (plaques, vis ou équerres) pour assembler et stabiliser les éléments, ou ajout de contreventements en bois lamellé-collé.

Injection de résines époxy : Remplissage des fissures ou trous pour restaurer l'intégrité, souvent associé à des cales en acier pour l'alignement.

Ajout d'éléments composites : Intégration de barres en fibre de carbone pour augmenter la résistance à la flexion sans alourdir la structure.

6-4. Renforcement des fondations et des sols

Techniques géotechniques : Clouage de sols (insertion de tiges en acier ou plastique pour ancrer les talus) ou inclusions rigides (pieux ou colonnes ballastées) pour améliorer la portance et la stabilité des terrains.

Ancrages injectés : Forage et injection de coulis pour créer des chainages horizontaux ou verticaux, redistribuant les charges vers les fondations.

Renforcement par géotextiles : Pose de couches renforcées pour stabiliser les remblais ou sols pulvérulents.

6-5. Renforcement parasismique et global

Ajout de diaphragmes et joints : Intégration de contreventements transversaux ou de joints de dilatation pour absorber les vibrations sismiques.

Allègement structurel : Suppression partielle d'éléments non porteurs pour réduire les charges, combinée à des renforcements ciblés.

Techniques avancées : Utilisation de systèmes intelligents (capteurs pour monitoring en temps réel) ou de matériaux auto-réparants pour une durabilité accrue.

6-6. Étapes et considérations générales

Diagnostic préalable : Auscultation non destructive (ultrasons, thermographie, modélisation par éléments finis) pour identifier les faiblesses.

Critères de choix : Compatibilité avec la structure existante, minimisation des impacts esthétiques (surtout pour le patrimoine), respect des normes (Eurocodes, Plan Séisme France) et contraintes environnementales (température, humidité).

Contrôle et durabilité : Essais post-renforcement et suivi pour valider l'efficacité, visant une longévité équivalente à une construction neuve.

Ces techniques visent non seulement à corriger mais à anticiper les évolutions (changement d'usage, normes renforcées). Si ce chapitre fait référence à un manuel spécifique (par exemple, sur le génie civil ou la réhabilitation sismique)

Chapitre 7 : Surveillance et entretien des constructions

Le chapitre 7, intitulé Surveillance et entretien des constructions, traite généralement des pratiques et des procédures nécessaires pour assurer la durabilité, la sécurité et la fonctionnalité des ouvrages de construction (bâtiments, ponts, infrastructures, etc.). Voici un résumé des points clés typiquement abordés dans un tel chapitre, basé sur les standards en génie civil et en gestion des infrastructures. Si vous avez un contexte spécifique (par exemple, un manuel ou un domaine précis comme le bâtiment ou les travaux publics).

7-1 Objectifs de la surveillance et de l'entretien :

- Assurer la sécurité des usagers.
- Prolonger la durée de vie des constructions.
- Prévenir les dégradations majeures.
- Maintenir les performances fonctionnelles et esthétiques.

7-2 Surveillance des constructions :

- **Inspections régulières** : Planification d'inspections visuelles ou techniques (ex. : contrôle des fissures, corrosion, déformations).

7-3 Types d'inspections :

- **Initiale** : Après la construction pour vérifier la conformité.
- **Périodique** : Selon un calendrier (annuel, quinquennal, etc.).
- **Exceptionnelle** : Après des événements comme séismes, tempêtes ou accidents.

7-4 Outils et technologies :

- Mesures manuelles (niveaux, théodolites).
- Capteurs (déformation, température, vibrations).
- Drones pour les zones difficiles d'accès.
- Techniques non destructives (ultrasons, radar, thermographie).

7-5 Entretien des constructions :

- **Entretien préventif** : Actions planifiées pour éviter les dégradations (ex. : nettoyage des drains, peinture anticorrosion).
- **Entretien correctif** : Réparations après identification de défauts (ex. : colmatage de fissures, remplacement d'éléments défectueux).
- **Plan de maintenance** : Établissement d'un calendrier et d'un budget pour l'entretien, basé sur la criticité de l'ouvrage et son usage.

7-6 Gestion des données et documentation :

Tenue d'un carnet de santé de l'ouvrage (historique des inspections, réparations, etc.).

Utilisation de logiciels de GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur).

Analyse des données pour anticiper les besoins futurs.

7-7 Aspects réglementaires et normes :

- Respect des normes locales ou internationales (ex. : Eurocodes, normes ISO).
- Obligations légales pour les propriétaires ou gestionnaires d'infrastructures.
- Coordination avec les autorités compétentes pour les inspections obligatoires.

7-8 Exemples de bonnes pratiques :

Surveillance des ponts : Vérification des appuis, des joints de dilatation, et des câbles (pour les ponts suspendus).

Bâtiments : Contrôle des façades, toitures, et systèmes de drainage.

Infrastructures souterraines : Inspection des tunnels pour détecter les infiltrations d'eau ou les déformations.

7-9 Risques et gestion des défaillances :

- Identification des risques (corrosion, fatigue des matériaux, surcharge).
- Plan d'action en cas de détection de problèmes graves (fermeture temporaire, travaux d'urgence).
- Formation du personnel pour reconnaître les signes de dégradation.

Conclusion générale

En conclusion, ce cours forme un guide intégré pour la gestion des structures de construction, en abordant chaque étape du processus, de l'évaluation initiale à l'entretien continu.

Le chapitre 1 met en lumière l'importance d'un diagnostic précis pour identifier les pathologies et évaluer les performances des structures en béton, tandis que le chapitre 2 détaille les causes et impacts des dégradations affectant divers matériaux.

Le chapitre 3 complète cette analyse par des techniques d'auscultation modernes, permettant une détection non destructive et un suivi précis.

Les chapitres 4 et 5 explorent respectivement les matériaux et les techniques de réparation, offrant des solutions adaptées à chaque type de pathologie et de matériau, tandis que le chapitre 6 propose des méthodes de renforcement pour répondre aux nouvelles exigences ou compenser les faiblesses structurelles.

Enfin, le chapitre 7 insiste sur l'importance de la surveillance et de l'entretien pour prévenir les dégradations futures et prolonger la durée de vie des ouvrages.

Ensemble, ces chapitres soulignent l'approche systématique et multidisciplinaire nécessaire pour relever les défis du génie civil moderne, en intégrant des outils numériques, des normes rigoureuses et des pratiques durables. Ce cadre permet non seulement de restaurer et renforcer les structures existantes, mais aussi d'anticiper les évolutions futures, qu'il s'agisse de changements d'usage, de contraintes climatiques ou de nouvelles réglementations.

Bibliographie

American Concrete Institute. (2021). *ACI 562-21: Code requirements for assessment, repair, and rehabilitation of existing concrete structures and commentary*. ACI.

Association Française de Génie Civil. (2013). *Guide pour l'évaluation et la réparation des ouvrages en béton armé*. AFGC.

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. (2020). *Guide technique pour l'inspection et l'entretien des ponts*. CEREMA.

Comité Européen de Normalisation. (2005). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EN 1992-1-1). CEN.

Comité Européen de Normalisation. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings* (EN 1998-3). CEN.

Fib - International Federation for Structural Concrete. (2010). *Model code 2010: Final draft*. Fib.

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology* (2nd ed.). Pearson.

American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C876-15: Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. ASTM International.

Fib - International Federation for Structural Concrete. (2006). *Guidelines for the management of existing concrete structures*. Fib Bulletin 22.

Fib - International Federation for Structural Concrete. (2019). *Repair and rehabilitation of concrete structures*. Fib Bulletin 90.