

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou



Domaine : Science et Technique.

Filière : Génie Civil

Option : Charpente Métallique

Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté en vue d'obtention du diplôme de Master Professionnel

Thème

Expertise visuelle des pathologies des constructions métalliques : cas de deux structures implantées à Tizi Ouzou.

Présentée par :
KANA Nabila

Devant le jury :

M.AKKOUCHE Karim	Docteur	Univ. De Tizi-Ouzou	Promoteur
M.HAMIZI Mohand	Professeur	Univ. De Tizi-Ouzou	Président
M.BOUAFIA Youcef	Professeur	Univ. De Tizi-Ouzou	Examineur

Année Universitaire : 2023 - 2024

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale ----- 1

Chapitre I : Généralités sur la construction métallique

I. Introduction ----- 3

Partie 1 : Les structures métalliques et leurs usages ----- 3

II. Usages des constructions métalliques ----- 4

II.1. Usage industrielle ----- 4

II.2. Usage d'habitation ----- 5

II.3. Usage de stockage ----- 5

II.4. Ouvrage d'art ----- 5

II.5. Autres ----- 6

III. Exemples de chef d'œuvre en constructions métalliques ----- 6

IV. Avantages et inconvénients de la construction métallique ----- 9

IV.1. Avantages ----- 9

IV.2. Inconvénients ----- 9

V. L'acier ----- 10

V.1. Elaboration de l'acier ----- 10

V.2. Fabrication des tôles et des profilés ----- 10

V.3. Comportement de l'aciers ----- 12

V.3.1. Comportement réel ----- 12

V.4. Classification des aciers ----- 13

V.5. Nuances d'acier couramment utilisées ----- 14

VI. Conclusion ----- 15

Chapitre II : Généralités sur les pathologies en charpente métallique

I. Introduction ----- 16

II.1. Pathologie ----- 16

II.2. La prévention des désordres	17
II.3. Diagnostic	17
Partie 02 : Différentes pathologies de la partie superstructure cas de la construction métallique	17
III.1. Défaut de conception et de construction	18
III.1.1. Les erreurs liées à la conception et aux calculs	18
III.1.2. Les erreurs liées à la réalisation	18
III.2. Erreurs liées à l'exploitation et à la maîtrise d'ouvrage	19
III.3. Matériaux de constructions	20
III.3.1. L'aciers	20
III.3.2. Les assemblages	21
III.4. Manque d'entretien	22
III.5. Changement d'usage	22
III.6. Due aux Actions naturelles	23
III.6.1 Le vent	23
III.6.2 La neige	23
III.6.3 Les Précipitations	23
III.6.4. La température	24
III.7. Due aux Actions chimiques	24
III.7.1. La corrosion	24
III.8. Due aux actions accidentelles	25
III.8.1. Séisme [14]	25
III.8.2. Explosion	26
III.8.3. Choc des trafics	27
Partie 03 : Différentes pathologies de la partie infrastructure cas de la construction métallique	27
IV.1. Les risques liés au sol	27
IV.1.1. Retrait et Gonflement	27
IV.1.2. Les glissements du terrain	28
IV.1.3. Les effondrements de cavités souterraines	28
IV.1.4. Les tassements et les affaissements	29
IV.1.4.1. Les tassements	29
IV.1.4.2. Les affaissements	30
IV.1.5. Les écroulements et les chutes de blocs	31
IV.1.6. Liquéfaction du sol	31

IV.2. Les risques liés au fondations	32
IV.2.2. Matériaux de constructions en cause	34
IV.2.2.1. Béton armé	34
IV.2.3. L'environnement en cause	36
IV.2.4. L'utilisation en cause	37
V. Conclusion	37

Chapitre III : Procédés de diagnostic et Techniques de réparation et de renforcement

I. Introduction	38
Partie 01 : Procéder du diagnostique	38
II.1. Diagnostic	38
II.2. Le processus de diagnostic d'un ouvrage	38
II.3. Les principales étapes d'un diagnostic	39
II.3.1. Révision de l'historique de l'ouvrage	40
II.3.2. Analyse des conditions de service	40
II.3.3. Visite du site	41
II.3.4. Évaluation détaillée	41
II.3.5. Évaluation des données recueillies	41
II.4. Choix des investigations	41
II.4.1. Nature des matériaux	42
II.4.2. Type de structure	42
II.4.3. Etat de l'ouvrage	42
II.4.4. Environnement de l'ouvrage	43
II.5. Type d'investigation	43
II.5.1. Méthodes non destructifs	43
A. Inspection visuelle	43
B. Essai de ressuage	44
C. Essai par magnétoscopie (MT)	45
D. Ultrasons	45
E. La radiographie	46
F. Courants de Foucault	47
II.5.2. Investigations destructives	48
A. Analyse Chimique et Métallurgique	48

B. Essais Mécaniques	48
II.6. Rapport d'un diagnostic.....	48
Partie 02 : Proposition d'une fiche pour l'évaluation des structure métallique.....	48
III.1. Identification de la construction	48
III.2. Usage de la construction	49
III.3. Description de la construction	49
III.4. Sol de la construction	49
III.5. Inspection de l'infrastructure.....	49
III.6. Inspection de la superstructure.....	49
III.7. Autres indications.....	50
III.8. Etat de la structure	50
III.9. Une évaluation profonde est nécessaire	50
Partie 03 : Technique de réparation et de renforcement	53
IV.1. Les différentes techniques de réparation et du renforcement.....	53
IV.1.1. Remplacement d'éléments endommagés	53
IV.1.2. Dispositif provisoire de reprise des efforts par barres de précontrainte	54
IV.1.3. Ajout de matière	54
IV.1.4. Déconsolidation d'assemblages rivés.....	56
IV.1.5. Limiter la corrosion	57
IV.1.5.1. La peinture	57
IV.1.5.2. Gainage	58
IV.1.6. Lutte contre l'humidité	59
IV.1.7. Remèdes contre les infiltrations des eaux	59
IV.1.8. Entretien.....	59
IV.1.9. Micro -pieux	60
IV.1.10. Injections de sol	61
V. Conclusion	62

Chapitre IV : Evaluations des structures métalliques existantes

I. Introduction	63
Partie 01 : Evaluation d'une passerelle.....	63
II.1. Les désordres constatés lors de l'inspection visuelle de la passerelle.....	63
II.2. Fiche d'évaluation de la passerelle.....	66
II.3. Interprétation des résultats.....	69

Partie 02 : Evaluation d'un hall métallique -----	69
III.2. Fiche d'évaluation du hall métallique-----	77
III.3. Interprétation des résultats-----	80
IV. Conclusion -----	80
Conclusion Générale -----	81
Référence Bibliographique-----	82

Remerciement

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté aide et assistance et qui ont contribué à l'élaboration de ce projet de fin d'étude.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur **AKKOUCHE Karim**, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce projet de fin d'étude.*

Mes remerciements vont également au membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail.

*Je voudrais exprimer mes remerciements à tous mes enseignants et le staff administratif du département génie civil en particulier monsieur **BOUDJEMIA** et monsieur **SI SALEM** pour les orientations et les conseils qu'ils ont su me prodiguer durant mon parcours de la première à la cinquième année universitaire .*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes enseignants qui m'ont tant donné avec beaucoup de compétence tout au long du cursus universitaire, un grand merci pour leurs aides et orientations qui ont enrichi mes connaissances.

Enfin je tiens à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père **MOKRANE**.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère **NACIRA**.*

*A ma chère grand-mère **HALIMA**, ce modeste travail et le fruit de tes prières et ton amour, t'es ma source de tendresse que dieu te garde.*

*A mes chères sœurs **MASSILIA** et **MELISSA** qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu vous protège et vous offre la chance et le bonheur.*

*A mon adorable frère **MOH** qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

A la mémoire de mes grands-parents et mes oncles j'aurai aimé que vous soyez présent ce jour-là, mais vous êtes parti très tôt. Que dieu vous accueille dans son vaste paradis.

A mes oncles et mes tantes. Que Dieu vous donne une longue et joyeuse vie.

A tous les cousins et les cousines les voisins, les camarades et les amis (Celina, Ghilas, Tahar, Said, Nina, Jacob, Malha, Nabil, ...) que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour votre amour et votre encouragements.

Résumé :

Les constructions métalliques, bien que robustes et durables, peuvent présenter certaines insuffisances dues à divers facteurs, tels que les agressions environnementales, les défauts de conception, les erreurs d'exécution, ...etc. Les désordres engendrés deviennent de plus en plus dangereux, ce qui nous incite à réfléchir sur l'état actuel de ces ouvrages. A cet effet, dans ce projet de fin d'étude, une intention particulière est accordée à l'évaluation des pathologies des constructions métalliques. Une telle étude est indispensable pour prévenir les dégâts et maintenir l'état de la construction. Elle se doit de reposer sur un diagnostic précis des ouvrages. Pour mener à bien ce travail, dans un premier temps, les pathologies relatives structures métalliques sont rassemblés d'une manière synthétique et exhaustive. Il évoque également le diagnostic, les causes, la prévention et la réparation, sous forme de généralités. Dans un second temps, en se référant aux travaux existants, une fiche d'évaluation du niveau de dégradation des structures métalliques est proposée. Et enfin, cette méthode de diagnostic basée sur une inspection visuelle est mise en application sur quelques ouvrages implantés dans la commune de Tizi Ouzou,

Mots clés : Constructions métalliques ; Pathologie ; Désordres ; Fiche d'évaluation ; Réhabilitation ; Renforcement.

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1. Acier et teneur en carbone ----- 13

Tableau I.2. Nuances d'aciers normalisés----- 14

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1. Structure métallique -----	3
Figure I.2. Section d'éléments en I et en H -----	4
Figure I.3. Bâtiment de loisirs -----	4
Figure I.4. L'usine Renault, Swindon, R.-U, 1980 -----	4
Figure I.5. Entrepôt -----	5
Figure I.6. Silo -----	5
Figure I.7. Viaduc de Salta, Argentine -----	5
Figure I.8. Écluse de Grave, Pays-Bas -----	5
Figure I.9. Pylône de ligne électrique -----	6
Figure I.10. Grue de levage sur chantier -----	6
Figure I.11 - 1801 - L.A. de Cessart & J. Dillon - la passerelle du Ponts des arts – Paris -----	7
Figure I.12 - 1884 - G. Eiffel & M. Kœchlin- le viaduc de Garabit – Garabit -----	7
Figure I.13 - 1900 - Deglane, Louvet Thomas & Girault - Le Grand Palais – Paris -----	7
Figure I.14 - 1900 - Résal & Alby – Le Pont Alexandre III – Paris -----	7
Figure I.15 - 1889 - G. Eiffel & M. Kœchlin- la Tour Eiffel – Paris -----	7
Figure I.16 - 1965 - de Mailly, Depusse Prouvé - La tour Nobel (Défense) – Paris -----	7
Figure I.17 - 2003 - Foster & Partners - Ste Marie Axe – Londres -----	8
Figure I.18 - 2001 - Brownlie – Gateshead Millennium Bridge – Londres -----	8
Figure I.19 - 1985 – Nicolas Janberg-plateforme Draupner-Mer du Nord Norvège -----	8
Figure I.20 - 1931 - Shreve, Lamb and Harmon- Empire State Building-New York -----	8
Figure I.21 - 2002 - Dar Al-Handasah- l'horloge De Mekka El Moukarrama- Arabie Saoudite -----	8
Figure I.22 - 1937 - Joseph BS- Pont Golden Gate-USA -----	8
Figure I.23. Four Martin -----	10
Figure I.24. Coupe d'un haut fourneau -----	10
Figure I.25. Phase de fabrication des profilés métallique -----	11
Figure I.26. Procédé du laminage -----	11
Figure I.27. Diagramme contrainte-déformation des aciers S235 et S355 -----	12
Figure I.28. Comportement réel -----	13
Chapitre II :	
Figure II.1. Illustration du phénomène de résonance -----	20
Figure II.2. Arrachement lamellaire -----	21
Figure II.3. Le toit s'est effondré sous le poids de la neige -----	23

Figure II.4. Résilience de l'acier -----	24
Figure II.5.A. Pont métallique de Milia-Jijel -----	25
Figure II.5.B. Corrosion des profils des poutres de l'usine de liège d'Ouled Salah- Jijel. ----	25
Figure II.6. Structure métallique effondrée après séisme de Boumerdes -----	25
Figure II.7. Des barres diagonales à larges ailes ont flambé par rapport à leur axe faible et se sont rompues (Kobe, Japon, 1995)-----	26
Figure II.8. Incendie dans un tunnel -----	26
Figure II.9. Explosif d'un immeuble-----	26
Figure II.10. Un pont aux États-Unis s'effondre après avoir été heurté par un bateau -----	27
Figure II.11. En Ile-et-Vilaine, un camion arrache un pont, la structure totalement détruite -- -----	27
Figure II.12. Retrait et gonflement des argiles -----	28
Figure II.13. Glissement de terrain-----	28
Figure II.14 Schéma d'évolution d'un fontis -----	29
Figure II.15. Tassement uniforme -----	29
Figure II.16. Effet du tassement de terrain sur la stabilité des constructions -----	30
Figure II.17. Effondrement minier survenu sur la mine d'Elura située à 600 km à l'ouest-nord-ouest de Sydney, en Australie, découverte dans les années 1970 -----	31
Figure II.18.A. Éboulement de terre à Bukavu -----	31
Figure II.18.B. Chutes de blocs-----	31
Figure II.19. La liquéfaction du sol entraîne le renversement des bâtiments -----	32
Figure II.20. Des fissures inclinées dus au gel des fondations -----	32
Figure II.21. Coupe schématique d'un pieux mal réalisé -----	33
Figure II.22. Endommagement du poteau causé par le déplacement du coffrage -----	33
Figure II.23. Phénomène de ségrégation -----	34
Figure II.24. Apparition des fissures causée par le décoffrage prématuré-----	35
Figure II.25. Fissures dues au retrait-----	35
Figure II.26. Excavation en limite d'un bâtiment-----	36
Figure I.27. Constructions voisines risque de déstabiliser le bâtiment -----	37

Chapitre III :

Figure III.1. Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en charpente métallique -----	39
Figure III.2. Liste des principaux paramètres décrivant les conditions de service des structures -----	40

Figure III.3. Schéma du contrôle visuel -----	43
Figure III.4. Le principe de l'essai -----	44
Figure III.5. Le principe de l'essai -----	45
Figure III.6. Le principe de l'essai d'ultrason -----	46
Figure III.7. Examen par radiographie-----	47
Figure III.8. Schématisation de la détection d'une fissure par courants de Foucault -----	47
Figure III.9. Remplacement d'un montant d'une poutre treillis -----	53
Figure III.10. Ajout de matière sous la membrure inférieure entre lignes de rivets (Pont de Douarnenez) -----	55
Figure III.11. Rivet défectueux -----	57
Figure III.12. Application d'une peinture anti corrosion -----	57
Figure III.13. Gainage-----	58
Figure III.14. Etapes de réalisation des micropieux -----	60
Figure III.15. Injection du sol-----	61

Chapitre IV : Evaluations des structures métalliques existantes

Figure IV.1. La passerelle reliant la station de bus à la nouvelle ville de T.O. -----	63
Figure IV.2. Présence des fissurations-----	64
Figure IV.3.a. Coté menant à la ville -----	64
Figure IV.3.b. le côté menant à la gare -----	64
Figure IV.4. Présence de corrosion -----	65
Figure IV.5. Présence des pièges a eaux et des pièges a poussières-----	66
Figure IV.6. Présence importante de corrosion -----	66
Figure IV.7. Le hall métallique du campus universitaire OUED AISSI-----	69
Figure IV.8.a. Évacuation des eaux sur le pied de poteau -----	70
Figure IV.8.b. Présence des pièges à poussières -----	70
Figure IV.8.c. Perte de matière -----	70
Figure IV.8.d. Exposition des poteau directement à l'environnement (contacte direct avec le sol) -----	70
Figure IV.9. Détérioration au niveau du carrelage et décollement des peintures -----	71
Figure IV.10. Présence légère de corrosion-----	71
Figure IV.11. Présence des pièges a poussières -----	72
Figure IV.12. Présence de corrosion avancée -----	72
Figure IV.13. Présences de fissures et de moisissures dans les murs extérieurs -----	73
Figure IV.14. Fissuration et dégradation des murs intérieurs -----	73

Figure IV.15. Dessérage des boulons -----	74
Figure IV.16. Certains boulons ont des rondelles et certains non -----	74
Figure IV.17. Cisaillement des boulons -----	75
Figure IV.18. Présence de corrosion -----	75
Figure IV.19. Infiltration des eaux -----	76
Figure IV.20. Sans protection-----	76
Figure IV.21. Assemblage mal fait (soudure, boulons) -----	77

Introduction Générale

Les structures métalliques jouent un rôle déterminant dans le génie civil moderne, offrant des solutions résilientes et pérennes pour divers usages allant des gratte-ciels aux ponts, en passant par les infrastructures industrielles et les sites énergétiques. Leurs popularités sont attribuables à leurs innombrables qualités telles que la résistance élevée, la flexibilité de conception et la rapidité de construction. Cependant, à l'instar de toute technologie, les charpentes métalliques sont sujets à diverses pathologies susceptibles de compromettre leurs intégrités et leurs sûretés.

Ce projet de fin d'études se concentre sur les anomalies des structures métalliques. Il propose une analyse approfondie des origines des détériorations, des méthodes de diagnostic et des techniques de réparation et de renforcement.

Pour enrichir cette étude théorique, il est essentiel d'examiner des cas concrets au travers d'inspections sur site et d'études de cas documentées. L'observation directe des défauts permet une meilleure compréhension des mécanismes en jeu et offre l'opportunité de tester les procédures sur le terrain. Donc nous avons réalisé des visites de deux structures en charpente métallique :

- Structure 01 : La passerelle qui relie la nouvelle station de bus à la nouvelle ville de la willaya de Tizi-Ouzou.
- Structure 02 : Hall Métallique qui se trouve au campus universitaire Oued-Aissi.

La structure de notre mémoire de fin d'étude est devisée en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre de cette recherche se concentre sur les généralités des constructions métalliques. Il explore les propriétés des matériaux métalliques, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les différents types de structures métalliques couramment utilisées. Ce chapitre établit une base de connaissances essentielle pour comprendre les performances et les défis associés aux constructions métalliques.

Le deuxième chapitre est dédié aux pathologies spécifiques des constructions métalliques. Il examine les diverses formes de dégradation. Chaque pathologie est analysée en termes de causes, et de conséquences. La compréhension de ces pathologies est cruciale pour développer des stratégies efficaces de maintenance et de réparation.

Le troisième chapitre traite des procédés de diagnostic et des techniques de réparation et de renforcement des constructions métalliques. Les méthodes d'inspection sont détaillées pour

identifier les dégradations des structures et la création d'un outil standardisé pour évaluer l'état des structures, documenter les observations, et planifier les interventions nécessaires. Les différentes techniques de réparation et de renforcement sont également présentées pour offrir des solutions pratiques aux pathologies identifiées.

Le *quatrième chapitre* se concentre sur l'évaluation des structures existantes, en particulier à travers des études de cas pratiques, telles que la visite d'un hall métallique et d'une passerelle. Il décrit les processus d'inspection sur site, l'utilisation de fiches d'évaluation standardisées pour documenter l'état des structures, analyse des données recueillies pour classer les structures en fonction de leur vulnérabilité. Ce chapitre met en évidence l'importance d'une évaluation continue pour garantir la sécurité et la durabilité des constructions métalliques.

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale, et qui permet d'envisager des perspectives aux travaux présentés ici.

Chapitre I : Généralités sur la construction métallique

I. Introduction

Scindé en deux parties, ce chapitre s'articule sur les généralités de la construction métallique. Dans la première partie, une brève description des différentes structures métalliques ainsi que leurs usages spécifiques est donnée. Un récapitulatif des avantages et inconvénients ainsi que les différentes caractéristiques mécaniques des composants de ce type de construction est donné dans la deuxième partie.

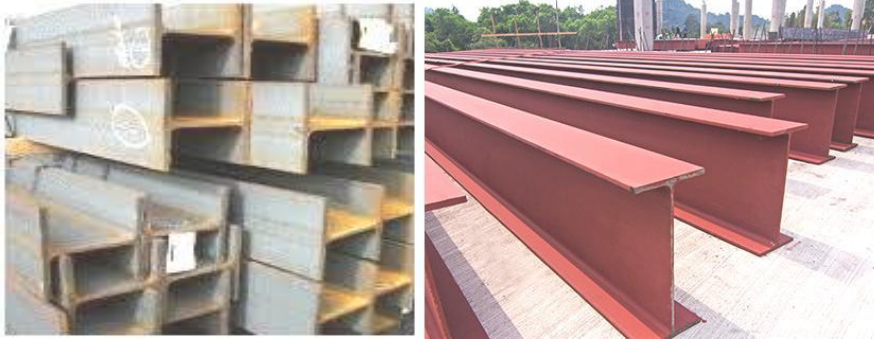
Partie 1 : Les structures métalliques et leurs usages.

Une structure en charpente métallique (voir fig. 1) est un assemblage d'éléments métalliques sous forme de profilés commerciaux ou de profilés reconstitués soudés (PRS). Ces derniers servent à la construction de l'ossature suivant une forme et une utilisation bien déterminée.



Figure I.1.Structure métallique [1]

Souvent, pour des raisons techniques, les profilés en H (HEA, HEB, ...etc.) sont recommandés pour qu'ils soient utilisés comme éléments poteaux (voir fig. 2. a), et les profilés en I (voir fig. 2.b) pour les éléments poutres (Poutre principale, poutre secondaire, solive, traverse, panne....etc).



2a- Section en H

2b- Section en I

Figure I.2. Section d'éléments en I et en H [2]

II. Usages des constructions métalliques

II.1. Usage industrielle

Les constructions industrielles avec des volumes de grandes dimensions sont très courants. Leurs fonctionnalités ainsi que leur qualité architecturale sont influencées par de nombreux facteurs, par exemple le plan d'implantation, la polyvalence et la qualité souhaitée pour la construction [3].

Il s'agit de grandes surfaces couvertes plus ou moins fermées latéralement. La construction peut être partiellement ou entièrement métallique, exemple : les parois latérales sont constituées par des « pans de fer » (système de traverses horizontales ou lisses et de poteaux intermédiaires) supportant des bardages en tôles [4].

Parmi ces constructions industrielles, on peut citer [5] :

- Des bâtiments industriels (usines de transformations de produits agricoles ou agroalimentaires, bâtiments d'élevage (voir fig.3), usines de fabrication « mécanique tel que l'automobiles (voir fig.4), produits pharmaceutiques...etc. ».



Figure I.3. Bâtiment de loisirs [3]



Figure I.4. L'usine Renault, Swindon, R.-U,1980 [3]

II.2. Usage d'habitation

Dans ce domaine, la construction métallique intervient sous forme d'ossature métalliques ou en partie métallique (exemple : combles et couverture) [4]. On cite :

- Habitat individuel : souvent des villas ou de petit immeuble.
- Habitat collectif : des bâtiments.

II.3. Usage de stockage

Généralement, les structures à usage de stockage sont en construction métallique, que ce soit pour des hangars agricoles, des entrepôts (voir fig.5), des locaux de stockage (les réservoirs et les silos) (voir fig.6), ou des abris de jardin.



Figure I.5.entrepôt [6]



Figure I.6. Silo [6]

Ces structures permettent de couvrir de grandes surfaces de manière simple, robuste, et durable, répondant ainsi aux exigences de stockage diverses [6].

II.4. Ouvrage d'art

Ouvrage d'art est une construction artificielle de génie civil de grande importance liée à l'établissement et à l'exploitation d'une ligne de communication ou de transport terrestre, fluviale ou maritime (pont, viaduc, passerelle) (voir fig.7 et 8).



Figure I.7.Viaduc de Salta, Argentine [7]



Figure.1.8. Écluse de Grave, Pays-Bas [7]

Un dispositif de transition entre plusieurs modes de transport par le franchissement d'un obstacle naturel ou artificiel. L'obstacle peut être une chaîne de montagne, un cours d'eau, une région industrielle ou encore une ville comprenant de nombreux bâtiments (circulation, etc.) [7].

II.5. Autres

La construction métallique est souvent une solution économique pour réaliser des structures telles que [4] :

- Pylône, mât (porteur de câble, d'antenne, d'éolienne...). Selon la liaison au sol, on distingue les dispositifs encastrés tel que les pylônes électriques (voir fig.9) ou à haubans (antennes) ;
- Château d'eau ;
- Installations agricoles (rampe d'arrosage ; ...) ;
- Engins de levage « Pylône, derrick, grue, portique... » (voir fig. 10) ;
- Installations industrielles.



Figure I.9. Pylône de ligne électrique [2]

Figure I.10. Grue de levage sur chantier [2]

III. Exemples de chef d'œuvre en constructions métalliques



Figure I.11 -1801 - L.A. de Cessart & J. Dillon - la passerelle du Ponts des arts – Paris [8]



Figure I.12 - 1884 - G. Eifel & M. Kœchlin- le viaduc de Garabit – Garabit paris [8]



Figure I.13 - 1900 - Deglane, Louvet Thomas & Girault - Le Grand Palais – Paris [8]



Figure I.14 - 1900 - Résal & Alby – Le Pont Alexandre III – Paris [8]



Figure I.15 - 1889 - G. Eifel & M. Kœchlin- la Tour Eiffel – Paris [8]



Figure I.16 - 1965 - de Mailly, Depusse Prouvé - La tour Nobel (Délia) – Paris [8]



Figure I.17 - 2003 - Foster & Partners - Ste Marie Axe –Londres [8]



Figure I.18 -2001 -Brownlie – Gateshead Millennium Bridge – Londres [8]



Figure I.19-1985 –Nicolas Janberg-plateforme Draupner-Mer du Nord Norvège [8]



Figure I.20-1931- Shreve, Lamb and Harmon- Empire State Building-New York [9]



Figure I.21-2002- Dar Al-Handasah- l’horloge De Mekka El Moukarrama- Arabie Saoudite [9]



Figure I.22- 1937- Joseph BS - Pont Golden Gâte-USA [9]

Partie 2 : Les caractéristiques des structures métalliques

IV. Avantages et inconvénients de la construction métallique

IV.1. Avantages

- Fiabilité : L'acier étant un matériau très homogène, ce qui permet de garantir la composition chimique et les qualités mécaniques ; les contraintes réelles et celles calculés sont voisines [10] ;
- Ductilité : Une ossature métallique peut subir des surcharges de fortes intensité sans aller jusqu'à la ruine (ex : séisme, vent ...) ; ceci est dû à la formation de rotule plastique [10] ;
- Légèreté : La qualité de résistance et de ténacité de l'acier par rapport à son poids rend la structure plus légère même si elle est volumineuse [2] ;
- Rapidité d'exécution : On peut pré fabriquer l'ensemble du bâtiment (Construction) en atelier avec une grande précision et une grande rapidité, le montage sur site, par boulonnage est d'une grande simplicité [11]
- La récupération et la réutilisation des éléments de la structure après démontage [2].
- Transformation : On peut modifier un bâtiment par simple démontage de certains éléments, comme on peut renforcer certains éléments sur place [10] ;

IV.2. Inconvénients

- Prix élevé (concurrentiel avec le béton armé pour les grandes portées) [11] ;
- Faible résistance au feu : L'acier perd 50 % de la valeur de sa résistance limite lorsque (T° avoisine 500°C) [10] ;
- Susceptibilité aux phénomènes d'instabilité :

Notamment (Flambement, Déversement et Voilement) en raison de la minceur des profils [10] ;

- La corrosion : Nécessite un entretien permanent (peinture antirouille) [10]
- Imperfections de laminage [10]

Les calculs de résistance sont établis sur la base de sections théoriques parfaites de poutrelles, qui sont différentes des sections réelles obtenues après laminage.

- Faible isolation [2].

V. L'acier

V.1. Elaboration de l'acier

L'acier est le principal matériau utilisé pour les constructions métalliques. C'est un produit métallurgique obtenu à partir du minerai de fer. Il est fabriqué en transformant le minerai de fer en fonte en le chauffant avec du coke dans un haut fourneau (fig I .23 et I .24). A la suite de cette opération le métal obtenu est [1] :

- Du fer si tout le carbone a disparu ;
- De l'acier doux s'il contient au moins 0.1% de carbone ;
- De l'acier dur s'il contient entre 0.5 et 1.0% de carbone.

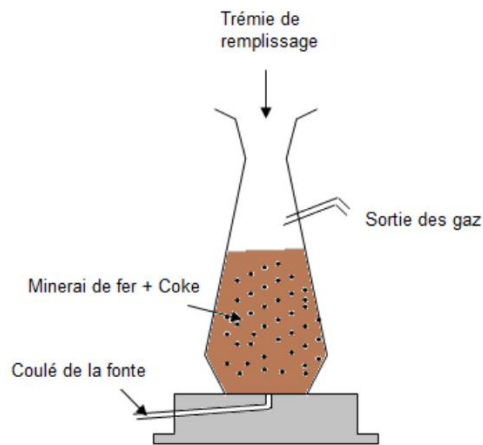


Figure I.23. Four Martin [1]

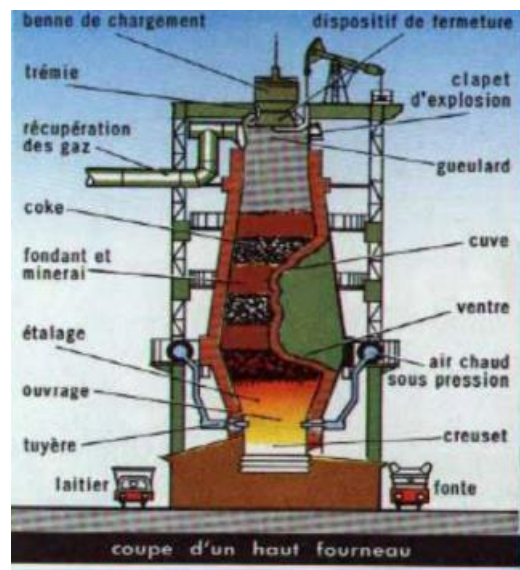


Figure I.24. Coupe d'un haut fourneau

C'est la teneur en carbone, essentielle pour les caractéristiques mécaniques qui détermine les domaines d'application de l'acier [1].

De nombreux aciers spéciaux sont fabriqués en incorporant aux aciers naturels divers éléments tels que :

Le nickel, le chrome, le tungstène, le silicium etc.

Les aciers inoxydables sont ainsi des alliages composés de fer (73%), de chrome (18%), de nickel (8%) et de carbone (1%) [1].

V.2. Fabrication des tôles et des profilés

La fabrication des tôles et des profilés est un processus essentiel dans l'industrie métallurgique. Les tôles sont obtenues à partir de différentes techniques de laminage, telles que le laminage à chaud en continu, le laminage à chaud sur un train réversible, ou le laminage à

froid. D'autre part, les profilés sont obtenus par un processus de profilage à froid qui permet de façonner des produits de section constante, tels que les profilés larges, les tubes, et les profilés étroits. Le profilage à froid est un pliage en continu où la tôle est progressivement pliée par des galets pour obtenir la forme désirée.

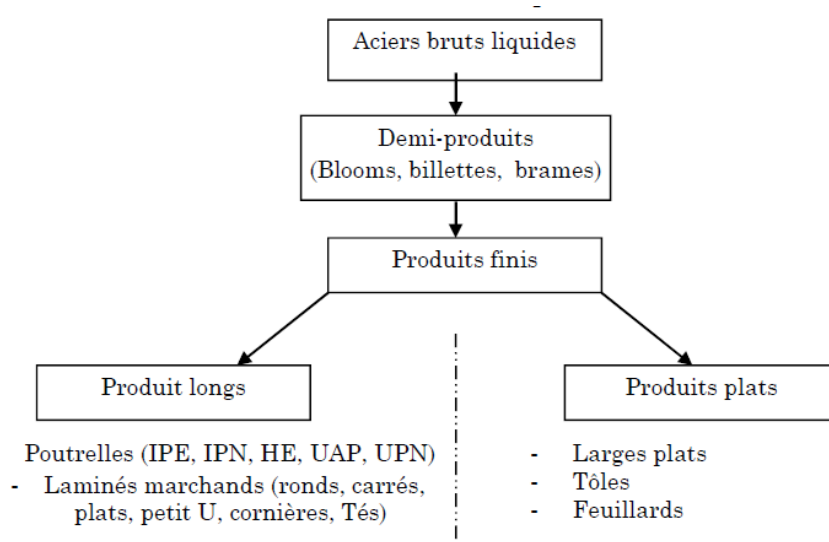


Figure.I.25. Phase de fabrication des profilés métallique [10]

Les produits en acier peuvent être classés en deux grandes catégories [12] :

- Les produits longs qui sont obtenus par laminage à chaud, étirage ou tréfilage (poutrelles, palplanches, câbles, fils, ronds à béton...).
- les produits plats qui subissent en général un laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de forte épaisseur (tôles, bardages, profils minces, profils creux...).

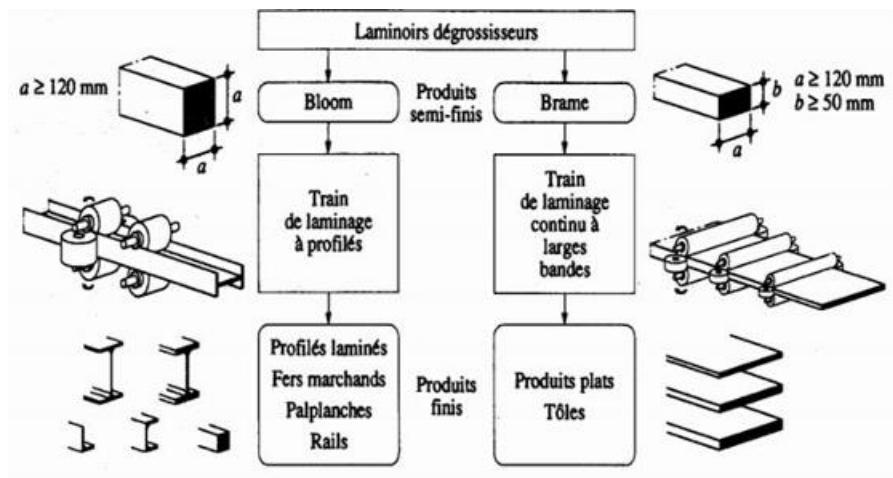


Figure I.26. Procédé du laminage [12]

Le laminage (fig I.26) est un procédé employé dans l'industrie sidérurgique pour faire des tôles et des profilés. Le principe consiste à faire passer entre deux cylindres un ligot qui épousera la forme de l'espace disponible en s'allongeant et en s'aplatissant. Pour obtenir des profilés, barres ou rails, on utilise des cylindres cannelés [1].

V.3. Comportement de l'aciers

L'étude du comportement de l'acier est essentielle dans de nombreux domaines, notamment dans l'ingénierie civile. Les essais en laboratoire jouent un rôle crucial dans la compréhension des propriétés mécaniques, thermiques et chimiques de l'acier. Ces essais permettent de caractériser la résistance, la ductilité, la ténacité, la fatigue et d'autres propriétés qui sont vitales pour concevoir et évaluer des structures métalliques en toute sécurité et efficacité.

V.3.1. Comportement réel

L'essai de traction est l'un des plus fondamentaux. Il consiste à appliquer une force de traction progressive à un échantillon d'acier jusqu'à ce qu'il se rompe. Cela permet de déterminer la résistance à la traction, le module d'élasticité et la limite d'élasticité de l'acier.

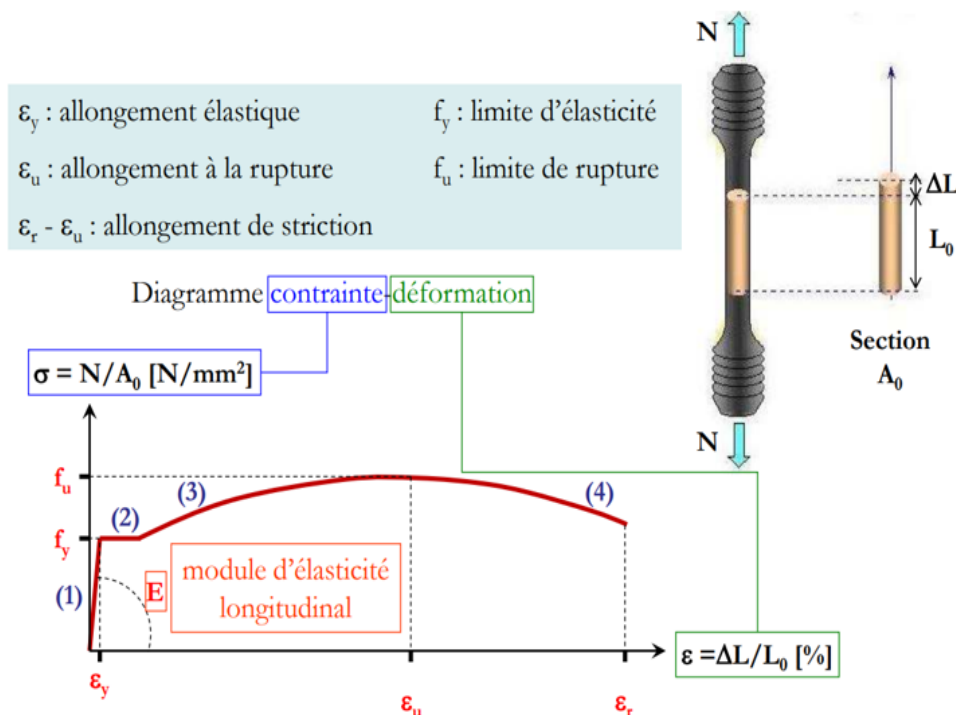


Figure I.27. Diagramme contrainte-déformation des aciers S235 et S355 [12]

Ce diagramme contrainte-déformation se décompose en 4 phases [12] :

- Phase 1 – Domaine élastique : obéissant à la loi de Hooke $\sigma = E \cdot \epsilon$

- Phase 2 – Palier d’écoulement plastique : traduisant un allongement sous charge constante.
- Phase 3 – Domaine d’écrouissage : correspondant à une nouvelle augmentation de la sollicitation avec l’allongement.
- Phase 4 – domaine de striction : correspondant à une réduction localisée de la section de l’éprouvette.

En construction métallique, les pièces et les éléments des ossatures sont conçus et calculés pour rester la plupart du temps dans le domaine élastique [12].

Le palier d’écoulement plastique représente une réserve de sécurité. Il traduit la ductilité de l’acier (elle permet une bonne tenue aux séismes) [12].

L’acier a un comportement élastoplastique [12].

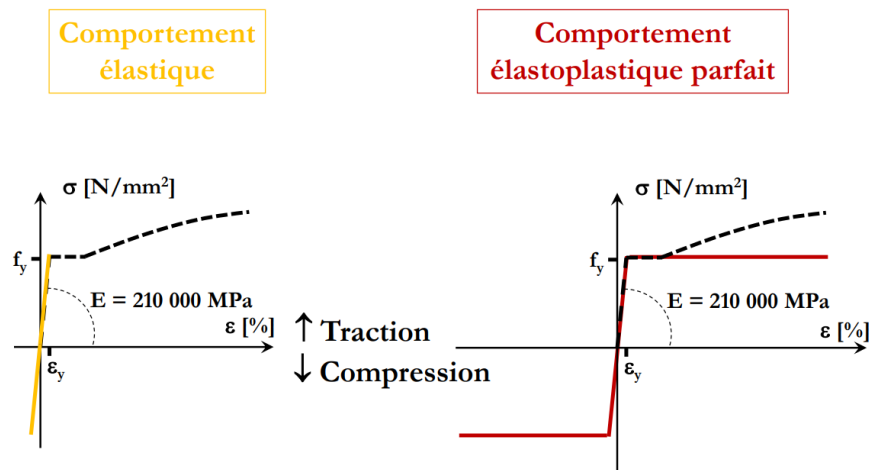


Figure I.28. Comportement réel [12]

V.4. Classification des aciers

Classification des aciers selon leur teneur en carbone (voir Tableau I.1)

Tableau I.1. Acier et teneur en carbone [10]

	Matériau	Teneur en carbone	Utilisation
Fonte	Fonte	$C > 1.7\%$	Culasse moteurs
Acier	-Aciers doux	$0.05 < C < 0.3 \%$	-Charpente, boulons
	- Aciers mi durs	$0.3 < C < 0.6 \%$	-Construction mécanique
	-Aciers durs	$0.6 < C < 0.75 \%$	-Rails, ressorts

	-Aciers extra durs	0.75 < C < 1.2 %	-Outillage industrielle
	-Aciers sauvages	1.2 < C < 1.7 %	-Aciers non utilisés

* Suivant la teneur en carbone les métaux ferreux se subdivisent en fonte et en acier

Le carbone influe directement et de manière proportionnelle sur les valeurs des limites d'élasticité et de dureté. Tandis que la plasticité lui est inversement proportionnelle.

* Il influe également sur la soudabilité du matériau ; plus celle-ci est élevée moins le matériau est soudable [10].

➤ Classification selon la teneur en éléments d'alliage [10] :

Selon les quantités additionnées d'éléments d'alliage on distingue :

- Les aciers à faible alliage contenant jusqu'à 2 % d'éléments d'alliage
- Les aciers moyennement alliés : - 10 % d'éléments d'alliage.
- Les aciers fortement alliés : + 10 % d'éléments d'alliage.

V.5. Nuances d'acier couramment utilisées

On a 03 Nuances [10] :

- Aciers S235
- Aciers S275
- Aciers S355

Ces trois nuances d'acier (voir Tableau I.2) sont utilisées car elles répondent aux exigences de calcul de Plasticité qui sont :

- $f_u \geq 1.2f_y$
- $\epsilon_u \geq 0.15$ (15%)
- $\epsilon_u \geq 20 \epsilon_y$

Tableau I.2. Nuances d'aciers normalisés [10]

Caractéristique mécanique des aciers en fonction de leur épaisseur	Nuances d'aciers		
	S235	S275	S355
* Limite élastique f (MPa)			355
t ≤ 16 mm	235	275	345
16 < t ≤ 40 mm	225	265	335
40 < t ≤ 63 mm	215	255	

* Contrainte de rupture f_u (MPa)			
$t \leq 3 \text{ mm}$	360 /510	430/580	510/680
$3 < t \leq 100 \text{ mm}$	340/470	410/560	490/630
* Allongement minimal moyen ϵ_u			
$t \leq 3\text{mm}$	18 %	15 %	15 %
$3 < t \leq 150 \text{ mm}$	23 %	19 %	19 %

VI. Conclusion

Enfin, nous posons la question suivante pour guider notre réflexion : quels sont les principaux défis auxquels font face les structures métalliques en termes de durabilité et de sécurité ? C'est à cette question que nous tenterons de répondre dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Généralités sur les pathologies en charpente métallique

I. Introduction

Ce chapitre est constitué de trois parties. Dans la première partie, les différentes notions liées au domaine étudié sont exposées et expliquées. En s'appuyant sur les travaux existants (Documents techniques, Règlements, Articles scientifiques, Livres et Rapports d'expertises), une rétrospective des différentes pathologies pouvant apparaître sur les structures métalliques « superstructure et infrastructure » est donnée dans les parties deux et trois.

Partie 01 : Définition de quelques notions

II.1. Pathologie [13] :

- Du dictionnaire : Le mot pathologie vient du grec "pathos" : ce qu'on éprouve, souffrance et "logos" : discours, traité.
- En médecine, la pathologie est la science qui a pour objet l'étude des maladies. Un abus de langage relativement récent et populaire consiste à faire du mot « pathologie » un synonyme du mot « maladie ».
- En génie civil : ce terme est depuis peu utilisé en génie civil. L'étude des désordres et surtout l'étude statistique, systématique et ordonnée des désordres et des sinistres sont en effet, relativement récentes.
 - **Un désordre** : est un défaut constaté sur un élément d'ouvrage d'une construction. Il peut s'agir d'un défaut esthétique, d'une anomalie de fonctionnement d'un équipement ou de défauts affectant les structures. On peut dire aussi : Altération, perturbation, trouble, dérèglement, vice.... [13]
 - **Vice** : La définition de ce mot est plus proche de : défaut, imperfection grave, défectuosité. Le terme '**vice de construction**' est très usité. Mais, il s'applique surtout aux ouvrages neufs, plus qu'aux ouvrages dégradés par l'usage ou les agents extérieurs [13].
 - **Sinistre** : Désordre important affectant tout ou partie de la construction à la suite d'un accident ou d'une catastrophe naturelle, donnant lieu, quand il est reconnu, à une indemnité et à une déclaration à la compagnie d'assurance concernée [13].
 - **Ruine** : Dans le droit des obligations et de la responsabilité civile, la ruine se dit, en matière d'urbanisme et d'habitation, de tout ou partie d'un immeuble qui risque de s'effondrer et, ce faisant, de causer des dommages à la propriété d'autrui. Cette grave dégradation d'un édifice, d'un mur, d'un immeuble peut conduire à l'écroulement total ou partiel de la construction. Dans le dictionnaire professionnel du BTP c'est : la mise

hors service d'un ouvrage par déformation excessive d'une structure sous une sollicitation mécanique. Elle se matérialise par la rupture d'un matériau ou la perte de l'équilibre statique de l'ouvrage. Elle rend ce dernier inapte à son exploitation [13].

- **Remède** : L'origine de ce mot est médicale. Remèdes, désigne tout ce qui est employé au traitement d'une maladie. Un terme analogue est proposé est celui de « solution » [13].

II.2. La prévention des désordres : La prévention c'est tout ce que l'on peut faire avant qu'un problème n'arrive, pour l'empêcher justement d'arriver. Il s'agit donc d'alerter, d'attirer l'attention, de signaler, d'informer, de sensibiliser, de prévenir. La prévention c'est le contraire de l'improvisation, il s'agit en fait de réfléchir avant d'agir. De repérer les sources d'ennuis, non pour renoncer à l'action mais pour la maîtriser et la réussir ainsi du premier coup [13].

II.3. Diagnostic : Le diagnostic se fonde sur l'étude des symptômes, anomalies de structure ou de fonctionnement, et sur la connaissance des pathologies, pour porter un jugement sur l'état et le fonctionnement de l'ouvrage. Il comporte deux parties [13] :

- **Le diagnostic positif** qui réunit tous les éléments correspondants en vue de ranger une pathologie dans un cadre défini ;
- **Le diagnostic différentiel** qui étudie tous les éléments discordants permettant de séparer une pathologie des autres affections avec lesquelles elle pourrait être confondue.

- Le diagnostic s'opère en général en deux étapes [13] :

- **Le pré -diagnostic** prend place au début de l'opération, au moment des études de faisabilité'. Il doit permettre de dépister les problèmes majeurs que peuvent poser les structures. L'expérience et la compétence de l'intervenant sont déterminantes pour son efficacité', d'autant plus qu'il soit spécialiste ;
- **Le diagnostic approfondi** s'effectue une fois l'opération engagée. Il consiste à rassembler toutes les données techniques nécessaires pour l'établissement du projet ; il peut nécessiter un dégarnissage total, ou partiel, d'éléments de structure afin d'effectuer des sondages spécifiques et pertinents.

Partie 02 : Différentes pathologies de la partie superstructure cas de la construction métallique

III.1. Défaut de conception et de construction

III.1.1. Les erreurs liées à la conception et aux calculs

- Absence ou insuffisance du cahier des charges : Tout projet devrait être défini par un cahier des charges techniques spécifiant toutes les exigences de chargement, de déformation et d'exécution [14].
- Erreurs sur le chargement de la structure (changement d'usage de la structure) [14]
- Les logiciels de calcul : Leur utilisation est souvent délicate. Ils génèrent malheureusement des excès de confiance. Mieux connaître les théories de base tels : la méthode des éléments finis, la résistance des matériaux, la dynamique des structures...etc. [14]
- Non-respect des hypothèses de calcul ou de modélisation : La concordance entre hypothèses de calcul et la réalité doit être la plus fidèle possible [14].

III.1.2. Les erreurs liées à la réalisation

- Erreur d'identification des pièces à monter [14]
- Manque de coordination entre les intervenants [14]

Exemple : Les erreurs d'implantation fréquemment rencontrées au niveau des chantiers de construction où les tolérances admises par l'entreprise réalisant l'ossature métallique et celle réalisant l'infrastructure, ne sont pas compatibles. Ceci a souvent pour conséquence des difficultés au niveau du montage ainsi que des retards considérables. Sur ce point, il faut associer l'entreprise de CM lors de l'opération de l'implantation.

- Erreur sur le choix des classes géométriques et mécaniques de boulons [14]
- Erreur au niveau du soudage, par exemple le refroidissement rapide qui modifie la texture, donc les caractéristiques de l'acier [14]
- Une manutention sans se soucier de la résistance des éléments [14].
- Méconnaissance des règles de bonnes exécution : Exemple : Exécuter des opérations de soudage dans certaines conditions météorologiques d'intempéries [14].
- Absence ou manque de contrôle sur chantier [14] :
 - Contrôle dimensionnel : réglage, vérification des alignements, conformité aux plans (pas d'éléments manquants), etc....
 - Vérification de la classe des boulons, du serrage des boulons précontraints, des soudures éventuellement, etc....
- Absence de réseaux anti incendie [14]

III.2. Erreurs liées à l'exploitation et à la maîtrise d'ouvrage

- Utilisation abusive, non conforme au cahier des charges et au plan d'utilisation des locaux [14]
- Absence de budget d'entretien et manque d'entretien favorisant la corrosion, notamment pour les constructions métalliques préfabriquées à usage d'habitation [14] ;
- Absence de consignes de sécurité relatives à l'exploitation de l'ouvrage [14]
- Obstruction des chéneaux ou des descentes d'eau de pluie : Risque de chargement cumulatif dangereux [14].
- Les Vibrations : Elles peuvent engendrer des desserrages au niveau des boulons

(Ce qui est dangereux), et peuvent également provoquer la fatigue [14].

- Modifications architecturales

Ce genre d'erreur est souvent dû au manque de coordination entre l'architecte et l'ingénieur de structure [14]. Exemple : un projet d'édification de gratte-ciels au sein de Londres. Originellement prévu pour une hauteur maximale de 200 mètres, le plan initial a été revu à la baisse afin de ne pas entrer visuellement en conflit avec la Tour de Londres et la Cathédrale de Saint Paul. Ces modifications du plan initial ont réduit la taille de la tour à 160 mètres, et en ont retiré les balcons initialement prévus sur la façade. Si ce changement semble minime, l'absence d'avancées a impacté la vie de tous les résidents alentour. En effet, la forme concave et lisse de la tour, couplée au verre qui la recouvre, provoque une forte concentration des rayons solaires en certains moments de la journée en contrebas. Ces points de chaleur peuvent atteindre jusqu'à 117°C et ont causé, entre autres, la fonte de la carrosserie d'une Jaguar, des incendies de devantures et le décrochage de plusieurs tuiles de boutiques voisines.

- Les effets de résonances [15]

La résonance représente le phénomène selon lequel un système mécanique est sensible à certaines fréquences. Si la sollicitation est entretenue à une fréquence égale à celle de la structure, des dommages irréversibles seront occasionnés à cette dernière (voir fig II.1).



Figure II.1. Illustration du phénomène de résonnance

III.3. Matériaux de constructions

III.3.1. L'aciers

• Défauts naturels

Pouvant constituer des amorces de fissures, les défauts de l'acier peuvent être à l'origine de ruptures de poutres. Ils sont malheureusement indécélables à l'œil nu, sauf s'ils débouchent en surface [14].

• La rupture Fragile

La rupture fragile se caractérise par une rupture soudaine et catastrophique sans déformation plastique notable. Ce type de rupture est souvent transgranulaire et suit un cheminement cristallographique. Elle peut être préjudiciable dans les cas suivants [16] :

- Températures basses, rendant l'acier facile à se rompre.
- Présence de défauts internes tels que des inclusions ou des fissures.
- Composition chimique et traitement thermique inadéquats, conduisant à une faible ténacité

• Arrachement lamellaire ou feuilletage des platines

Les arrachements lamellaires sont souvent produits sur des tôles d'acier à grains fins d'épaisseur de 15 à 50 mm. L'arrachement lamellaire est un type de défaillance qui se produit souvent dans les aciers lorsqu'ils sont soumis à des contraintes de traction perpendiculaires à la direction de laminage (voir fig II.2). Cela se produit principalement dans les zones affectées par la chaleur, comme les soudures.

Les fissures sont le plus souvent amorcées sur des inclusions. Elles se propagent dans le métal. Elles peuvent demeurer entièrement sous la surface, ce qui les rend impossibles à détecter par inspection visuelle [17].

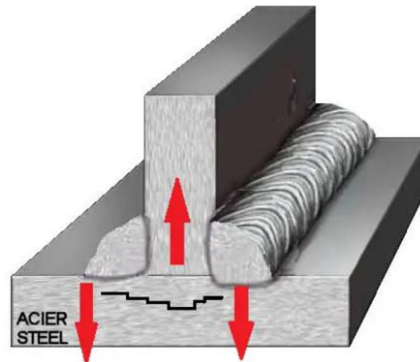


Figure.II.2. Arrachement lamellaire [17]

III.3.2. Défaut d'assemblage

Boulons ordinaires : Les causes les plus fréquentes de désordres dans les assemblages réalisés par boulons ordinaires sont [14] :

- Les pinces trop faibles pouvant entraîner la déchirure des pièces assemblées par pression diamétrale ;
- Les boulons d'assemblage ne doivent être sollicités que par des efforts de traction et de cisaillement. Une sollicitation secondaire de flexion peut provoquer leur rupture. Ces flexions peuvent être dues à des jeux trop importants ou à des défauts de contact entre pièces assemblées ;

Soudures : Les désordres dans les assemblages soudés sont généralement dus à une mauvaise exécution des soudures [14].

Défauts des soudures [14] :

- Manque de pénétration ;
- Inclusions : elles constituent des amorces de fissures ;
- Caniveaux : ils entraînent l'affaiblissement des pièces ;
- Déformations angulaires : elles entraînent des contraintes internes supplémentaires si l'on redresse les pièces sans précaution.
- Mauvaises conditions d'exécution (position incorrecte de l'assemblage, mauvais accostage des pièces, ambiance anormale, intempéries...),

- Causes dues à l'assemblage lui-même. Elles résultent, en général, d'une mauvaise conception de l'assemblage.

III.4. Manque d'entretien

Le manque d'entretien des structures métalliques peut entraîner divers problèmes de dégradation qui compromettent la sécurité, la durabilité et la fonctionnalité des structures. Voici quelques conséquences associées au manque d'entretien des structures métalliques :

-Affaiblissement des éléments structurels, réduction de la capacité portante, risques accrus d'effondrement.

-Perte de résistance structurelle, risques de défaillance soudaine.

-Accélération de la corrosion, perte d'esthétique, création de points de faiblesse.

-Réduction de la résistance mécanique, risques de rupture imprévisible.

-Les fuites et infiltrations d'eau résultent de joints défectueux, de membranes d'étanchéité endommagées ou de défauts dans les toitures.

III.5. Changement d'usage

Le changement d'usage des structures métalliques, c'est-à-dire leur adaptation à des fonctions différentes de celles pour lesquelles elles ont été initialement conçues, peut engendrer divers désordres.

Ces désordres sont souvent liés aux nouvelles charges, des conditions environnementales modifiées et des exigences de performance accrues. Voici un aperçu des principaux problèmes qui peuvent survenir :

- Surcharge et fatigue du Matériau : Les structures métalliques peuvent être soumises à des charges plus importantes ou différemment réparties par rapport à leur conception initiale.

- Inadéquation des fondations : Les fondations initiales peuvent ne pas être adaptées aux nouvelles charges ou à la distribution des charges.

- Corrosion accélérée : De nouvelles conditions d'usage peuvent exposer les structures à des environnements plus corrosifs (humidité accrue, présence de produits chimiques).

- Modification des points de fixation et assemblages : Les changements d'usage peuvent nécessiter de nouveaux points de fixation ou la modification des assemblages existants.

- Problèmes d'isolation et de protection thermique : Les nouvelles utilisations peuvent nécessiter des conditions thermiques différentes (par exemple, entrepôts transformés en bureaux).

III.6. Due aux Actions naturelles

III.6.1 Le vent

- Effet de Venturi

La vitesse du vent est augmentée dans les passages resserrés. Règle neige et vent tiennent compte de ce phénomène en l'assimilant à la notion de site exposé [14].

- Effet de Karman

L'effet de Karman apporte aux constructions élancées des efforts perpendiculaires à la direction du vent. Il se manifeste à partir d'une vitesse critique de vent, fonction de la période propre de vibration de la construction et de ses caractéristiques géométriques. Ce phénomène est particulièrement à étudier pour les cheminées métalliques et les ponts suspendus [14].

III.6.2 La neige

Faire attention au risque d'accumulation (voir fig II.3) conséquence d'accumulation de la neige) en réduisant les hauteurs des acrotères et adoptant des pentes minimales de versants (au moins 5 %) et en s'assurant régulièrement de la non obstruction de conduites d'évacuation [14].



Figure II.3. Le toit s'est effondré sous le poids de la neige [18]

III.6.3 Les Précipitations

Lors de précipitations importantes, des effondrements de toiture ont parfois été provoqués par une évacuation trop lente des eaux. Ce qui engendra des surcharges excessives de

l'ossature portante. Le phénomène est « une réaction en chaîne » : Plus il y a accumulation d'eau, plus la structure fléchit et plus l'accumulation s'aggrave [14].

III.6.4. La température

• Dilatation

Dans le cas de structures les variations de température provoquant la dilatation des éléments métalliques peuvent conduire à des désordres ou à des instabilités [14].

Les caractéristiques mécaniques d'un acier mesurées à température ambiante peuvent changer lorsque la température augmente ou diminue. Ainsi, un acier peut se déformer plus rapidement à haute température. A basse température, la résistance au choc est altérée : l'énergie nécessaire afin de rompre par choc une éprouvette normalisée diminue avec la température.

• Froid

La résilience de l'acier diminue avec la température (voir fig II.4). Au-dessous de la température de transition, le métal devient particulièrement fragile. Les désordres dus à ce phénomène peuvent se produire surtout dans les régions climatiques rigoureuses et touchent plus particulièrement les éléments soumis à la fatigue, tels que les chemins de roulement de pont roulant [14].

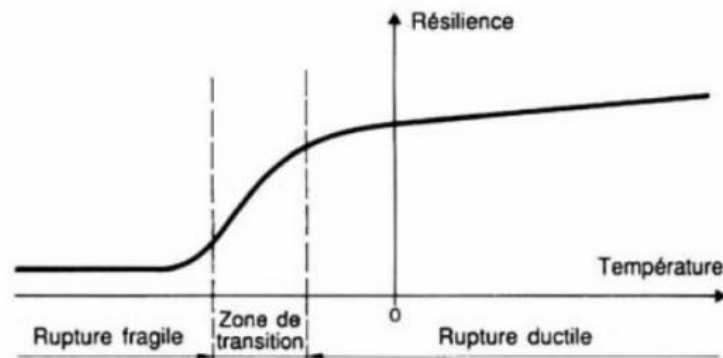


Figure II.4. Résilience de l'acier [14].

III.7. Due aux Actions chimiques

III.7.1. La corrosion

Généralement, la corrosion d'un métal, on entend la transformation du métal (élément fer) en divers composés (oxydes et hydroxydes) sous une action chimique (action de l'oxygène de l'air en présence d'eau, oxygène, salinité, pH, gaz carbonique), physiques (vitesse des courants, température, pression, particules solides présentes dans l'eau (sable, ...)), ou biologiques (salissures marines biologiques végétales ou animales, bactéries...) [19].

Comme titre d'exemple on cite les deux figures (voir fig II.5.A et II.5.B)



Figure II.5.A. Pont métallique de Milia-Jijel



Figure II.5.B. Corrosion des profils des poutres de l'usine de liège

III.8. Due aux actions accidentelles

III.8.1. Séisme [14]

Généralement, les aciers de constructions métalliques vérifient les conditions de ductilité prévues par les codes de calcul (Eurocode 03, Règle de conception et de calcul des structures en acier « CCM97 »). Cette propriété donne aux profilés métalliques de grandes capacités d'absorption et de dissipation de l'énergie.

En effet, suite aux observations effectuées après des tremblements de terre majeurs (Notamment celui de Boumerdes du 21 Mai 2003) (voir fig II.6), le caractère parasismique efficace des constructions métalliques a souvent été confirmé. Toutefois, des exceptions existent.



Figure II.6. Structure métallique effondrée après séisme de Boumerdes [14]

Selon le rapport élaboré par Davidovici après le séisme de 2003 à Boumerdes, plusieurs modes de ruine ont été relevés, Insuffisance du contreventement au RDC et effondrement par excès de déplacements .



Figure II.7. Des barres diagonales à larges ailes ont flambé par rapport à leur axe faible et se sont rompues (Kobe, Japon, 1995) [14]

A ce titre, nos références, sont les séismes de Northridge (USA), en 1994, et de Kobe (Japon), en 1995, où de nombreuses fissurations locales ont été observées et certains endommagements des éléments de la structure (voir fig II.7).

Cela dit, on peut affirmer que les structures métalliques ne peuvent détenir le « label parasismique » qu'en présence de conceptions réfléchies permettant d'assurer le comportement global ductile recherché et de mise en œuvre soignée.

A cet effet, le projet de construction devra favoriser la formation de zones dissipatives saines où pourront se développer des déformations locales ductiles.

III.8.2. Explosion

Une explosion et un incendie (voir fig II.8 et II.9) peuvent avoir des conséquences dramatiques sur l'intégrité des structures. Ils peuvent entraîner des dommages sévères voire détruire les ouvrages. Leurs risques sont connus et le plus souvent anticipés. Toutefois établir une étude prenant en compte tous les tenants et aboutissants reste un sujet complexe [13].



Figure II.8. Incendie dans un tunnel [13]



Figure II.9. Explosion d'un immeuble [13]

III.8.3. Choc des trafics

La pathologie liée aux chocs des trafics dans les constructions en génie civil concerne les dommages causés par les chocs mécaniques, tels que les chocs de poids lourds hors gabarit contre les intrados des ponts (voir fig II.10), les chocs de bateaux (voir fig II.11) ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue.



Figure II.10. Un pont aux États-Unis s'effondre après avoir été heurté par un bateau [20]

Figure II.11. En Ille-et-Vilaine, un camion arrache un pont, la structure totalement détruite [21]

Ces chocs peuvent entraîner des dommages importants aux ouvrages, se manifestant par des épaufrures, des cassures fraîches et des épaufrures profondes.

Partie 03 : Différentes pathologies de la partie infrastructures cas de la construction métallique

IV.1. Les risques liés au sol

IV.1.1. Retrait et Gonflement

Le retrait et le gonflement se produisent dans les couches superficielles du sol et affectent donc les constructions et les dallages fondés superficiellement (voir fig II.12). Les désordres observés sont des fissurations des structures, des distorsions des ouvertures, des ruptures de canalisations [13].

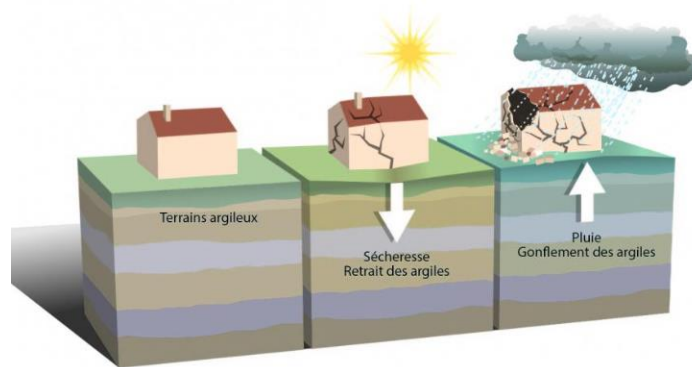


Figure II.12. Retrait et gonflement des argiles [13]

IV.1.2. Les glissements du terrain

Les glissements de terrain sont des phénomènes géologiques dangereux pour les constructions et pour les personnes (voir fig II.13). Quelques mètres cube suffisent à complètement déstabiliser une habitation [13].

On appelle glissement de terrain le déplacement plus ou moins rapide vers le bas et l'extérieur de masse de terre, éventuellement de roches, le long d'une pente [13].

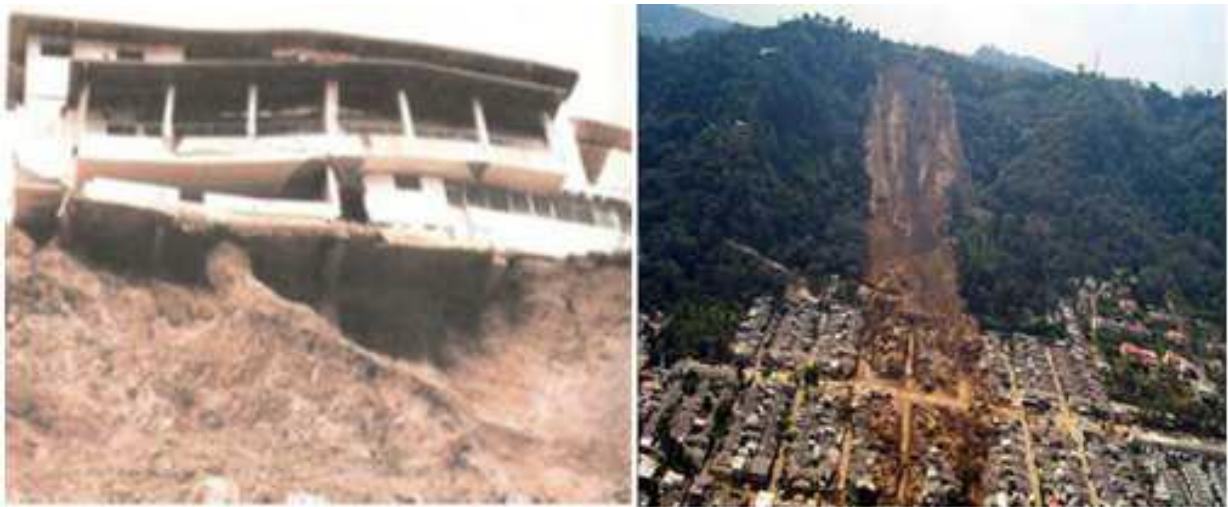


Figure II.13. Glissement de terrain [15]

Un glissement de terrain est dangereux et destructeur non seulement par le glissement du terrain lui-même mais aussi par l'accumulation en bas de la pente de terre, de roche et de débris divers [13].

IV.1.3. Les effondrements de cavités souterraines

Ces phénomènes combinent des processus liés à la gravité mais aussi à l'évolution des cavités souterraines naturelles avec la dissolution de certaines roches (gypse) et aggravés par les

activités humaines (carrières et ouvrages souterrains). Les effondrements affectent alors le toit de la cavité et provoquent, en surface, une dépression généralement de forme circulaire ou la formation de fontis. L'exploitation par chambres non ou mal remblayées crée des effondrements différés. Le toit des chambres supporte les terrains sus-jacents sur une épaisseur souvent importante. On observe une dégradation des galeries qui peut gagner de proche en proche vers le haut. Les terrains sus-jacents s'effondrent jusqu'à provoquer une vaste ouverture à l'air libre ou fontis (voir fig II.14) [13].

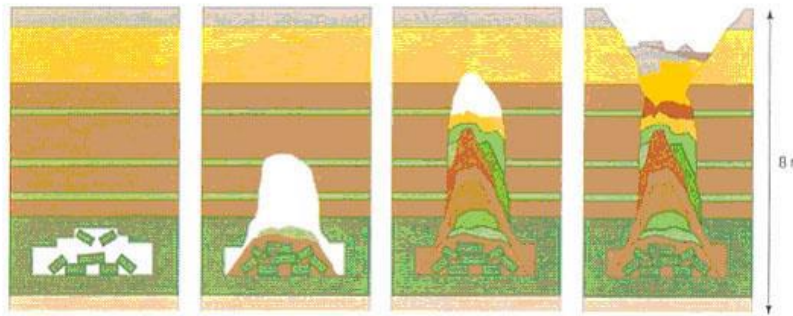


Figure II.14 Schéma d'évolution d'un fontis [13]

IV.1.4. Les tassements et les affaissements

IV.1.4.1. Les tassements

- **Tassement uniforme**

Lorsque les tassements sont uniformes, ils ne provoquent pas de désordres dans les constructions (voir fig II.15), mais ils peuvent causer des désordres fonctionnels [13].

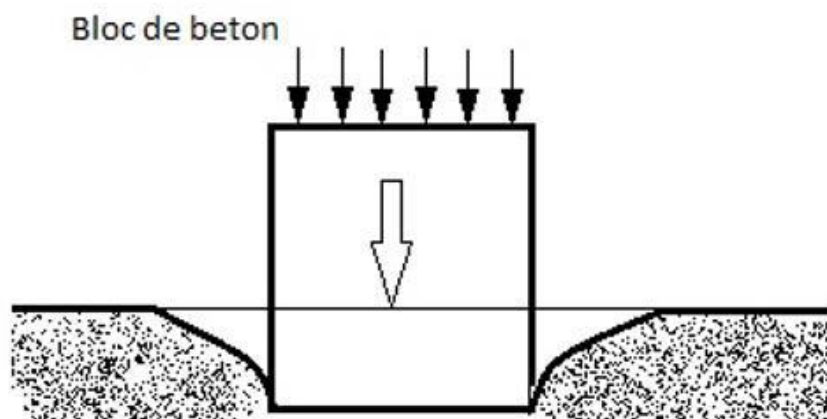


Figure II.15. Tassement uniforme [13]

- **Tassement différentiel**

Le tassement différentiel est par définition un mouvement d'enfoncement du sol non uniforme sous l'action d'une charge. Ce phénomène peut provoquer de graves désordres dans la structure se traduisant par l'apparition de fissures pouvant atteindre plusieurs mètres (voir fig II.16).

Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si le tassement est important [13].



Figure II.16. Effet du tassement de terrain sur la stabilité des constructions [15]

IV.1.4.2. Les affaissements

Un affaissement est une déformation souple, sans rupture et progressive de la surface du sol se traduisant par une dépression en forme de cuvette, généralement à fond plat, et sur des terrains plutôt élastiques qui vont supporter la déformation sans rompre.

Ce type de désordre se développe parfois sur plusieurs hectares au droit de vastes carrières ou mines. Il s'agit souvent d'un phénomène symptomatique des carrières souterraines soit mal remblayées soit, lorsqu'elles sont profondes, recouvertes par des formations "souples". Généralement, ce ne sont pas tant les affaissements à proprement parler (déplacements verticaux) qui affectent les bâtiments et infrastructures de surface, mais plutôt les déformations du sol (voir fig II.17) (déplacements horizontaux, flexions, etc.).

Si des désordres sensibles peuvent affecter le bâti et les infrastructures (notamment les réseaux enterrés) présents dans l'emprise des cavités, les affaissements de surface ne présentent que très exceptionnellement et souvent indirectement un danger pour les personnes en raison de la progressivité du phénomène [13].

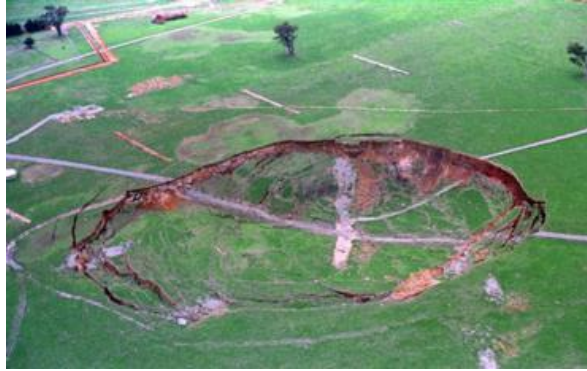


Figure II.17. Effondrement minier survenu sur la mine d'Elura située à 600 km à l'ouest-nord-ouest de Sydney, en Australie, découverte dans les années 1970 [13]

IV.1.5. Les écroulements et les chutes de blocs

Les éboulements et chutes de blocs sont des mouvements de terrain rapides résultant de l'action de la pesanteur sur des éléments rocheux (voir fig II.18.A et II.18.B) [13].



Figure II.18.A. Éboulement de terre à Bukavu [13]



Figure II.18.B. Chutes de blocs [15]

IV.1.6. Liquéfaction du sol

Le phénomène de liquéfaction des sols (meubles) lors d'un séisme, plus généralement de vibrations, est un évènement catastrophique (voir fig II.19). De nombreux et importants sinistres sont ainsi rencontrés. Il est décrit comme le fait que le sol se comporte pendant un court instant à la manière d'un fluide visqueux. Ce phénomène est principalement rencontré dans les milieux côtiers et des sols sableux, ainsi que les argiles sensibles. Il se produit si le sol est saturé et soumis à des sollicitations rapides, telles que les séismes, les raz-de marée, les explosions [13].



Figure II.19. La liquéfaction du sol entraîne le renversement des bâtiments [13]

IV.2. Les risques liés au fondations [13]

- L'erreur de niveau du sol d'assise réelle ;
- Le non-respect des plans d'exécution : (Dimensionnement, position et nombre des armatures) ;
- Le mauvais dosage des bétons ;
- Le choix de constituants de mauvaise qualité ou inadapté ;
- Le non-respect des règles de mise en œuvre : (Terrassements avec des matériaux inappropriés et mal compactés, fond de fouille défectueux, suppression du béton de propreté, enrobage insuffisant, ...)
- La non prise en compte des conditions climatiques (Gel, pluie, venue d'eau, sécheresse) ; Le gel est le facteur majeur qui risque de détériorer une assise car il provoque des variations de volume de l'eau contenue dans le sol (voir fig II.20).

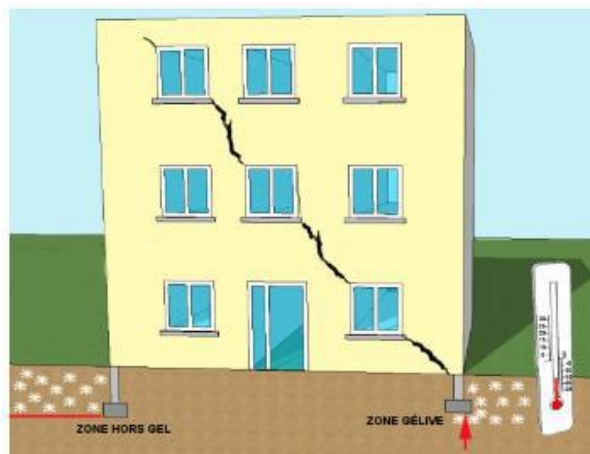


Figure II.20. Des fissures inclinées dus au gel des fondations [13]

-Les défauts de réalisation des fondations profondes : Profondeur insuffisante, coupure, étranglement, ...etc., (voir fig II.21)

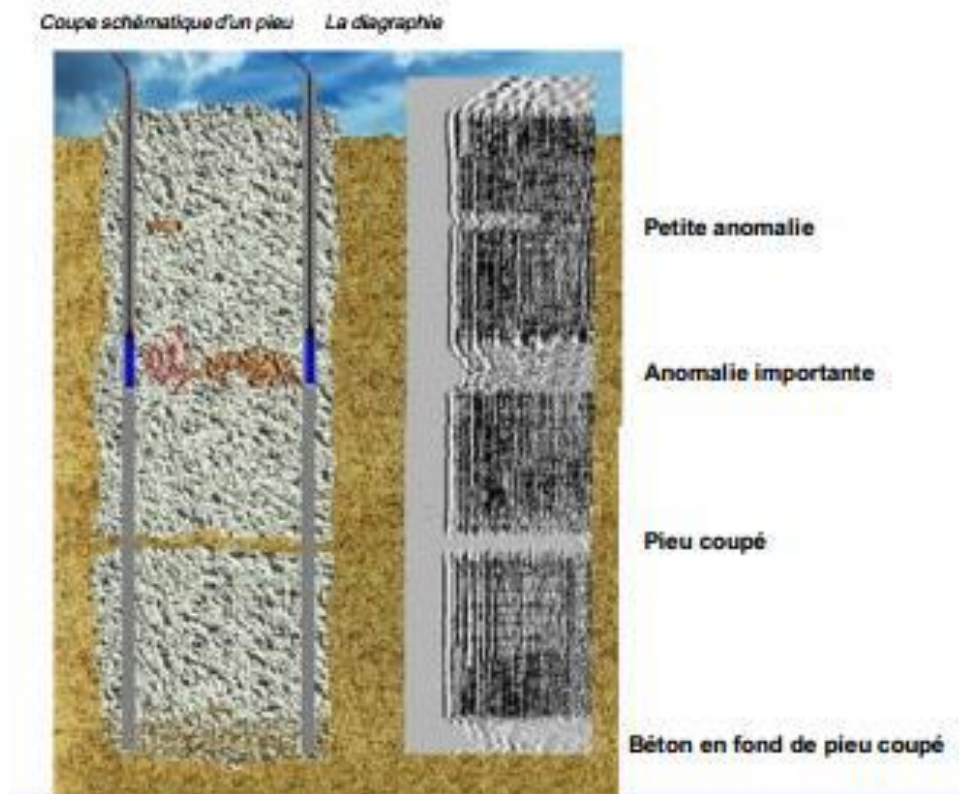


Figure II.21. Coupe schématique d'un pieu mal réalisé [13]

IV.2.2. Matériaux de constructions en cause

IV.2.2.1. Béton armé :

Les signes apparents sont souvent des fissures, des désagrégations et des épaufrages. Les causes de ces problèmes sont multiples, les plus fréquemment rencontrées sont [22] :

- **Ségrégation du béton frais**

Entre la fin du bétonnage et le début de prise se produit un phénomène de sédimentation (tassement) :

Par gravité, les grains lourds en suspension sont attirés vers le bas. L'eau qui reflue (ressuage) entraîne à son tour une partie des grains les plus fins vers la surface de l'élément. Il en résulte, dans la zone inférieure de l'élément, une concentration plus élevée en gros grains et, dans la partie supérieure, une concentration plus forte en pâte de ciment (voir fig II.23) [22].



Figure II.23. Phénomène de ségrégation

- **Décoffrage prématuré :** La vitesse et l'économie actuellement recherchées dans la construction ont pour conséquence que le coffrage est retiré avant que le béton ait acquis une résistance suffisante. Le décintrement et le décoffrage prématurés d'un béton peuvent entraîner [22] :
 - Des déformations excessives de pièces minces fléchies ;
 - Une fissuration des parties tendues ;
 - Une microfissuration préjudiciable au niveau de la durabilité de la structure (voir fig II.24).



Figure II.24. Apparition des fissures causée par le décoffrage prématuré [22]

- **Retrait lors du durcissement :**

- Le retrait thermique peut être la cause de pré fissuration du béton (voir fig II.25). La prise puis le durcissement du béton se font avec un dégagement de chaleur ; le matériau se contracte au cours de son refroidissement. A ce phénomène viennent s'ajouter des effets de masse, la température d'hydratation pouvant être plus élevée au sein d'une pièce massive et plus faible au voisinage des parois par échange thermique avec l'extérieur [22].

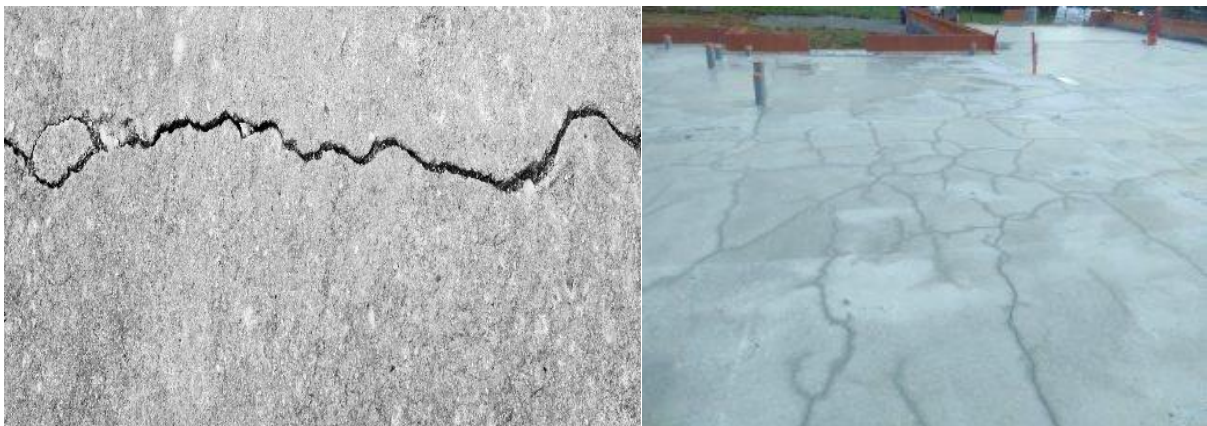


Figure II.25. Fissures dues au retrait [22]

- **Absorption d'eau par le béton :**

On constate souvent que parmi les différentes parties d'un même ouvrage construit avec les mêmes matériaux, certaines sont saines tandis que d'autres sont gravement détériorées. Cela est dû à la différence de quantité d'eau absorbée par le béton [22].

- **Réactions chimiques :**

En fonction de la concentration de l'agent agressif, de la mobilité de son milieu, de la température ambiante et de la durée d'exposition, ces milieux peuvent attaquer le béton et provoquer des dégâts irréversibles si des précautions de protection ne sont pas prises à temps. La vitesse de dégradation du béton dépend également de plusieurs facteurs dont notamment [22] :

- La nature des différents constituants (ciment, agrégats...) et composition minéralogique
- La composition du béton
- Le mode de sa mise en œuvre
- De l'âge du béton et des conditions climatiques

- **Altération atmosphérique :**

Si l'eau absorbée par le béton est exposée à des températures inférieures à zéro degré Celsius, elle gèle en augmentant le volume ; la pression résultante fissure le béton. Au moment du dégel la surface fissurée s'épauffre [22].

IV.2.3. L'environnement en cause [13]

- Milieux urbain ou rural
- Engins lourds ou vibrants (voir fig II.26), battage de pieux, ...etc.

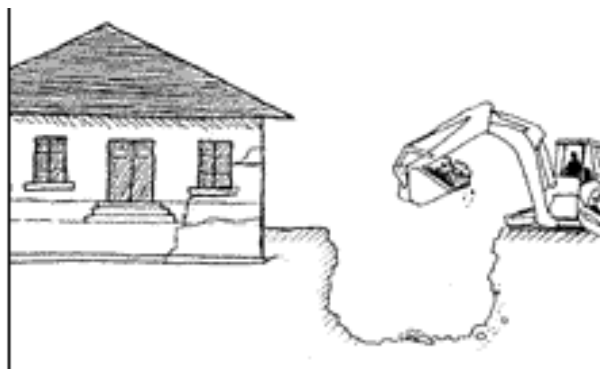


Figure II.26. Excavation en limite d'un bâtiment [13]

- Travaux en sous-sol (galeries, égouts, ...)
- Constructions voisines (voir fig II.28).

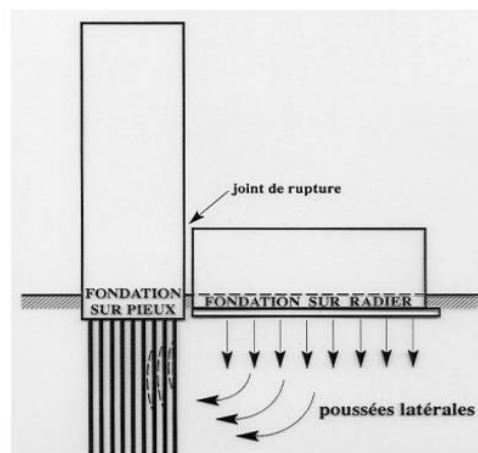


Figure I.27. Constructions voisines risque de déstabiliser le bâtiment [13]

IV.2.4. L'utilisation en cause [13]

- Les modifications de destination du bâtiment
- L'augmentation des charges d'utilisation (stockages lourds)
- Une surélévation sur des fondations inadaptées
- Une extension mitoyenne qui surcharge les fondations adjacentes
- L'installation de machines vibrantes sans désolidarisation
- Une extension en sous-sol sous les fondations – Etc...

V. Conclusion

Les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance ou de comportement sont dues à plusieurs facteurs qu'on ne peut pas les maîtriser tous, donc la notion de la structure parfaitement durable c'est une notion irréalisable, cette vulnérabilité des structures impose des réparations ou des renforcements à travers le cycle de la vie de l'ouvrage.

A cet effet, de plus de la compréhension des mécanismes dégradant, l'élaboration d'un diagnostic fiable exige une la maîtrise parfaite des différentes méthodes d'inspection.

Chapitre III : Procédés de diagnostic et Techniques de réparation et de renforcement

I. Introduction

Ce chapitre est scindé en trois parties. Dans la première partie, les principales étapes et les différentes techniques employées lors de l'inspection des structures (en particulier les structures métalliques) sont données. Une fiche d'évaluation des structures métalliques est proposée dans la deuxième partie du chapitre. En fonction de la nature et de l'importance du désordre, du composant touché et du matériau utilisé, un récapitulatif des différentes méthodes de réparation et de renforcement est donné.

Partie 01 : Procédés du diagnostic

Généralement, Il n'est pas possible d'évaluer la nécessité de réparer une structure ou de choisir les méthodes de réparation sans avoir, au préalable, bien identifié l'origine des dégradations. L'identification des causes des dégradations est une étape les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées. Donc, avant d'entreprendre des travaux de réparation, il faut donc prévoir une campagne d'évaluation la plus détaillée possible de l'état de la construction [23]

II.1. Diagnostic

Le diagnostic est un ensemble de techniques élaborées dont l'objectif est d'évaluer l'état de matériau dans une structure donnée, tout en évaluant la stabilité globale et partielle de cette structure. Pour pouvoir analyser et déterminer les causes affectant cette conception, et envisager à la fin une intervention et réparation avec succès [24]

II.2. Le processus de diagnostic d'un ouvrage

La Figure III.1 ci-dessous résume le processus d'un diagnostic :

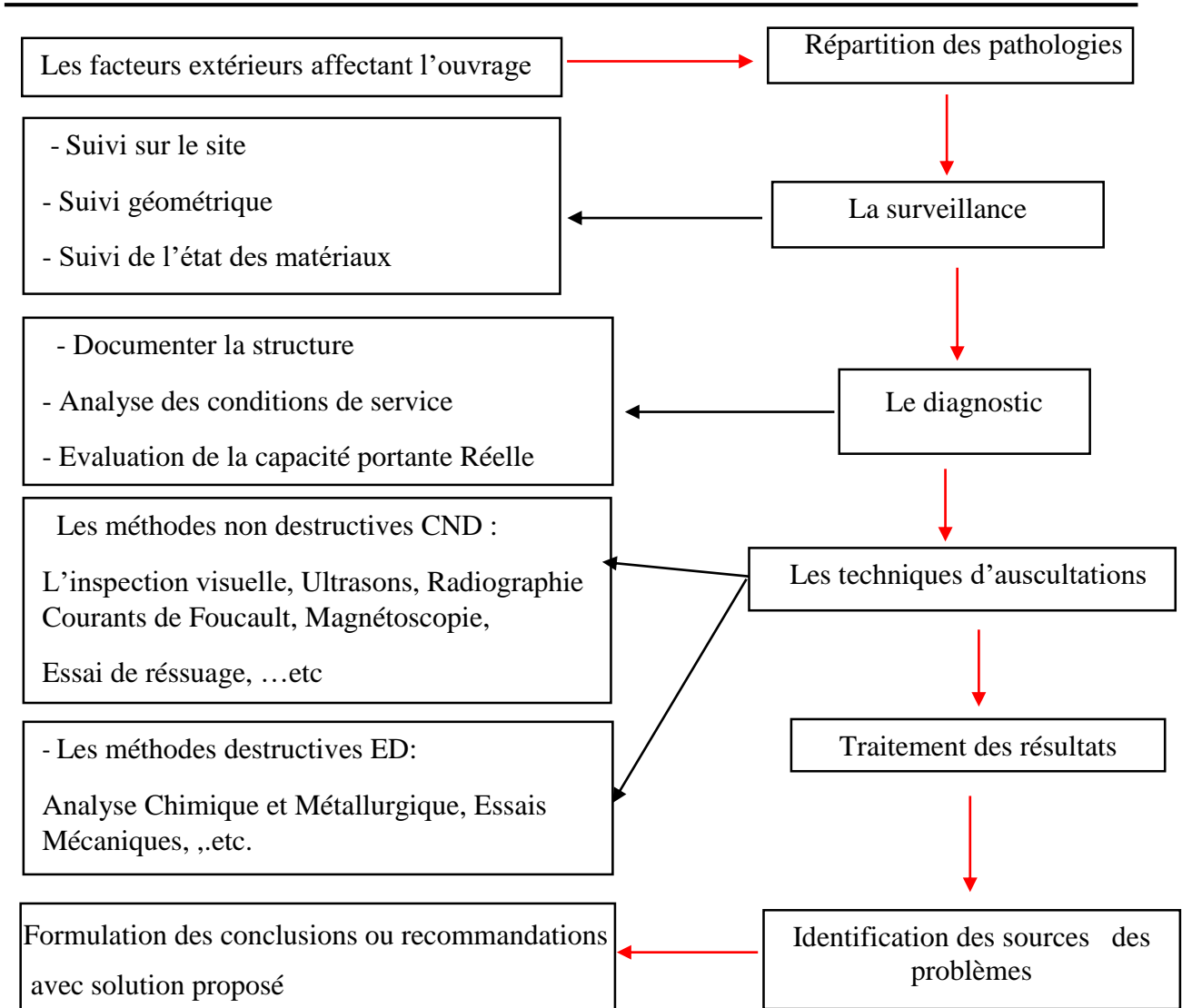


Figure III.1. Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en charpente métallique [24]

II.3. Les principales étapes d'un diagnostic

La campagne d'évaluation fait partie d'un processus, constitué de plusieurs étapes, qui permettra l'obtention des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les causes des dégradations. Dans tous les cas, la campagne d'évaluation a pour but d'aider à établir les causes des dégradations et à choisir les techniques de réparations les plus appropriées. Les campagnes d'évaluation peuvent comporter 5 grandes étapes [23] :

- Révision de l'historique de l'ouvrage
- Analyse des conditions de service
- Visite du site
- Évaluation détaillée
- Traitement des données recueillies

II.3.1. Révision de l'historique de l'ouvrage

Cette phase consiste à recueillir et réviser toutes les documents disponibles concernant la conception, la mise en œuvre, l'exploitation et l'entretien de la structure concernée notamment [23] :

- Dossier d'exécutions et de surveillance,
- Plans et photos,
- Rapport d'essais sur les matériaux et d'expertise,
- Réparations antérieures : Causes, méthodes utilisées et matériaux utilisés.

II.3.2. Analyse des conditions de service

Cette phase consiste d'abord à évaluer dans quelle mesure la fonction actuelle de la structure (conditions de service) correspondent aux spécifications d'origines (voir fig III.1). Cette opération permet d'identifier les points suivants [23] :

- Les zones les plus sollicitées,
- Les parties exposées aux cycles de gel/dégel, aux cycles thermiques et aux variations d'humidité, etc.

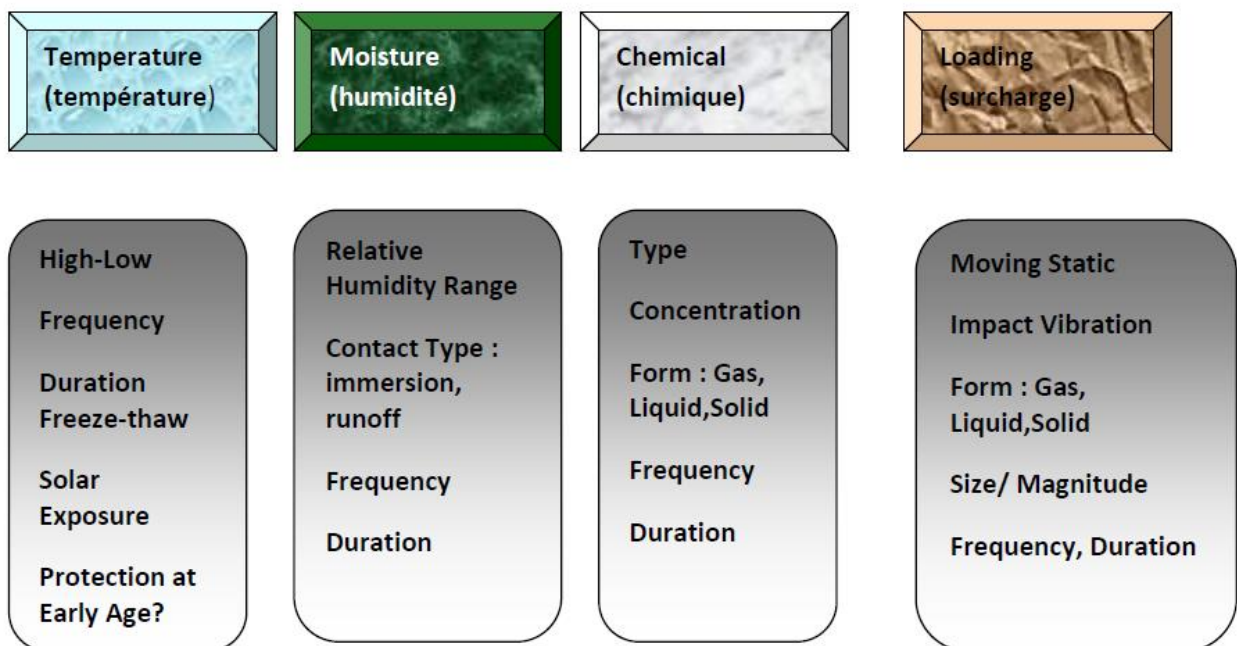


Figure III.2. Liste des principaux paramètres décrivant les conditions de service des structures [25]

Cette étape devrait être effectuée avant la première visite sur le site, parce que très souvent, les principales causes des dégradations sont directement liées aux conditions de service [23].

II.3.3. Visite du site

Les techniciens visitons le site de l'ouvrage doit prévoir des schémas ou des plans simplifiés qui pourront être utilisés pour localiser les principaux problèmes observés. Les activités suivantes peuvent être effectuées sur le site [23] :

- Observations visuelles
- Prise de photos
- Observation des zones critiques (joints, appuis, système de drainage, etc.)
- Localisation des fissures, des délaminations et des autres types de dégradations
- La présence des taches et la décoloration du sol et l'apparition des fissures et de crevasses et des affaissements et les bombements.
- L'influence des structure voisines par exemple les excavations profondes pour les sous-sols ou les fondations peuvent entraîner des affaissements de sol qui affectent les bâtiments adjacents

II.3.4. Évaluation détaillée

Si les informations recueillies durant la visite de site de l'ouvrage sont insuffisantes. Dans ce cas-là, il est nécessaire d'entreprendre un programme d'investigation plus détaillé pour former une image complète sur l'état de l'ouvrage examiné. L'évaluation détaillée peut comporter les activités suivantes [23] :

- Essais non destructifs,
- Campagne de carottage,
- Cartographie des fissures,
- Programme des essais à effectuer sur les échantillons prélevés par carottage,
- Programme des essais in situ.

II.3.5. Évaluation des données recueillies

Cette étape consiste à évaluer et à analyser l'ensemble des données (techniques, visuelles, historiques, climatiques) obtenues sur le site et au laboratoire [23]

II.4. Choix des investigations

Le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres. Il est nécessaire de les évaluer. Ces différents paramètres sont les suivants :

II.4.1. Nature des matériaux :

Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre.

II.4.2. Type de structure

- Structure industrielles
- Habitation (bâtiment ou bien structure individuelle)
- Ouvrage d'art (ponts, tunnel, tours, etc.)
- Stockage (entrepôt, silos, réservoir, ...etc.)
- Structure ancienne (construites à partir de matériaux locaux disponibles à l'époque exemple la casbah d'Alger)

II.4.3. Etat de l'ouvrage

- **Dégradation Légère**
 - Fissures superficielles
 - Corrosion de surface
 - Humidité superficielle
 - Usure légère
- **Dégradation Modérée**
 - Fissures profondes
 - Déformations légères
 - Corrosion pénétrante
 - Infiltrations mineures
 - Fatigue légère des matériaux
- **Dégradation Sévère**
 - Fractures complètes
 - Déformations importantes
 - Pourriture profonde
 - Infiltrations majeures
 - Humidité pénétrante
 - Fatigue avancée des matériaux
- **Dégradation Critique**
 - Effondrements partiels
 - Corrosion structurelle menaçant l'intégrité

- Attaques chimiques sévères
- Dommages environnementaux critiques (par exemple, après une catastrophe naturelle)

II.4.4. Environnement de l'ouvrage :

- Maritime
- Industrielle
- Urbain
- Rural
- Montagnard
- Désertique

II.5. Type d'investigation

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories : soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives.

II.5.1. Méthodes non destructifs

Pour interpréter correctement les résultats de n'importe quel type d'essai, il faut bien connaître ce qui est effectivement mesuré et les limites de validité des résultats. Il existe une très grande variété d'essais non destructifs qui sont :

- Ressuage
- L'inspection visuelle
- Courants de Foucault
- Ultrasons
- Radiographie

A. Inspection visuelle

Cet examen permet l'appréciation de nombreux paramètres (forme, couleur, défauts externes) [26].

L'examen visuel direct des pièces (voir fig III.3) peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (tâches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhibitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc.

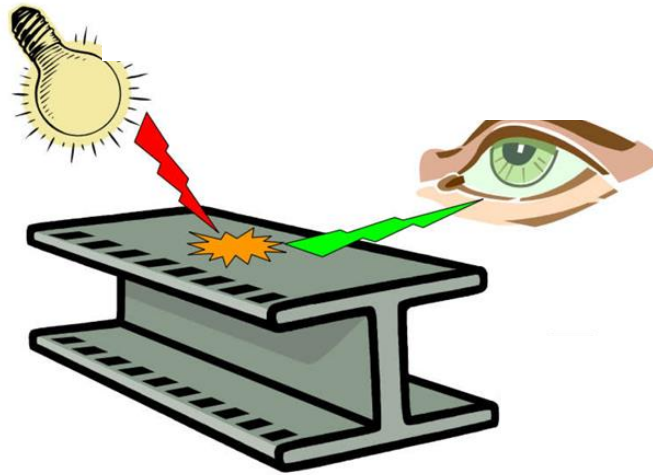


Figure III.3. Schéma du contrôle visuel [27]

Il détecte tous les signes de détérioration et d'identifier toutes les sources potentielles de désordres tels que :

- D'identifier des caniveaux, des fissures débouchant et de la porosité de surface ainsi que des projections et des amorçages accidentels [28].
- La corrosion, la défaillance et les fissures des soudures.
- Défaillances, ruptures de boulons.
- Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur.
- Les zones d'altération superficielles et profondes.
- Les zones humides.
- Les éclats de béton en formation ou profonds.
- Les zones de ségrégation.

B. Essai de ressuage :

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchantes, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...); la pièce étant ensuite examinée visuellement [26]. Les différentes étapes de l'essai sont détaillées ci-après (voir fig III.4).

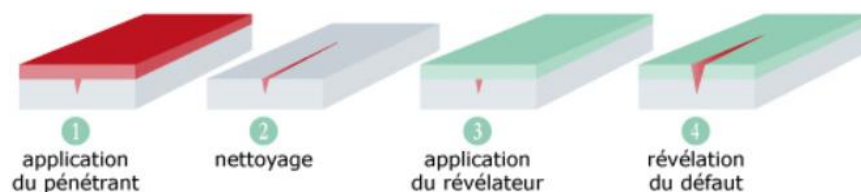


Figure III.4. Le principe de l'essai [29]

C. Essai par magnétoscopie (MT)

Cette méthode permet en plus, par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface (voir fig III.5). Pour cela, on applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV [26].

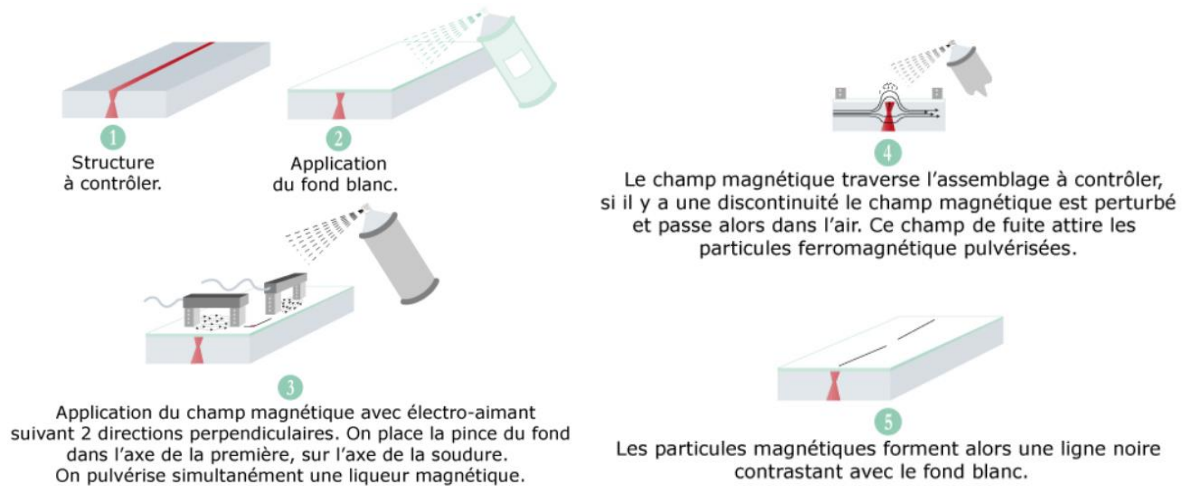


Figure III.5. Le principe de l'essai [30]

La Magnétoscopie est utilisée pour le contrôle :

- Des soudures bout à bout ou d'angle,
- Des pièces moulées (craquelures dans les congés de raccordement, réseaux de fissures superficielles...),
- Des pièces forgées (craquelures correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion...),
- Des produits laminés et étirés (dédoublures débouchantes, reliures, fissures sur les peaux tendues des produits emboutis ou cintrés),

D. Ultrasons

Cette technique est parmi les méthodes les plus répandues. Elle consiste à détecter les défauts en balayant la pièce à contrôler et en observant les échos réfléchis sur les discontinuités de la matière [26]. (Voir fig III.6)

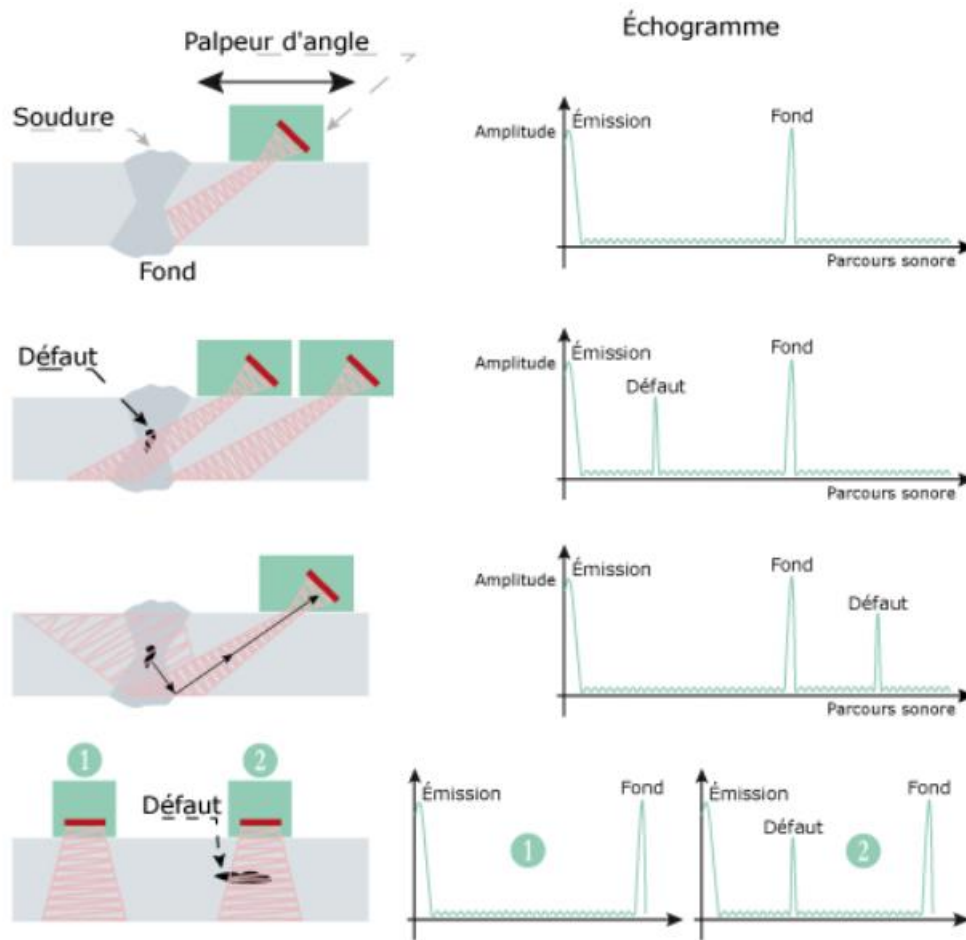


Figure III.6. Le principe de l'essai d'ultrason [29].

Les ultrasons sont principalement utilisés pour le contrôle [29]:

- Des assemblages soudés,
- Des produits forgés, moulés, laminés,
- Des matériaux composites sur chantier ou en atelier.

E. La radiographie

La radiographie est une technique basée sur le bombardement d'un corps (un tube, une pièce) par les rayons X (voir fig III.7). Applicable généralement dans le domaine de médecine, mais actuellement elle s'applique dans d'autres domaines (mécanique, électrotechnique, matériaux), c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence les hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui de contrôle de maintenance [26].

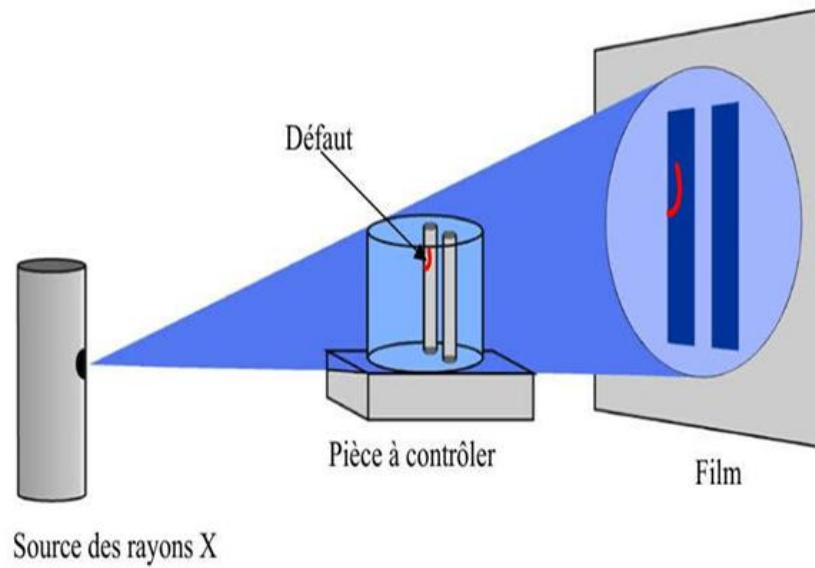


Figure III.7. Examen par radiographie [26].

F. Courants de Foucault

Ce type de contrôle (voir fig III.8) s'effectue en illuminant par un champ magnétique variable la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur. En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés [26].

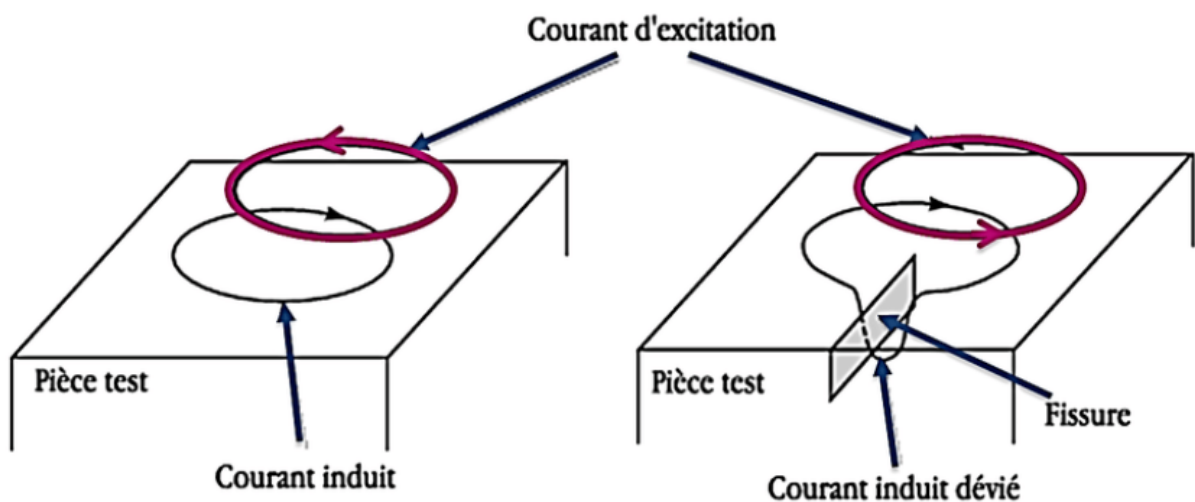


Figure III.8. Schématisation de la détection d'une fissure par courants de Foucault [30]

II.5.2. Investigations destructives

A. Analyse Chimique et Métallurgique :

- Spectrométrie : Identification de la composition chimique pour évaluer la susceptibilité à la corrosion.
- Microscopie Électronique à Balayage (MEB) : Étude des microstructures, analyse des modes de fracture.

B. Essais Mécaniques :

- Traction : Mesure de la résistance à la traction.
- Dureté : Détermination de la dureté pour évaluer l'état de traitement thermique.

II.6. Rapport d'un diagnostic

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, il comprend :

- L'identification de la structure, le nom du demandeur,
- L'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) charge de l'étude,
- Une brève description de la structure,
- Le rappel des objectifs de l'étude,
- La liste des documents consultés,
- Les résultats de l'inspection visuelle,
 - Les résultats des essais de laboratoire,
- Une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable, et leur incidence sur la sécurité,
- Des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude,
- Proposition des solutions
- Une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer,
- Des recommandations relatives aux méthodes de réparation.

Partie 02 : Proposition d'une fiche pour l'évaluation des structures métalliques

Une fiche d'évaluation de construction est un document détaillé utilisé pour évaluer divers aspects d'un bâtiment ou d'une structure. Voici une interprétation des différentes sections mentionnées :

III.1. Identification de la construction : Cette section comprend des informations de base sur le bâtiment, telles que l'adresse, le type de construction (résidentielle, commerciale, industrielle, etc.), l'année de construction, le nom du propriétaire, et éventuellement des données sur les rénovations antérieures.

III.2. Usage de la construction : Il s'agit d'évaluer et de documenter l'usage actuel de la construction (par exemple, habitation, bureaux, commerce) et de vérifier si cet usage est conforme aux règlements de zonage et aux permis de construire.

III.3. Description de la construction : Cette section décrit en détail les caractéristiques de la construction, telles que les matériaux utilisés (brique, béton, bois, acier), le nombre d'étages, la surface au sol, le style architectural, et d'autres caractéristiques physiques.

III.4. Sol de la construction : Ici, on évalue la qualité et l'état du sol sur lequel la construction est érigée. Cela peut inclure une analyse géotechnique du sol, la stabilité, les risques de glissement de terrain, la capacité portante, et la présence éventuelle de contaminants.

III.5. Inspection de l'infrastructure : Cette section se concentre sur l'inspection des fondations et des autres éléments souterrains ou au niveau du sol qui supportent la structure principale. On évalue la stabilité, l'état, les fissures éventuelles, et les signes d'affaissement ou de détérioration.

III.6. Inspection de la superstructure :

- **Éléments porteurs :** Evaluation des poutres, colonnes et autres éléments structuraux essentiels pour la stabilité du bâtiment.
- **Planchers :** Inspection de l'état des planchers pour détecter des signes de déformation, d'affaissement, ou de détérioration.
- **Contreventement :** Evaluation des systèmes qui assurent la stabilité latérale de la construction face aux forces comme le vent ou les séismes.
- **Toiture :** Inspection de la toiture pour vérifier l'étanchéité, l'état des matériaux de couverture, et la présence de dommages.
- **Escalier :** Evaluation de la solidité et de la sécurité des escaliers.
- **Balcon :** Inspection des balcons pour vérifier la stabilité, la sécurité des garde-corps, et l'état des matériaux.
- **Mur extérieur :** Evaluation de l'état des murs extérieurs, en vérifiant la présence de fissures, d'humidité, et l'intégrité des revêtements.

- **Plafond** : Inspection des plafonds pour détecter des fissures, des taches d'humidité, ou des signes de détérioration.
- **Mur Intérieur** : Evaluation des murs intérieurs pour des signes de dommages, d'humidité ou de dégradation.
- **Élément vitré** : Inspection des fenêtres et autres surfaces vitrées pour vérifier l'état des vitrages, des cadres, et l'étanchéité.
- **Structure voisine** : Evaluation des impacts des structures voisines sur le bâtiment, comme les risques de dommages dus à des travaux adjacents.
- **Cheminée** : Inspection des cheminées pour leur état structurel, leur fonctionnalité, et la sécurité.
- **Acrotère** : Evaluation des parapets ou des éléments surélevés en bordure des toits plats pour vérifier leur intégrité.
- **Corniche** : Inspection des corniches pour vérifier leur état et leur sécurité.

III.7. Autres indications : Observations supplémentaires, notes sur des points spécifiques, recommandations particulières en Fournissant des informations supplémentaires qui ne sont pas couvertes dans les sections précédentes mais qui sont importantes pour l'évaluation globale.

III.8. Etat de la structure : Invulnérable ou Vulnérable : Classification de la structure en termes de vulnérabilité par rapport la solidité globale du bâtiment et déterminer s'il est résistant ou susceptible de subir des dommages.

III.9. Une évaluation profonde est nécessaire : Indication si une évaluation plus détaillée ou spécifique est nécessaire. On Identifier les domaines nécessitant une analyse plus approfondie, des tests spécifiques ou une expertise technique supplémentaire.

Cette fiche d'évaluation permet de réaliser un diagnostic complet et précis de l'état d'un bâtiment, en identifiant les problèmes potentiels et en planifiant les interventions nécessaires pour assurer la sécurité, la durabilité et la conformité réglementaire de la construction.

Fiche d'évaluation des structures métalliques de Tizi-Ouzou

Inspecteur : **Date:** .../.../.....

Identification de la construction

Adresse : Position GPS: X:...../Y:...../Z:.....
 Entreprise :/ B.E.T :

Usage de la construction

Habitation « Collectif Individuel » / Commercial / Habitation & Commercial / Scolaire / Sportif / Hospitalier / Industriel / Socioculturelle / Administration / Réservoir d'eau / Autres

Description de la construction

Année de construction :	Vide sanitaire : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	H RDC :m
Nombre de niveau :	Sous-sol : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> /Nbr :	H Étage :m
Joint de dilatation : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> /E _p :	Entre-sol : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> /Nbr :	H Niveau-inf :m

Régulière en plan : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Réalisation : Entreprise qualifiée <input type="checkbox"/>	Calculée au séisme: Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Régulière en élévation : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Entreprise quelconque <input type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/>	Contrôlée par le CTC: Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>

Sol de la construction

Site : Rocheux (S1) <input type="checkbox"/> Ferme (S2) <input type="checkbox"/> Très meuble (S3) <input type="checkbox"/> Meuble (S4) <input type="checkbox"/>	Glissement : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Liquéfaction : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Affaissement : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
---	--	--

Inspection de l'infrastructure

Semelle Isolée <input type="checkbox"/> Semelle Filante <input type="checkbox"/> Radier général <input type="checkbox"/> Pieux en BA <input type="checkbox"/>	Description :
--	---------------------------------------

Inspection de la superstructure

<u>Éléments porteurs</u>	Accessibilité : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/>
Poteaux métalliques <input type="checkbox"/>	Description :
Autres <input type="checkbox"/>	

Autres indications : Poteau court / Nbr de P-C : / Niveau : /

<u>Planchers</u>	Accessibilité : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/>
Corps creux <input type="checkbox"/>	Description :
Dalle pleine <input type="checkbox"/>	
Plancher mixte <input type="checkbox"/>	
Autres <input type="checkbox"/>	

<u>Contreventement</u>	Accessibilité : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/>
Portique ductile <input type="checkbox"/>	Description:.....
Portique ordinaire <input type="checkbox"/>	
Palée triangulée en X <input type="checkbox"/>	
Palée triangulée en V <input type="checkbox"/>	
Autre <input type="checkbox"/>	

<u>Toiture :</u>	Accessibilité : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/>
Couverture métallique <input type="checkbox"/>	Description:.....
Couverture en bois <input type="checkbox"/>	
Autres <input type="checkbox"/>	

<u>Escalier</u>	Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/> État moyen <input type="checkbox"/>	Description :
Béton Armé <input type="checkbox"/>	
Métallique <input type="checkbox"/>	
Bois <input type="checkbox"/>	
Autres <input type="checkbox"/>	
<u>Balcon</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Mur extérieur</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Acrotère</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Corniche</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Cheminée</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Plafond</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Mur Intérieur</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Élément vitré</u>		Description :
Bon état <input type="checkbox"/>	
Mauvais état <input type="checkbox"/>	
<u>Structure voisine</u>		Description :
Danger permanent <input type="checkbox"/>	
Aucun danger <input type="checkbox"/>	
<u>Autres indications :</u>		
.....		
.....		
Structure : Invulnérable <input type="checkbox"/> Vulnérable <input type="checkbox"/>		Nombre de Logements :/Nombre d'habitants :
		Indications: Enfants :/Vieux:...../Handicapés:.....
Une évaluation profonde est nécessaire : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>		
<u>Autres informations :</u>		
.....		
.....		
.....		
.....		

Partie 03 : Techniques de réparation et de renforcement

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et l'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic. Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et de critères économiques. On peut être amené donc à procéder :

Réparation : La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer par des travaux appropriés, un niveau de service perdu.

Renforcement : Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service ou performance mécanique d'une construction (augmentation de ductilité, de la résistance...).

IV.1. Les différentes techniques de réparation et du renforcement

IV.1.1. Remplacement d'éléments endommagés

De très nombreux ouvrages sont constitués par des structures triangulées intérieurement hyperstatiques et il est souvent possible de démonter une barre (diagonale, ou montant) sans mettre en cause la stabilité de l'ouvrage sous poids propre. Si l'on se contente de démonter une barre et de la remplacer sans précautions particulières (voir fig III.9), il est évident que la barre neuve ne participera pas à la résistance de l'ouvrage sous l'effet des charges permanentes. Il convient donc de mettre en place un dispositif provisoire capable d'équilibrer les efforts existant dans la barre à remplacer. Dans le cas d'une barre tendue, ce dispositif peut être facilement réalisé à l'aide de barres de précontrainte [17]



Figure III.9. Remplacement d'un montant d'une poutre treillis [17]

IV.1.2. Dispositif provisoire de reprise des efforts par barres de précontrainte

Le cas d'une barre comprimée, il est possible d'imaginer un dispositif similaire composé de butons et de vérins mais un tel système est encombrant et plus difficile à ancrer en ses extrémités.

Afin d'éviter tout effort et déformation parasites, il faut veiller à ce que la résultante des efforts du dispositif provisoire soit portée par la fibre moyenne de la barre.

Il n'est pas toujours facile de connaître avec précision l'effort exact existant dans une barre (charges permanentes mal connues, déformations imposées à l'ouvrage, phasage de construction inconnu ou mal connu, etc.). Pour compenser le manque d'informations, il est possible de procéder de la manière suivante [17] :

- Mise en charge du dispositif provisoire à l'effort donné par le calcul ;
- Réalisation d'un repère d'alignement de la barre et de son gousset d'attache (un simple trait de scie suffit dans la plupart des cas) ;
- Élimination des rivets d'attache de la barre sur son gousset et de tout élément pouvant gêner un mouvement relatif ;
- Vérification qu'il n'y a pas eu de mouvement relatif barre-gousset, sinon ajustement de l'effort dans le dispositif provisoire de sorte à réaligner le repère.

IV.1.3. Ajout de matière

Il est facile de renforcer une structure métallique en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle (voir fig III.10). Cette facilité ne doit pas faire oublier les précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement.

Si l'on excepte certains cas particuliers où les efforts dus au poids propre sont nuls ou très faibles (ponts suspendus et viaduc métalliques démontables par exemple), il convient de soulager les efforts dans la structure lors du renforcement, de sorte que ce dernier participe au moins partiellement à la résistance sous poids propre. Pour ce faire, trois méthodes sont couramment utilisées [17] :

- Installation de l'ouvrage sur appuis provisoires. Mais cette méthode, simple et efficace, n'est que rarement envisageable pour d'évidentes raisons de site ;
- Mise en œuvre d'un précontraint provisoire. Lorsqu'il s'agit de renforcer une diagonale ou un montant, l'installation et l'ancrage de barres de précontrainte ne pose pas de problèmes majeurs dans les cas courants. Lorsqu'il s'agit de renforcer une membrure de poutre, l'ancrage des barres ou des câbles de précontrainte pose des problèmes

technologiques (difficulté pour ancrer un effort concentré en partie courante d'une membrure, problèmes d'encombrement aux abouts de l'ouvrage) ;

- Recours aux dénivellations d'appuis : cette méthode, facile à mettre en œuvre dans de nombreux cas, voit son domaine d'application limité par la résistance de la section sollicitée par les transferts d'efforts. L'augmentation des sections des membrures modifie la rigidité et la loi d'inertie de la structure, ce qui provoque une modification de la courbe des moments fléchissant et il convient d'en tenir compte dans le calcul. Il ne faut pas oublier de vérifier et éventuellement de renforcer les goussets d'attache. Il est inutile de prévoir des renforts en acier à haute limite élastique, les contraintes à ne pas dépasser en service normal étant limitées par la qualité des aciers en place.



Figure III.10. Ajout de matière sous la membrure inférieure entre lignes de rivets (Pont de Douarnenez) [17]

En ce qui concerne les dispositions constructives, il faut :

a) Eviter les concentrations de contraintes et les efforts parasites en délardant les extrémités des pièces de renfort, en meulant les extrémités des cordons de soudure, en réalisant l'attache des pièces de renfort dans des zones où l'effort est aussi faible que possible, en respectant le tracé des lignes d'épures, etc. ;

B) Eviter de créer des « pièges à eau » ; cette exigence est parfois en contradiction avec le maintien de la position des centres de gravité. La figure illustre cette contradiction le renfort de la membrure supérieure modifie la position du centre de gravité de cette membrure mais ne gêne pas l'évacuation des eaux de pluie. Le renfort de la membrure inférieure présente le défaut inverse. Dans le cas où il n'est pas possible de concilier les deux exigences, il y a lieu d'éviter

les pièges à eau et de réaliser un modèle de calcul tenant compte des excentricités des centres de gravité.

IV.1.4. Déconsolidation d'assemblages rivés

Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs rivets surcharge les rivets encadrant et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les rivets défectueux [17] :

- Soit par de nouveaux rivets au moins du diamètre immédiatement supérieur à ceux remplacés, posés avec soin,
- Soit, si l'on est dans l'impossibilité de poser de nouveaux rivets, par des boulons HR, à condition de remplacer tous les rivets constituant l'assemblage,
- Soit, dans le cas où le nombre de rivets à remplacer est faible, par boulons calibrés,
- Soit, par des boulons injectés.

L'alésage définitif avant la pose du rivet ou du boulon de substitution doit avoir fait complètement disparaître l'ovalisation éventuelle du trou engendrée par l'ébranlement

Il arrive fréquemment que l'état des pièces se soit dégradé dans le temps en raison de l'ébranlement ou que les rivets soient mal posés (voir fig III.14). D'autre part, l'enlèvement des anciens rivets et la pose de nouveaux, si ces opérations ne sont pas réalisées dans les règles de l'art, fatiguent toujours quelque peu le métal des pièces à assembler (chocs, déformations). Si bien qu'un tablier métallique peut se trouver en plus mauvais état après réparation qu'avant. Ces travaux doivent donc être réalisés par des entreprises qualifiées et nécessite une surveillance continue [17].

- Les réparations des ébranlements nécessitent toujours une étude préalable en vue de déterminer [17] :
- S'il est nécessaire, pour éviter le retour de l'avarie, de réaliser un renforcement de l'assemblage (par exemple : établissement d'une continuité entre longerons, pose d'un raidisseur sous dispositif d'attache de voie),
- Si le diamètre du rivet ou boulon définitif est compatible avec les règles de trusquinage (pas, pince). Dans le cas contraire, il y aurait lieu de remplacer les pièces concernées.



Figure III.11. Rivet défectueux [17]

IV.1.5. Limiter la corrosion

La corrosion sera fortement accélérée si on laisse s'accumuler les saletés sur l'élément considéré. Il est nécessaire de balayer, de nettoyer les surfaces à l'air comprimé ou par aspiration ; aux endroits accessibles, il faut le faire souvent et aux endroits moins accessibles, à l'intervalle régulier [31].

IV.1.5.1. La peinture :

La peinture est le monde universel de protection de l'acier contre la corrosion. Il convient d'abord de nettoyer la surface et de la protéger des particules pouvant s'y déposer (voir fig II.12). La longévité du revêtement dépend de la préparation de la surface, la durée de la protection étant d'autant plus longue que le nettoyage a été plus soigné [31].



Figure III.12. Application d'une peinture anti corrosion [32]

Après le nettoyage il faut [31] :

- Appliquer la première couche de peinture avant que la surface puisse être salie à nouveau ;
- Vérifier après chaque couche de peinture qu'il ne reste pas de vides, de manques et de cloques qu'il conviendrait de retourner (Les couches successives doivent avoir des couleurs différentes pour faciliter les vérifications) ;
- Vérifier l'épaisseur des différentes couches ;

IV.1.5.2. Gainage :

On peut assurer une protection permanente en gainant l'élément tout entier avec du béton ou de la matière plastique ou en l'entourant d'un manteau de métaux non ferreux [31].

- *Béton :*

Le gunitage est une sorte de béton qui est projeté contre les surfaces (voir fig III.13). Il existe deux méthodes.

- Pour la variante sèche, l'eau n'est ajoutée que dans le tuyau d'injection de la lance. Le mélange n'a lieu que lorsque le gunitage adhère sur la surface.
- Pour la méthode humide, le ciment est mélangé à l'avance avec de l'eau et seulement alors conduit dans le tuyau, et c'est uniquement de l'air sous haute pression qui est ajouté. Le gunitage s'applique bien sur un armement placé à l'avance.



Figure III.13. Gainage [13]

- *Revêtement bitumineux armé :*

Ces revêtements forment une excellente protection contre la corrosion et sont couramment employés pour gainer les éléments enterrés dans les sols fortement corrosifs.

Les revêtements bitumineux armés sont surtout utilisés pour protéger les canalisations, les tirants et assemblages qui servent à ancrer les ouvrages de soutènement.

Le travail consiste à revêtir la surface métallique à protéger d'une couche d'impression de goudron, à la vernisser et à recouvrir le tout d'une ou plusieurs enveloppes spiralées de feutre ou d'autre matériau approprié, saturé d'un mélange imperméable à base de bitume [31].

IV.1.6. Lutte contre l'humidité :

- Dans la plupart des cas, il suffit d'améliorer l'entourage immédiat du bâtiment pour évacuer l'eau loin du mur le plus vite possible, en révisant les pentes de terrain avoisinant [31].
- Les matériaux utilisés dans les parties du mur qui sont au contact du sol, ne doivent pas être poreux ni présenter la caractéristique de retenir l'eau, comme les enduits plâtre par exemple [33].
- Les murs doivent respirer et être ventilés. Une bonne ventilation des caves et le remplacement des enduits à la chaux sont à préconiser [31].

IV.1.7. Remèdes contre les infiltrations des eaux :

Des ruptures dans l'étanchéité provoquent l'infiltration de l'eau. Il en est de même lorsque l'étanchéité laisse à désirer dans le voisinage des souches ou lorsque les gouttières ou les descentes d'eaux pluviales sont bouchées ou abîmées.

Le nettoyage et la remise en état de tous ces ouvrages suffiront pour remédier à la pénétration de l'eau [31].

IV.1.8. Entretien

La planification d'un programme d'entretien périodique représente une pratique très efficace pour retarder l'apparition des dégradations. L'entretien périodique des ouvrages concerne [13] :

- Nettoyages (évacuations EP, rigoles fenêtres, démoussages)
- Graissage des articulations (quincailleries)
- Rénovation des finitions protectrices, des joints d'étanchéité
- Surveillance des relevés d'étanchéité
- Surveillance de l'évolution des fissures et déformations, ...

IV.1.9. Micro -pieux :

La technique des micro -pieux consiste à exécuter des pieux de faible diamètre (60 à 250mm), forés à l'aide d'outils permettant de traverser et d'identifier, avec le même matériel, la roche, la maçonnerie, le béton et les couches de sol justifiant la consolidation (voir fig III.14).

Dans la majorité des cas, les micro - pieux sont forés par rotation. Ce procédé de forage est parfaitement adapté à la reprise en sous-œuvre au voisinage d'ouvrages existants.

Le bétonnage des micro- pieux s'effectue généralement en pression et on utilise un béton fortement dosé en ciment. Ce procédé confère aux micro -pieux une très grande adhérence au terrain et une bonne résistance. D'où une charge portante par frottement latéral élevée par rapport à leur section [31].

La disposition et le nombre des micropieux sont directement fonction des qualités des fondations auxquelles on doit les associer. On peut [31] :

- Soit les sceller à la maçonnerie existante, à l'intervalle défini, par une voûte de décharge de micro -pieu à micro -pieu ;
- Soit créer une structure additionnelle pour obtenir un écartement plus grand entre micro -pieux ; mais sa réalisation nécessite des travaux de démolition et de déblais plus important ; de plus, elle est souvent difficile à intégrer dans la fondation existante.

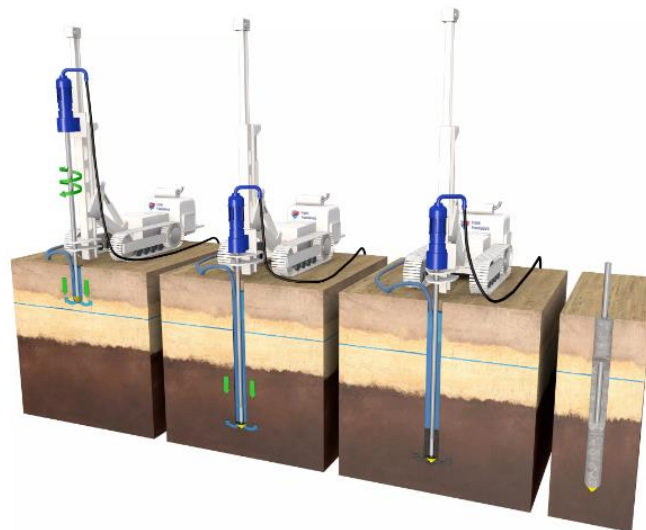


Figure III.14. Etapes de réalisation des micropieux [34]

Il s'agit d'une technique délicate dont le prix est relativement élevé. Toutefois, la mesure où la reprise en sous-œuvre des fondations nécessite de descendre à plus de 3m de profondeur, les micro -pieux sont compétitifs.

Le faible encombrement du matériel à utiliser permet de résoudre le problème des accès difficiles et des volumes de manœuvre exigus.

On y a souvent recours en cas de sinistres (tassements en cours de construction, désordres après affouillements limitrophes,), pour le renforcement de monuments historiques ou pour la reprise de fondations profondes [31].

IV.1.10. Injections de sol :

La technique consiste à combler par injection sous pression les vides ou fissures du sol afin d'augmenter sa résistance à la compression (voir fig III.15) .

Les produits d'injection sont, selon les cas, constitués de coulis de ciment éventuellement additionné de pouzzolanes de cendre volante, de plastifiant et d'accélérateur de coulis d'argiles colloïdale ou de bentonite, de coulis à base de produit chimique liquide ou de résines organiques [31].



Figure III.15. Injection du sol [35]

Cette technique permet [31] :

- De combler en sous-sol les vides qui n'auraient pas été détectés au moment de la construction ou qui se serait produit après coup, sous l'effet de venues d'eau par exemple ;
- D'augmenter, si nécessaire la compacité des sols sous radier de fondation.

Simple dans son principe, elle doit cependant n'être appliquée qu'en tenant compte des conditions particulières à chaque cas. Elle n'est notamment pas utilisable dans tous les sols, certain n'étant pas injectable et d'autres risquant d'absorber des volumes énormes de coulis sans aucun effet de consolidation. Elle nécessite par ailleurs de grande précaution lors de sa mise en œuvre (risque de fissuration du bâtiment traité ou de désordre dans les bâtiments voisin).

Cette technique ne peut donc être appliquée avec succès et économie qu'après une sérieuse étude géologique et uniquement par entreprise spécialisée ayant une grande expérience dans ce domaine.

V. Conclusion

Ce chapitre souligne l'importance d'un diagnostic précis et détaillé comme première étape indispensable pour toute opération de réparation ou de renforcement des structures. La mise en place d'outils standardisés comme la fiche d'évaluation permet une gestion plus efficace des informations recueillies et une planification stratégique des interventions. Les techniques de réparation et de renforcement, lorsqu'elles sont bien appliquées, prolongent significativement la durée de vie des structures et assurent leur sécurité.

Chapitre IV : Evaluations des structures métalliques existantes

I. Introduction

Dans ce chapitre, la fiche d'évaluation présentée ci-dessus (voir chapitre trois) est mise en exercice, à cet effet, deux constructions implantées dans la wilaya de Tizi Ouzou sont expertisées. Pour chacune des deux structures (Structure 01 : La passerelle qui relie la nouvelle station de bus à la nouvelle ville ; Structure 02 : Hall métallique du campus universitaire Oued-Aissi), et pour chaque composant, l'importance de (s) désordre (s) est estimée. En fonction de la nature, l'emplacement et la gravité de la pathologie, les causes probables et les solutions adéquates sont proposées.

Partie 01 : Evaluation d'une passerelle

La passerelle qui relie la nouvelle station de bus et la nouvelle ville de Tizi Ouzou est une liaison très importantes. Chaque jour plusieurs centaines de passagers l'utilise comme un moyen de déplacement sécurisé pour accéder à la ville.



Figure IV.1. La passerelle reliant la station de bus à la nouvelle ville de T.O.

II.1. Les désordres constatés lors de l'inspection visuelle de la passerelle

➤ Les fondations :



Figure IV.2. Présence des fissurations

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.2)

Pathologie : Fissures et éclatement du béton.

Cause : Mauvaise adhérence entre les deux mortiers (lors de la mise en œuvre du mortier négligence du nettoyage de la surface du béton).

Conséquence : Infiltration d'eau, aggravement des fissures donc corrosion des pieds de poteaux.

Solution : Traitement de surface du béton existant et coulage d'un autre mortier pour garantir l'étanchéité.

➤ **Eléments porteurs**

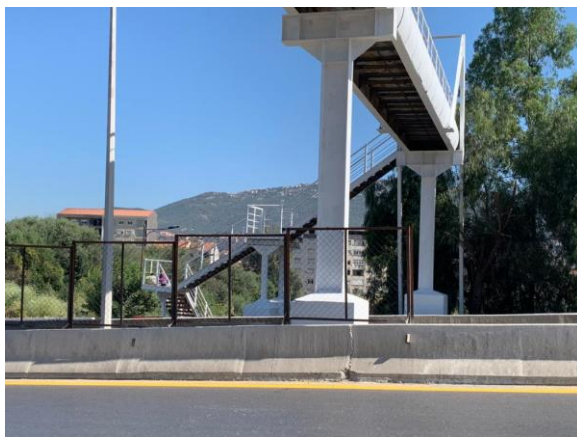


Figure IV.3.a. Coté menant à la ville



Figure IV.3.b. le côté menant à la gare

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.3.a et IV.3.b)

Pathologie : Vibrations importantes sur le côté menant à la gare lord de l'exploitation.

Cause : Cause probable (erreur de calcul).

Conséquence : Instabilité d'une partie d'un ouvrage.

Solution : Avant de passer à l'action mener des enquêtes plus profonde pour mieux designer la cause du désordre.

➤ Planchers



Figure IV.4. Présence de corrosion

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.4)

Pathologie : La présence de corrosion dans les éléments de la structure (poutre principale, solives,...) ; et des détériorations (manque de matières).

Cause : Accumulation d'eau de pluie, absence d'évacuation d'eau et négligence d'entretien.

Conséquence : Dégradation de la structure suite à la corrosion de ses composants (solives, traverse,).

Solution : Evacuation des eaux et organisation d'un programme d'entretien périodique (Brossage, peinture de protection).

➤ Escalier



Figure IV.5. Présence des pièges a eaux et des pièges a poussières



Figure IV.6. Présence importante de corrosion

✚ **Analyse :** Représente (fig IV.5, fig IV.6)

Pathologie : Présences des pièges à eau et des pièges à poussières et corrosion avancée

Cause : Accumulation d'eau de pluie, absence d'évacuation d'eau et manque d'entretien

Conséquence : Présence importantes de corrosion et des détériorations dans les gérants (manque de matières)

Solution : Ajout de matière (soudures de plaque), remplacement des gérants endommagés, évacuation des eaux et organisation d'un programme d'entretien (peinture de protection, entretien périodique).

II.2. Fiche d'évaluation de la passerelle

Fiche d'évaluation des structures métalliques de Tizi-Ouzou

Inspecteur : KANA Nabila

Date : 30/05/2024

Identification de la construction

Adresse : **La passerelle reliant la nouvelle station de bus à la nouvelle ville de TIZI-OUZO**

Position GPS : 36.692778,4.050028

Usage de la construction

Habitation « Collectif Individuel » / Commercial / Habitation & Commercial / Scolaire / Sportif / Hospitalier / Industriel / Socioculturelle / Administration / Réservoir d'eau / Autres

Description de la construction

Année de construction : 2008	Vide sanitaire : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>	H RDC : /
Nombre de niveau : 01	Sous-sol : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/> /Nbr :....	m
Joint de dilatation : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/> /E _p :.....	Entre-sol : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/> /Nbr :....	H Étage : / m
Nombre de niveau :		H Niveau-inf : / m

Régulière en plan : Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Réalisation : Entreprise qualifiée <input checked="" type="checkbox"/>	Calculée au séisme: Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Régulière en élévation : Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Entreprise quelconque <input type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/>	Contrôlée par le CTC: Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>

Sol de la construction

Site : Rocheux (S1) <input type="checkbox"/> Ferme (S2) <input type="checkbox"/> Très meuble (S3) <input type="checkbox"/> Meuble (S4) <input type="checkbox"/>	Glissement : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/> Liquéfaction : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>	Affaissement : Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>
---	--	---

Inspection de l'infrastructure

Semelle Isolée <input checked="" type="checkbox"/> Semelle Filante <input type="checkbox"/> Radier général <input type="checkbox"/> Pieux en BA <input type="checkbox"/>	Description : présence des fissures due à une mauvaise adhérence entre les deux mortiers.
---	---

Inspection de la superstructure

<u>Éléments porteurs</u> Poteaux métalliques <input checked="" type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/>	Accessibilité : Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input checked="" type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Description : on remarque que l'état de la structure est moyen à mauvais et des vibrations importantes lors de l'exploitation.
--	---

Autres indications : Poteau court / Nbr de P-C : **05** / Niveau : **01** /

<u>Planchers</u> Corps creux <input type="checkbox"/> Dalle pleine <input type="checkbox"/> Plancher mixte <input type="checkbox"/> Autres <input checked="" type="checkbox"/>	Accessibilité : Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Moyen <input checked="" type="checkbox"/> Description : La présence de corrosion dans les éléments de la structures (solives, traverse,.....). La présence des pièges à eau et à poussières.
--	--

<u>Contreventement</u> Portique ductile <input type="checkbox"/> Portique ordinaire <input type="checkbox"/> palée triangulée en X <input type="checkbox"/> Palée triangulée en V <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/>	Accessibilité : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Description:.....
--	--

<u>Toiture :</u> Couverture métallique <input type="checkbox"/> Couverture en bois <input type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/>	Accessibilité : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> / Etat : Bon <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Description:.....
---	--

<u>Escalier</u> Béton Armé <input type="checkbox"/> Métallique <input checked="" type="checkbox"/> Bois <input type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/>	Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input checked="" type="checkbox"/> état moyen <input type="checkbox"/> Description : Présence importantes de corrosion et une grande détérioration qui se localise plus précisément dans les gérants. Présence des pièges à eau et des pièges à poussières.
<u>Balcon</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Main courante</u> Bon état <input checked="" type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Acrotère</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Corniche</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Cheminée</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Plafond</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Mur Intérieur</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Élément vitré</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Structure voisine</u> Danger permanent <input type="checkbox"/> Aucun danger <input checked="" type="checkbox"/>	Description :
<u>Autres indications</u> : Négligence total d'entretien (peinture de protection, entretien régulier)	
Structure : Invulnérable <input type="checkbox"/> Vulnérable <input checked="" type="checkbox"/>	Nombre de Logements :/Nombre de passagers :incomptable. Indications :Enfants :/Vieux:/Handicapés:
Une évaluation profonde est nécessaire : Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
<u>Autres informations</u> :	

II.3. Interprétation des résultats :

Après inspection visuelle de la structure et en se référant aux différents critères donnés dans la fiche ci-dessus, globalement, la structure peut être classée vulnérable (par rapport à son exploitation), cette classification peut se justifier par l'état des éléments structuraux (planchers, escalier, poteaux). Une étude plus avancée est jugée nécessaire pour détecter l'origine des vibrations importantes au niveau du côté menant à la gare.

Partie 02 : Evaluation d'un hall métallique

Le hall métallique d'Oued Aissi est un espace pédagogique, où chaque jour, une vingtaines d'étudiants se présentent pour effectuer leurs travaux pratiques en utilisant des machines et des équipements mécaniques et électriques.



Figure IV.7. Le hall métallique du campus universitaire Oued Aissi

III.1. Les désordres constatés lors de l'inspection visuelle du hall métallique

➤ Eléments porteurs



Figure IV.8.a. Évacuation des eaux sur le pied de poteau



Figure IV.8.b. Présence de pièges à poussières



Figure IV.8.c. Perte de matière



Figure IV.8.d. Poteaux exposés à l'environnement (contact direct avec le sol)

+ **Figure IV.8.** Etat des poteaux

+ **Analyse :** Représente (fig IV.8)

Pathologie : Corrosion avancée

Cause : Manque de protection (contact direct avec le sol, infiltration des eaux de pluie), évacuation des eaux de pluie sur le pied de poteau, une erreur de conception ou d'exécution

Conséquence : Corrosion partielle des poteaux, perte de matière,

Solution : Protection des poteaux (peinture anti corrosion, enrober les partie poteaux avec du béton pour les bien recouvrir). Il faut aussi dégager la terre au tour des poteaux et refaire la fondation ou prévoir un coulage jusqu'au niveau du 00m

➤ **Plancher**



Figure IV.9. Détérioration au niveau du carrelage et décollement des plintes

✚ **Analyse :** Représente (fig IV.9)

Pathologie : Détérioration au niveau du carrelage et décollement des plintes.

Cause : Erreur d'exécution, mauvaise adhérence entre le mortier de pose et le béton, problème du tassement.

Conséquence : Endommagements du plancher et infiltration des eaux,

Solution : Réparation des endroits détériorés.

➤ **Toiture**



Figure IV.10. Présence légère de corrosion

✚ **Analyse :** Représente (fig IV.10)

Pathologie : Corrosion légère

Cause : Discontinuité matérielle due à la mauvaise exécution du joint de couverture.

Conséquence : Infiltration des eaux et corrosion.

Solution : Remplacement du joint.

➤ **Escalier**

❖ **Escalier intérieur**



Figure IV.11. Présence des pièges à poussières

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.11)

Pathologie : Présence de pièges à poussières

Cause : Manque d'entretien.

Conséquence : Corrosion.

Solution : Organisation d'un programme d'entretien régulier.

❖ **Escalier extérieur**



Figure IV.12. Présence de corrosion avancée.

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.12)

Pathologie : Corrosion avancée.

Cause : Accumulation d'eau de pluie et absence de système d'évacuation des eaux.

Conséquence : Dégradation totale des escaliers, manque de matière, réduction de la section et infiltration des eaux.

Solution : Evacuation des eaux, peinture anti corrosion, remplacement des gérants endommagés, ajout de matière pour les endroits détériorés (Exemple : soudé une plaque d'acier)

➤ **Murs extérieurs**



Figure IV.13. Présences de fissures et de moisissures sur les murs extérieurs.

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.13)

Pathologie : Présences de fissures et de moisissures sur les murs extérieurs

Cause : Manque d'entretien, mauvaise connexion entre les éléments de brique.

Conséquence : Dégradation partielle des murs.

Solution : Refaire la façade avec un traitement particulier (une peinture étanche).

➤ **Murs intérieurs**



Figure IV.14. Fissuration et dégradation des murs intérieurs.

Analyse : Représente (fig IV.14)

Pathologie : Fissuration et dégradation des murs intérieurs.

Cause : Infiltration des eaux, mauvaise connexion entre murs adjacent, mauvaise exécution et mauvaise connexion entre les éléments de brique.

Conséquence : Dégradation des murs

Solution : Démolir et reconstruire le mur, injection du béton à l'intérieur les fissures.

➤ **Autres indications**

❖ **Boulons**



Figure IV.15. Dessérage des boulons



Figure IV.16. Absence de rondelle de boulon dans certains cas.



Figure IV.17. Cisaillement des boulons.

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.15, IV.16 et IV.17)

Pathologie : Desserrage des boulons, certains boulons ont des rondelles et d'autres non, cisaillement des boulons.

Cause : Erreur de mise en œuvre et manque de control.

Conséquence : disfonctionnement (total ou partiel) de la structure, rupture au niveau des points de jonction.

Solution : Remplacement des boulons et traitement des assemblages.

❖ **Pont roulant**



Figure IV.18. Présence de corrosion



Figure IV.19. Infiltration des eaux

✚ **Analyse :** Représente (fig IV.18 et IV.19)

Pathologie : Corrosion avancée

Cause : Infiltration des eaux de pluie.

Conséquence : Corrosion et détérioration (manque de matière).

Solution : réparation des système d'évacuation des eaux et peinture anti corrosion

❖ **Soudures**



Figure IV.20. Modification sans remettre la peinture de protection

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.20)

Pathologie : Négligence de protection (peinture anti corrosion).

Cause : Elément exposé aux facteurs externes.

Conséquence : Corrosion.

Solution : Appliqué une peinture anti corrosion.



Figure IV.21. Assemblage mal fait (soudure, boulons)

✚ **Analyse** : Représente (fig IV.21)

Pathologie : Assemblage mal fait (soudure et boulons) et corrosion.

Cause :

- Les trous de la poutre d'escalier sont beaucoup plus larges que la tête du boulon utilisé et les soudures sont mal faite.

Conséquence : Un mode de ruine inattendu dans l'assemblage.

Solution : Remplacement des éléments corrodés et non conforme à l'étude.

III.2. Fiche d'évaluation du hall métallique

Fiche d'évaluation des structures métalliques de Tizi-Ouzou

Inspecteur : KANA Nabila

Date : 02/06/2024

Identification de la construction

Adresse : **Hall métallique à Campus OUED AISSI**

Position GPS : 36.699734,4.102059

Entreprise :/ B.E.T :

Usage de la construction

Habitation « Collectif Individuel » / Commercial / Habitation & Commercial / Scolaire / Sportif / Hospitalier / Industriel / Socioculturelle / Administration / Réservoir d'eau / Autres

Description de la construction

Année de construction : **1990**

Nombre de niveau : **02**

Joint de dilatation : Oui Non / E_p :

Vide sanitaire : Oui Non

Sous-sol : Oui Non / Nbr : ...

Entre-sol : Oui Non / Nbr : ...

H RDC : / m

H Étage : / m

H Niveau-inf : / m

Régulière en plan : Oui Non

Régulière en élévation : Oui Non

Réalisation : Entreprise qualifiée

Entreprise quelconque Autres

Calculée au séisme: Oui Non

Contrôlée par le CTC: Oui Non

Sol de la construction

Site : Rocheux (S1) Ferme (S2)

Très meuble (S3) Meuble (S4)

Glissement : Oui Non

Liquéfaction : Oui Non

Affaissement : Oui Non

Inspection de l'infrastructure

Semelle Isolée Semelle Filante

Radier général Pieux en BA

Description : Y'avais pas d'accès au fondation

Inspection de la superstructure

Éléments porteurs

Poteaux métalliques

Autres

Accessibilité : Oui Non / Etat : Bon Mauvais Moyen

Description : vis-à-vis des poteaux on note leurs état moyenne par contre l'état de leurs bases est mauvais. En observant plusieurs phases de corrosion.

Autres indications : Poteau court / Nbr de P-C : 02 / Niveau : 02 /

Planchers

Corps creux

Dalle pleine

Plancher mixte

Autres

Accessibilité : Oui Non / Etat : Bon Mauvais Moyen

Description : on remarque quelques détériorations au niveau des carrelages et décollement des peintures ce qui permet la pénétration des eaux.

Contreventement

Portique ductile

Portique ordinaire

Palée triangulée en X

Palée triangulée en V

Autre

Accessibilité : Oui Non / Etat : Bon Mauvais Moyen

Description:.....
.....
.....

Toiture :

Couverture métallique

Couverture en bois

Autres

Accessibilité : Oui Non / Etat : Bon Mauvais Moyen

Description : La présence légère de corrosion dans les éléments de la toitures TN40/les pannes.

<u>Escalier</u> Béton Armé <input type="checkbox"/> Métallique <input checked="" type="checkbox"/> Bois <input type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/>	Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/> état moyen <input checked="" type="checkbox"/> Description : Escalier intérieur : présences des pièges à poussières. - Escalier extérieur : présences des pièges à eau, corrosion avancée.
<u>Balcon</u> Bon état <input checked="" type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description : Négligence d'entretien.
<u>Mur extérieurs</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input checked="" type="checkbox"/>	Description : présences des moisissures dans les murs et des fissurations.
<u>Acrotère</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Corniche</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Cheminée</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Plafond</u> Bon état <input checked="" type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/> Etat moyen <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Mur Intérieur</u> Bon état <input type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/> Etat moyen <input checked="" type="checkbox"/>	Description : présences des fissures importantes dans les murs.
<u>Élément vitré</u> Bon état <input checked="" type="checkbox"/> Mauvais état <input type="checkbox"/>	Description :
<u>Structure voisine</u> Danger permanent <input type="checkbox"/> Aucun danger <input checked="" type="checkbox"/>	Description :
Autres indications : desserrages et cisaillement des boulons, ya certains de boulons ont une rondelles et ya d'autre non, fissures de soudures	
Structure : Invulnérable <input checked="" type="checkbox"/> Vulnérable <input type="checkbox"/>	Nombre de Logements :/Nombre d'étudiants :20 étudiants. Indications :Enfants : /Vieux:...../Handicapés:.....
Une évaluation profonde est nécessaire : Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
Autres informations :	

III.3. Interprétation des résultats :

Après inspection visuelle de la structure en se référant aux critères données par la fiche ci-dessus, on classe la structure comme vulnérable (par rapport à l'exploitation du lieu) à cause de l'état des éléments de la structure (escaliers extérieurs, murs intérieurs, base des poteaux, les assemblages).

Une étude précise et juger nécessaire pour détecter les causes principales des différentes pathologies affronter durant cette dernière.

IV. Conclusion

Les évaluations ont révélé des vulnérabilités significatives dans la passerelle et le hall métallique. Ces structures présentent des risques pour la sécurité et nécessitent une étude approfondie pour déterminer les réparations nécessaires. Il est impératif de prendre des mesures correctives rapidement pour garantir la sécurité des utilisateurs et la durabilité des structures. Un suivi régulier et un entretien rigoureux seront essentiels pour prévenir de futurs problèmes.

Conclusion Générale

Ce mémoire a mis en évidence l'importance cruciale d'une gestion proactive et rigoureuse des structures métalliques. Les pathologies identifiées peuvent avoir des répercussions significatives sur la fonctionnalité des constructions et la sécurité des usagers, rendant indispensable l'utilisation de méthodes de diagnostic précises et de techniques de réparation adéquates. La fiche d'évaluation proposée constitue un outil précieux pour les ingénieurs, facilitant une évaluation systématique et cohérente des structures métalliques.

Les études de cas sur les deux structures (*la passerelle et le hall métallique*) ont démontré que l'application pratique des concepts théoriques et des outils développés, soulignant la nécessité d'une attention continue et d'interventions appropriées pour maintenir la sécurité et la performance des structures métalliques.

La complexité et l'importance de ce domaine offrent un vaste champ de recherche, particulièrement dans le développement de nouvelles technologies de surveillance et de matériaux innovants pour la réparation et le renforcement des structures métalliques.

De cette étude, une compréhension approfondie des pathologies des constructions métalliques et l'application de techniques adéquates de diagnostic et de réparation sont essentielles pour prolonger la durée de vie de ces structures et garantir leur sécurité. Nous encourageons vivement les étudiants à continuer cette recherche, car l'amélioration de nos connaissances et de nos techniques dans ce domaine est cruciale pour l'avenir de l'ingénierie structurelle.

Liste Bibliographique

- [1] DAHMANI, Lahlou., (2019), *Calcul des éléments de construction métallique selon l'Eurocode 3*. Université Mouloud MAMMERRI de Tizi Ouzou, Algérie.
- [2] MATMOUR., Ghlamallah, (2019), *Cours charpente métallique*. Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie.
- [3] Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM) Espace Technologique, (2008). L'orme Des Merisiers - Immeuble Apollo F - 91193 Saint-Aubin, France
- [4] BENSALAH, Mohamed Draïdi., (2014). *Cours charpente métallique*. Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique de Blida, Algérie.
- [5] BEN JDIDIA, Mounir., (2014), *Cours de charpente métallique*. Ecole nationale d'ingénieurs de SFAX, Tunisie.
- [6] (1997) Construction métallique. La société SN ID. Val de Loire, France
- [7] ALLALA, Faouzi., (2005), *Cours d'ouvrages d'art*. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Tunisie.
- [8] MARON, Philippe., (2024) *Cours construction métallique*. Université de Pau et Des Pays de L'Adour, France.
- [9] LOGBI, Abdelaziz., (2020) *Cours construction métallique*. Université Chahid Hamma Lakhdar El-Oued, Algérie.
- [10] BANOUNE, Brahim., *Cours Construction Métallique*. Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie.
- [11] KHALDI, Nacera., (2022). *Cours Charpente métallique*. Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie.
- [12] MONTASSAR, Sami., (2013). *Cours de construction métallique*. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

- [13] ROUAIGUIA, Assia., (2023). *Cours de construction métallique*. Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie.
- [14] BECHEUR, Abdelhamid., (2010). *Pathologies des constructions métalliques*. Les journées techniques d'Organisme National de Contrôle Technique de la Construction (CTC). Université Abderrahmane Mira Bejaia, Algérie.
- [15] AKKOUCHE, Karim., (2020). *Développement d'un système Expert pour la réhabilitation des structures endommagées par des séismes*. Thèse de doctorat. Université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou, Algérie.
- [16] Centre technique de la construction métallique « CTICM », (2023). *Documents techniques*. France.
- [17] Jean-Paul PERSY., (2014). *Guide FAME 2 : Réparation et rénovation des structures métalliques*. France.
- [18] DUFY, Mark. *Maison abandonnée toit s'est effondré dans la ville pittoresque de la Saskatchewan, Canada*.
- [19] BOUMEHRAZ, Mohammed- Amin & MELLAS, Mekki., (2015). *Diagnostic des dégradations des structures métalliques sous l'effet de corrosion dans la région de Jijel*. 2^{ème} Conférence Internationale de Mécanique (ICM'15). Constantine, Algérie. 289-294.
- [20] NIKHINSON Julia., (2024). *Effondrement du pont de Baltimore : création d'un premier couloir de navigation à travers les décombres*. États-Unis.
- [21] ALLAIN., Camille, (2024). *Arraché par un camion hors gabarit, un pont s'effondre*. Ille-et-Vilaine. France.
- [22] DJAFAR HENNI, Imane., (2022). *Cours Pathologies et Réhabilitation des Structures*. Université Hassiba Benbouali Chlef, Algérie.
- [23] GUELMINE, Layachi., (2019). *Cours Pathologies des Constructions*. Université Mohamed El Bachir El Ibrahim – Bordj Bou Arreridj, Algérie.

- [24] CHABBI, Radhia ; FERHOUNE, Noureddine & BOUABDALLAH, Fouzia., (2018). *Pathologies, diagnostic à l'aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé état de l'art*. Université Larbi Ben Mhidi, Oum El Bouaghi, Algérie.
- [25] Peter H. EMMONS., (1994). *Concrete Repairer and maintenance illustrated*. R.S. MEANS COMPANY, ING., Construction Published & Consultations, Construction Plaza, P.B. Kingston, MA 02364-0800.
- [26] BOUCHALA, Tarek., (2008). *Modélisation semi-analytique des courants de Foucault, application au contrôle non destructif par des capteurs à noyau de ferrite*. Thèse de doctorat. Université El hadj Lakhdar Batna, Algérie.
- [27] stratégies de maintenance. *Les contrôles non destructifs*. BTS MI. France
- [28] BEYER, André., (2020). *Essais non destructifs d'assemblages soudés*. Article technique Centre technique industriel de la construction métallique(CTCIM). France.1090-2
- [29] Bouyer Hervé., (2024). *Les contrôles non destructifs*. Article technique Alticontrol. NANTES, France.
- [30] El GHOUL, Islam Nacereddine., (2016). *Réalisation d'un banc d'essais pour l'inversion des signaux en contrôle non destructif par courants de Foucault*. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.
- [31] OUZAA, Keira., (2015). *Cours réhabilitation des structures*. Université des sciences et de la technologie. Université Mohamed BOUDIAF d'Oran, Algérie.
- [32] *Peinture de protection anti corrosion*. Condamin signalisation marquage service. Saint-Etienne, France.
- [33] JASKOWSKA, (1997). *La réhabilitation des murs extérieurs et refends*. Encyclopédie du bâtiment, Tome 2, Editions WEKA, (1-2172, 16-2172)
- [34] DELENS, Jacques., (2024) . *Micropieu graphique d'exécution*. Atlas fondation. France
- [35] Clément Fayat (2023). *Injection du sol*. SEFI-INTAFOR. Gustave Eiffel, France