

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES

En : Génie Civil

Spécialité : Génie Civil

Par : DEBBAL MOHAMMED ZAKARIA

Sujet

Méthodologie de prédiction de la durée de vie d'un ouvrage d'art

Soutenue publiquement, le 04 / 12 / 2025 , devant le jury composé de :

M. HAMZAOUI Fethi	MCA, Université de Tlemcen	Président
M. BOUMECHRA Nadir	Professeur, Université de Tlemcen	Directeur de thèse
M. LABBACI Boudjemaa	Professeur, Université de Bechar	Examineur
M. BARAKA Abdelhak	MCA, Université de Bechar	Examineur

Dédicaces

Ce mémoire est dédié

À la mémoire de mes très chers parents, dont l'amour et le soutien inconditionnels ont été les fondements de mon parcours. Leur sagesse et leurs valeurs inculquées continuent à m'inspirer chaque jour.

À ma chère épouse, FAIZA, pour sa patience, son encouragement et son amour indéfectible.

A mes chères filles Amel Nihel, Fatima Zohra Ibtihel et à mon cher fils Mohammed Yahia. Vous êtes la joie de ma vie et ma plus grande fierté.

A tous mes frères et sœurs, beaux-frères et belles-sœurs, neveux et nièces.

A toute la famille DEBBAL et LALLAM.

A tous mes amis et collègues au département d'hydraulique, au département de Génie Civil et à la SEROR Tlemcen.

A tous ceux qui me sont chers

Mohammed Zakaria DEBBAL

Remerciements

Louange à Allah de m'avoir donné la volonté, le courage, la patience et la persévérance pour accomplir ce travail.

Tout d'abord, je voudrais souligner que la réalisation de ce mémoire n'a été possible que grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute mes remerciements et ma gratitude.

Je voudrais d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse monsieur BOUMECHRA Nadir, pour la confiance qu'il m'a accordé, pour sa disponibilité, pour ses précieux conseils, ses orientations et ses encouragements continus.

Je remercie particulièrement monsieur HAMZAOUI Fethi de m'avoir toujours encouragé à mener ce travail. Je le remercie également d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je voudrais également remercier monsieur LABBACI Boudjemaa et monsieur BARAKA Abdelhak pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je tiens aussi à témoigner toute ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département d'Hydraulique et je tiens à leur dire que c'est un grand plaisir de travailler avec eux.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à tous les ingénieurs, projeteurs et membres du personnel de la SEROR, chacun par son nom. Je vous remercie pour votre aide précieuse, votre contribution, vos conseils avisés, votre investissement et votre soutien inestimable.

Mes derniers remerciements, les plus vifs, vont à ma chère épouse, qui m'a incité à continuer la recherche, qui m'a énormément aidé, conseillé, soutenu et encouragé sans limite.

Résumé :

La performance, la durabilité et la sécurité d'un pont sont influencées par un ensemble complexe de phénomènes et de paramètres reliés et interconnectés.

Cette étude vise à élaborer un modèle d'évaluation de l'état général des ponts en béton armé, en considérant divers facteurs de dégradation liés aux spécificités du pont lui-même ou à son environnement.

Afin d'intégrer les deux catégories de critères, internes et externes, nous avons identifié et considéré 30 facteurs liés à la dégradation. La méthode AHP a été employée pour évaluer l'importance relative de chaque facteur en calculant leur poids respectif. Sur la base de ces facteurs, nous déterminons un indice global de dégradation qui reflète l'état général du pont. Cet indice nous permet de classer les ponts selon un éventail allant de l'absence de danger à un état critique nécessitant une intervention urgente. Nous avons appliqué ce modèle sur trois ponts en Algérie et nous avons constaté des résultats satisfaisants.

L'innovation de notre modèle réside dans sa capacité à fournir une estimation quantifiée, numérisée et personnalisée de l'état de dégradation d'un pont. Il est souple et évolutif et peut intégrer un très grand nombre de facteurs et de critères. Il est aussi prédictif et permet d'anticiper l'évolution de la dégradation d'une structure ce qui est essentielle pour planifier efficacement les opérations de maintenance.

L'objectif ultime est de fournir aux gestionnaires un outil d'appréciation et de comparaison pour évaluer l'état des ponts et envisager les actions nécessaires quant à leur entretien, leur réparation ou leur remplacement, contribuant ainsi à l'amélioration de la gestion et de la sécurité des infrastructures routières.

Mots-clés: Ponts en béton armé, dégradation et durabilité des ponts, processus de hiérarchie analytique (AHP), facteurs internes et externes, études de cas en Algérie.

Abstract:

The performance, durability, and safety of a bridge are influenced by a complex set of interrelated and interconnected phenomena and parameters. This study aims to develop a model for assessing the overall condition of reinforced concrete bridges, considering various degradation factors related to the specifics of the bridge itself or its environment.

To integrate both categories of criteria, internal and external, we identified and considered 30 factors related to degradation. The AHP method was employed to evaluate the relative importance of each factor by calculating their respective weights. Based on these factors, we determine an overall degradation index that reflects the general state of the bridge. This index allows us to classify bridges on a spectrum ranging from no danger to a critical state requiring urgent intervention. We applied this model to three bridges in Algeria and found satisfactory results.

The innovation of our model lies in its ability to provide a quantified, digitized, and customized estimate of a bridge's degradation state. It is flexible and scalable, capable of integrating a vast number of factors and criteria. It is also predictive, allowing for the anticipation of the evolution of a structure's degradation, which is essential for effectively planning maintenance operations.

The ultimate goal is to provide managers with an assessment and comparison tool to evaluate the condition of bridges and consider necessary actions regarding their maintenance, repair, or replacement, thereby contributing to the improvement of road infrastructure management and safety.

Keywords: Reinforced concrete bridges, bridge degradation and durability, analytic hierarchy process (AHP), internal and external factors, case studies in Algeria.

الملخص

تتأثر فعالية الجسور ودوامها وسلامتها بمجموعة معقدة من الظواهر والمعايير المترابطة والمتصلة.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نموذج لتقييم الحالة العامة للجسور المنجزة من الخرسانة المسلحة، مع الأخذ بعين الاعتبار مختلف عوامل التدهور المتعلقة بخصائص الجسر ذاته أو ببيئته

لدمج الفئتين من المعايير، الداخلية والخارجية، قمنا بتحديد واعتبار 30 عاملاً مرتبطاً بالتدهور.

تم استخدام طريقة التحليل التسلسل الهرمي لتقييم الأهمية النسبية لكل عامل عن طريق حساب أوزانها الخاصة.

بناءً على هذه العوامل، نحدد مؤشر تدهور عام يعكس الحالة العامة للجسر. يتيح لنا هذا المؤشر تصنيف الجسور ضمن نطاق يتراوح من عدم وجود خطر إلى حالة حرجية تتطلب تدخلاً عاجلاً. قمنا بتطبيق هذا النموذج على ثلاثة جسور في الجزائر ووجدنا نتائج مرضية.

تكمن ابتكارية نموذجنا في قدرته على تقديم تقييم كمي، ورقمي، ومخصص لحالة تدهور الجسر. إنه نموذج مرن وقابل للتطوير ويمكنه استيعاب عدد كبير من العوامل والمعايير. كما أنه تنبؤي مما يسمح بتوقع تطور التدهور في الجسر، وهو أمر أساسي لتخطيط عمليات الصيانة بكفاءة.

الهدف النهائي هو تزويد المسؤولين والمختصين بأداة تقييم ومقارنة لتقدير حالة الجسور والنظر في الإجراءات اللازمة للصيانة أو الإصلاح أو الاستبدال، مما يساهم في تحسين إدارة وسلامة البنية التحتية للطرق.

الكلمات المفتاحية: الجسور الخرسانية المسلحة، تدهور ودوام الجسور، عملية التحليل الهرمي (AHP)، العوامل الداخلية والخارجية، دراسات حالات في الجزائر.

TABLE DE MATIERES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION GENERALE	4
1.1. Contexte et Problématique	4
1.2. Objectifs de l'étude	5
1.3. Méthodologie	6
1.4. Organisation générale du mémoire de la thèse.....	7
CHAPITRE 2 GENERALITES SUR LES PONTS.....	8
2.1. Définitions.....	9
2.2. Historique.....	9
2.3. Classification des ponts.....	16
2.4. Intérêt de la classification des ponts.....	17
2.5. Avantages des ponts à poutres en béton armé.....	17
2.6. Patrimoine des ponts en Algérie	18
2.6.1. Quelques chiffres	18
2.6.2. Difficultés d'obtention des statistiques précises	19
2.6.3. Particularités des ponts en Algérie	19
2.6.4. Etat des lieux du parc national d'ouvrages d'art en Algérie	19
2.7. Conclusion :	25
CHAPITRE 3 PATHOLOGIES DES PONTS	26
3.1. Introduction.....	26
3.2. Actions Agissant sur les Ponts	27
3.2.1. Actions Permanentes.....	27
3.2.2. Actions Variables	27
3.2.3. Actions Thermiques	28
3.2.4. Actions Accidentelles.....	28
3.2.5. Actions de Construction.....	28
3.3. Facteurs pathologiques et causes des désordres des ponts en béton armé	28
3.3.1. Facteurs mécaniques et physiques.....	29
3.3.1.2. Surcharges :	29

3.3.1.3. Fatigue :.....	29
3.3.2. Facteurs chimiques.....	31
3.3.3. Facteurs climatiques.....	33
3.3.4. Facteurs accidentels	34
3.3.5. Défauts de conception et d'exécution.....	36
3.3.6. Autres Facteurs.....	37
3.4. Typologie des désordres.....	37
3.4.1. Désordres affectant les fondations:	37
3.4.2. Désordres affectant les appuis.....	38
3.4.3. Désordres affectant les équipements :.....	38
3.4.4. Désordres affectant les joints de chaussée :	38
3.4.5. Désordres affectant les appareils d'appuis :.....	39
3.5. Principaux systèmes d'évaluation de l'état des ponts.....	39
3.5.1. Systèmes basés sur les états limites.....	40
3.5.2. Systèmes basés sur l'inspection visuelle.....	41
3.5.3. Systèmes basés sur la modélisation numérique.....	41
3.5.4. Système basé sur les Probabilités et Statistiques	42
3.5.5. Systèmes basés sur les indicateurs de performance	42
3.5.6. Les méthodes d'évaluation les plus récentes	44
3.5.7. Exemples de ponts en Algérie.....	46
3.6. Les normes et réglementations en vigueur	46
3.6.1. Normes Canadiennes (Norme S6-88) :	46
3.6.2. Eurocodes	46
3.6.3. Normes Internationales	47
3.6.4. Normes et Réglementations en Algérie pour l'Évaluation de l'État des Ponts	47
3.7. Conclusion	48
CHAPITRE 4 LA PRISE DE DECISION MULTICRITERE ET LA METHODE AHP	49
4.1. Introduction.....	50
4.2. L'Analyse multicritère (AMC)	50
4.2.1. Définitions, concepts et principes de l'AMC	50

4.2.2. Méthodes Courantes d'AMC	54
4.2.3. Quelques exemples d'utilisation de l'AMC	57
4.3 Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP).....	59
4.3.1. Principes de la Méthode AHP	59
4.3.2. Étapes de l'Application de la Méthode AHP	59
4.3.3. Principaux domaines d'application de l'AHP	64
4.3.4. Application de l'AHP dans le domaine de Génie civil :	64
4.4. Justification du choix de la méthode AHP	66
4.5. Conclusion	67
CHAPITRE 5 UTILISATION DE L'AHP POUR L'ETUDE DE L'ETAT DE DEGRADATION DES PONTS EN BETON ARME ET PREDICTION DE LA DUREE DE SERVICE	68
5.1. Introduction	69
5.2. Identification des facteurs de la dégradation.....	69
5.3. Création du modèle numérique	71
5.3.1. Développement de la structure hiérarchique.....	71
5.3.2. Comparaisons binaires, calcul des poids et vérification de la cohérence.....	73
5.3.3. Notations des facteurs	75
5.3.4. Evaluation de l'indice global de la dégradation des ponts (Global Bridge Degradation Index).....	82
5.3.5. Catégorisation des ponts selon la dégradation	82
5.4. Simulation du modèle numérique, Etude de cas :	83
5.4.1. Etude de cas: Pont sur Oued Isser RN22.....	84
5.4.2. Pont sur Oued Gouasmia RN17	88
5.4.3. Pont sur Oued Mouilah RN 7A	92
5.5. Synthèse et discussion:.....	96
5.6. Conclusion :	98
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	99
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Répartition des ponts suivant le type de la voie	18
Tableau 2.2. Répartition des ponts suivant leur état.....	20
Tableau 2.3. Répartition des ponts suivant l'âge	21
Tableau 4.1. : Échelle de comparaison par paires de Saaty [112]	59
Tableau 4.2.: Matrice des comparaisons.	60
Tableau 4.3.: Méthode de Calcul de (λ_{max})	61
Tableau 4.4. : Indice aléatoire RI [112]	62
Tableau 5.1. Facteurs de la dégradation considérés dans le modèle développé	69
Tableau 5.2. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence	74
Tableau 5.3. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence (Suite1).....	74
Tableau 5.4. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence (Suite2).....	75
Tableau 5.5. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence (Suite3).....	75
Tableau 5.6. Notations des facteurs de dégradation liés aux poutres	76
Tableau 5.7. Notations des facteurs de dégradation liés à l'hourdis.....	77
Tableau 5.8. Notations des facteurs de dégradation liés aux entretoises.....	77
Tableau 5.9. Notations des facteurs de dégradation liés aux appuis	78
Tableau 5.10. Notations des facteurs de dégradation liés aux fondations.....	79
Tableau 5.11. Notations des facteurs de dégradation liés aux équipements.....	79
Tableau 5.12. Notations des facteurs de dégradation liés l'âge.....	80
Tableau 5.13. Notations des facteurs de dégradation liés aux sollicitations.....	80
Tableau 5.14. Notations des facteurs de dégradation liés à l'environnement.....	81
Tableau 5.15. Classification de l'état de dégradation du pont.	83
Tableau 5.16. Récapitulation des notations de l'ouvrage sur Oued Isser	88
Tableau 5.17. Récapitulation des notations de l'ouvrage sur Oued Gouasmia	92
Tableau 5.18. Récapitulation des notations de l'ouvrage sur Oued Mouilah.....	95
Tableau 5.19 : Résultats de l'application du modèle pour les trois cas d'études.....	96

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Tarr Steps, 1000 ans av. JC.....	8
Figure 2.2. Pont Milvius, IIème siècle av. JC	9
Figure 2.3. Pont du Gard, construit vers 50 après JC,	9
Figure 2.4. Pont d'Avignon (1180)	10
Figure 2.5. Iron Bridge, construit en 1779 à Coalbrookdale.	10
Figure 2.6. Vieux Pont de Mostar, Construit entre 1566 et 1567	11
Figure 2.7. Viaduc de Garabit, France, 1884	12
Figure 2.8. Pont El-Ourit, Tlemcen, Algérie, 1890	12
Figure 2.9. Viaduc de Millau, France, 2004	13
Figure 2.10. Pont Hong Kong-Zhuhai-Macao, Chine, 2018	13
Figure 2.11. Répartition des ponts suivant le type de la voie	19
Figure 2.12. Répartition des ponts suivant leur état	20
Figure 2.13. Répartition des ponts suivant l'âge	21
Figure 2.14. Répartition des ponts suivant le mode de construction de la superstructure	22
Figure 3.1 : Phénomène d'affouillement au pied d'une pile de pont	28
Figure 3.2. Effondrement du pont routier au PK 0+710 RN6, Ain Sefra, Algérie.....	29
Figure 3.3. Corrosion des armatures	30
Figure 3.4. Pont détruit par un séisme, Kobe, janvier 1995	32
Figure 3.5. Choc de véhicule].....	33
Figure 3.6. Résistance à l'incendie d'un pont routier	34
Figure 4.1.: Structure hiérarchique.....	58
Figure 5.1. La structure hiérarchique (Source Auteur)	70
Figure 5.2 : Localisation générale des cas d'étude sur la carte de l'Algérie.	82
Figure 5.3. : Pont sur Oued Isser au PK 35+617 sur la route nationale n°22.....	83
Figure 5.4 : Pont sur Oued Gouasmia RN 17 (Source Auteur).....	87
Figure 5.5. : Pont sur Oued Mouilah RN7A (Source Auteur)	91
Figure 5.6. Poids locaux (w_i) des Critères et Sous-Critères.	95
Figure 5.7. Pondérations globales W_i des facteurs F.....	96

Chapitre I

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte et Problématique

La pérennité des ponts est un enjeu de sécurité publique qui nécessite une grande attention. De ce fait, la conception, la construction, l'entretien et la surveillance des ponts doivent être réalisés avec le plus grand soin pour garantir leur durabilité et leur fiabilité. Cependant, l'évaluation de l'état d'un pont est une tâche complexe qui nécessite l'expertise d'ingénieurs spécialisés. Des inspections régulières et des analyses approfondies permettent de détecter les éventuelles dégradations et de prendre les mesures correctives nécessaires pour garantir la sécurité des usagers. A cet effet, les municipalités et les gestionnaires des infrastructures de base, doivent mettre en place un plan de gestion des interventions pour maintenir ces ouvrages en bon état et prévoir les moyens financiers et les choix techniques de réhabilitation.

La dégradation des ponts est un problème complexe qui résulte de plusieurs facteurs, notamment l'intensité du trafic routier, les conditions climatiques, et la vulnérabilité des matériaux de construction vis-à-vis des facteurs environnementaux. Le trafic reste l'un des principaux facteurs de dégradation. Les charges répétées et les impacts extrêmes causés par le passage de véhicules peuvent entraîner une fatigue de la structure et de ses matériaux, augmentant ainsi le risque de défaillance de l'ouvrage [1],[2].

Les événements climatiques extrêmes, tels que les inondations et les variations de température, aggravent également le vieillissement. Les ponts en béton et en acier sont particulièrement vulnérables à la corrosion et à d'autres formes de dégradation dues aux conditions environnementales [3],[6],[7].

Par exemple, l'utilisation de sels pour le déneigement peut accélérer la corrosion des armatures des ouvrages en béton armé et aussi des structures métalliques [1].

Cela souligne l'importance d'évaluer régulièrement l'état des ponts et de mettre en œuvre éventuellement des mesures de renforcement appropriées.

Les systèmes de gestion des ponts sont le plus souvent basés sur les résultats d'inspections visuelles et d'évaluations ciblées d'un nombre limité de structures. Ces auscultations visuelles dépendent du jugement de l'inspecteur et de son niveau d'expertise et elles sont souvent converties en des notes qui décrivent qualitativement l'état des matériaux et leur capacité structurale apparente.

Un pont doit satisfaire les conditions de sécurité et de fonctionnalité et qui sont les suivantes :

- ✓ Le pont doit être capable de supporter les charges auxquelles il est soumis (poids propre, charges roulières, vents, etc.) sans se déformer de manière excessive ou risquer de s'effondrer.
- ✓ Les matériaux utilisés doivent être suffisamment résistants pour faire face aux contraintes mécaniques et aux agressions extérieures.
- ✓ Le pont ne doit pas présenter de flexions ou de vibrations excessives qui pourraient compromettre la sécurité des usagers ou endommager la structure.

La dégradation ou la défaillance des ponts devient une grande problématique pour la plupart des pays, surtout que les sources de cette défaillance sont souvent complexes et mal déterminées.

En Algérie, les infrastructures de transport sont relativement récentes comparées à celles des pays développés. Bien que certains ponts aient plus d'un siècle et peuvent être en bon état, d'autres, dont certains plus récents, présentent des signes de dégradation. Ces structures, principalement en béton armé, sont exposées à divers facteurs de détérioration. Une évaluation rigoureuse de leur état est cruciale pour planifier leur entretien, mais les méthodes actuelles souvent subjectives et manquent de systématisation [4].

La plupart des désordres apparaissent après environ quinze ans d'exploitation, bien au-delà de la fin de la période de garantie décennale, qui est souvent difficile à faire valoir pour les ouvrages d'infrastructure. Les divers processus de dégradation, en fonction de l'intensité et de la nature de l'entretien effectué, ont un impact sur la durée de vie des structures [5].

Une structure peut se dégrader en raison de facteurs liés à sa qualité d'origine ou en raison de contraintes opérationnelles ou environnementales. Cela inclut un large éventail de critères tels que l'âge, les défauts de construction, les charges de trafic, l'érosion des fondations et les attaques chimiques.

Étant donné la complexité de ces phénomènes et la diversité des paramètres impliqués, il serait approprié d'adopter une méthode d'analyse multicritère capable de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres.

1.2. Objectifs de l'étude

Les phénomènes et les paramètres pouvant affecter la pérennité d'un ouvrage constituent un système complexe généré par un ensemble d'aspects et de mécanismes qui opèrent simultanément. Plusieurs paramètres rentrent en jeu dans l'apparition d'une défaillance dans un ouvrage et son évolution en risque majeur. Ces paramètres sont essentiels comme éléments de contrôle ou de surveillance pour l'évaluation de l'état du pont et éventuellement l'établissement d'un programme d'entretien. Vu le nombre important, l'interaction variée et une certaine hiérarchisation entre ces paramètres,

plusieurs méthodes mathématiques ont été conçus pour leur traitement dans le but d'une analyse globale de l'ouvrage. Pour cela, dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons envisagé le développement d'une approche multicritère, de type Analytic Hierarchy Process (AHP), pouvant cerner le mieux possible la majorité de ces éléments, du moins les plus influents.

Le but est de fournir aux gestionnaires les éléments de réflexion nécessaires à l'évaluation de l'état d'un ouvrage et de pouvoir faire des projections dans le temps pour estimer globalement ses états à différents horizons et ainsi procéder aux démarches nécessaires quant à son entretien, sa réparation ou son remplacement.

L'objectif principal de ce travail consiste à développer un modèle d'évaluation globale de l'état de dégradation des ponts ce qui permet la prédiction de la durée de servie.

Vue l'importance des ouvrages d'art en béton armé dans le patrimoine Algérien d'infrastructures de base, notre travail s'est restreint sur ce type d'ouvrages. Ces derniers ont la particularité d'avoir un nombre important de paramètres de mesure quantitatives ou/et qualitatives qui rentrent en jeu dans l'évaluation de l'état global d'un ouvrage.

Cet objectif peut être subdivisé en un certain nombre de missions spécifiques suivantes :

- 1- Identifier les différents facteurs de la dégradation ;
- 2- Établir un algorithme de calcul de pondération de chaque facteur ;
- 3- Etablir une classification suivant l'état de dégradation avec suggestions sur les types d'intervention ;
- 4- Concevoir un outil informatique basé sur le modèle proposé, afin de faciliter son utilisation et son application à des cas concrets de dégradation des ponts.

1.3. Méthodologie

La méthodologie du présent travail de thèse de doctorat est définie en 5 étapes et qui sont :

- 1- Revue de littérature;
- 2- Identification des facteurs de la dégradation d'un pont en béton armé;
- 3- Établissement de l'algorithme de calcul;
- 4- Développement du modèle d'évaluation de la dégradation des ponts à poutres en béton armé basé sur l'AHP;
- 5- Élaboration d'une interface informatique basée sur le modèle développé.

Le choix de la méthode AHP a été motivé par sa capacité à structurer des décisions complexes, à intégrer des préférences subjectives, sa facilité d'utilisation, sa gestion de l'incertitude et sa flexibilité. Ces caractéristiques en font un choix judicieux pour notre étude. Son utilisation est particulièrement pertinente dans le cadre de projets de ponts, où les critères peuvent souvent être contradictoires et où certains jugements sont

subjectifs.

Cette méthode est appropriée pour optimiser et améliorer la durabilité des ouvrages en béton armé. Elle intervient dans plusieurs domaines clés liés à cette durabilité, notamment l'évaluation de la vulnérabilité, la sélection des matériaux, la priorisation des interventions de maintenance et les méthodes de réhabilitation.

1.4. Organisation générale du mémoire de la thèse

Le présent mémoire est subdivisé en 5 chapitres.

Le chapitre 1 est cette introduction où a été décrit le cheminement intellectuel de la problématique posée dans le cadre de ce travail de thèse de doctorat.

Le chapitre 2 est consacré à une revue de littérature relative à des généralités sur les ponts notamment les ponts à poutres en béton armé, un historique, des notions sur la classification et sur les avantages de ce type de ponts. Ce chapitre englobe aussi un aperçu sur le patrimoine des ponts en Algérie et sur les difficultés d'évaluer concrètement celui-ci.

Le chapitre 3 aborde la pathologie des ponts, les actions en jeu, la typologie des désordres et leurs causes principales. Il présente également les approches courantes et les principaux systèmes d'évaluation ainsi que les facteurs déterminants de la durée de vie des ponts.

Une introduction aux différentes méthodes de gestion et d'analyse des critères multiples dans un processus de prise de décision tel que la méthode AMC () et la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) est donné dans le chapitre 4 notamment l'historique, les avantages et les domaines d'application.

Le chapitre 5 décrit le modèle développé sur la base de la méthode AHP pour l'étude de l'état de dégradation des ponts à poutres en béton armé et prédiction de la durée de service. Ce chapitre commence d'abord par une identification des facteurs de dégradation et expose ensuite le développement de la structure hiérarchique ainsi que toutes les étapes développées depuis les comparaisons binaires et le système de notation jusqu'à l'obtention de l'indice global de la dégradation des ponts (GBDI). Le tout est réalisé en conformité avec la méthode AHP. Cette partie inclut également des études de cas d'ouvrages existants en Algérie, suivies d'une synthèse et d'une discussion.

Ce mémoire est finalisé par une conclusion générale de travail de recherche avec une synthèse globale. Quelques perspectives de continuation de ce travail y sont aussi présentées.

Chapitre II

Généralités sur les ponts

GENERALITES SUR LES PONTS

2.1.Définitions

Un pont est une structure qui permet de traverser des obstacles naturels, tels que des rivières et des ravins, ou des voies de circulation comme des routes, des autoroutes, des chemins de fer et des canaux. Les aqueducs et les passerelles pour piétons sont également considérés comme des ouvrages de franchissement. Ils jouent un rôle essentiel dans le transport et la connectivité.

Ces constructions reliant deux points distincts, facilitent le passage de piétons, de véhicules ou de trains. En plus de supporter des charges, les ponts doivent résister à des forces telles que le vent, l'eau et les vibrations. [8],[9]

2.2.Historique

L'histoire des ponts reflète l'ingéniosité humaine face aux défis du terrain et aux besoins de communication. Chaque époque a laissé son empreinte sur ces structures essentielles, qui continuent d'évoluer avec les progrès technologiques. Les principales étapes de cette évolution sont:

Antiquité

- Origines:

Les premiers ponts étaient probablement des troncs d'arbres ou des structures simples en bois (Troncs d'arbres jetés en travers d'une rivière).

Plus tard, les civilisations anciennes, comme les Égyptiens et les Sumériens, ont commencé à construire des ponts plus élaborés. Les troncs furent remplacés par des pierres parallélépipédiques, de grandes dimensions, disposées sur d'autres pierres espacées convenablement.

Le Tarr Steps est un pont en dalle de pierre de l'époque préhistorique, situé en Grande-Bretagne dans le Somerset. Il a été édifié sur la rivière Bale 1000 ans av. JC [10].



Figure 2.1. Tarr Steps, 1000 ans av. JC. [10]

Lorsque l'on découvrit la technique de la maçonnerie, on s'aperçut bien vite que le travail en poutre-linteau ou dalle classique avec d'autres matériaux comme le bois, devenait impossible en raison du peu de résistance qu'offrait la maçonnerie à la flexion. L'arc et la voûte clavée firent alors leur apparition.

-La Mésopotamie utilisa ce procédé avec des briques, matériau tout à fait fonctionnel dans cette région où la pierre et le bois faisaient défaut. Des traces de voûtes en brique, de formes circulaire ou elliptique, ont été découvertes, datant de 1800 avant JC [10].

-Ponts Romains:

Les Romains ont perfectionné la construction de ponts en utilisant la voûte en pierre. Ils ont édifié de nombreux ponts emblématiques, tels que le Pont du Gard (1^{er} siècle av. JC.) et le Pont Milvius à Rome, qui témoignent de leur ingéniosité. Ces structures étaient conçues pour durer et faciliter le transport à travers l'Empire.

Le pont Milvius ou pont Molle, construit au II^{ème} siècle av. JC, se situe à 3 km de Rome sur le Tibre [10]. Ce pont était le seul accès à Rome par le Nord.



Figure 2.2. Pont Milvius, II^{ème} siècle av. JC [10]

Un des plus célèbres ouvrages de cette époque est le Pont du Gard construit par le général romain AGRIPPA et servant à alimenter la ville de Nîmes en eau. C'est sûrement le pont-aqueduc romain le plus connu compte tenu de ses dimensions, notamment sa hauteur, et de l'amplitude de ses arches.

Les deux étages inférieurs sont composés de voûtes dont les ouvertures vont jusqu'à 25 m, ils sont faits de pierres de taille sans mortier. La hauteur du pont est de 48 m et sa longueur est de 260 m à l'étage supérieur [10].



Figure 2.3. Pont du Gard, construit vers 50 après JC, [10]

Moyen Âge :

Au Moyen Âge, les ponts ont continué à évoluer avec l'utilisation de techniques comme les arches en pierre. Des ouvrages célèbres comme le Pont d'Avignon (1180) sont apparus, intégrant des styles architecturaux variés, notamment roman et gothique [10].

De nombreux ponts ont été construits pour faciliter les pèlerinages, souvent sous l'égide d'institutions religieuses [10].

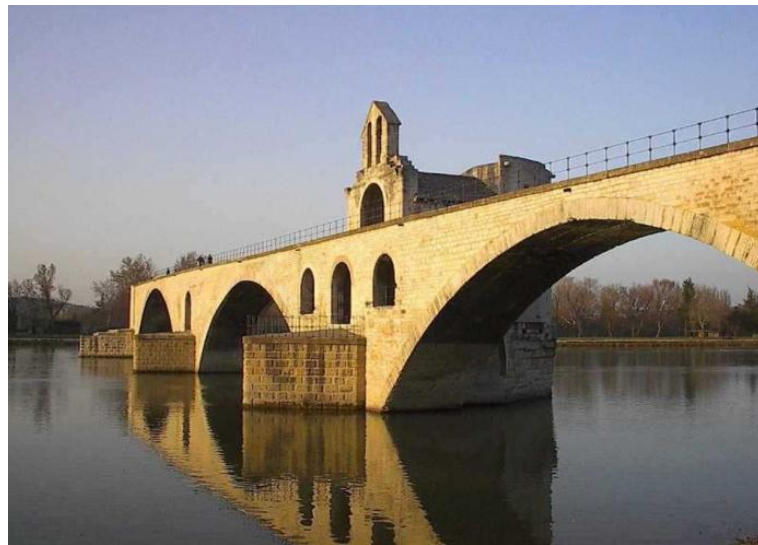


Figure 2.4. Pont d'Avignon (1180) [10]

Renaissance et Période Moderne :

Avec la Renaissance, les connaissances en ingénierie se sont améliorées. Les ponts en maçonnerie sont devenus plus légers et plus esthétiques. La période a également vu l'émergence des premiers ponts en fonte au XVIIIe siècle.

Le premier pont métallique a été réalisé en fonte, en Angleterre. Il s'agit de Iron Bridge, construit en 1779 par Abraham Darby III sur la Severn, à Coalbrookdale. Sa portée est de 30,5 m pour une longueur totale de 60 m [11].



Figure 2.5. Iron Bridge, construit en 1779 à Coalbrookdale. [11]

Pont de la Sainte-Trinité (Florence, Italie): Construit entre 1567 et 1570, ce pont en pierre sur l'Arno se distingue par ses trois arches inégales. L'arche centrale mesure 33 mètres, tandis que les arches latérales font 28 mètres. Ce pont est un exemple notable de l'architecture de la Renaissance italienne, alliant élégance et innovation technique [11].

Vieux Pont de Mostar (Bosnie-Herzégovine): Construit entre 1566 et 1567 sous le règne du sultan Süleyman le Magnifique, ce pont emblématique est célèbre pour son arc en pierre qui enjambe la rivière Neretva. Bien qu'il ait été détruit pendant la guerre en 1993, il a été reconstruit fidèlement en 2004. [11]



Figure 2.6. Vieux Pont de Mostar, Construit entre 1566 et 1567 [11]

Révolution Industrielle :

Le 19^{ème} siècle a marqué un tournant avec l'introduction de nouveaux matériaux comme l'acier, permettant la construction de ponts métalliques plus longs et plus résistants, tels que le Viaduc de Garabit réalisé par Gustave Eiffel en 1884 [12].



Figure 2.7. Viaduc de Garabit, France, 1884 [12]



Figure 2.8. Pont El-Ourit, Tlemcen, Algérie, 1890 [13]

19^{ème} Siècle et Au-delà :

- Béton Armé : Le 20^{ème} siècle a vu l'essor du béton armé et précontraint, révolutionnant la conception des ponts. Des structures emblématiques telles que le viaduc de Millau (France) et le pont Hong Kong-Zhuhai-Macao (Chine) illustrent cette évolution.



Figure 2.9. Viaduc de Millau, France, 2004 [14]

Viaduc de Millau : Il est reconnu comme le plus haut pont du monde, avec une hauteur atteignant 343 mètres au-dessus de la vallée du Tarn. Longueur : 2 460 mètres. Largeur: 32 mètres. Conçu pour résister à des vents allant jusqu'à 250 km/h. En plus de ses caractéristiques techniques, le viaduc est également apprécié pour son intégration harmonieuse dans le paysage naturel. [14]



Figure 2.10. Pont Hong Kong-Zhuhai-Macao, Chine, 2018 [15]

Pont Hong Kong-Zhuhai-Macao en Chine : Plus long pont maritime du monde (55 kilomètres), intégrant des tunnels pour éviter les typhons et les tremblements de terre. Solutions d'ingénierie avancées pour la résistance aux conditions climatiques extrêmes et la durabilité des matériaux [15]

Technologie Moderne: Aujourd'hui, les techniques de conception assistée par ordinateur (CAO) et les matériaux composites sont utilisés pour créer des ponts à la fois fonctionnels et esthétiques qui se distinguent par leur architecture et leurs caractéristiques techniques tels que le Pont Danyang-Kunshan en Chine (Longueur : 164,8 km), le pont du Beipanjiang en Chine (Hauteur : 565 m) et le pont du détroit d'Akashi au Japon (Portée : 1,991 km) [16].

Ces ponts illustrent l'innovation et l'ingénierie moderne, repoussant les limites de ce qui est possible dans la construction de ponts.

2.3.Classification des ponts

La classification des ponts repose sur plusieurs critères, notamment la structure, les matériaux, la fonction, le type de travées etc. Chaque type a ses propres caractéristiques et applications, ce qui permet aux ingénieurs de choisir la solution la plus adaptée aux besoins spécifiques d'un projet. Les principales catégories de ponts sont :

Classification selon la structure

Les ponts peuvent être classés en cinq grandes catégories selon leur structure :

Ponts en arc : Ces ponts utilisent un arc comme élément porteur principal pour supporter la charge. Ils sont souvent construits en acier ou en béton [17],[18].

Ponts à poutres : Composés de poutres horizontales soutenues par des piles et culées, ils exercent principalement des efforts de flexion. Exemples : Pont de Brooklyn. Ils sont limités en portée, mais des exemples comme le pont d'Oléron montrent qu'ils peuvent atteindre des longueurs significatives [19],[B11] .

Ponts à voûtes : La partie inférieure du tablier est formée de voûtes reposant sur plusieurs piliers. Ce type est adapté pour des charges compressives. il est souvent utilisé dans les constructions historiques [19],[18]

Ponts suspendus: Le tablier est suspendu par des câbles qui passent par des pylônes. Ils sont connus pour leurs longues portées et leur capacité à supporter de lourdes charges. Exemples : Pont Golden Gate, pont de Brooklyn. [19] ,[B13]

Ponts à haubans : Similaires aux ponts suspendus mais avec des câbles inclinés qui transmettent les forces aux pylônes, offrant une rigidité supplémentaire. Exemples : Pont Millau, pont Vasco de Gama [19],[20]

Classification selon la fonction

- ✓ Les ponts peuvent également être classés selon leur usage [21], [17], [18].
- ✓ Ponts routiers : Destinés à la circulation automobile.
- ✓ Ponts ferroviaires : Conçus spécifiquement pour le passage des trains.
- ✓ Passerelles : Destinées aux piétons et parfois aux cyclistes.
- ✓ Ponts-aqueducs : Transportent de l'eau sur de longues distances.
- ✓ Ponts à usage mixte: Servent à plusieurs types de trafic simultanément [21],[17]

Classification selon les matériaux

Les matériaux utilisés pour la construction des ponts influencent également leur classification:

- ✓ Béton armé : Utilisé pour sa résistance et sa durabilité.
- ✓ Acier : Prisé pour sa légèreté et sa capacité à supporter de grandes charges.
- ✓ Ponts mixtes : Combinaison de béton et d'acier pour tirer parti des avantages des deux matériaux.
- ✓ Matériaux composites : De plus en plus utilisés pour leurs propriétés avancées[21],[22]

Classification selon la portée

- ✓ Ponts courts : Généralement moins de 30 mètres.
- ✓ Ponts moyens : Entre 30 et 150 mètres.
- ✓ Ponts longs : Plus de 150 mètres.

2.4.Intérêt de la classification des ponts

La classification des ouvrages vise à mieux comprendre la nature et le type d'ouvrages présents dans le parc national, ainsi que le degré de complexité de leurs structures. Elle permet d'établir une politique de gestion adaptée aux exigences et priorités de maintien en service, tout en garantissant la sécurité des usagers. De plus, cette classification facilite l'évaluation des coûts d'entretien et du budget annuel nécessaire pour ces opérations.

2.5. Avantages des ponts à poutres en béton armé

Les ponts à poutres en béton armé présentent plusieurs avantages qui les rendent particulièrement adaptés à de nombreux projets d'infrastructure. Les principaux atouts de ce type de ponts sont:

- ✓ Résistance et durabilité : Le béton armé combine la résistance à la compression du béton avec la résistance à la traction de l'acier, ce qui permet aux ponts de supporter des charges importantes tout en étant durables dans le temps.
- ✓ Économie de coûts : Ces ponts sont souvent plus économiques que d'autres types, notamment pour les portées modérées. Leur construction demande moins de matériaux et moins de temps, ce qui réduit les coûts globaux du projet [23],[24].
- ✓ Flexibilité de conception : Les ponts à poutres en béton armé peuvent être conçus pour diverses configurations, y compris des travées indépendantes ou continues. Cela offre une grande flexibilité pour s'adapter aux spécificités du site et aux besoins des usagers.
- ✓ Faible entretien : Les structures en béton armé nécessitent généralement peu d'entretien par rapport à d'autres matériaux, ce qui est un avantage considérable pour la gestion à long terme des infrastructures.
- ✓ Facilité de mise en œuvre : La construction de ces ponts est souvent simplifiée grâce à l'utilisation de techniques modernes [23],[24].
- ✓ Résistance aux intempéries : Le béton armé est résistant aux conditions climatiques variées et peut supporter des environnements difficiles, ce qui le rend idéal pour les ouvrages exposés aux éléments naturels.

En somme, les ponts à poutres en béton armé sont une solution efficace et économique pour le franchissement d'obstacles, alliant robustesse, durabilité et flexibilité dans leur conception.

2.6. Patrimoine des ponts en Algérie

L'Algérie, avec son relief montagneux et ses nombreux oueds, possède un réseau routier qui repose en grande partie sur une multitude de ponts. Ces infrastructures, de tailles et de types variés, jouent un rôle crucial dans la connectivité du pays et son développement économique.

2.6.1. Quelques chiffres

La réalisation des ouvrages d'art a connu une évolution très rapide passant de 2583 ouvrages recensés en 1990 à 3756 ouvrages recensés en 2002 pour atteindre un nombre de 6285 ouvrages recensés en 2013 [25].

Des rapports plus récents indiquent que l'Algérie possède l'un des réseaux de transport les plus étendus d'Afrique, tant sur le plan routier que ferroviaire.

Le réseau routier s'étend sur une longueur totale de 141 500 km (le plus long du continent), équipé de 4 815 ouvrages d'art [26],[27].

Le réseau ferroviaire mesure environ 4200 km avec des extensions prévues pour atteindre 10 500 km [26],[27].

2.6.2. Difficultés d'obtention des statistiques précises

Malheureusement, il est difficile d'obtenir des statistiques exhaustives et à jour sur l'ensemble des ponts algériens et ceci pour plusieurs raisons :

- ✓ **Manque de recensement centralisé:** Il n'existe pas de base de données nationale complète recensant l'ensemble des ponts, leurs caractéristiques techniques, leur état et leur âge.
- ✓ **Définition variable du terme "pont":** Les critères de classification des ouvrages d'art peuvent varier d'une étude à l'autre, ce qui rend les comparaisons difficiles.
- ✓ **Constante évolution du réseau:** Le réseau routier algérien est en constante évolution, avec de nouveaux ponts construits régulièrement et d'autres réhabilités ou renforcés.

2.6.3. Particularités des ponts en Algérie

Bien que les données soient dispersées, il est possible de dégager quelques éléments clés sur les ponts algériens :

- ✓ **Grande diversité de types:** On retrouve en Algérie une grande variété de ponts : ponts en arc, ponts suspendus, ponts à haubans, viaducs...
- ✓ **Importance des grands viaducs:** Les grands viaducs, tels que ceux de l'autoroute Est-Ouest, sont emblématiques du génie civil algérien. Ils permettent de franchir de grandes vallées et de raccourcir les distances.
- ✓ **Enjeux de maintenance:** De nombreux ponts anciens nécessitent des travaux de maintenance importants pour assurer leur pérennité.
- ✓ **Développement de nouvelles technologies:** Les nouvelles constructions intègrent des technologies de pointe pour améliorer la durabilité et la sécurité des ouvrages

2.6.4. Etat des lieux du parc national d'ouvrages d'art en Algérie

En Algérie, où une grande partie des ponts a été construite dans les années 1960 et 1970, beaucoup d'entre eux sont désormais soumis à des charges qui dépassent leur capacité initiale [25].

L'état actuel du parc de ponts en Algérie nécessite une attention particulière. De nombreux ouvrages présentent des signes de dégradation avancée, tels que des fissures, des déformations et une corrosion visible [1].

Nous donnons, dans ce qui suit, quelques informations relatives aux ouvrages d'art en Algérie. Ces données sont tirées à partir d'une banque de données des ouvrages d'art du ministère des travaux publics. Bien que relativement anciennes, ces renseignements sont intéressants surtout en ce qui concerne les ponts anciens [28].

Tableau 2.1. Répartition des ponts suivant le type de la voie

Type de routes	Nombre	Pourcentage
Route nationale	2583	69 %
Chemin de wilaya	1173	31 %
Somme	3756	

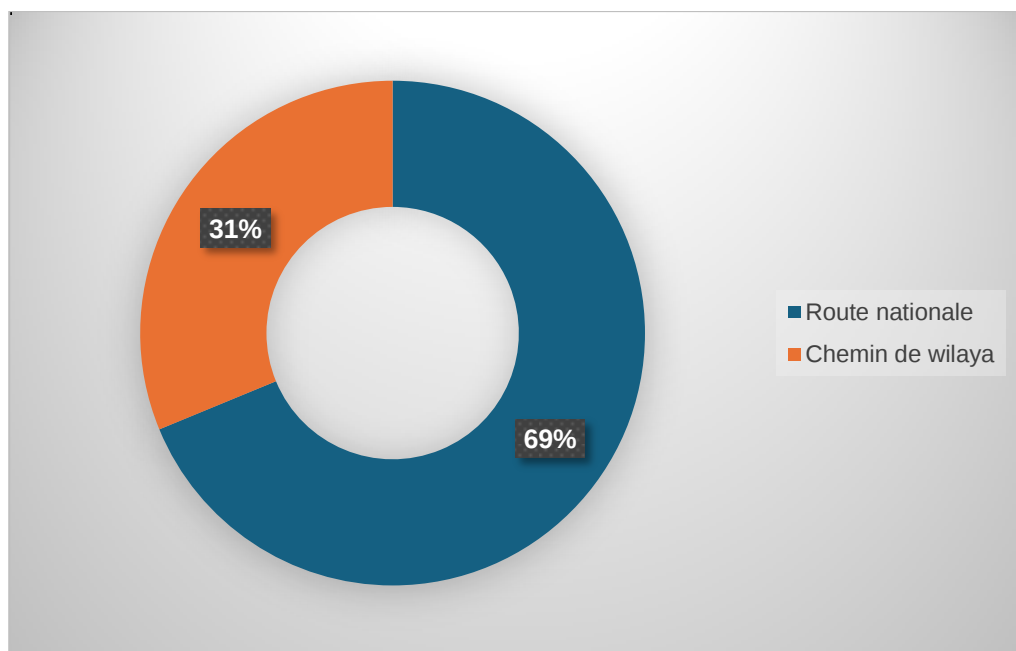
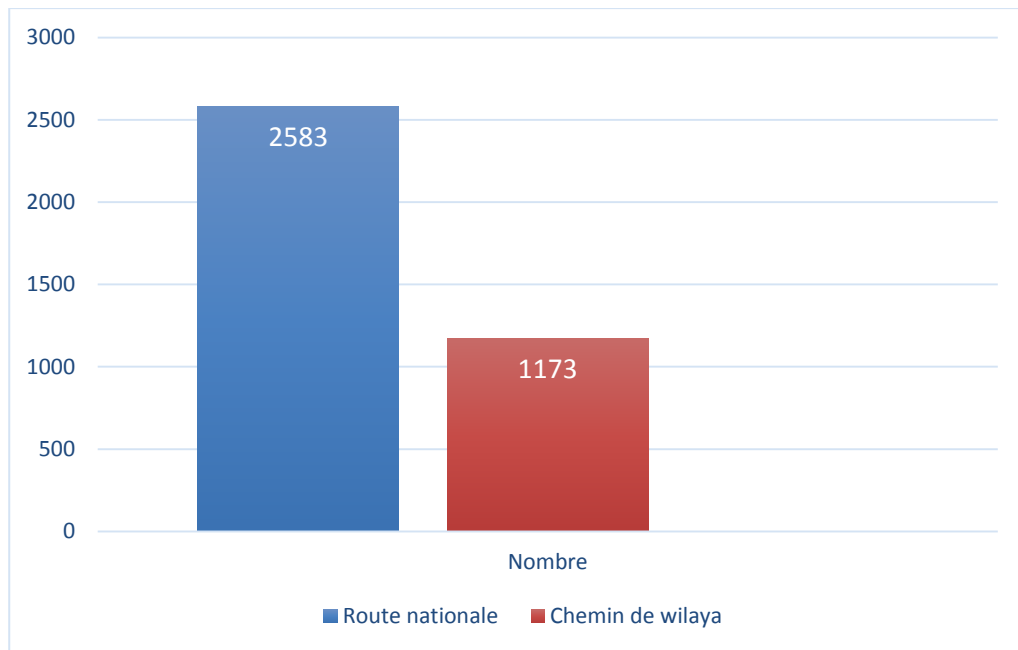


Figure 2.11. Répartition des ponts suivant le type de la voie

Tableau 2.2. Répartition des ponts suivant leur état

Etat des ouvrages	Nombre	Pourcentage
Bon	2602	69 %
Moyen	832	22 %
Mauvais	322	9 %

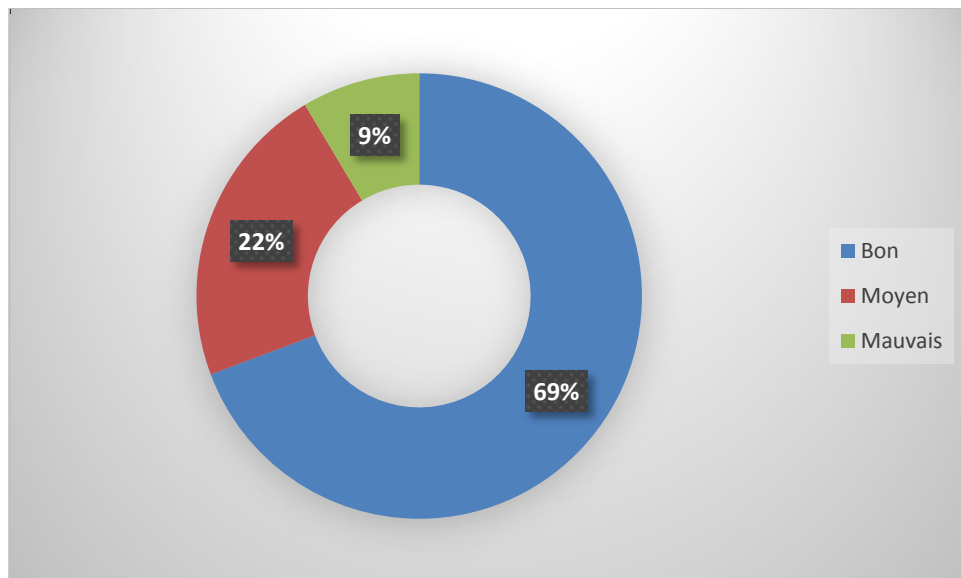
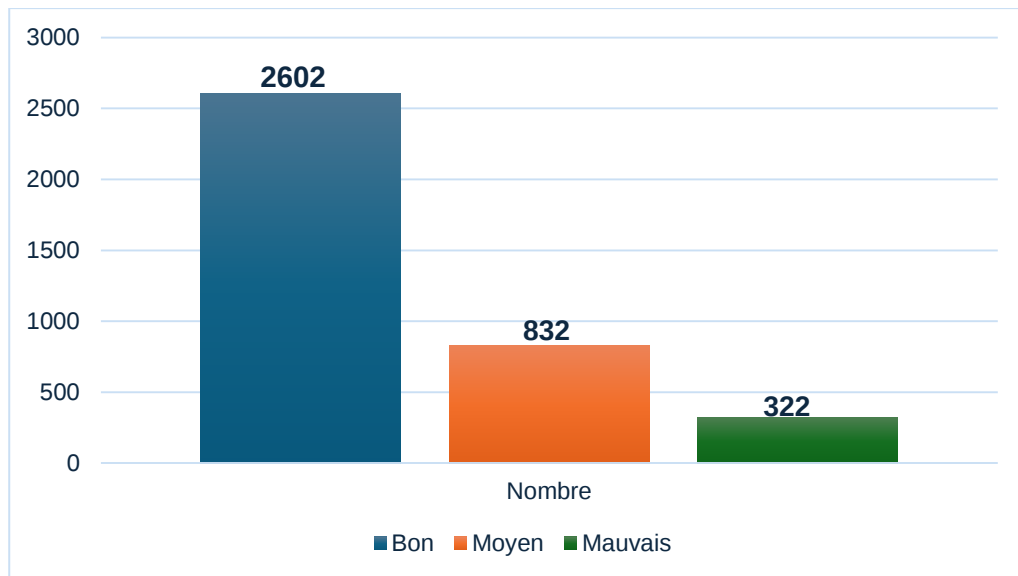


Figure 2.12. Répartition des ponts suivant leur état

Tableau 2.3. Répartition des ponts suivant l'âge

Année de construction	Nombre	Pourcentage
Avant 1850	3	0.08%
1850 - 1900	224	5.96%
1900-1962	693	18.45%
1962-1970	124	3.30%
1970-1980	357	9.50%
1980-1990	899	23.94%
1990- 2002	356	9.48%
Inconnue	1100	29.29%

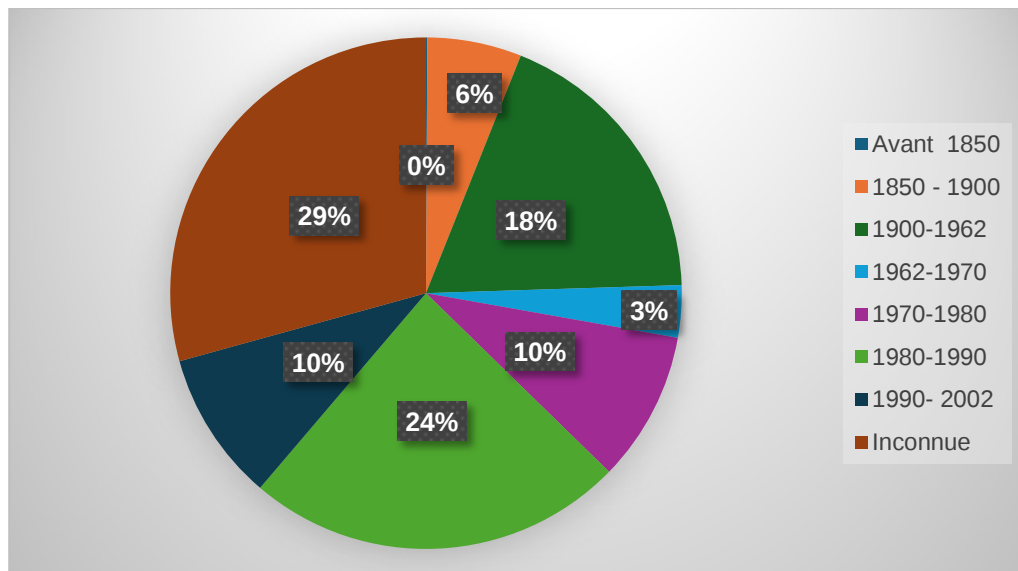
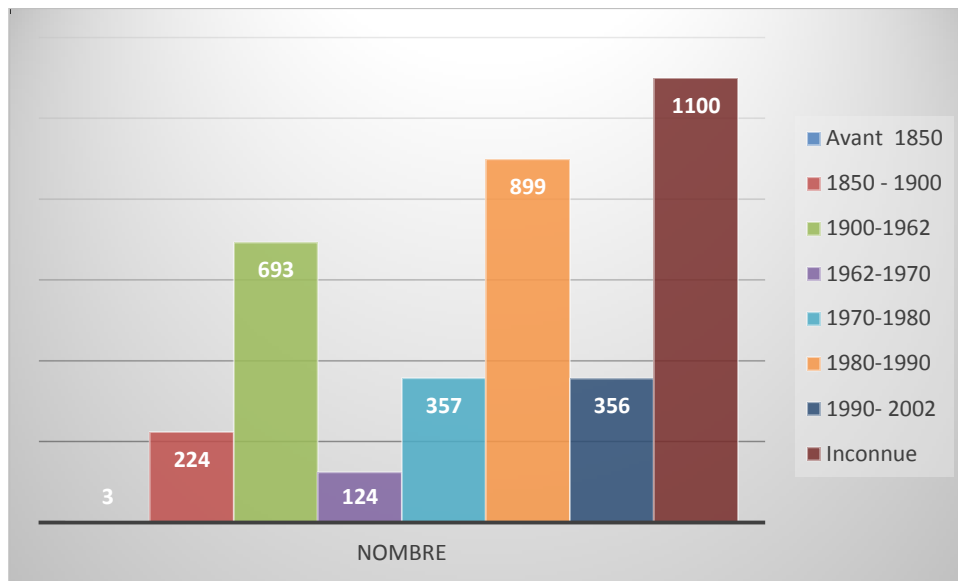


Figure 2.13. Répartition des ponts suivant l'âge

Tableau 2.4. Répartition des ponts suivant le mode de construction de la superstructure

Mode de construction	Nombre	Pourcentage
BA	2074	55.22%
MAC	753	20.05%
BP	311	8.28%
MIX	311	8.28%
MET	141	3.75%
BA+MAC	81	2.16%
Inconnue	85	2.26%

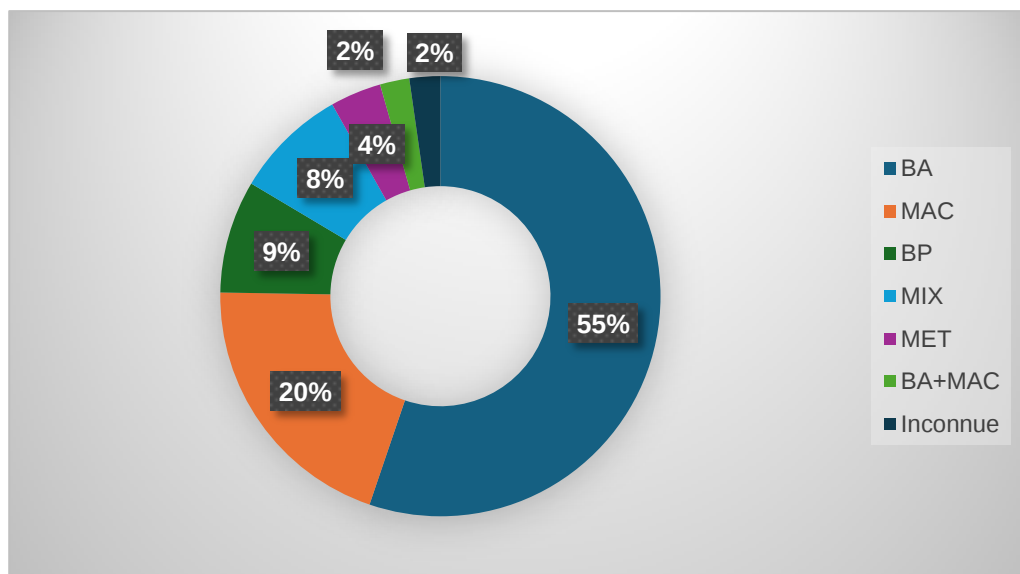
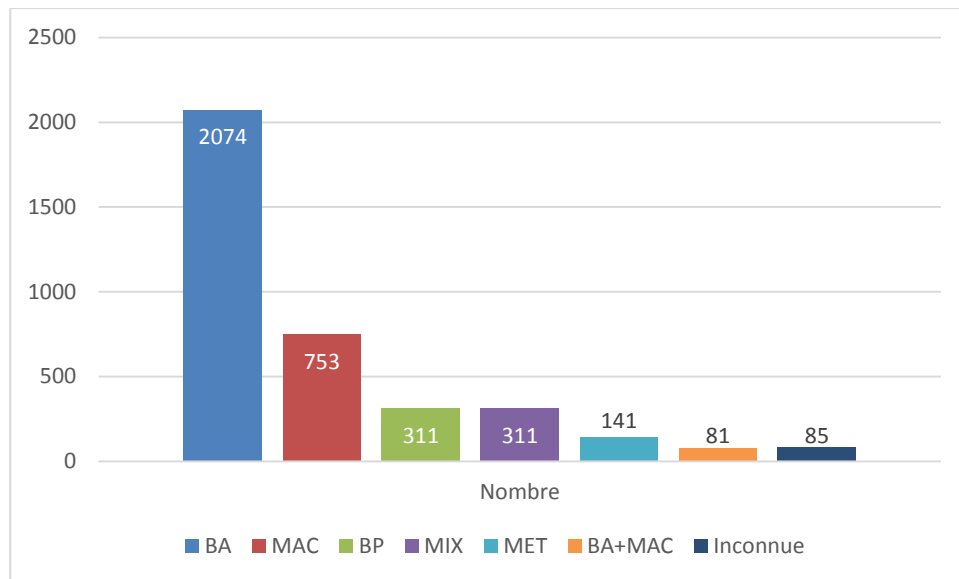


Figure 2.14. Répartition des ponts suivant le mode de construction de la superstructure

2.7. Conclusion :

Un pont est défini comme une structure permettant de franchir divers obstacles, jouant un rôle crucial dans le transport et la connectivité. Dans ce chapitre nous avons donné des généralités sur les ponts, en abordant leur définition, leur histoire, leur classification et leur importance, notamment en Algérie. L'histoire des ponts montre une évolution significative, depuis les premières constructions en bois jusqu'aux ouvrages

modernes en béton armé et acier, illustrant l'ingéniosité humaine face aux défis techniques.

Les ponts à poutres en béton armé sont particulièrement préférés pour leur résistance, durabilité et coût réduit. En Algérie, le patrimoine des ponts est riche et varié, avec un réseau de plus de 6 000 ouvrages. Toutefois, ce réseau fait face à des défis de maintenance et de mise à jour des données sur l'état des infrastructures. Le chapitre souligne ainsi l'importance de ces structures dans le développement économique et la nécessité d'une gestion efficace pour assurer leur pérennité.

Chapitre III

Pathologies des ponts

PATHOLOGIES DES PONTS

3.1. Introduction

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble non exhaustive sur la pathologie des ponts, les actions agissantes et les méthodes de diagnostic et d'évaluation. Il mettra en lumière l'importance d'une approche proactive dans la gestion des infrastructures afin de garantir leur sécurité et leur pérennité.

3.2. Actions Agissant sur les Ponts

La prise en compte de ces différentes actions est essentielle pour assurer la sécurité et la durabilité des ponts. Chaque type d'action nécessite une attention particulière lors de la phase de conception et de calcul afin de garantir que le pont puisse supporter les charges prévues tout au long de sa durée de vie de service.

Pour assurer sa fonction, un pont doit être capable de résister, avec une marge de sécurité appropriée, non seulement aux efforts engendrés par son poids propre, mais aussi aux efforts dus à l'ensemble des actions d'origine naturelle et fonctionnelle qui lui seront appliquées.

Dans la plupart des cas, toutes ces actions sont introduites dans les calculs avec des valeurs codifiées par des normes.

Les ponts sont soumis à diverses actions qui influencent leur conception, leur construction et leur durabilité. Ces actions peuvent être classées en plusieurs catégories :

3.2.1. Actions Permanentes

Ces actions incluent le poids propre des éléments constitutifs du pont, tels que :

- Poutres principales
- Dalles
- Entretoises
- Equipements du tablier dont l'existence est imposée par la fonction de l'ouvrage (trottoirs, corniches, garde-corps, glissières, revêtement) [29]

3.2.2. Actions Variables

Ces actions varient selon les conditions d'utilisation et peuvent inclure :

- Charges de trafic : Charges dues aux véhicules, piétons et autres usagers[30]. Ces charges sont définies souvent par un règlement dans le cas d'un pont routier tel que le règlement

algérien (DTR-RCPR 2008) ou français (fascicule 61 titre II)[29].

- Charges de neige : En fonction des normes climatiques de la région [30] .
- Charges de vent : Effets du vent sur la structure, prenant en compte la vitesse et la direction [31]. Son effet n'est pas cumulable avec les charges d'exploitation [29].

3.2.3. Actions Thermiques

Les variations de température peuvent provoquer des dilatations ou des contractions des matériaux, entraînant des efforts internes dans la structure. Ses effets interviennent dans le dimensionnement des joints de chaussée. Deux types d'effets thermiques sont souvent considérés :

- Variations uniformes : Changements de température affectant l'ensemble du pont.
- Gradients thermiques : Différences de température entre différentes parties du pont [32].

3.2.4. Actions Accidentelles

Ces actions sont imprévues et peuvent inclure :

- Chocs ou impacts : par exemple, collisions avec des véhicules ou le choc d'un bateau ou d'un véhicule sur une pile de pont.
- Séisme : la prise en compte de l'action des séismes est définie par des règlements tels que le règlement parasismique algérien (R.P.O.A 2008).
- Surcharge temporaire : Comme lors d'événements spéciaux où un grand nombre de personnes se rassemblent sur le pont [30],[29]. En Algérie, le règlement DTR-RCPR 2008 définit les charges et épreuves pour les ponts routiers [33]. Pour les événements spéciaux, il est crucial d'évaluer les surcharges potentielles et de prendre des mesures pour garantir la sécurité. Cela peut inclure des restrictions d'accès, des limitations de poids, ou même des renforcements temporaires du pont [34].

3.2.5. Actions de Construction

Les forces et contraintes appliquées lors de la construction du pont doivent également être prises en compte. Cela inclut les méthodes d'assemblage et les phases de mise en précontrainte [35].

3.3. Facteurs pathologiques et causes des désordres des ponts en béton armé

Les ponts sont soumis à diverses actions pathologiques qui peuvent compromettre leur intégrité et leur sécurité. Ces actions engendrent des dégradations résultant de l'augmentation des charges et des divers phénomènes naturels et physico-chimiques qui sont enregistrés et

qui s'ajoutent au cycle naturel du vieillissement des structures.

La stabilité d'un pont est un équilibre délicat entre les forces qui s'exercent sur lui et sa capacité à les supporter. Plusieurs facteurs peuvent influencer cette stabilité, et il est crucial de les comprendre pour assurer la sécurité et la durabilité de ces infrastructures.

Malgré leur robustesse, les ponts en béton armé sont sujets à divers désordres au fil du temps. Ces désordres peuvent compromettre leur intégrité structurelle et nécessitent des réparations coûteuses. Nous exposons ci-dessous les principales causes de ces désordres, regroupées en grandes catégories :

3.3.1. Facteurs mécaniques et physiques

3.3.1.1. Trafic routier :

Le trafic est l'une des causes majeures de vieillissement des ponts, entraînant des effets dynamiques et aussi répétitifs qui peuvent provoquer des phénomènes de fatigue dans les matériaux [36],[37].

Le trafic routier varie d'un endroit à un autre et évolue en fonction du temps. En effet, suivant un tronçon de route, la composition et la densité du trafic changent. L'action dynamique provoquée par le trafic routier dépend de nombreuses variables liées aux flux de trafic, au profil de la chaussée et au pont. Afin de simplifier l'analyse de l'ouvrage, ces actions dynamiques sont remplacées par des actions statiques équivalentes. Ces dernières sont constituées par un modèle de charge statique dont la valeur représentative est majorée par un facteur d'amplification dynamique. Cette manière de considérer l'action dynamique du trafic est proposée dans la plupart des normes de dimensionnement à travers le monde.

3.3.1.2. Surcharges :

Le passage de véhicules plus lourds que prévu ou une augmentation du trafic peuvent amplifier les sollicitations de la structure.

3.3.1.3. Fatigue :

Les cycles répétés de chargement et de déchargement peuvent provoquer des fissures de fatigue dans le béton et l'acier.

3.3.1.4. Cycles de gel-dégel :

Les cycles répétés du gel et dégel affectent les parties non protégées par un revêtement, provoquant des fissures et un écaillage du béton. La présence aussi de sels anti-verglas accélère la dégradation du béton par réaction chimique [36],[37].

3.3.1.5. Affouillements :

L'action mécanique de l'eau sur les structures se manifeste à travers les phénomènes

d'affouillement et d'abrasion. Dans le passé, l'affouillement des rivières autour des piles fut, avec les guerres, la principale cause de destruction des ponts.

L'affouillement autour des fondations des ponts peut être généralisé ou local, entraînant la déstabilisation de la structure [38],[39].

La situation est meilleure de nos jours en raison des techniques modernes d'exécution de travaux en rivière. Les techniques d'exécution de fondations profondes sont parfaitement maîtrisées par les entreprises spécialisées et la possibilité d'exécution d'ouvrages de grande portée réduit le nombre de piles en rivière. Les conséquences accidentelles d'affouillements ne sont plus à craindre pour les ouvrages neufs correctement fondés. Elles le sont, par contre, toujours pour les ouvrages anciens ou même récents lorsque leurs fondations manquent de robustesse [40].

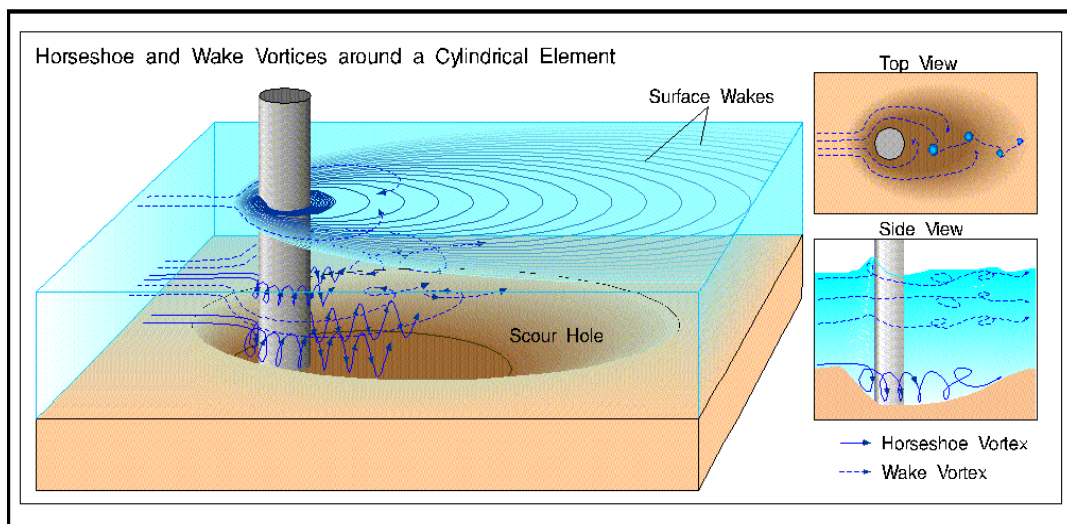


Figure 3.1. Phénomène d'affouillement au pied d'une pile de pont [40].

L'affouillement cause l'effondrement de 21% des ponts en Afrique du sud, 40% des ponts aux Etats-Unis et 62% des ponts à la nouvelle Zélande. C'est la principale cause de la rupture du pont de Schoharie Creek à New York le 5 avril 1987. Cet événement a marqué l'histoire de l'affouillement du fait qu'il a causé la perte de neuf vies humaines et un disparu en plus des dégâts matériels [41].

Un exemple spectaculaire sur l'impact de l'affouillement sur les ouvrages hydrauliques en Algérie est celui du pont enjambant Oued Barika à 10 Km à l'amont de la ville de Ain Safra. L'ouvrage a été réalisé en 1980 et a succombé en 1998 à une crue d'un débit de 1000m³. [42],[43].



Photo 3.2. Effondrement du pont sur oued Barika à Ain Sefra, Algérie [42]

3.3.2. Facteurs chimiques

3.3.2.1. Corrosion des armatures : C'est la cause la plus fréquente et la plus dommageable.

Les ponts en béton armé et en béton précontraint, notamment ceux construits avant 1975, sont particulièrement vulnérables à la corrosion des armatures en acier, ce qui peut mener même jusqu'à la rupture [44] , [37]



Figure 3.3. Corrosion des armatures [45]

Causes de la corrosion des armatures :

Le phénomène de corrosion des armatures est principalement causé par deux mécanismes : la carbonatation du béton et la pénétration des ions chlorures. Ces processus entraînent une série de dégradations qui peuvent compromettre l'intégrité structurelle des ouvrages.

a) Carbonatation : La carbonatation se produit lorsque le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air pénètre dans le béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium du béton, réduisant son pH et détruisant le film passif protecteur qui entoure les armatures appelé enrobage. Cela expose l'acier à des conditions corrosives, amorçant ainsi le processus de corrosion [46],[47]. L'alternance de phases d'humidité et de séchage accélère ce processus.

b) Pénétration des chlorures : Les ions chlorures, souvent présents dans les environnements marins ou en raison de l'utilisation de sels de déneigement, peuvent également provoquer la corrosion. Lorsque leur concentration atteint un seuil critique, ils dépassent l'acier, entraînant une corrosion accélérée [48],[47]

Conséquences de la corrosion des armatures :

La corrosion des armatures a plusieurs effets néfastes sur les ponts en béton armé :

a) Réduction de la section efficace des armatures : La corrosion entraîne la formation d'oxydes et d'hydroxydes de fer (rouille), qui augmentent de volume et provoquent une réduction de la section transversale des barres d'acier. Cela peut diminuer la capacité portante du pont [46],[49]

b) Fissuration et éclatement du béton : Les produits de corrosion expansifs créent des tensions internes qui peuvent provoquer des fissures dans le béton, ainsi que des éclats ou décollements de surface. Ces fissures permettent à l'eau et aux agents corrosifs d'atteindre plus facilement les armatures, aggravant ainsi le problème [47],[49]

c) Diminution de la durabilité et sécurité : La dégradation progressive due à la corrosion peut conduire à une perte d'aptitude au service du pont, voire à un risque accru d'effondrement si elle n'est pas détectée et traitée à temps [49],[48].

3.3.2.2. Alkali-réaction :

L'alkali-réaction, également connue sous le nom de réaction alkali-granat, est un phénomène chimique qui peut entraîner des dégradations significatives dans les structures en béton armé. Ce processus se produit lorsque des granulats réactifs, présents dans le béton, interagissent avec les alcalins (sodium et potassium) contenus dans le ciment, générant des produits gonflants qui provoquent des tensions internes et des fissures. [50]

3.3.2.3. Attaques chimiques : L'exposition à des produits chimiques agressifs, tels que les acides ou les sulfates, peut altérer le béton, entraîner une dégradation significative de la structure et compromettre sa durabilité. Ces conséquences sont principalement liées à la

corrosion des armatures en acier, destruction de la couche de passivation qui protège l'acier, dissolution du ciment, expansion des sulfates, augmentation de la porosité du béton facilitant ainsi la pénétration d'eau et d'autres agents agressifs [51].

3.3.3. Facteurs climatiques

3.3.3.1. Réchauffement climatique : Les effets climatiques sur la dégradation des ponts sont de plus en plus préoccupants, en raison des changements environnementaux qui modifient les conditions auxquelles ces structures sont exposées. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes peut fragiliser les structures en sollicitant leurs fondations par effets de gonflement ou de retrait du sol et en augmentant les risques d'affouillement [52],[37].

Les autres principales actions climatiques affectant les ponts sont la température et le vent. L'action de la température sur les matériaux est généralement bien connue. Lorsque la température est élevée, elle est une des causes de la fissuration du béton frais en cours de durcissement du fait de son séchage naturel (fissuration due au retrait de dessiccation).

À l'opposé, un bétonnage par temps froid, sans précautions particulières, engendre un risque de gel de l'eau du béton qui le détériore par expansion.

Ce risque doit être distingué des dégradations produites sur le béton durci, les cycles de gel et dégel.

En ce qui concerne le vent, son action sur les structures se manifeste de nombreuses manières: cela va de l'effet de dessiccation du béton frais en surface à la pression dynamique appliquée aux structures et à leur mise en mouvement éventuelle.

3.3.4. Facteurs accidentels

3.3.4.1 Séismes :

Les effets du séisme sur la dégradation des ponts sont significatifs et peuvent entraîner des dommages structurels graves.

La situation géographique de l'Algérie, fait que plusieurs régions du pays peuvent être qualifiées de zones sismiquement actives. La sollicitation sismique, qu'a connue la région de BOUMERDES en 2003 de magnitude 6.8 en est une preuve. Le dimensionnement des ouvrages d'art en tenant compte du risque sismique est essentiel afin d'éviter des effondrements catastrophiques et limiter les degrés d'endommagement et de déformation. Le règlement parasismique des ouvrages d'art Algérien RPOA-2008 a été élaboré dans ce sens.



Figure 3.4. Pont détruit par un séisme, Kobe, janvier 1995

3.3.4.2 Choc des véhicules :

Le choc des véhicules contre un ouvrage représente un danger considérablement fréquent dont les plus souvent sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts et particulièrement lorsque ce dernier concerne une ligne à grande ou à très grande vitesse.

Les ondes de choc endommagent les éléments du béton qui sont épaufrés et laissent généralement à nu le cadre d'armatures, les cassures sont fraîches et non altérées, les armatures ne sont pas corrodées, en plus, les épaufrures résultantes sont profondes et elles n'ont pas l'aspect d'un écaillage.



Figure 3.5. Choc de véhicule

3.3.4.3 Incendie :

L'action du feu sur les ouvrages d'art présente une probabilité absolue comparable à celle des chocs de véhicules lourds sur les piles ou les tabliers [45]

Les incendies peuvent avoir des effets significatifs sur les structures en béton armé, notamment les ponts. Bien que le béton soit classé comme un matériau incombustible, sa résistance au feu et son comportement à haute température méritent une attention particulière.

La résistance du béton commence à diminuer significativement autour de 600 °C, mais même à cette température, il conserve encore environ 50 à 60 % de sa capacité de résistance [53].

Des études montrent que le béton haute résistance (BHR) est particulièrement vulnérable à l'effritement sous l'effet de la chaleur. Ce phénomène a été observé lors d'incendies réels, comme celui du tunnel sous la Manche en 1996, où des dommages importants ont été causés par l'éclatement du béton [54].

L'effritement est causé par un faible rapport eau-ciment dans le BHR, ce qui entraîne une désintégration rapide des couches superficielles du béton lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées [54]



Figure 3.6. Résistance à l'incendie d'un pont routier [55]

3.3.5. Défauts de conception et d'exécution

Les dégradations des ponts peuvent être attribuées à divers défauts de conception et d'exécution. Néanmoins, ces défauts sont souvent évitables grâce à une planification rigoureuse, une sélection appropriée des matériaux et un contrôle de qualité strict pendant la construction. Parmi ces défauts nous trouvons :

Erreurs de calcul : Une mauvaise évaluation des charges ou des contraintes peut entraîner des fissures et des déformations excessives.

Mauvaise qualité du béton : Un béton mal dosé, avec des agrégats défectueux ou un excès d'eau, est moins résistant et plus perméable aux agents agressifs.

Défauts de ferrailage : Un positionnement incorrect des armatures, des recouvrements insuffisants ou une densité excessive peuvent créer des zones de faiblesse.

Mauvaise vibration du béton : Une vibration insuffisante lors du coulage peut entraîner des vides et des zones de ségrégation, ce qui affaiblit le béton.

Enrobage insuffisant : Un enrobage de béton trop mince ou de mauvaise qualité ne protège pas efficacement les armatures contre les agents agressifs.

Les défauts d'étanchéité ou de drainage : Ces défauts peuvent favoriser l'infiltration d'eau et accélérer la corrosion des armatures.

3.3.6. Autres Facteurs

3.3.6.1. Mouvements du sol :

Les tassements, qu'ils soient différentiels ou uniformes, constituent une des principales causes de dégradation des ponts. Ces mouvements du sol sur lesquels reposent les ouvrages d'art engendrent des contraintes supplémentaires dans la structure, susceptibles de provoquer des fissures, des déformations et, à long terme, une diminution de la capacité portante du pont.

Les dégradations causées par les tassements réduisent la durée de vie du pont et augmentent les coûts d'entretien. Dans les cas les plus graves, ces tassements peuvent conduire à la rupture de la structure, mettant en danger la sécurité des usagers. Dans des cas moins graves, ils peuvent causer des perturbations du trafic, nécessitant des restrictions de circulation ou des fermetures de voies, ce qui entraîne des perturbations importantes pour les usagers [39],[56].

3.3.6.2. Défaut d'entretien : Un manque d'entretien régulier, tel que le nettoyage, l'inspection et la réparation des fissures, peut accélérer la dégradation.

3.4. Typologie des désordres

3.4.1. Désordres affectant les fondations:

Les désordres affectant les fondations des ponts sont variés et peuvent avoir des conséquences graves sur la sécurité et la durabilité des structures. Ces désordres peuvent être classés en plusieurs catégories, chacune ayant des causes et des manifestations spécifiques:

3.4.1.1. Tassements des fondations :

Les tassements se produisent lorsque le sol sous les fondations ne peut pas supporter les charges appliquées, entraînant un affaissement inégal ou excessif. Ce problème peut résulter d'une mauvaise conception, de sollicitations trop importantes, d'une exécution défectueuse, ou de conditions naturelles comme l'affouillement dû à des écoulements d'eau [57],[58].

3.4.1.2. Insuffisance de résistance:

Certaines structures peuvent être incapables de supporter des efforts tranchants ou/et de flexion, ce qui peut provoquer des déformations significatives. Ce type de problème est souvent attribué à une conception inappropriée ou à une surcharge causée par un trafic excessif [57],[58].

3.4.1.3. Effets des conditions environnementales

Les phénomènes naturels tels que les inondations ou les tremblements de terre peuvent provoquer des dommages significatifs aux fondations.

Exemple : L'effondrement du pont de la Rivière Saint-Étienne en 2007, causé par l'érosion du sol due à une crue [57].

3.4.2. Désordres affectant les appuis

Ces désordres peuvent se manifester sous forme de :

- ✓ Détérioration du béton des appuis à cause de mauvais matériaux, environnement agressif, ou sollicitations excessives.
- ✓ Rupture des piles sous l'effet d'un séisme ou d'un choc par exemple.
- ✓ Endommagement des culées par exemple à cause de la poussée dynamique des terres.

3.4.3. Désordres affectant les équipements :

Les principaux désordres des équipements peuvent concerner

- ✓ Les dispositifs de retenue (Garde-corps, glissières de Sécurité, barrières en béton etc.).
- ✓ Les trottoirs et les bordures
- ✓ Les corniches
- ✓ La couche de roulement
- ✓ Les systèmes d'évacuation des eaux
- ✓ La chape d'étanchéité

3.4.4. Désordres affectant les joints de chaussée :

Les joints de chaussée des ponts peuvent être affectés par divers désordres, qui peuvent compromettre leur fonctionnalité et la sécurité des usagers. Les principaux types de désordres pouvant survenir sont:

- ✓ Fissures longitudinales des joints: Se produisent souvent le long des joints et peuvent indiquer des mouvements structurels.
- ✓ Fissures transversales des joints: Elles apparaissent perpendiculairement aux joints et peuvent être causées par des variations de température ou des charges excessives.
- ✓ Décalages de Joint : Cela se manifeste par une dénivellation des lèvres du joint, ce qui peut entraîner des infiltrations d'eau et une dégradation accrue des matériaux sous-jacents[59].
- ✓ Affaissements : Ces déformations peuvent se produire sur les rives de la chaussée, souvent dues à un tassement du sol ou à une mauvaise conception.
- ✓ Bourrelets : Ces défauts sont caractérisés par des gonflements qui se forment sur la surface de la chaussée, généralement dues à la déformation du matériau sous l'effet de la chaleur ou d'une pression accrue [59].
- ✓ Flambement : Ce phénomène se produit lorsque les joints sont soumis à une compression excessive, entraînant une déformation permanente [59]
- ✓ Dis-jointoiement: Cela concerne la dégradation du mortier autour des joints, qui peut entraîner une perte d'étanchéité et favoriser l'infiltration d'eau dans les structures sous-jacentes [60],[61]

3.4.5. Désordres affectant les appareils d'appuis :

Les appareils d'appui des ponts sont essentiels pour transmettre les charges du tablier aux supports, mais ils peuvent être sujets à divers désordres tels que :

- ✓ Corrosion : La corrosion des parties métalliques est l'un des problèmes les plus fréquents, en particulier dans les appareils d'appui métalliques. Elle peut entraîner une dégradation significative et réduire la capacité portante de l'appareil [62],[63]
- ✓ Fissuration : Des fissures peuvent apparaître dans le noyau des appareils d'appui, souvent dues à des mouvements structurels ou à une mauvaise protection contre la corrosion[62],[63]
- ✓ Usure et Feuilletage : Les rouleaux et autres éléments mobiles peuvent subir un feuilletage ou une usure excessive, ce qui affecte leur fonctionnement et peut provoquer un blocage[62].
- ✓ Dénivellation et Déplacement : Des dénivellations entre les éléments du pont peuvent survenir en raison de translations importantes, entraînant des problèmes d'alignement et de fonctionnement [62],[63].
- ✓ Déformation excessive : peut résulter de plusieurs causes et peut signaler des désordres structurels plus graves [64].
- ✓ Rupture de l'appareil d'appuis: La rupture des appareils d'appuis rupture est souvent

révélatrice d'un défaut sérieux [62],[63].

- ✓ Ecrasement de l'appareil d'appuis : Suite à une mauvaise répartition des réactions d'appuis ou un mouvement des appuis (tassement différentiels) [45].

3.5. Principaux systèmes d'évaluation de l'état des ponts

Il existe plusieurs systèmes d'évaluation de l'état des ponts qui permettent de surveiller leur sécurité, leur durabilité et leur fonctionnalité. Ces systèmes s'appuient souvent sur des inspections visuelles, des tests techniques et des modèles mathématiques pour évaluer leurs conditions. Les principaux systèmes généralement utilisés sont :

3.5.1. Systèmes basés sur les états limites

Les systèmes basés sur les états limites visent à garantir la sécurité et la fonctionnalité des ponts existants. En intégrant une approche méthodique qui combine identification des charges, application de coefficients de sécurité et analyse numérique, ces systèmes permettent d'évaluer efficacement l'état structural des ponts tout en répondant aux exigences modernes du génie civil.

Ces systèmes permettent de déterminer si une structure peut supporter les charges et les conditions d'utilisation prévues sans atteindre un état de défaillance.

Les états limites se divisent en deux catégories principales :

1. États limites ultimes : Ce sont les conditions qui pourraient mener à l'effondrement de la structure. Ils incluent des phénomènes tels que :

- La rupture de matériaux.
- Le renversement ou le glissement.
- Des déformations excessives [65].

2. États limites de service : Ils concernent la performance de la structure pendant son utilisation, sans nécessairement mener à une défaillance. Cela inclut :

- Les vibrations excessives.
- Les flèches (déformations verticales) trop importantes.
- Les déformations locales [65].

La méthodologie d'évaluation basée sur les états limites implique plusieurs étapes :

- Identification des charges : Les charges permanentes (poids propre, équipements fixes) et variables (vent, neige) doivent être définies selon les normes en vigueur [65],[66].

- Application de coefficients de sécurité : Ces coefficients tiennent compte des incertitudes liées aux charges et à la résistance des matériaux. Par exemple, une charge permanente peut avoir un coefficient proche de 1, tandis qu'une charge variable comme le vent peut nécessiter un coefficient plus élevé [65].
- Analyse numérique : Des modèles numériques, comme ceux utilisant la méthode des éléments finis, sont souvent employés pour simuler le comportement du pont sous différentes conditions de charge et pour déterminer les états limites [67].

Le calcul aux états limites présente plusieurs avantages :

- Uniformité dans la sécurité : Il assure que toutes les structures répondent à des critères de sécurité identiques, facilitant ainsi la conception et l'évaluation [65].
- Adaptabilité : Ce système s'applique à divers types de structures et matériaux, permettant une large gamme d'applications dans le génie civil [65].
- Outil d'évaluation avancé : Il permet une évaluation plus précise des ponts en service, surtout face à l'augmentation des charges dues au trafic routier moderne [67], [68].

3.5.2. Systèmes basés sur l'inspection visuelle

Ces systèmes reposent sur des inspections visuelles réalisées par des ingénieurs experts pour identifier les défauts visibles tels que les fissures, la corrosion, la déformation, l'usure des matériaux, etc. Les ponts sont souvent classés selon une échelle numérique qui reflète leur état global.

Exemples :

✓ **Le National Bridge Inventory (NBI) :**

Utilisé aux États-Unis, ce système évalue la condition des ponts à l'aide d'une échelle de notation allant de 0 à 9, prenant en compte des critères tels que la superstructure, la sous-structure et la chaussée.

✓ **Système de Notation de l'État des Ponts (SNEP) :**

Ce système est principalement utilisé en France pour évaluer l'état des ponts. Il repose sur une inspection détaillée de la structure, suivie d'une notation des différents éléments du pont (fondations, piles, tablier, etc.). Chaque partie du pont est notée sur une échelle de 0 à 3, ce qui permet d'obtenir un score global pour chaque structure. La notation permet de déterminer si un pont nécessite des réparations, des renforcements, ou une réhabilitation complète.

D'autres pays européens comme l'Allemagne, les Pays-Bas et l'Italie ont leurs propres systèmes d'évaluation des ponts, souvent basés sur des principes similaires à ceux du SNEP, mais avec des méthodes et des échelles de notation différentes.

L'utilisation des méthodes d'inspection visuelle peut réduire le temps et les coûts associés aux évaluations structurelles complètes. Cependant, certaines zones du pont peuvent être difficiles d'accès, nécessitant un équipement spécial ou des mesures de sécurité accrues.

3.5.3. Systèmes basés sur la modélisation numérique

L'évaluation de l'état des ponts peut également se faire par modélisation numérique en utilisant des logiciels d'analyse structurelle. Ces méthodes permettent d'analyser le comportement structurel sous différentes conditions de charge et d'environnement, offrant une compréhension approfondie de la performance des ponts.

La modélisation numérique consiste à créer des représentations mathématiques d'un pont, permettant de simuler son comportement sous diverses conditions. Cela inclut les modèles géométriques (Représentation précise des dimensions et de la forme du pont) et les propriétés des matériaux (Intégration des caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés dans la construction du pont).

L'utilisation de logiciels spécialisés comme SAP2000, ABAQUS ou ANSYS permet de simuler des scénarios de dégradation, ce qui permet aux ingénieurs de prédire l'évolution de l'état du pont et de planifier les réparations nécessaires.

Ces logiciels sont basés sur la méthode des éléments finis (MEF), qui est la technique la plus couramment utilisée pour résoudre des problèmes complexes en subdivisant le pont en éléments plus simples, facilitant ainsi l'analyse (éléments finis). Chaque élément est caractérisé par des équations qui décrivent son comportement mécanique.

La méthode des éléments finis offre une multitude d'avantages pour la modélisation et l'analyse des ponts. Sa capacité à simplifier les systèmes complexes, à gérer les matériaux hétérogènes, à traiter les non-linéarités et à optimiser les conceptions en fait un outil indispensable pour les ingénieurs civils dans le domaine du génie structural. Grâce à ces avantages, la MEF contribue significativement à garantir la sécurité et la durabilité des infrastructures routières.

3.5.4. Système basé sur les Probabilités et Statistiques

Ces méthodes reposent sur des modèles mathématiques qui intègrent l'incertitude associée aux matériaux, aux charges et aux conditions environnementales. Elles permettent d'estimer la fiabilité d'une structure en tenant compte de divers facteurs de risque.

Cette approche évalue la probabilité qu'une structure réponde aux exigences de performance tout au long de sa durée de vie. Elle utilise des modèles statistiques et probabilistes pour simuler différents scénarios et évaluer les risques associés à chaque situation.

Des techniques de simulation, telles que la méthode de Monte Carlo, sont utilisées pour modéliser l'incertitude dans les paramètres d'entrée suivant des lois probabilistes bien choisies pour ces derniers [69] .

3.5.5. Systèmes basés sur les indicateurs de performance

Les systèmes basés sur les indicateurs de performance (KPIs)(Key Performance Indicators) sont essentiels pour évaluer l'état des ponts. Ces indicateurs permettent de quantifier divers aspects de la performance structurelle, de la sécurité et de la durabilité des ponts, offrant ainsi une base solide pour la prise de décisions concernant leur maintenance et leur gestion [70].

Types d'indicateurs de performance

Les indicateurs de performance utilisés pour évaluer les ponts peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Indicateurs de sécurité : Mesurent la capacité d'un pont à résister aux charges et aux conditions environnementales sans défaillance. Par exemple, le taux de défaillance peut indiquer la fréquence des incidents liés à la structure.
- Indicateurs de condition : Évaluent l'état physique du pont, tels que le pourcentage de dégradations visibles (fissures, corrosion) ou le niveau d'entretien requis.
- Indicateurs d'efficacité : Comparaison entre le poids réel du pont et le poids théorique minimum nécessaire pour supporter les charges prévues. Cela aide à évaluer l'efficacité de la conception du pont [71].
- Indicateurs économiques : Évaluent le coût d'entretien par rapport à la durée de vie restante du pont, permettant d'optimiser les budgets alloués à la maintenance.

Méthodologie d'évaluation

Pour mettre en place un système basé sur des indicateurs de performance, il est essentiel d'adopter une méthodologie structurée :

- Définition des KPIs : Sélectionner des indicateurs spécifiques, mesurables, atteignables, pertinents et temporellement définis (méthode SMART) pour garantir leur efficacité [72].
- Collecte de données : Utiliser des outils numériques et des capteurs pour collecter des données en temps réel sur l'état du pont. Cela peut inclure des mesures de vibrations, des inspections visuelles et des analyses structurelles.
- Analyse et interprétation : Les données recueillies doivent être analysées pour identifier les tendances et les anomalies. L'utilisation de tableaux de bord peut faciliter cette analyse en fournissant une vue d'ensemble claire des performances [73].

Avantages des systèmes basés sur les KPIs

- Prise de décision informée : Les KPIs fournissent des informations précises qui aident les gestionnaires à prendre des décisions éclairées concernant l'entretien et les réparations nécessaires.

- Suivi continu : La mise en place d'indicateurs permet un suivi constant de l'état du pont, facilitant ainsi une intervention rapide en cas de dégradation.
- Amélioration continue : Les systèmes basés sur les KPIs favorisent une culture d'amélioration continue en identifiant les domaines nécessitant des améliorations dans la conception ou l'entretien des ponts.

3.5.6. Les méthodes d'évaluation les plus récentes

Les méthodes d'évaluation de l'état des ponts ont évolué au fil des années pour devenir de plus en plus précises, efficaces et adaptées aux technologies modernes. Elles peuvent combiner l'utilisation de technologies avancées telles que les drones, le LiDAR, l'intelligence artificielle, l'imagerie thermique, et les capteurs en temps réel pour obtenir une idée précise de l'état des ponts. Ces méthodes permettent non seulement de mieux comprendre la condition actuelle des infrastructures, mais aussi de prévoir leur durabilité et de planifier des interventions de maintenance plus efficaces. L'intégration de ces technologies facilite une gestion proactive des ponts, contribuant ainsi à améliorer leur sécurité et leur longévité.

Parmi les méthodes d'évaluation les plus récentes utilisées pour évaluer l'état des ponts existants nous citons :

1. Surveillance en temps réel (Structural Health Monitoring - SHM) :

Le Structural Health Monitoring (SHM) est une méthode de surveillance continue qui utilise des capteurs installés sur les ponts pour mesurer divers paramètres comme les vibrations, les déplacements, les déformations, la température, l'humidité et d'autres conditions environnementales. Les données recueillies en temps réel sont envoyées à une plateforme pour analyse. Ce procédé utilise les moyens de technologies avancées tels que les accéléromètres, jauges de déformation, capteurs de déplacement, capteurs de température, inclinomètres, GPS, etc.

Parmi les grands avantages de cette méthode est qu'elle permet de détecter des défaillances ou des comportements anormaux du pont bien avant qu'ils ne deviennent critiques et offre une évaluation continue et dynamique de l'état des ponts.

À titre d'exemple, plusieurs ponts en suspendus Chine et aux États-Unis intègrent désormais des systèmes de SHM pour suivre leur condition en temps réel.

2. Inspection par LiDAR (Light Detection and Ranging)

Le LiDAR est une technologie de télédétection qui utilise un laser pour scanner et cartographier la structure du pont avec une grande précision. Il permet de créer un modèle 3D du pont, offrant une analyse détaillée de sa géométrie et de son état structurel et fournit des données très précises sur l'état du pont. Il est particulièrement utile pour mesurer les déformations, la corrosion, et l'usure, notamment sur des ponts complexes [74].

3. Imagerie par drone (Inspection par drone)

L'utilisation des drones pour l'inspection des ponts permet de capturer des images haute résolution, ainsi que des vidéos, de toutes les parties du pont, y compris celles difficiles d'accès. Les drones peuvent être équipés de caméras thermiques, de LiDAR (télédétection par laser), et d'autres capteurs pour évaluer l'état du béton, de l'acier, et des autres matériaux[74].

Cette technique réduit les risques pour les inspecteurs, permet des inspections rapides et couvre des zones difficiles à atteindre sans interruption du trafic. De plus, l'imagerie permet une analyse visuelle détaillée, tandis que les drones équipés de LiDAR ou de caméras thermiques peuvent aussi détecter des défauts invisibles à l'œil nu.

Aux Etats-Unis, en Chine et dans de nombreux pays Européens, comme le Royaume-Uni et la France, les drones sont utilisés pour inspecter les ponts ferroviaires et autoroutiers.

4. Inspection par Ultrason (Contrôles non destructifs - CND)

Les contrôles non destructifs (CND), notamment les tests par ultrasons, permettent d'inspecter les structures internes des matériaux du pont sans les endommager. Cette méthode est utilisée pour détecter des fissures internes, de la corrosion ou des défaillances dans le béton ou l'acier.

Cela permet de localiser des défauts internes invisibles à l'œil nu, sans besoin d'endommager la structure. Elle est particulièrement utile pour évaluer les fondations ou les parties internes du pont.

5. Imagerie Thermographique (Caméra thermique)

L'utilisation de caméras thermiques permet d'identifier les zones de défaillance du pont en détectant les différences de température à la surface des matériaux. Les variations thermiques peuvent indiquer des problèmes comme la corrosion sous-jacente, des défauts d'isolation ou des fissures dans le béton qui laissent passer l'humidité [74].

6. Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) et de l'Apprentissage Automatique (Machine Learning)

Les technologies d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique sont de plus en plus utilisées pour analyser les données collectées lors des inspections. L'IA peut aider à détecter des anomalies et à prévoir la durée de vie des ponts en analysant des données historiques et en prédisant des scénarios futurs de dégradation.

Ce moyen permet d'automatiser l'analyse des inspections et d'améliorer la précision des évaluations. L'IA peut détecter des modèles cachés dans de grandes quantités de données, rendant ainsi les évaluations plus rapides et plus fiables.

7. Inspection par Radar à pénétration de sol (Ground Penetrating Radar - GPR)

Le Radar à pénétration de sol (GPR) est utilisé pour examiner la structure interne d'un pont,

notamment pour détecter des anomalies dans le béton, comme des fissures ou de la corrosion dans les armatures. Il émet des ondes électromagnétiques qui sont réfléchies par les différents matériaux, permettant une analyse détaillée du sous-sol ou de la structure et de cartographier les structures internes du pont de manière non invasive [74].

3.5.6. Exemples de ponts en Algérie :

Sans être exhaustifs, citons quelques exemples de ponts en Algérie où les données de cas réels ont été utilisées avec succès pour améliorer la précision des modèles d'expertise des ponts :

- **Pont de l'Oued Isser** : Ce pont, faisant partie du projet de ligne à grande vitesse (LGV) reliant Oran, Sidi Bel Abbès et Tlemcen, est équipé de capteurs permettant de mesurer des paramètres tels que la force des vents et les secousses sismiques. Ces données sont cruciales pour ajuster en temps réel la vitesse des trains et valider les modèles numériques de performance du pont [75].

- **Pont de Sidi Rached** : Construit entre 1907 et 1912, ce viaduc a subi plusieurs réhabilitations basées sur des analyses de son comportement structurel. Les travaux de réhabilitation ont inclus des études sur l'impact des eaux souterraines sur la stabilité du pont, utilisant des données historiques et contemporaines pour optimiser les interventions [76].

- **Pont ferroviaire sur le Mont de l'Ourit** : Bien que moins documenté dans les résultats, ce pont conçu par Gustave Eiffel est un exemple où des données réelles ont été utilisées pour évaluer sa résistance et sa durabilité dans le temps, intégrant ainsi des analyses sismiques et de charge [77].

3.6. Les normes et réglementations en vigueur

L'évaluation de l'état des ponts est régie par plusieurs normes et réglementations qui varient selon les pays et les types de structures. Les principales normes en vigueur sont:

3.6.1. Normes Canadiennes (Norme S6-88) :

Cette norme traite de l'évaluation de la capacité portante des ponts en béton armé. Elle est souvent critiquée pour sa tendance à sous-estimer la capacité réelle des structures, en utilisant des hypothèses générales qui ne tiennent pas compte des conditions spécifiques de chaque pont [78].

3.6.2. Eurocodes

- Eurocode 0 : Ce code fournit les bases de calcul pour l'évaluation structurale des constructions existantes, y compris les ponts. Il est applicable lors de projets de réparations ou de modifications [79].

- Eurocode 1-2 : Ce code définit les actions sur les structures, y compris celles dues au trafic

sur les ponts. Bien qu'il soit principalement destiné aux nouvelles constructions, il peut également être pertinent pour l'évaluation des ouvrages existants[79].

3.6.3. Normes Internationales

- ISO 13822:2010 : Cette norme internationale traite de l'évaluation des constructions existantes, visant à limiter les interventions sur ces structures. Elle souligne que l'application des règlements destinés aux ouvrages neufs peut conduire à des renforcements injustifiés[79]

3.6.4. Normes et Réglementations en Algérie pour l'Évaluation de l'État des Ponts

L'évaluation de l'état des ponts en Algérie repose sur un cadre réglementaire solide qui vise à assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures.

Cette évaluation est régie par plusieurs normes et réglementations, principalement établies par des lois spécifiques et des décrets ministériels sur la base d'un ensemble de règles et de réglementations spécifiques, conçues pour assurer la durabilité et la fiabilité de ces ouvrages d'art.

Le cadre réglementaire algérien en matière d'évaluation des ponts est principalement constitué de :

- ✓ Le Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art (RPOA) : Ce règlement, mis en place en 2008, définit les normes de conception et de calcul des ouvrages d'art, y compris les ponts, en tenant compte des risques sismiques spécifiques à l'Algérie. Il inclut des recommandations pour l'évaluation des ouvrages existants.
- ✓ Le Règlement Définissant les Charges à Appliquer pour le Calcul et les Épreuves des Ponts Routes (RCPR) : Ce règlement spécifie les charges à considérer lors du calcul et des essais des ponts routiers. Il est essentiel pour évaluer la capacité portante des ouvrages.
- ✓ Les normes internationales (Eurocodes) : Bien que le RPOA soit le référentiel principal, les normes internationales, notamment les Eurocodes, sont souvent utilisées comme référence complémentaire pour les études plus approfondies.

Cadre Légal

- ✓ Loi n° 90-30 du 1er décembre 1990 : Cette loi constitue la base légale pour la réglementation des infrastructures, y compris les ponts. Elle stipule que le ministre compétent doit établir, en concertation avec les autorités locales, des programmes relatifs à la construction et à l'entretien des ouvrages d'art [80].
- ✓ Normes Techniques : Les ponts doivent être conçus et réalisés selon les normes techniques en vigueur, qui incluent des critères de sécurité, de durabilité et de résistance aux aléas naturels, notamment sismiques [81].

Normes Spécifiques

- ✓ Normes Parasismiques : En Algérie, les normes anti-sismiques sont cruciales pour la conception des infrastructures. Les règles de conception doivent prendre en compte la classification des zones sismiques et les caractéristiques géologiques du site [81] .
- ✓ Évaluations Techniques : Des études d'évaluation régulières sont nécessaires pour déterminer la durée de vie restante des ponts. Ces évaluations peuvent inclure des inspections visuelles, des tests non destructifs et une analyse structurale approfondie [82].

Procédures d'Évaluation

1. Inspections Périodiques : Les ponts doivent faire l'objet d'inspections régulières afin d'identifier tout signe de détérioration ou de défaillance structurelle. Ces inspections sont souvent réalisées par des ingénieurs qualifiés [80].
2. Rapports d'Évaluation : Après chaque inspection, un rapport détaillé est établi, indiquant l'état général du pont, les réparations nécessaires et les recommandations pour l'entretien futur.
3. Interventions d'Urgence : En cas de détection de problèmes graves, des interventions immédiates peuvent être requises pour garantir la sécurité des usagers [83].

3.7. Conclusion

La compréhension des facteurs pathologiques sur les ponts est cruciale pour leur maintenance et leur sécurité. Les interventions doivent être ciblées pour traiter ces problèmes avant qu'ils n'entraînent des défaillances structurelles majeures et éventuellement irréversibles.

Une approche intégrée et systématique est essentielle pour évaluer l'état des ponts afin de prévenir les dégradations et assurer leur sécurité à long terme. Les méthodes modernes d'évaluation et de diagnostic sont cruciales pour anticiper et gérer les pathologies rencontrées.

Chapitre IV

La prise de décision multicritère et la méthode AHP

La prise de décision multicritère et la méthode AHP

4.1. Introduction

L'Analyse Multicritères (AMC) est une approche essentielle dans la prise de décision, particulièrement dans des contextes complexes où plusieurs critères, souvent en conflit, doivent être considérés. Cette méthode permet d'évaluer et de comparer différentes options en intégrant divers facteurs tels que le coût, l'impact environnemental et la satisfaction des parties prenantes. À travers des techniques variées, comme l'Analytic Hierarchy Process (AHP), l'AMC aide à structurer le processus décisionnel, facilitant ainsi l'identification de solutions optimales.

Ce chapitre explore les définitions, principes et méthodes les plus courantes de l'AMC, tout en mettant en lumière son importance croissante dans des domaines tels que le génie civil et la gestion des ressources. Nous examinerons également les défis associés à cette approche, notamment la subjectivité dans la pondération des critères.

4.2. L'Analyse multicritère (AMC)

4.2.1. Définitions, concepts et principes de l'AMC

4.2.1.1. Définitions

L'Analyse Multicritères (AMC), également connue sous le nom de Méthode Multicritères (MMC) ou Aide Multicritères à la Décision (AMCD), regroupe un ensemble de techniques destinées à faciliter la prise de décision dans des situations complexes où plusieurs critères, souvent en conflit, doivent être évalués et comparés pour différentes options.

L'AMC repose sur l'idée que les décisions ne peuvent pas être fondées uniquement sur un critère unique, comme le coût ou le bénéfice immédiat, mais doivent également intégrer d'autres facteurs tels que l'impact environnemental, la satisfaction des parties prenantes et la faisabilité technique, permettant ainsi d'orienter les choix vers des solutions optimales en tenant compte de divers points de vue afin d'atteindre un équilibre optimal. Par exemple, dans le cadre d'un projet d'infrastructure, il est crucial de prendre en compte non seulement les aspects financiers, mais aussi les impacts environnementaux, sociaux et économiques.

4.2.1.2. Concepts clés de l'AMC :

L'évaluation des options dans tout processus décisionnel repose sur plusieurs éléments clés qui permettent de structurer et de rationaliser la prise de décision. Ces concepts sont :

✓ **Critères d'Évaluation :** Les critères sont les paramètres ou dimensions utilisés pour

évaluer les différentes options disponibles. Ils servent de fondement pour comparer les alternatives en fonction de leurs performances. Par exemple, lors de l'évaluation d'un projet, les critères peuvent inclure :

- Coût : Évaluation des dépenses nécessaires pour la mise en œuvre.
 - Durabilité : Impact environnemental et pérennité des solutions proposées.
 - Impact sur la communauté: Effets sociaux et économiques sur la population locale.
- ✓ **Alternatives** : Ce sont les différentes options ou solutions possibles à évaluer par rapport aux critères établis.
 - ✓ **Poids des critères** : L'importance relative de chaque critère dans la décision. Les poids peuvent être déterminés par des techniques de jugement d'experts ou des méthodes de pondération telles que l'analyse par paires.
 - ✓ **Fonctions d'utilité** : Fonctions mathématiques qui traduisent la performance d'une alternative par rapport à un critère donné en une valeur numérique standardisée.
 - ✓ **Matrice de décision** : Un tableau qui rassemble les performances des alternatives par rapport à tous les critères.

4.2.1.3. Principes de l'AMC

Il n'existe pas une seule méthode multicritères, mais plutôt une famille de méthodes avec des approches variées. Cependant, on peut dégager des étapes générales communes à la plupart des MMC :

1. Définition du problème et des objectifs :

- ✓ Identifier la problématique : Définir clairement la question à laquelle on cherche à répondre et le contexte de la décision. Par exemple : "Quel projet d'aménagement urbain choisir pour optimiser à la fois la qualité de vie, le coût et l'impact environnemental ?"
- ✓ Définir les objectifs : Préciser les buts à atteindre. Ces objectifs doivent être formulés selon les critères de la méthode SMART, ce qui signifie qu'ils doivent être spécifiques, c'est-à-dire clairs et précis quant à ce que l'on souhaite accomplir; mesurables, permettant d'évaluer les progrès réalisés; atteignables, réalistes et réalisables en fonction des ressources disponibles ; réalistes, en tenant compte des contraintes et des capacités de l'équipe ou de l'organisation ; et enfin temporellement définis, avec une échéance précise pour assurer un suivi efficace.
- ✓ Identifier les acteurs concernés : Il est également crucial d'identifier les acteurs concernés par la problématique. Cela inclut toutes les parties prenantes, telles que les décideurs, les bénéficiaires, et d'autres groupes qui peuvent avoir un intérêt dans le résultat du projet. Comprendre leurs intérêts respectifs permet de mieux orienter le projet et d'assurer une collaboration efficace.

2. Identification des alternatives (actions, options) :

- ✓ *Lister les options possibles* : Dans cette étape cruciale, il est essentiel de dresser une liste exhaustive de toutes les solutions envisageables pour répondre au problème identifié. Cela implique de prendre en compte non seulement les solutions évidentes, mais aussi celles qui peuvent sembler moins conventionnelles. Pour ce faire, il peut être utile d'organiser un brainstorming avec les parties prenantes concernées, d'explorer des études de cas similaires ou de consulter des experts dans le domaine. Chaque option doit être notée de manière claire et concise, en s'assurant que toutes les perspectives sont prises en compte.
- ✓ *Définir les caractéristiques des alternatives*: Une fois les options identifiées, il est important de décrire précisément chaque alternative afin d'en évaluer la pertinence et l'efficacité. Cela inclut:
 - Description générale : Fournir un aperçu détaillé de chaque alternative, y compris son fonctionnement et son objectif principal.
 - Avantages et inconvénients: Analyser les points forts et les faiblesses de chaque option, en tenant compte des ressources nécessaires, des délais d'implémentation et des impacts potentiels sur l'organisation ou le projet.
 - Coûts associés: Estimer les coûts directs et indirects liés à chaque alternative, y compris les investissements initiaux et les frais récurrents.
 - Risques potentiels: Identifier les risques associés à chaque option, qu'ils soient financiers, opérationnels ou liés à la réputation.
 - Critères de succès: Définir comment mesurer le succès de chaque alternative une fois mise en œuvre, en établissant des indicateurs clairs et mesurables.

3. Définition des critères :

- ✓ Identifier les critères pertinents : Choisir les critères qui permettent d'évaluer les alternatives en fonction des objectifs. Les critères doivent être :
 - Pertinents : Liés aux objectifs.
 - Non redondants : Ne pas mesurer la même chose.
 - Opérationnels : Mesurables ou évaluables.
- ✓ Structurer les critères : Organiser les critères en une structure hiérarchique (arbre des critères) pour faciliter leur analyse.

4. Évaluation des alternatives selon les critères :

- ✓ Déterminer les performances des alternatives : Évaluer chaque alternative pour chaque critère. Cette évaluation peut être :

- Quantitative : Utilisation de mesures numériques (ex : coût en euros, distance en kilomètres).
 - Qualitative : Utilisation d'échelles d'appréciation (ex : très bon, bon, moyen, mauvais) ou de jugements subjectifs.
- ✓ Construire la matrice de performance : Organiser les résultats dans un tableau où les lignes représentent les alternatives et les colonnes les critères.

5. Pondération des critères :

- ✓ Déterminer l'importance relative des critères : Attribuer un poids à chaque critère pour refléter son importance par rapport aux autres. Plusieurs méthodes existent pour la pondération :
- Pondération directe : Les acteurs attribuent directement un poids à chaque critère (ex : sur 100).
 - Méthode des comparaisons par paires : Les acteurs comparent les critères deux à deux pour déterminer leur importance relative.
- ✓ S'assurer de la cohérence des poids: Vérifier que les poids attribués reflètent bien les préférences des acteurs.

6. Agrégation des résultats:

- ✓ **Combiner les performances et les poids:** Utiliser une méthode d'agrégation pour combiner les performances des alternatives sur chaque critère avec les poids des critères. Différentes méthodes d'agrégation existent:
- **Somme pondérée:** Multiplier la performance de chaque alternative sur chaque critère par le poids du critère, puis additionner les résultats.
 - **Méthodes ELECTRE, PROMETHEE, AHP :** Méthodes plus complexes qui utilisent des relations de sur-classement ou des comparaisons par paires.

7. Analyse des résultats et recommandations :

- ✓ **Interpréter les résultats :** Analyser les scores obtenus par les alternatives et identifier les alternatives les plus performantes.
- ✓ **Effectuer une analyse de sensibilité :** Tester la robustesse des résultats en modifiant les poids des critères ou les performances des alternatives.
- ✓ **Formuler des recommandations :** Proposer des recommandations aux décideurs en expliquant les raisons du choix.

4.2.2. Méthodes Courantes d'AMC

Les méthodes multicritères sont variées et adaptées à différents contextes, chacune présentant des caractéristiques spécifiques. Voici un aperçu des méthodes les plus fréquemment employées, regroupées par catégories principales, avec une description succincte de chacune :

4.2.2. 1. Méthodes basées sur la sur-classement (Outranking methods) :

✓ ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) :

Cette famille de méthodes, incluant ELECTRE I à IV et ELECTRE Tri, compare les actions par paires en établissant des relations de sur-classement fondées sur la concordance (accord entre critères) et la discordance (désaccord significatif sur un critère). Elles permettent d'élaborer un classement partiel ou complet des alternatives, particulièrement utiles en cas de nombreux critères et d'incertitudes dans les données[84] ,[85]

Logiciels associés à ELECTRE

Les logiciels associés à ELECTRE incluent CATIA, Pack Elec, SCHEMAPLIC, ProfiCAD, Calc EP et Obat, facilitant la conception électrique et la gestion de projets [86], [87], [88], [89].

✓ PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations):

Plus simple que l'ELECTRE, cette méthode utilise des fonctions de préférence pour évaluer la force de la préférence d'une alternative par rapport à une autre pour chaque critère. Elle génère ensuite un classement complet basé sur des indices de flux positifs et négatifs, appréciée pour sa clarté et sa simplicité [84]

Logiciels associés à PROMETHEE

Plusieurs logiciels permettent d'appliquer la méthode PROMETHEE dans un cadre interactif :

1. Decision Lab 2000 : Un logiciel qui facilite le développement de modèles basés sur PROMETHEE, permettant aux utilisateurs de définir facilement les alternatives, les critères et leurs poids respectifs.
2. D-Sight : Un autre outil qui offre une interface conviviale pour l'application de PROMETHEE, permettant également une visualisation graphique des résultats[90],[91].
3. Visual PROMETHEE : Développé spécifiquement pour intégrer les méthodes PROMETHEE et GAIA, ce logiciel aide à représenter graphiquement les résultats et à analyser les performances des alternatives[90],[92].

4.2.2.2. Méthodes basées sur l'agrégation pondérée:

✓ AHP (Analytic Hierarchy Process) :

Développée par Thomas Saaty, cette méthode décompose le problème de décision en une hiérarchie de critères et de sous-critères. Elle utilise des comparaisons par paires pour déterminer les poids relatifs des critères et les scores des alternatives pour chaque critère. L'agrégation pondérée permet ensuite de calculer un score global pour chaque alternative et de les classer. L'AHP est très populaire pour sa structure hiérarchique qui facilite la compréhension du problème et pour sa capacité à gérer des critères qualitatifs. [93],[94].

Les logiciels recommandés pour l'AHP incluent SuperDecisions, Expert Choice, Decision Lens, D-Sight, et MCDM Tools. Ces logiciels facilitent la modélisation et l'analyse des décisions complexes[95],[96],[97],[98],[99].

SAW (Simple Additive Weighting) :

C'est la méthode d'agrégation pondérée la plus simple. Elle consiste à attribuer un poids à chaque critère et à multiplier ce poids par le score de chaque alternative pour ce critère. La somme des scores pondérés pour chaque alternative donne son score global. SAW est facile à comprendre et à mettre en œuvre, mais elle suppose l'indépendance des critères et une échelle de mesure commune[100],[101].

Les logiciels associés à SAW incluent SAWprogram, qui facilite la création de programmes de coupe, et SAWfactory, permettant la surveillance à distance des machines.[19]

4.2.2. 3. Méthodes basées sur la distance à l'idéal (Distance-based methods) :

✓ TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) :

Cette méthode identifie l'alternative idéale (qui maximise tous les critères) et l'alternative anti-idéale (qui minimise tous les critères). Elle calcule ensuite la distance de chaque alternative à ces deux solutions idéales et classe les alternatives en fonction de leur proximité à l'idéal et de leur éloignement de l'anti-idéal. TOPSIS est appréciée pour sa logique intuitive et sa facilité d'interprétation [84],[103].

La méthode multicritère TOPSIS est soutenue par divers logiciels, parmi lesquels PyTOPSIS en Python, J-TOPSIS en Java, et des outils comme Expert Choice et SuperDecisions, qui intègrent également d'autres méthodes [104]

4.2.2. 4. Autres méthodes importantes :

✓ UTA (UTilités Additives) :

Cette méthode vise à construire une fonction d'utilité additive qui représente les préférences du décideur. Elle utilise des techniques d'optimisation pour estimer les paramètres de cette fonction à partir d'informations sur les préférences du décideur [84],[103] .

La méthode UTA s'accompagne de divers outils et ressources. Parmi eux, le langage R et ses packages comme `mcda`, Python avec `pymcda`, et MATLAB pour des scripts personnalisés. Des logiciels comme Expert Choice, D-Sight et Decision Lab permettent également d'intégrer l'UTA dans des analyses multicritères, facilitant ainsi la prise de décision[105] ,[106].

✓ MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) :

Cette méthode utilise des jugements qualitatifs pour évaluer les différences d'attractivité entre les alternatives. Elle est particulièrement utile lorsque les données sont difficiles à quantifier [84], [94].

Plusieurs logiciels sont dédiés à cette méthode tels que: M-MACBETH, un outil qualitatif ; MCDA-ULaval, utilisé académiquement ; et MACBETH for MCDA, facilitant l'analyse approfondie.

Facteurs considérés pour sélectionner une méthode multicritère :

- ✓ Le type de données disponibles : (quantitatives, qualitatives, imprécises)
- ✓ Le nombre de critères et d'alternatives :
- ✓ La complexité du problème.
- ✓ Les préférences du décideur.
- ✓ L'objectif de l'analyse : (classement, sélection, description)

Il est important de noter qu'il n'existe pas de méthode universelle et que le choix de la méthode la plus appropriée dépend du contexte spécifique du problème de décision. Souvent, une combinaison de plusieurs méthodes peut être utilisée pour obtenir une analyse plus complète et robuste.

4.2.3. Quelques exemples d'utilisation de l'AMC

L'Analyse Multicritère (AMC) est utilisée dans divers domaines pour évaluer et prendre des décisions en tenant compte de plusieurs critères notamment dans les domaines suivants :

1. Éducation :

- Auto Multiple Choice (AMC) : Ce logiciel permet de concevoir et corriger des QCM (Questions à Choix Multiples) de manière automatisée. Il facilite le contrôle continu des enseignements, génère des QCM imprimables, et utilise LaTeX pour la rédaction de sujets mathématiques. L'AMC peut également limiter la correction manuelle aux seules questions ouvertes et corriger automatiquement les copies après leur numérisation[107].

2. Santé publique :

- Modélisation des risques : L'AMC est utilisée pour déterminer les zones à risque dans la lutte contre le paludisme à Madagascar, en combinant des données environnementales et des connaissances d'experts pour cartographier les risques de transmission[108]. Par exemple, l'outil Full MCE for Public Health, développé pour le logiciel QGIS, permet aux acteurs de la santé d'utiliser une approche d'analyse multicritère pour identifier les priorités d'intervention[108].

3. Gestion des inondations :

- Projets de prévention : L'AMC est appliquée pour évaluer les projets de prévention des inondations en considérant leurs impacts sur la santé humaine, l'économie et l'environnement. Elle permet d'analyser les bénéfices et les coûts associés à ces projets, facilitant ainsi leur optimisation et leur justification économique[109],[110].

4. Environnement :

- Évaluation des impacts environnementaux : Dans le cadre de projets d'infrastructure ou d'aménagement du territoire, l'AMC aide à évaluer les conséquences environnementales en intégrant des indicateurs monétarisés et non monétarisés, ce qui permet de mieux comprendre l'efficacité et la rentabilité des projets proposés[109],[110].

Quelques exemples d'utilisation de l'AMC dans le Génie Civil :

Les méthodes multicritères d'aide à la décision (MCDA) sont de plus en plus utilisées dans le domaine du génie civil pour résoudre des problèmes complexes impliquant de nombreux critères souvent contradictoires:

1. Choix des matériaux de construction:

- ✓ **Sélection du type de béton:** Face à divers types de béton (haute performance, fibré, etc.), les MCDA aident à choisir le plus approprié en considérant des critères tels que la

résistance, la durabilité, le coût, l'impact environnemental (émissions de CO₂), la disponibilité locale, etc.

- ✓ **Choix des revêtements routiers:** Pour la construction ou la réfection de routes, il faut choisir entre différents types de revêtements (asphalte, béton, etc.). Les critères peuvent inclure le coût initial, la durabilité, la résistance à l'orniérage, le bruit, l'adhérence, l'impact environnemental, etc.

2. Conception et planification des infrastructures:

- ✓ **Tracé des routes et des autoroutes:** Le choix du tracé optimal d'une route implique de considérer des critères géographiques (topographie, géologie), environnementaux (impact sur la faune et la flore, traversée de zones sensibles), économiques (coût de construction, expropriations), sociaux (impact sur les riverains), etc. Les MCDA permettent de comparer différents tracés et de sélectionner le meilleur compromis.
- ✓ **Localisation des ouvrages d'art (ponts, tunnels, barrages):** La décision de construire un pont, un tunnel ou un barrage, et leur emplacement précis, dépend de nombreux facteurs tels que le coût, la géologie, l'hydrologie, l'impact environnemental, la sécurité, etc. Les MCDA aident à évaluer les différentes options et à choisir la solution optimale.
- ✓ **Gestion des eaux pluviales:** Face aux enjeux croissants liés aux inondations urbaines, les MCDA peuvent être utilisées pour évaluer différentes solutions de gestion des eaux pluviales (bassins de rétention, noues, toitures végétalisées) en considérant des critères tels que l'efficacité hydraulique, le coût, l'intégration paysagère, l'impact environnemental, etc.

3. Maintenance et réhabilitation des infrastructures:

- ✓ **Priorisation des travaux de maintenance:** Avec des budgets limités, il est crucial de prioriser les travaux de maintenance sur les infrastructures existantes (routes, ponts, bâtiments). Les MCDA permettent d'évaluer l'état des infrastructures en fonction de critères tels que la sécurité, la vétusté, le coût des réparations, l'impact sur les usagers, etc., et d'établir un ordre de priorité pour les interventions.
- ✓ **Choix des techniques de réhabilitation:** Face à un ouvrage endommagé, plusieurs techniques de réhabilitation peuvent être envisagées. Les MCDA aident à choisir la technique la plus appropriée en considérant des critères tels que le coût, la durabilité, l'impact environnemental, la rapidité d'exécution, etc.

4. Gestion des risques naturels:

- ✓ **Évaluation des risques d'inondation:** Les MCDA peuvent être utilisées pour évaluer les risques d'inondation dans une zone donnée en considérant des critères tels que l'aléa (probabilité et intensité des inondations), la vulnérabilité (présence d'habitations,

d'infrastructures), les enjeux (conséquences économiques, sociales, environnementales), etc. Cette évaluation permet de prioriser les mesures de prévention et de protection.

- ✓ **Choix des mesures de protection contre les avalanches, les glissements de terrain:**
Face à un risque naturel, plusieurs mesures de protection peuvent être envisagées (paravalanches, murs de soutènement, etc.). Les MCDA aident à choisir les mesures les plus appropriées en considérant des critères tels que l'efficacité, le coût, l'impact environnemental, l'acceptabilité sociale, etc.

4.3 Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP)

4.3.1. Principes de la Méthode AHP

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), ou Analyse Hiérarchique des Processus, est une méthode d'aide à la décision multicritère développée par Thomas Saaty dans les années 1970. Elle permet de structurer un problème complexe en une hiérarchie de critères et de sous-critères, puis d'évaluer et de comparer les différentes options en utilisant des comparaisons par paires[110], [111] .

4.3.2. Étapes de l'Application de la Méthode AHP

L'application de la méthode AHP passe par les étapes suivantes :

1. Définition du problème et de l'objectif :

- **Identifier le problème de décision :** Définir clairement la question à laquelle on cherche à répondre. Par exemple : "Quel est le meilleur fournisseur ?", "Quelle est la stratégie d'investissement la plus appropriée ?", etc.
- **Définir l'objectif global :** Préciser le but à atteindre. Par exemple : "Sélectionner le fournisseur le plus performant", "Maximiser le rendement de l'investissement", etc.

2. Construction de la hiérarchie :

- **Identifier les critères :** Déterminer les facteurs importants à prendre en compte pour atteindre l'objectif. Ces critères doivent être pertinents, mesurables et non redondants. Par exemple : pour le choix d'un fournisseur, les critères pourraient être le prix, la qualité, les délais de livraison, le service après-vente, etc.
- **Décomposer les critères en sous-critères (si nécessaire) :** Si certains critères sont trop généraux, les décomposer en sous-critères plus spécifiques. Par exemple, le critère "qualité" pourrait être décomposé en "fiabilité", "durabilité", "conformité aux normes", etc.
- **Structurer la hiérarchie :** Organiser les critères et les sous-critères en une structure hiérarchique arborescente, avec l'objectif global au sommet, suivi d'un niveau dédié aux critères de décision. Ensuite, un niveau supplémentaire décrivant les caractéristiques de chacun de ces critères. Enfin, au bas de cette hiérarchie, le dernier

niveau présente les actions à évaluer. (Figure 4.1.)

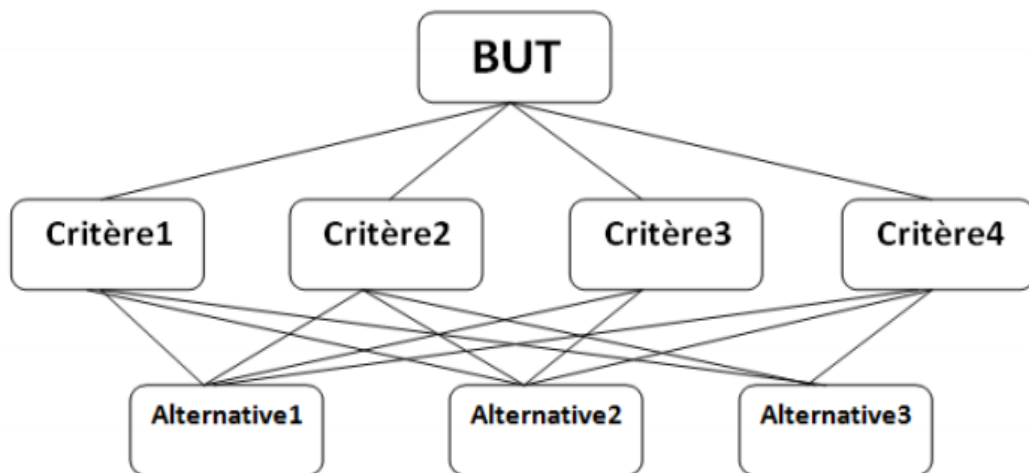


Figure 4.1.: Structure hiérarchique. [112]

3. Comparaisons par paires et établissement des matrices de comparaison :

- **Comparer les critères entre eux :** Pour chaque niveau de la hiérarchie (critères et sous-critères), comparer chaque élément avec tous les autres par paires, en les évaluant par rapport au critère du niveau supérieur. Pour ce faire, une note est attribuée à chaque paire d'éléments selon une échelle prédéfinie, comme le propose Saaty [112]

Tableau 4.1. : Échelle de comparaison par paires de Saaty [112]

Degré d'importance	Évaluation
1	Importance égale d'un critère par rapport à un autre
3	Importance modérée d'un critère par rapport à un autre
5	Importance forte d'un critère par rapport à un autre
7	Importance très forte d'un critère par rapport à un autre
9	Importance extrême d'un critère par rapport à un autre

N.B. : 2, 4, 6, 8 : Valeurs intermédiaires

Construire les matrices de comparaison :

Pour chaque ensemble de comparaisons par paires, il est nécessaire de créer une matrice carrée. Dans cette matrice, les lignes et les colonnes représentent les éléments à comparer, tandis que les valeurs à l'intérieur de la matrice reflètent les jugements de comparaison.

Voici la structure générale de la matrice des comparaisons :

Tableau 4.2.: Matrice des comparaisons.

	Critère 1.1	Critère 1.2	...	Critère 1.n
Critère 1.1	1	a_{12}	...	a_{1n}
Critère 2.1	a_{21}	1	...	a_{2n}
...	...	...	...	...
Critère n.1	a_{n1}	a_{n2}	...	1

Règles de Comparaison :

- ✓ Les éléments de la matrice sont notés a_{ij} , où i représente la ligne et j représente la colonne.
- ✓ La valeur a_{ij} indique le jugement de comparaison entre l'élément en ligne i et l'élément en colonne j .
- ✓ Conformément aux conventions établies, chaque élément est comparé dans le sens des lignes vers les colonnes.
- ✓ Il est important de noter que pour chaque paire d'éléments, la relation suivante est respectée :

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (4.1)$$

4. Calcul des poids des critères et des sous-critères :

- ✓ **Normaliser les matrices de comparaison :** Diviser chaque élément d'une matrice par la somme de sa colonne. Cela se formule comme suit :

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_j a_{ij}} \quad (4.2)$$

- ✓ **Calculer les poids :** Une fois la matrice normalisée, le poids relatif de chaque critère ou sous-critère est obtenu en calculant la moyenne des éléments de chaque ligne de la matrice normalisée. Cela s'exprime par :

$$p_i = \frac{1}{n} \sum_j b_{ij} \quad (4.3)$$

Où n représente le nombre de critères à comparer.

Remarque : Il est important de noter que la somme des poids des critères d'un même nœud d'arborescence est égale à 1.

5. Calcul des poids globaux :

Pour chaque option, multiplier le poids de chaque critère par le poids du sous-critère correspondant (si applicable) et additionner les résultats pour obtenir le poids global de l'option.

6. Analyse de la cohérence :

Calculer le ratio de cohérence (CR) : Cette étape permet de vérifier la cohérence des jugements subjectifs. Un CR inférieur à 0.1 (10%) est généralement considéré comme acceptable. Si le CR est supérieur à 0.1, il est nécessaire de revoir les comparaisons par paires.

Pour évaluer cet indice, Saaty propose de calculer l'indice de cohérence (IC) défini par la formule suivante :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4.4)$$

L'indice de cohérence (IC) est dérivé de la valeur propre maximale ($\lambda_{\max}$) de la matrice de comparaison, qui est déterminée comme suit :

Tableau 4.3.: Méthode de Calcul de ($\lambda_{\max}$)

	Critère 1.1	Critère 1.2		Critère 1.n
Critère 1.1	$p1 \times a11$	$p1 \times a12$		$p1 \times a1n$
Critère 1.2	$p2 \times a21$	$p2 \times a22$		$p2 \times a2n$
.....				
Critère 1.n	$pn \times an1$	$pn \times an2$		$pn \times ann$
	$d_1 = \sum_i p_i \times a_{i1}$	$d_2 = \sum_i p_i \times a_{i2}$		$d_n = \sum_i p_i \times a_{in}$

Les valeurs d_j sont calculées comme suit :

$$d_j = \sum_i p_i \times a_{ij} \quad (4.5)$$

Ensuite, la valeur propre maximale est déterminée par la formule :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_j \frac{d_j}{p_j} \quad (4.6)$$

Enfin, le ratio de cohérence (RC) est calculé selon l'équation suivante :

$$RC = \frac{IC}{RI} \quad (4.7)$$

Où RI représente l'indice de cohérence aléatoire, obtenu par simulation, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 4.4 : Indice aléatoire RI [112]

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

7. Classement des options :

Comparer les poids globaux : Classer les options en fonction de leur poids global, de la plus élevée à la plus basse. L'option ayant le poids global le plus élevé est considérée comme l'option satisfaisant au mieux le critère principal des jugements établis.

4.3.3. Principaux domaines d'application de l'AHP

L'AHP est largement appliquée dans divers domaines pour aider à la prise de décision multicritères. Comme exemples significatifs de son utilisation nous trouvons:

-Gestion des Fournisseurs

L'AHP est souvent utilisée pour la sélection des fournisseurs. Par exemple, elle a été appliquée pour classer les fournisseurs d'une centrale laitière en Tunisie, permettant une évaluation structurée basée sur plusieurs critères tels que le coût, la qualité et le délai de livraison[113].

-Évaluation des Risques

Dans le domaine de la gestion de projet, l'AHP est combinée avec d'autres méthodes comme le Weighted Product Model (WPM) pour évaluer les risques associés aux projets. Cette approche permet d'intégrer des critères quantitatifs et qualitatifs, facilitant ainsi une analyse complète des impacts potentiels[114]

-Choix Multicritères

L'AHP est également utilisée pour des décisions complexes telles que le choix d'emplacement pour des installations industrielles. Par exemple, elle a été employée pour déterminer l'emplacement optimal d'une usine en évaluant divers facteurs tels que l'accessibilité, les coûts et les ressources disponibles[113]

-Secteur Automobile

Dans l'industrie automobile, l'AHP a été appliquée pour le choix de véhicules en tenant compte de critères comme la performance, le prix et les caractéristiques techniques. Cela aide les consommateurs à faire des choix éclairés basés sur leurs priorités personnelles[113]

-Planification Environnementale

L'AHP est utilisée dans la planification environnementale, où elle aide à évaluer différentes stratégies d'aménagement du territoire en tenant compte de critères écologiques, économiques et sociaux[115]

-Évaluation de la Performance

Dans le secteur bancaire, l'AHP est appliquée pour construire des systèmes d'évaluation de la performance opérationnelle, permettant aux institutions financières de hiérarchiser leurs objectifs et d'évaluer leurs résultats en fonction de critères définis[117]

Application de l'AHP dans le domaine de Génie civil :

La méthode multicritère AHP (Analytic Hierarchy Process) est largement utilisée dans le domaine du génie civil pour aider à la prise de décision en intégrant divers critères. A titre d'exemples, citons les quelques applications notables suivantes:

1. Évaluation de la vulnérabilité sismique

L'AHP a été appliqué pour estimer la vulnérabilité des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP) face aux actions sismiques. Cette méthode permet de calculer un indice de vulnérabilité qui classe les conduites d'eau selon leur niveau de dommage potentiel, facilitant ainsi la priorisation des interventions nécessaires [118].

2. Gestion des risques de projet

Dans le cadre de projets de construction, l'AHP est utilisé pour évaluer et hiérarchiser les risques associés. Cette approche permet d'analyser les impacts des risques sur les coûts, les délais et la qualité, en intégrant des critères quantitatifs et qualitatifs pour une évaluation complète[114],[119]

3. Planification territoriale

L'AHP est également employé dans l'aménagement du territoire, où il aide à la prise de décisions concernant l'implantation d'infrastructures. Par exemple, il a été intégré dans des outils SIG (Systèmes d'Information Géographique) pour évaluer divers critères d'évaluation liés aux zones d'aménagement, facilitant ainsi une approche plus structurée et informée [120]

4. Sélection de fournisseurs et matériaux

Dans le cadre de la chaîne logistique du génie civil, l'AHP est utilisé pour sélectionner les fournisseurs et les matériaux en fonction de plusieurs critères, tels que le coût, la qualité et la fiabilité. Cela permet d'optimiser les choix réalisés lors des phases d'approvisionnement [113],[117].

5. Évaluation des performances opérationnelles

La méthode AHP peut être appliquée pour construire des systèmes d'évaluation des performances opérationnelles dans divers projets d'ingénierie, permettant ainsi une meilleure gestion et optimisation des ressources [117].

6. Choix de technologies de construction :

Dans le cadre de projets de construction, l'AHP permet de comparer différentes technologies et méthodes de construction. Cela inclut l'évaluation des matériaux, des techniques de mise en œuvre et des impacts environnementaux associés à chaque option [99].

7. Planification urbaine :

Dans le cadre de la planification urbaine, l'AHP peut être utilisé pour déterminer les meilleures options d'aménagement du territoire, en tenant compte des critères économiques, sociaux et environnementaux. Cela inclut le choix des sites pour de nouveaux développements ou infrastructures [121].

8. Analyse multicritères pour l'aménagement durable :

Des études ont montré que l'AHP peut être intégré dans des méthodologies d'évaluation de projets d'aménagement durable, permettant ainsi une approche structurée pour choisir les meilleures alternatives en fonction de critères tels que l'impact environnemental et la rentabilité économique [122].

4.2.4. Justification du choix de la méthode AHP

Notre choix s'est basé sur la méthode AHP dans l'évaluation de l'état de dégradation des ponts en béton armé, en se basant sur les avantages de cette méthode malgré ses limitations présentées ci-dessous.

Avantages :

- ✓ La seule méthode permettant de vérifier la cohérence des relations d'importance. (Jugements) entre critères.

- ✓ Méthode simple.
- ✓ Possibilité d'ajouter ou d'éliminer des critères sans perturber le modèle.
- ✓ Les critères peuvent avoir des importances très variables.
- ✓ Le nombre de critères et sous- critères n'est pas limité.
- ✓ Facilité d'utilisation: L'AHP est intuitif et simplifie le processus décisionnel.
- ✓ Consensus: Favorise l'accord entre les parties prenantes grâce à une approche structurée.
- ✓ Flexibilité: Peut être appliqué à divers types de décisions impliquant plusieurs critères.
- ✓ Réduction du biais: Aide à structurer la prise de décision pour minimiser les biais individuels.

Inconvénients :

- ✓ Le nombre des comparaisons augmente plus rapidement que le nombre des critères.
- ✓ Le choix d'échelle de 1 à 9 n'est pas justifié mathématiquement.
- ✓ Complexité potentielle: Peut devenir difficile à gérer avec un grand nombre d'alternatives ou de critères.
- ✓ Sensibilité aux jugements subjectifs: Les résultats dépendent fortement des évaluations subjectives fournies par les participants.

4.4. Conclusion

L'Analyse Multicritères s'impose aujourd'hui comme un outil essentiel pour aborder les défis complexes de la prise de décision contemporaine. En facilitant une évaluation systématique des différentes alternatives selon plusieurs critères, elle établit un cadre qui encourage la transparence et la rigueur dans le processus décisionnel.

Des méthodes telles que l'AHP et d'autres approches multicritères sont cruciales dans divers domaines, allant de la construction à la gestion environnementale. Avec l'augmentation de la complexité et de l'interconnexion des enjeux, l'intégration de ces méthodes dans les pratiques décisionnelles devient primordiale pour assurer des choix éclairés et durables.

L'application de la méthode AHP dans le secteur des BTP permet une meilleure compréhension des infrastructures et la gestion des facteurs affectant sa durabilité, optimisant ainsi la conception, la construction et l'entretien pour garantir leur longévité. Raison pour laquelle nous avons choisi d'utiliser cette méthode dans ce travail de thèse de doctorat.

Chapitre V

Utilisation de l'AHP pour l'étude de
l'état de dégradation des ponts en béton
armé et prédiction de la durée de service.

Utilisation de l'AHP pour l'étude de l'état de dégradation des ponts en béton armé et prédiction de la durée de service

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle proposé permettant d'estimer le degré de dégradation d'un pont en intégrant un grand nombre de critères jugés pertinents pour la caractérisation de cette dégradation. Nous considérons en particulier les spécificités des ponts à poutres en béton armé.

Ce modèle s'appuie sur la méthode multicritère AHP, reconnue pour son efficacité dans divers domaines, y compris le génie civil.

L'approche adoptée repose sur l'analyse des comportements structuraux des ponts, en intégrant des facteurs tels que les charges permanentes et d'exploitation, les conditions environnementales et leurs caractéristiques spécifiques.

La validation du modèle est faite à travers trois cas de ponts présentant des désordres de différentes natures.

5.2. Identification des facteurs de la dégradation

La détermination des paramètres liés à la dégradation constitue la première phase de l'algorithme de calcul du modèle élaboré. La sélection de ces éléments a été réalisée à travers un processus rigoureux de tri et d'élimination parmi l'ensemble des facteurs susceptibles d'influer sur la dégradation.

Dans la majorité des cas pathologiques des ouvrages d'art, un grand nombre de paramètres et de facteurs peuvent participer à la dégradation et cela à des degrés divers. Il serait utopique de prétendre pouvoir cerner et intégrer tous les facteurs dans une seule étude.

La plupart des recherches existantes se focalisent sur les défauts des éléments structurels ou sur des facteurs externes. Une évaluation assez exhaustive des facteurs de dégradation des ponts nécessite une approche systématique qui prend en compte à la fois les conditions internes et externes. Cette compréhension permet d'anticiper les problèmes potentiels et d'assurer une maintenance appropriée pour prolonger la durée de vie des ouvrages.

Dans cette étude, nous proposons de définir ce qu'on va appeler un « Indice Global de Dégradation du pont » (GBDI : Global Bridge Degradation Index) pour un pont en considérant simultanément les dégradations observables de la structure de l'ouvrage,

considérées comme facteurs internes, ainsi que les effets néfastes de certains paramètres liés à l'âge de l'ouvrage, son exploitation et son environnement, que nous appelons facteurs externes.

Dans un but de pouvoir considérer les facteurs les plus pertinents et les plus récurrents dans la dégradation des ponts en béton armé, nous avons sollicité l'avis d'ingénieurs et d'experts dans le domaine du génie civil et spécialement celui des ouvrages d'art. Ces consultations nous ont permis de sélectionner collectivement un total de 30 critères impactant la dégradation répartis en deux ensembles, facteurs internes et facteurs externes. Les facteurs internes englobent l'état des divers éléments de la structure et des équipements, tandis que les facteurs externes considèrent l'âge de la structure, son environnement, les charges externes et l'influence du sol et de l'eau. Le tableau 5.1 énumère les facteurs de la dégradation considérés dans cette étude.

Tableau 5.1. Facteurs de la dégradation considérés dans le modèle développé

	Critère	Symbole
1	Facteurs internes	C.F.I
2	Facteurs externes	C.F.E
3	Structure	C.ST
4	Equipements	C.EQ
5	Sollicitations	C.SO
6	Age	C.AG
7	Environnement	C.EN
8	Tablier	C.ST1
9	Appuis	C.ST2
10	Fondations	C.ST3
11	Appareils d'appuis	C.EQ1
12	Etanchéité	C.EQ2
13	Joints de chaussée	C.EQ3
14	Système de drainage	C.EQ4
15	Action de l'humidité	C.EN1
16	Action des eaux de ruissellement	C.EN2
17	Action des chlorures	C.EN3
18	Action du gel	C.EN4
19	Poutres	C.ST1.1
20	Hourdis	C.ST1.2
21	Entretoises	C.ST1.3
22	Piles	C.ST2.1
23	Culées	C.ST2.2
24	Tassement différentiel	C.ST3.1
25	Affouillement	C.ST3.2
26	Tassement uniforme	C.ST3.3
27	Rupture des poutres	C.ST1.1.1
28	Fissurations de flexion	C.ST1.1.2
29	Fissuration de cisaillement	C.ST1.1.3
30	Déformations des poutres	C.ST1.1.4

5.3. Création du modèle numérique

5.3.1. Développement de la structure hiérarchique

L'utilisation de l'AHP passe par le développement d'un organigramme qui range les critères considérés sous forme d'une structure hiérarchique à plusieurs niveaux distincts, allant du niveau le plus général aux niveaux les plus spécifiques (figure 5.1).

En haut (Niveau 0) se trouve l'objectif principal en l'occurrence le calcul de l'indice global de dégradation du pont (Global Bridge Degradation Index) (GBDI).

Les niveaux suivants organisent de manière hiérarchique les critères principaux et leurs sous-critères, formant ainsi une structure arborescente cohérente.

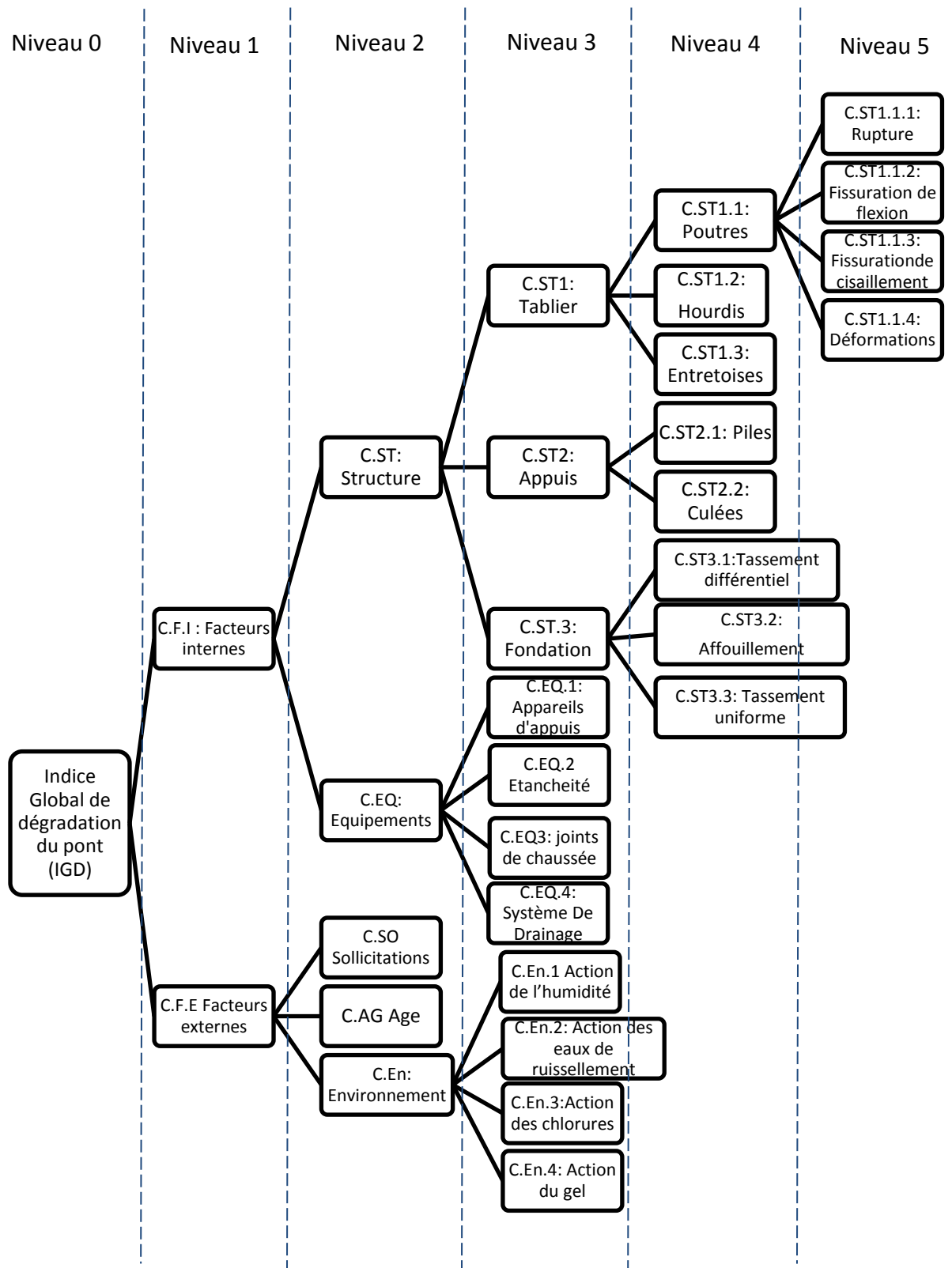


Figure 5.1. La structure hiérarchique (Source Auteur)

5.3.2. Comparaisons binaires, calcul des poids et vérification de la cohérence

5.3.2.1. Comparaisons binaires

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 4, l'AHP utilise des comparaisons binaires des critères à chaque niveau du sommet jusqu'à la base de la hiérarchie. Les matrices de comparaison (de jugement) sont des représentations numériques des relations entre chaque deux éléments (comparaison par paire) qui partagent un critère parent commun et permet d'évaluer l'importance relative d'un élément par rapport à un autre.

Les comparaisons (voir tableaux 5.2., 5.3 et 5.4) ont été faites en concertation avec des ingénieurs experts de la société Algérienne spécialisée dans l'étude et la réalisation des ouvrages d'art (SEROR), ainsi qu'avec des mathématiciens et des ingénieurs en Génie civil.

5.3.3.2. Calcul des poids :

Les matrices de comparaison permettent de calculer l'importance relative de chaque critère en déterminant le vecteur propre $V_{max} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ associé à la plus grande valeur propre λ_{max} .

Ce vecteur V_{max} fournit directement les poids de nos n critères. (Voir tableaux 5.2. 5.3 et 5.4).

Les calculs liés aux poids locaux et aux indices de cohérence ont été réalisés à l'aide du logiciel Microsoft Excel et des scripts développés sous MATLAB.

5.3.3.3. Vérification de la cohérence des jugements:

La vérification de la cohérence des jugements est faite selon la méthode proposée par T.L. SAATY qui se base sur le ratio de cohérence (RC), calculé à partir de l'indice de cohérence (IC) et l'indice aléatoire (RI) (Voir chapitre 4).

L'analyse des taux de cohérence obtenus (CR), tous inférieurs à 10%, valide la cohérence de nos jugements faits en collaboration avec les experts.

Tableau 5.2. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence

Poutres						
Critère	C.ST1.1.1	C.ST1.1.2	C.ST1.1.3	C.ST1.1.4	Poids	CR%
C.ST1.1.1	1	2	2	3	0,40	5 <10
C.ST1.1.2	0,5	1	1	4	0,25	
C.ST1.1.3	0,5	1	1	4	0,25	
C.ST1.1.4	0,33	0,25	0,25	1	0,09	
Environnement						
Critère	C.En.1	C.En.2	C.En.3	C.En.4		CR %
C.En.1	1	1	2	3	036	2 <10
C.En.2	1,0	1	2	2	0,32	
C.En.3	0,5	0,5	1	2	0,19	
C.En.4	0,33	0,5	0,5	1	0,13	
Equipements						
Critère	C.EQ.1	C.EQ.2	C.EQ.3	C.EQ.4	Poids	CR %
C.EQ.1	1	2	3	2	0,42	5 <10
C.EQ.2	0,5	1	2	2	0,26	
C.EQ.3	0,33	0,5	1	2	0,18	
C.EQ.4	0,5	0,5	0,5	1	0,14	

Tableau 5.3. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence (Suite1)

Facteurs externes					
Critère	C.SO	C.AG	C.En	Poids	CR %
C.SO	1	1	1	0,33	4,6<10
C.AG	1	1	0,5	0,26	
C.En	1	2	1	0,41	
Fondations					
Critère	C.ST3.1	C.ST3.2	C.ST3.3	Poids	CR %
C.ST3.1	1	1	2	0,40	0<10
C.ST3.2	1	1	2	0,40	
C.ST3.3	0,5	0,5	1	0,20	

Tableau 5.4. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence (Suite2)

Structure					
Critère	C.ST1	C.ST2	C.ST3	Poids	CR %
C.ST1	1	1	1	0,33	0<10
C.ST2	1	1	1	0,33	
C.ST3	1	1	1	0,33	
Tablier					
Critère	C.ST1.1	C.ST1.2	C.ST1.3	Poids	CR %
C.ST1.1	1	3	6	0,67	0 ≤10
C.ST1.2	0,33	1	2	0,22	
C.ST1.3	0,167	0,5	1	0,11	

Tableau 5.5. Comparaisons binaires et Ratio de la cohérence (Suite3)

Niveau 01				
Critère	C.F.I	C.F.E	Poids	CR %
C.F.I	1	1	0,5	
C.F.E	1	1	0,5	
Facteurs internes				
Critères	C.ST	C.EQ	Poids	CR %
C.ST	1	3	0,75	
C.E	0.33	1	0,25	
Appuis				
Critère	C.ST2.1	C.ST2.2	Poids	CR %
C.ST2.1	1	0,5	0,33	
C.ST2.2	2	1	0,67	

5.3.4. Notations des facteurs

Nous avons adopté des systèmes de notation pour quantifier et illustrer l'impact de chaque critère du dernier niveau de la hiérarchie sur l'état du pont.

Après plusieurs rencontres avec des experts (ingénieurs, experts et professeurs), nous sommes arrivés aux résultats présentés dans les tableaux ci-dessous (Tableaux 5.5 à 5.13)

Tableau 5.6. Notations des facteurs de dégradation liés aux poutres

POUTRES	Critères	Poids Critères	Constats poutres	Notation
	Rupture	0.4	Aucune	0
			Rupture d'une seule poutre.	44
			Rupture de plusieurs poutres	48
	Fissuration de flexion	0.25	Aucune	0
			Fissures verticales et parallèles sur les parois latérales et au niveau du talon de la poutre (fissures de flexion) avec ouverture inférieure à 0,3mm	16
			Fissures verticales et parallèles sur les parois latérales et au niveau du talon de la poutre (fissures de flexion) avec ouverture comprise entre 0,3 et 0,6mm.	24
			Fissures verticales et parallèles sur les parois latérales et au niveau du talon de la poutre (fissures de flexion) avec ouverture supérieure à 0,6mm touchant au moins une poutre centrale.	40
			Fissures verticales et parallèles sur les parois latérales et au niveau du talon de la poutre (fissures de flexion) avec ouverture supérieure à 0,6mm touchant une poutre de rive.	28
	Fissuration de cisaillement	0.25	Aucune	0
			Fissures de cisaillement inclinées à 45° parallèles sur les parois de la poutre avec ouverture inférieure ou égale à 0,3mm	22
			Fissures de cisaillement inclinées à 45° parallèles sur les parois de la poutre avec ouverture supérieure à 0,3mm touchant au moins une poutre centrale.	38
			Fissures de cisaillement inclinées à 45° parallèles sur les parois de la poutre avec ouverture supérieure à 0,3mm touchant une poutre de rive.	26
	Déformation	0.09	Aucune	0
			Flèche longitudinale vers le bas localisée en travée	20
			Flèche longitudinale vers le bas de l'ensemble de la poutre	22

Tableau 5.7. Notations des facteurs de dégradation liés à l'hourdis

Critères	Poids	Constats Hourdis	Notation
Hourdis	0.22	Aucune	0
		Fissures longitudinales parallèles au niveau du plan inférieur de l'hourdis (flexion transversale de l'hourdis)	14
		Fissures longitudinales au niveau de la ligne de jonction hourdis-âme de la poutre (insuffisance d'armatures transversales de couture)	10
		Délamination, feuilletage dans la surface inférieure de l'hourdis (corrosion des aciers, gel du béton)	8

Tableau 5.8. Notations des facteurs de dégradation liés aux entretoises

Critères	poids	Constats Entretoises	Notation
Entretoises	0.11	Aucune	0
		Dégradation de l'enrobage, éclatement du béton et corrosion des aciers de l'entretoise dans les angles et sur la surface inférieure	8
		Fissures verticales à la jonction entretoise-poutre (insuffisance d'armature de liaison entre poutres et entretoises)	10
		Fissuration verticale sur les faces verticales et sur la surface inférieure de l'entretoise (fissuration de flexion)	14

Tableau 5.9. Notations des facteurs de dégradation liés aux appuis

Facteurs	Poids	Sous-Facteurs	Constats Piles	Notation
Piles colonnes	0.33	P1	Aucune anomalie	0
		P2	Fissures se propageant à partir des socles d'appuis (frettes insuffisantes ou appareils d'appuis trop près du bord)	12
		P3	Fissures transversales parallèles sur la surface supérieure du chevêtre (retrait)	12
		P4	Fissures transversales sur la partie supérieure et les côtés latéraux du chevêtre (efforts de flexion excessifs dans le chevêtre)	19
		P5	Fissures horizontales contournant la surface cylindrique de la colonne (efforts excessifs de flexion composée)	28
		P6	Epaufrement, délaminage, dénudation des armatures (corrosion des aciers)	22
		P7	Fissure verticale longeant la colonne de bas en haut (Alcali-réaction ou excès de compression)	22
Piles murs	0.33	P1	Aucune anomalie	0
		P8	Fissures localisées près des socles d'appuis (insuffisance des frettes)	12
		P9	Fissures verticales peu ouvertes sur les parois latérales de la pile se propageant à partir de la face supérieure (retrait)	12
		P10	Fissures ouvertes verticales à partir du sommet vers le bas (insuffisance des armatures de chaînage en tête de la pile)	19
		P11	Fissures verticales qui montent à partir de la fondation (tassement du sol lié à une insuffisance de la semelle)	28
		P12	Fissures horizontales parallèles sur la partie centrale des parois de la pile (flexion excessive dans la pile ou mauvaise reprise de bétonnage)	28
Culées	0.67	C1	Aucune anomalie	0
		C2	Fissures ouvertes verticales à partir du sommet vers le bas (insuffisance des armatures de chaînage du mur)	22
		C3	Fissures verticales qui montent à partir de la fondation (tassement du sol de fondation sous la partie centrale de la semelle, insuffisance d'armatures dans la semelle, retrait gêné du mur)	30
		C4	Fissures horizontales parallèles sur la partie centrale du mur (flexion excessive)	30
		C5	Fissures verticales peu ouvertes sur mur garde-grève (retrait du béton)	5
		C6	Fissure horizontale le long de l'arrête inférieure du mur garde-grève (effort de flexion anormal provoqué par l'about du tablier qui entre en contact avec le mur garde-grève)	9
		C7	Fissure horizontale le long de l'arrête inférieure du muret-cache (effort de flexion anormal provoqué par l'about du tablier qui entre en contact avec le muret-cache)	5

Tableau 5.10. Notations des facteurs de dégradation liés aux fondations

Critère	Poids	Sous-critères	Constats	Notation
Fondations	0.4	Tassement différentiel	Aucun	0
			$H < L/350$	20
			$H > L/350$	45
	0.4	Affouillement	Aucun	0
			Trace d'érosion	8
			Erosion localisée jusqu'à mi-hauteur de la fondation	16
			Dénudation totale (Forte érosion dépassant toute la hauteur de la fondation)	43
	0.2	Tassement uniforme	$< 5 \text{ cm}$	0
			$5 \text{ cm} < H < 10 \text{ cm}$	16
			$H > 10 \text{ cm}$	40

Avec : H (cm) : Hauteur de tassement.

L (cm) : Longueur de portée des travées.

Pour les ponts de taille moyenne, des tassements différentiels peuvent être tolérés à condition que le rapport $\Delta h/L$ reste inférieur à 1/300, soit environ 5 cm pour une portée de 15 mètres [123].

Tableau 5.11. Notations des facteurs de dégradation liés aux équipements

Critères	Sous-critères	Poids	Constats	Notation C_k
Equipements	Appareils d'appuis	0.42	Bon état	0
		0.42	Dégradé	16
		0.42	Très dégradé	20
	Etanchéité	0.26	Bon état	0
		0.26	Dégradé	14
		0.26	Très dégradé	18
	Joints de chaussée	0.18	Bon état	0
		0.18	Dégradé	14
		0.18	Très dégradé	18
	Système de drainage	0.14	Bon état	0
		0.14	Dégradé	14
		0.14	Très dégradé	18

Tableau 5.12. Notations des facteurs de dégradation liés l'âge

Critères	Poids	Caractéristiques	Notation
Age	0.26	0 à 10	2
		11 à 20	4
		21 à 30	6
		31 à 40	8
		41 à 50	10
		51 à 60	12
		61 à 70	14
		71 à 80	16
		81 à 90	18
		> 90 ans	20

Tableau 5.13. Notations des facteurs de dégradation liés aux sollicitations

critères	poids	Caractéristiques	Notation
Sollicitations	0.33	Faible (pont classe III)	12
		Moyen (pont classe II)	16
		Élevé (pont classe I)	20

Tableau 5.14 Notations des facteurs de dégradation liés à l'environnement

critères	Sous-critères	poids	Caractéristiques	Notation C_k
Environnement	Action de l'humidité	0.36	Environnement très sec (aucun risque de corrosion)	0
			Environnement sec ou humide en permanence	4
			Environnement à humidité modérée	8
			Environnement humide rarement sec	12
			Alternance d'humidité et de séchage	18
	Action des eaux de ruissellement	0.32	Aucune agressivité	0
			Faible agressivité	6
			Agressivité moyenne	12
			Agressive importante	18
	Action des chlorures présents dans l'eau de mer	0.19	Ouvrage situé à plus de 5 Km de la mer	0
			Ouvrage situé entre 500 M et 5 Km de la mer	6
			Ouvrage situé à moins de 500 m de la mer	14
			Partie d'ouvrage en mer immergée en permanence	18
	Action du gel	0.13	Gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage	2
			Gel faible ou modéré avec agent de déverglaçage	8
			Gel sévère sans agent de déverglaçage	12
			Gel sévère avec agent de déverglaçage	18

NB :

Nous considérons l'effet de l'environnement en nous basant sur le concept de « Classe d'exposition » conformément aux textes normatifs relatifs au béton. Ces classes reflètent les actions dues à l'environnement auxquelles le béton et les armatures de la structure sont exposés [124],[125].

5.3.4. Evaluation de l'indice global de la dégradation des ponts (Global Bridge Degradation Index)

L'indice de dégradation globale du pont (**GBDI**), tel que l'on propose, identifie de façon numérisé l'état de dégradation du pont. Cet indice reflète la performance, la sécurité et la longévité du pont. Il est déterminé à l'aide de l'équation finale (5.7.).

Remarque :

Il est important de signaler que dans notre étude, nous avons adopté une approche qui met l'accent, si le cas se présente, sur les cas extrêmes de dégradation.

Pour calculer cet indice, nous devons déterminer d'abord deux indices : l'Indice de Dégradation Calculé (**CDI**) et l'Indice de Dégradation Extrême (**EDI**).

Ces indices sont déterminés comme suit :

$$\triangleright CDI = \sum W * N \quad (5.1.)$$

Où

W et N représentent les poids globaux indiqués et les notations des facteurs F illustrées dans les tableaux 5.5 à 5.13

$$\triangleright EDI = \begin{cases} DI_{max} & \text{si } DI_{max} > 15 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.2.)$$

$$\text{Avec } DI_{max} = \max\{DI_{Tablier}, DI_{Appuis}, DI_{Fondations}\} \quad (5.3.)$$

$$\text{et } DI_{Tablier} = w_{C.ST1.1} [w_{C.ST1.1.1} * N_{C.ST1.1.1} + w_{C.ST1.1.2} * N_{C.ST1.1.2} + w_{C.ST1.1.3} * N_{C.ST1.1.3} + w_{C.ST1.1.4} * N_{C.ST1.1.4}] + w_{C.ST1.2} * N_{C.ST1.2} + w_{C.ST1.3} * N_{C.ST1.3} \quad (5.4.)$$

$$DI_{Appuis} = w_{C.ST2.1} * N_{C.ST2.1} + w_{C.ST2.2} * N_{C.ST2.2} \quad (5.5.)$$

$$DI_{Fondations} = w_{C.ST3.1} * N_{C.ST3.1} + w_{C.ST3.2} * N_{C.ST3.2} + w_{C.ST3.3} * N_{C.ST3.3} \quad (5.6.)$$

Finalement, on arrive à la valeur du GBDI par la formule 5.7 :

$$GBDI = \max\{CDI, EDI\} \quad (5.7.)$$

5.3.5. Catégorisation des ponts selon la dégradation

Une fois l'indice GBDI calculé, nous attribuons au pont une classe en fonction de la valeur de cet indice. Chaque classe induira le type d'intervention approprié.

Après plusieurs rencontres avec des experts (ingénieurs, experts et professeurs), nous sommes arrivés aux résultats présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.15. Classification de l'état de dégradation du pont.

Classe	GBDI	Etat de dégradation	Intervention
C1	0 à 5	État de dégradation sans danger actuel ni potentiel	Aucune intervention recommandée
C2	5 à 10	Présence de signes de dégradations mineurs stables sans conséquences	Intervention recommandée non majeure
C3	10 à 15	Dégradation pouvant évoluer dans le temps	Intervention recommandée mais non urgente
C4	15 à 20	Dégradation causant un dysfonctionnement et pouvant évoluer de manière dangereuse	Intervention recommandée en urgence
C5	> 20	État de dégradation critique, déficience et dégâts graves	Intervention recommandée à l'immédiat

5.4. Simulation du modèle numérique, Etude de cas :

Cette partie vise à évaluer la performance de notre modèle d'expertise des ponts en le confrontant à des données réelles collectées sur un échantillon de ponts situés dans l'ouest algérien.

Le but est de déterminer dans quelle mesure le modèle proposé est capable d'évaluer avec précision l'état de dégradation des ponts, et d'identifier les éventuels types d'interventions à accomplir.

Les données des cas réels des ponts aident à améliorer la précision des modèles numériques d'expertise. En intégrant des informations concrètes sur les performances et les comportements des ponts existants, ces données permettent de calibrer et de valider les modèles théoriques.

En utilisant les observations sur le terrain, les ingénieurs peuvent ajuster les paramètres du modèle pour mieux refléter la réalité, ce qui augmente la fiabilité des prévisions concernant la durabilité et la sécurité des infrastructures.

De plus, cette approche permet d'identifier des tendances et des anomalies qui pourraient ne pas être apparentes dans les simulations basées uniquement sur des hypothèses théoriques, renforçant ainsi la capacité à anticiper les défaillances potentielles et à planifier des interventions appropriées.

Dans notre étude, nous avons utilisé le modèle développé pour examiner l'état de dégradation de trois ponts situés en Algérie.

Les emplacements de ces ouvrages sont illustrés dans la figure 5.2.

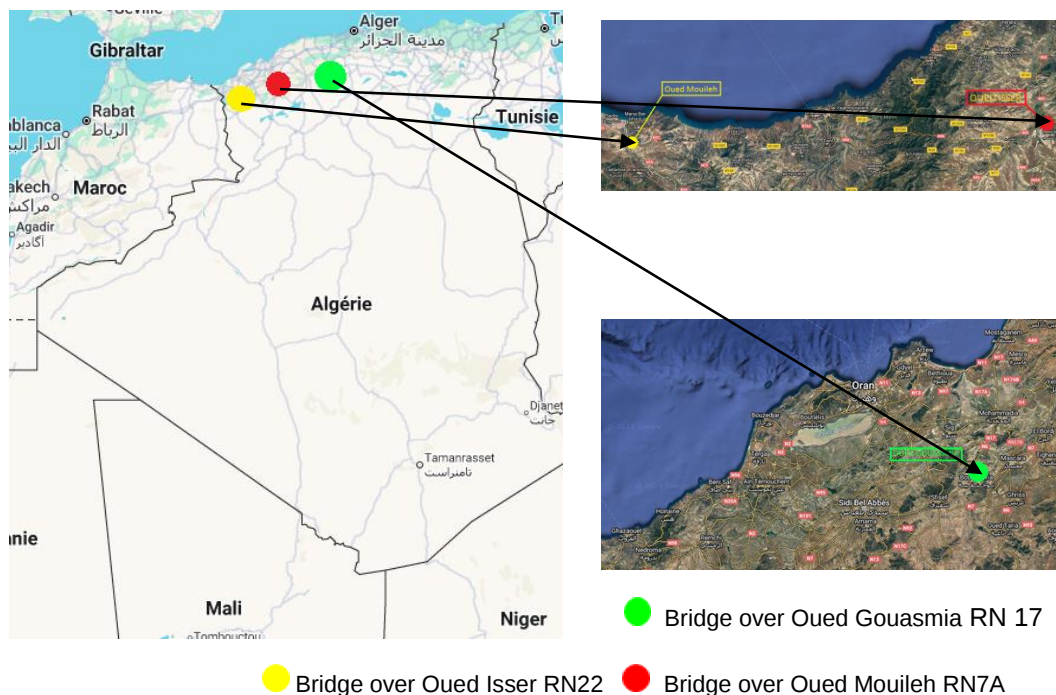


Figure 5.2 : Localisation générale des cas d'étude sur la carte de l'Algérie.

5.4.1. Etude de cas: Pont sur Oued Isser RN22

5.4.1.1. Présentation de l'ouvrage

Le premier cas étudié concerne le pont routier à deux travées enjambant Oued-Isser au PK 35+617 de la route nationale N°22 dans la Wilaya de Tlemcen.

Coordonnées : 35.106177593148516 , -1.440706702881388

Ce pont présente des désordres assez importants au niveau de plusieurs parties de ses éléments, notamment :

La poutre centrale,

La partie extrême (côté sud) de la poutre centrale,

La pile centrale,

Les entretoises,

Le sommier sur culée,

La dalle,

Les dés et les plaques d'appui des poutres,

Les joints de chaussée et le système de drainage.



Figure 5.3. : Pont sur Oued Isser au PK 35+617 sur la route nationale n°22

5.4.1.2. Notations et scores de l'ouvrage

Les constatations sur site ont permis de recueillir les informations servant à dresser les notations de l'ouvrage suivant le barème du modèle. Ces notations et scores sont résumés dans les tableaux ci-dessous.

Poutres :

Symboles	Critères	Poids Poutres	Poids Critères	Constats poutres	Notation C_k	SD
C.ST1.1.1	Rupture	0.67	0.4	Rupture d'une seule poutre.	44	11.792
C.ST1.1.2	Fissuration de flexion	0.67	0.25	Fissures verticales et parallèles sur les parois latérales et au niveau du talon de la poutre (fissures de flexion) avec ouverture supérieure à 0,6mm touchant une poutre de rive.	28	4.69
C.ST1.1.3	Fissuration de cisaillement	0.67	0.25	Fissures de cisaillement inclinées à 45° parallèles sur les parois de la poutre avec ouverture supérieure à 0,3mm touchant au moins une poutre centrale.	38	6.365
C.ST1.1.4	Déformation	0.67	0.09	aucune	0	0

C.ST1.1 Poutres = 22.847

Hourdis :

Symboles	poids	Constats Hourdis	Notation C_k	SD
C.ST1.2	0.22	Fissures longitudinales parallèles au niveau du plan inférieur de l'hourdis (flexion transversale de l'hourdis)	14	3.08

C.ST1.2 Hourdis = 3.08

Entretoises :

Symboles	poids	Constats Entretoises	Notation C_k	SD
C.ST1.3	0.11	Fissuration verticale sur les faces verticales et sur la surface inférieure de l'entretoise (fissuration de flexion)	14	1.54

C.ST1.2 Entretoises = 1.54

C.ST1 Tablier = 27.467

Piles :

Symboles	Poids	Sous-Facteurs	Constats Piles	Notation C_k	SD
C.ST2.1	0.33	P5	Fissures horizontales contournant la surface cylindrique de la colonne (efforts excessifs de flexion composée)	28	9.24

Culée :

Symboles	Poids	Sous-Facteurs	Constats Piles	Notation C_k	SD
C.ST2.2	0.67	C2	Fissures ouvertes verticales à partir du sommet vers le bas (insuffisance des armatures de chaînage du mur)	22	14.74

C.ST2 Appuis=23.98**Fondations :**

poids	Symboles	critères	Constats	Notation	SD
0.4	C.ST3.2	Affouillement	Erosion localisée jusqu'à mi-hauteur de la fondation	16	6.4

C.ST3 Fondations = 6.4**Equipements**

Critères	Symboles	Poids	Constats	Notation C_k	SD
Appareils d'appuis	C.EQ1	0.42	Très dégradé	20	8.4
Etanchéité	C.EQ2	0.26	Dégradé	14	3.64
Joints de chaussée	C.EQ3	0.18	Très dégradé	18	3.24
Système de drainage	C.EQ4	0.14	Dégradé	14	1.96

C.EQ Equipements =17.24

Facteurs Externes :

poids	Symboles	critères	Caractéristiques	Notation C_k	SD
0.26	C.AG	Age	41 à 50	10	2.6
0.33	C.SO	Sollicitations	Moyen (pont classe II)	16	5.28

poids	Symboles	critères	Caractéristiques	Notation C_k	SD
0.36	C.EN1	Action de l'humidité	Alternance d'humidité et de séchage	18	6.48
0.32	C.EN2	Action des eaux de ruissellement	Faible agressivité	6	1.92
0.19	C.EN3	Action des chlorures présents dans l'eau de mer	Ouvrage situé à plus de 5 Km de la mer	0	0
0.13	C.EN4	Action du gel	Gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage	2	0.26

SDEXT = 11.4306

C.En Environnement=8.66

Tableau 5.16. Récapitule les notations de l'ouvrage sur Oued Isser

Critères	C.ST1.1.1	C.ST1.1.2	C.ST1.1.3	C.ST1.1.4	C.ST1.2	C.ST1.3	C.ST2.1	C.ST2.2	C.ST3.1	C.ST3.2	C.ST3.3
Scores	44	28	38	0	14	14	28	22	0	16	0

Critères	C.EQ.1	C.EQ.2	C.EQ.3	C.EQ.4	C.En.1	C.En.2	C.En.3	C.En.4	C.SO	C.AG
Scores	20	14	18	14	18	6	0	2	16	10

5.4.1.3. Classement de l'ouvrage**Indice Global de Dégradation Calculé CDI=15.10****Indice de Dégradation Extrême EDI=27.467****GBDI=27.467**

Ce pont est classé en catégorie C5 avec un GBDI de 27,47. Par conséquent, en consultant le tableau 5.15, la structure est dans un état de dégradation critique, présentant des déficiences et des dommages graves qui nécessitent une intervention immédiate.

5.4.2. Pont sur Oued Gouasmia RN17

5.4.2.1. Présentation de l'ouvrage

Le deuxième cas concerne le pont routier traversant Oued Gouasmia au PK 87+781 sur la Route Nationale N°17 dans la Wilaya de Mascara, Algérie (Coordonnées : 35.2872306250305, -0.14250877056492023). Ce pont est constitué de quatre travées, dont chacune comporte quatre poutres préfabriquées surmontées d'une dalle coulée en place de 20 cm d'épaisseur.

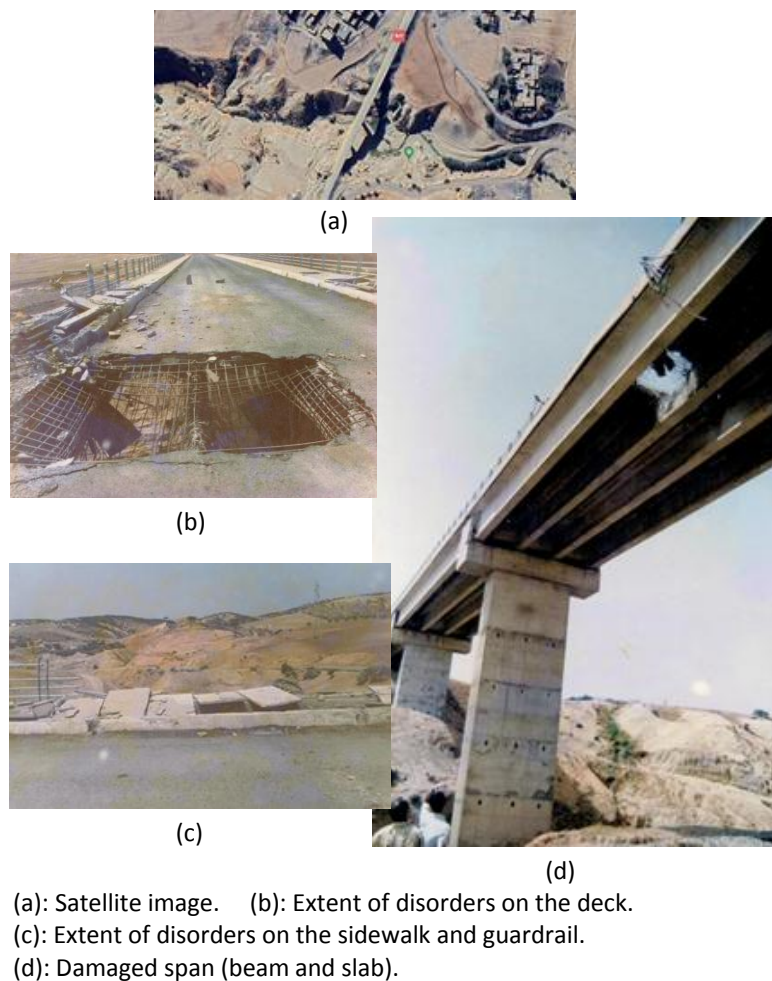


Figure 5.4 : Pont sur Oued Gouasmia RN 17 (Source Auteur)

5.4.2.2. Notations et scores de l'ouvrage :**Poutres :**

Symboles	Critères	Poids Poutres	Poids Critères	Constats poutres	Notation C_k	SD
C.ST1.1.1	Rupture	0.67	0.4	Rupture d'une seule poutre.	44	11.792
C.ST1.1.2	Fissuration de flexion	0.67	0.25	Fissures verticales et parallèles sur les parois latérales et au niveau du talon de la poutre (fissures de flexion) avec ouverture supérieure à 0,6mm touchant au moins une poutre centrale.	40	6.7
C.ST1.1.3	Fissuration de cisaillement	0.67	0.25	aucune	0	0
C.ST1.1.4	Déformation	0.67	0.09	aucune	0	0

C.ST1.1 Poutres = 18.492**Hourdis :**

Symboles	poids	Constats Hourdis	Notation C_k	SD
C.ST1.2	0.22	Rupture du tablier avec cisaillement total des armatures	32	7.04

C.ST1.2 Hourdis = 7.04**Entretoises :**

Symboles	poids	Constats Entretoises	Notation C_k	SD
C.ST1.3	0.11	Aucune	0	0

C.ST1.2 Entretoises = 0**C.ST1 Tablier = 25.532****Appuis :**

Aucune anomalie n'a été observée sur les plies et Culées.

C.ST2 Appuis=0.00

Fondations :

poids	Symboles	Critères	Constats	Notation C_k	SD
0.4	C.ST3.2	Affouillement	Trace d'érosion	8	3.2

C.ST3 Fondations = 3.2**Equipements**

Critères	Symboles	Poids	Constats	Notation C_k	SD
Appareils d'appuis	C.EQ1	0.42	Bon état	0	0
Etanchéité	C.EQ2	0.26	Dégradé	14	3.64
Joints de chaussée	C.EQ3	0.18	Dégradé	14	2.52
Système de drainage	C.EQ4	0.14	Dégradé	14	1.96

C.EQ Equipements =8.12**Facteurs Externes :**

poids	Symboles	Critères	Caractéristiques	Notation C_k	SD
0.26	C.AG	Age	31 à 40	8	2.08
0.33	C.SO	Sollicitations	Moyen (pont classe II)	16	5.28

poids	Symboles	Critères	Caractéristiques	Notation C_k	SD
0.36	C.EN1	Action de l'humidité	Alternance d'humidité et de séchage	18	6.48
0.32	C.EN2	Action des eaux de ruissellement	Faible agressivité	6	1.92
0.19	C.EN3	Action des chlorures présents dans l'eau de mer	Ouvrage situé à plus de 5 Km de la mer	0	0
0.13	C.EN4	Action du gel	Gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage	2	0.26

C.En Environnement=8.66**SDEXT=10.9106**

Le tableau 5.17. Récapitule les notations de l'ouvrage sur Oued Gouasmia

Critères	C.ST1.1.1	C.ST1.1.2	C.ST1.1.3	C.ST1.1.4	C.ST1.2	C.ST1.3	C.ST2.1	C.ST2.2	C.ST3.1	C.ST3.2	C.ST3.3
Scores	44	40	0	0	32	0	0	0	0	8	0

Critères	C.EQ.1	C.EQ.2	C.EQ.3	C.EQ.4	C.En.1	C.En.2	C.En.3	C.En.4	C.SO	C.AG
Scores	0	14	14	14	18	6	0	2	16	8

5.4.2.3. Classement de l'ouvrage

Indice Global de Dégradation Calculé CDI=10.06

Indice de Dégradation Extrême EDI=25.53

GBDI=25.53

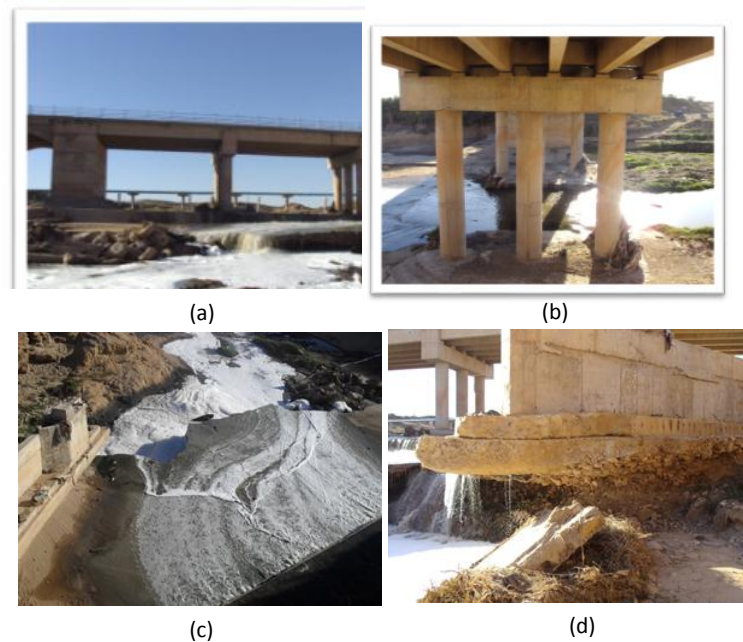
Ce pont est classé en catégorie C5 avec un GBDI de 25,53. Par conséquent, en consultant le tableau 5.15, l'ouvrage est dans un état de dégradation critique, présentant des déficiences et des dommages sévères qui nécessitent une intervention immédiate.

5.4.3. Pont sur Oued Mouilah RN 7A

5.4.3.1. Présentation de l'ouvrage

Comme troisième étude de cas, nous avons examiné le pont traversant Oued Mouilah au PK7+800 sur la RN 7A, reliant la ville de Maghnia à Marsa Ben Mehidi dans la Wilaya de Tlemcen (Position : 34°51'14" N, 1°51'27" W).

Il s'agit d'un pont à poutres en béton armé d'une longueur de 60 m, divisé en trois travées de 20 m chacune, supportées par six poutres reposant sur une culée et trois colonnes sur pieux.



(a): Overview of the structure. (b): Underside view. (c): Breakage of the protective slab, degrees of water pollution. (d): Extent of scour.

Figure 5.5. : Pont sur Oued Mouilah RN7A (Source Auteur)

5.4.3.2. Notations et scores de l'ouvrage :

Tablier :

Aucune anomalie majeure n'a été observée sur les poutres ou la dalle ou les entretoises.

De ce fait,

C.ST1 Tablier = 0.00

Appuis :

Facteurs	Poids	Sous-Facteurs	Constats Piles	Notation C_k	SD
Piles colonnes	0.33	P6	Epaufure, délaminage, dénudation des armatures (corrosion des aciers)	22	7.26

C.ST2 Appuis= 7.26

Fondations :

poids	Symboles	critères	Constats	Notation C _k	SD
0.4	C.ST3.2	Affouillement	Erosion localisée jusqu'à mi-hauteur de la fondation	16	6.4

C.ST3 Fondations = 6.4**Equipements**

Critères	Symboles	Poids	Constats	Notation C _k	SD
Appareils d'appuis	C.EQ1	0.42	Dégradé	16	6.72
Etanchéité	C.EQ2	0.26	Très dégradé	18	4.68
Joints de chaussée	C.EQ3	0.18	Dégradé	14	2.52
Système de drainage	C.EQ4	0.14	Très dégradé	18	2.52

C.EQ Equipements = 16.44**Facteurs Externes :**

poids	Symboles	critères	Caractéristiques	Notation C _k	SD
0.26	C.AG	Age	31 à 40	8	2.08
0.33	C.SO	Sollicitations	Moyen (pont classe II)	16	5.28

poids	Symboles	critères	Caractéristiques	Notation C _k	SD
0.36	C.EN1	Action de l'humidité	Environnement à humidité modérée	18	6.48
0.32	C.EN2	Action des eaux de ruissellement	Agressive importante	18	5.76
0.19	C.EN3	Action des chlorures présents dans l'eau de mer	Ouvrage situé à plus de 5 Km de la mer	0	0
0.13	C.EN4	Action du gel	Gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage	2	0.26

C.En Environnement=12.50**SDEXT= 12.485**

Tableau 5.18. Récapitule les notations de l'ouvrage sur Oued Mouilah

Critères	C.ST1.1.1	C.ST1.1.2	C.ST1.1.3	C.ST1.1.4	C.ST1.2	C.ST1.3	C.ST2.1	C.ST2.2	C.ST3.1	C.ST3.2	C.ST3.3
Scores	0	0	0	0	0	0	22	0	0	16	0

Critères	C.EQ.1	C.EQ.2	C.EQ.3	C.EQ.4	C.En.1	C.En.2	C.En.3	C.En.4	C.SO	C.AG
Scores	16	18	14	18	18	18	0	2	16	8

5.4.3.3. Classement de l'ouvrage

Indice Global de Dégradation Calculé IGDC=10.005

Indice de Dégradation Extrême EDI=7.26

GBDI=10.005

Ce pont est classé en catégorie C3 avec un GBDI de 10,005. En consultant le tableau 5.15, On peut conclure que l'ouvrage présente des signes de dégradation pouvant évoluer dans le temps. Une intervention non urgente est recommandée.

Nous résumons les résultats obtenus pour les trois cas étudiés dans le tableau 5.19.

Tableau 19 : Résultats de l'application du modèle pour les trois cas d'études.

Degradation indices	CDI	EDI	GBDI	CLASSE
Pont sur Oued Isser	15.10	27.47	27.47	C5
Pont sur Oued Gouasmia	10.06	25.53	25.53	C5
Pont sur Oued Mouilah	10.005	7.26	10.005	C3

5.5. Synthèse et discussion:

La figure 5.6 présente un diagramme solaire qui illustre les poids locaux obtenus à partir des tests de cohérence.

Ce diagramme met en évidence les paramètres « Structure » (75 %) et « Environnement » (41 %) qui sont les plus prépondérants.

De plus, les paramètres « Poutres », « Piles » et « Culées » sont les critères dominants au sein du critère « Structure ».

En revanche, le paramètre « Equipement » est considéré comme le moins important, contribuant seulement à 25 % dans la dégradation du pont.

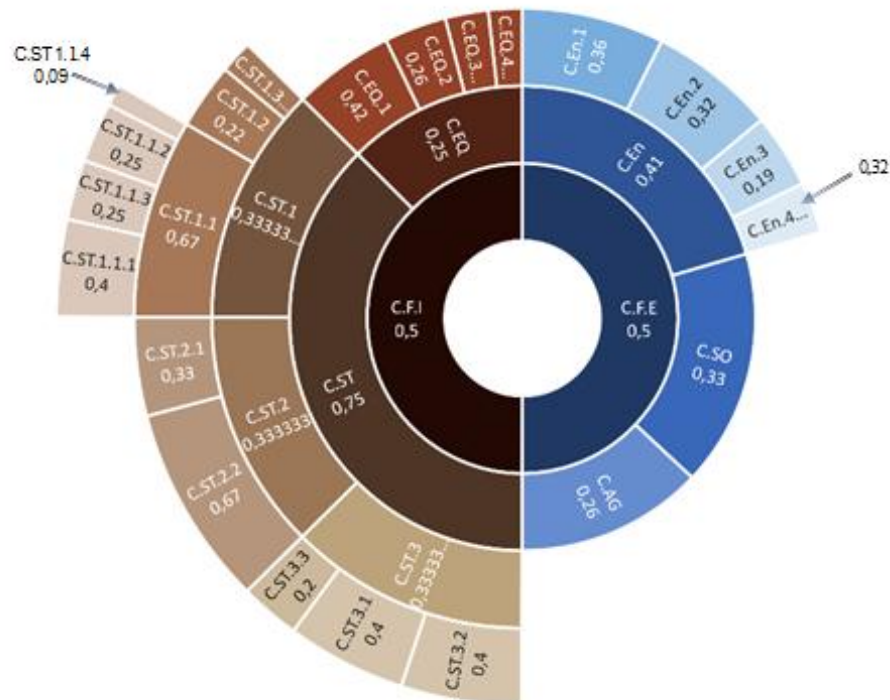


Figure 5.6. Poids locaux (wi) des Critères et Sous-Critères.

L'application du modèle hiérarchique permet également de déterminer les poids globaux W des facteurs en multipliant les poids locaux par ceux de leurs critères parents de niveau inférieur.

La figure 5.7. résume ces poids globaux des différents facteurs.

L'analyse du diagramme solaire présenté sur cette figure révèle des écarts importants entre les poids globaux des différents sous-facteurs.

Ces variations illustrent très bien l'importance relative et l'influence inégale de ces facteurs sur la dégradation du pont.



Figure 5.7. Pondérations globales W_i des facteurs F.

5.6. Conclusion :

L'application de l'AHP a permis de définir un indice numérique caractérisant l'état de dégradation des ponts en béton armé (GBDI) en se basant sur des critères relatifs à la structure, les charges, l'âge, et l'environnement.

Nous avons adopté une approche qui priorise, le cas échéant, les situations de dégradation extrêmes correspondant à un danger évident dans le fonctionnement de l'ouvrage.

L'analyse des résultats révèle que les caractéristiques « Structurales » et les conditions « environnementales » exercent une influence déterminante sur l'état et la durabilité des ponts. À l'inverse, les « équipements » installés sur l'ouvrage semblent avoir un impact moins prononcé.

Une analyse approfondie des poids relatifs au sein du modèle hiérarchique permet de hiérarchiser les différents sous-facteurs et de quantifier leur contribution respective à la dégradation du pont. Ceci souligne les disparités entre les sous-facteurs, révélant ainsi leur importance variable dans le processus de dégradation.

Les trois ponts algériens ayant servi de cas d'étude ont démontré la fiabilité de cette méthodologie, les résultats obtenus étant en parfaite cohérence avec les observations in situ et les préconisations des maîtres d'ouvrage.

Conclusion et perspectives

CONCLUSION GENERALE

La revue de la littérature a mis en évidence la complexité et l'incertitude inhérentes aux mécanismes de dégradation des ponts. Les pratiques actuelles, basées sur des jugements d'experts issus d'inspections visuelles, limitent la précision et la reproductibilité des résultats. Elles se traduisent souvent par une notation qualitative de l'état de santé des ouvrages. D'où l'originalité du travail de proposer un modèle d'évaluation quantitative, capable de combiner et d'intégrer l'ensemble des paramètres pertinents externes) afin de déterminer de manière objective l'état de santé global d'un pont.

Des classes d'état de la dégradation allant de 1 à 5 ont été identifiées selon la valeur du score de la dégradation globale GBDI, 1 représentant un état de dégradation sans danger actuel ni potentiel et 5 un état de dégradation critique.

Une méthodologie pour évaluer l'état de dégradation des ponts en béton armé a été élaborée. Le modèle proposé permet d'analyser cet état en s'appuyant sur un ensemble de facteurs et sous-facteurs influençant la détérioration. Ces éléments, classés en catégories internes et externes, ont été organisés selon une structure hiérarchique à six niveaux et 30 critères, adaptée à la méthode AHP pour établir la pondération relative de chaque facteur. Ce système de pondération, basé sur la méthode AHP, est jugé très approprié, car il offre la possibilité de vérifier la cohérence de cette pondération. De plus, nous avons utilisé une approche qui priorise les situations de dégradation extrêmes correspondant à un danger évident dans le fonctionnement de l'ouvrage.

La synthèse des résultats met en évidence que les paramètres «Structure» et «Environnement» sont les plus influents avec des contributions respectives de 75% et 41%. Par ailleurs, au sein du critère « Structure », les paramètres « Poutres », « Piles » et « Culées » se distinguent comme étant les plus déterminants. En revanche, le paramètre « Équipement » est jugé comme le moins significatif, n'apportant qu'une contribution de 25 % à la dégradation du pont.

En examinant les poids globaux, le modèle hiérarchique met en évidence des différences significatives entre les divers sous-facteurs. Ces variations, qui sont tout à fait logiques, illustrent clairement l'importance relative et l'influence inégale de ces sous-facteurs sur la dégradation du pont.

Pour des fins de calibration et de validation du modèle, une étude de cas a été réalisée sur trois ponts du réseau routier dans l'ouest de l'Algérie. La comparaison des résultats du modèle développé avec ceux des plans d'intervention des maîtres d'ouvrages a montré une concordance satisfaisante.

Le modèle fournit aux municipalités un outil efficace, robuste et facile à utiliser ne nécessitant pas des données difficiles à obtenir. Il sera de grande utilité pour supporter les municipalités dans leur démarche d'évaluation de l'état de dégradation de leurs ouvrages et dans l'élaboration d'un plan d'intervention capable de répondre à leurs exigences ainsi qu'à celles des ministères.

Cette étude ouvre la voie à une gestion optimisée des ponts, mettant en avant l'importance d'une approche intégrée et multidisciplinaire pour l'évaluation et l'entretien des infrastructures.

Les recommandations suivantes, ainsi que les perspectives futures découlant de cette recherche, peuvent être résumées comme suit :

- Ajout de facteurs de dégradation en intégrant diverses études de cas et en considérant les spécificités régionales, ce qui permettrait d'affiner les modèles et d'augmenter leur fiabilité.
- Application de l'outil développé à d'autres infrastructures, telles que des tunnels, des voies ferrées ou des routes, fournissant ainsi une évaluation complète du réseau de transport.
- L'intégration de technologies avancées, telles que la télédétection et l'intelligence artificielle, pourrait améliorer la précision des évaluations en fournissant des données en temps réel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] BENAZZOUZ, Ibrahim Khalil. 2004. Étude des ponts soumis à des dégradations. Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Département Génie Civil, Algérie.
- [2] HADDOU, Ahmed Adib et ABDELLAOUI, Nadir. 2023. Étude pathologique d'un pont à haubans : cas du pont de Oued Dib-Mila. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Département de Génie Civil, soutenu en septembre.
- [3] PIARC. 2023. Ponts routiers - Nouveaux matériaux et technologies de réhabilitation - Rapport technique. Paris, France : PIARC.
- [4] [Wang L., Xue X. Zhao, Wang Z. 2018. The Impacts of Transportation Infrastructure on Sustainable Development, Emerging Trends and Challenges, Int J Environ Res Public Health, 2018 Jun, 15(6): 1172.
- [5] [GODART B., Pathologie des ouvrages en béton armé et en béton précontraint, ENPC, Mastère MPREP, IFSTTAR.
- [6] CHÉRIFI, Wafa. 2020. Durabilité des éléments en béton armé en milieu marin. Mémoire de Master, Centre Universitaire de Ain Temouchent, Algérie.
- [7] BOUDJAHAM, Hocine. 2016. Étude de la durabilité et réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. Mémoire de Master, Université de Guelma, Faculté des Sciences et Technologie.
- [8] Techniques de l'Ingénieur. Définitions et catégories de ponts. 2023. [en ligne] Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-routes-les-ponts-et-les-joints-42235210/conception-des-ponts-c4496/definitions-et-categories-de-ponts-c4496niv10001.html>.
- [9] United Nations Office of the High Representative for the Least Developed Countries, Landlocked Developing Countries and Small Island Developing States (UN-OHRLLS). Améliorer la connectivité des transports pour les pays en développement sans littoral. 2021. Disponible sur: https://www.un.org/ohrlls/sites/www.un.org.ohrlls/files/french_materiaux_de_formation_pdsl_et_connectivite_de_transit.
- [10] BILLON, Jacques. 2015. Historique des ponts en maçonnerie. Cerema, Direction Territoriale Ouest, DIMER, GOA. Journée technique : Les ponts en maçonnerie, du diagnostic à la réparation, Angers(49), 12 octobre 2015. Disponible sur : https://www.cerema.fr/fr/system/files?file=documents/2018/01/1%20Journ%C3%A9e%20Cotita%20Angers%202015%20OA%20MA%20HISTORIQUE_0.pdf.

- [11] NAVIER, Henri. Deux ponts remarquables de la fin du XVI^e siècle : le vieux pont de Mostar et le pont de la Sainte-Trinité à Florence. Association Nationale des Amis des Bâtiments de France, 2023. Disponible sur : <https://anabf.org/pierredangle/dossiers/les-ponts/deux-ponts-remarquables-de-la-fin-du-xvi-sup-e-siecle>.
- [12] DÉSIRE, Clément et GRUBER, Cédric. Le Viaduc de Garabit - Un ouvrage réalisé par Gustave Eiffel. Mémoire de projet de fin d'études, 3^{ème} année ENSTIB, Université de Lorraine. 2013.
- [13] PILOT, Georges et BORDES, Jean-Louis. Ouvrages du génie civil français dans le monde : ponts et viaducs, 1820-1915. [Lieu de publication non spécifié] : [Éditeur non spécifié], [année de publication non spécifiée].
- [14] STUDYSMARTER. Viaduc de Millau. StudySmarter, 2023. Disponible sur : <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/quest-ce-que-lingenierie/viaduc-de-millau/>.
- [15] EGIS. La conception des ponts à travers l'histoire. Egis Group, 2023. Disponible sur : <https://www.egis-group.com/fr/articles/la-conception-des-ponts-a-travers-lhistoire>.
- [16] DOKMIMARLIK. L'architecture des ponts emblématiques. Dokmimarlik.com. Consulté le 24 novembre 2024. Disponible à : <https://dokmimarlik.com/fr/larchitecture-des-ponts-emblematiques/>.
- [17] ACCA Software. (n.d.). Type de pont : classification et caractéristiques. Consulté le 24 octobre 2024, sur <https://biblus.accasoftware.com/fr/type-de-pont-classification-et-caracteristiques/>.
- [18] Wikipedia. (2024). Classification des ponts. Consulté le 02 novembre 2024, sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_des_ponts.
- [19] Bibliothèque nationale de France. (n.d.). Cinq différents types de ponts. Consulté le 04 novembre 2024, sur <https://passerelles.essentiels.bnf.fr/fr/chronologie/construction/63b3ee09-7381-4ed4-81f3-79d95b7af069-pont-tancarville/article/a7c4cb4a-e34e-4917-a029-ef6c5aa434af-cinq-differents-types-ponts>.
- [20] Techno-science.net. Classification des ponts. Consulté le 25 novembre 2024. Disponible à : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Classification-des-ponts-page-2.html>.
- [21] Wixsite.com. Les types de ponts. Consulté le 28 novembre 2024. Disponible à : <https://rechernai.wixsite.com/tpe-lesponts/les-types-de-ponts>.
- [22] AZoBuild. The Importance of Bridges in Modern Infrastructure. 2020. [en ligne] Disponible sur : <https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8611>.
- [23] Archicontemporaine. Pont à poutres : origines et types. Consulté le 10 octobre 2024. Disponible sur : <https://www.archicontemporaine.org/pont-a-poutres-origines-et-types/>.

- [24] Groupe Pigeon. Quels sont les avantages du béton armé. Consulté le 10 octobre 2024. Disponible sur : <https://groupe-pigeon.com/fr/notre-groupe/notre-actualite/quels-sont-les-avantages-du-beton-arme>.
- [25] Université Batna2. (n.d.). Généralités et rappels sur les ponts. Consulté le 12 octobre 2024. Disponible à : https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/baghdadi_mohammed/files/3_chapitre_1_generalites_et_rappels_sur_les_ponts_.pdf.
- [26] Cerema. Jumelage Algérie : Appui à la gestion du réseau routier et des ouvrages. Cerema, 2016. Consulté le 06 novembre 2024, <http://www.cerema.fr/fr/projets/jumelage-algerie-appui-gestion-du-reseau-routier-ouvrages>.
- [27] Wikipedia. (n.d.). Transports en Algérie. Consulté le 06 novembre 2024. Disponible à : https://fr.wikipedia.org/wiki/Transports_en_Alg%C3%A9rie.
- [28] ATTAB. Banque de données des ouvrages d'arts. Ministère des travaux publics, Direction de l'exploitation et de l'entretien routiers, Juillet 2002.
- [29] https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/baghdadi_mohammed/files/3_chapitre_1_generalites_et_rappels_sur_les_ponts_.pdf.
- [30] https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/annexe_croa_200303_cle5c4119.pdf
- [31] <http://www.icab.eu/guide/eurocode/eurocode1.html>.
- [32] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6550/09.pdf?sequence=10&isAllowed=y>
- [33] <https://mffp.gouv.qc.ca/RADF/guide/annexes/annexe-12/>.
- [34] <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0457647.pdf>
- [35] <https://www.infociments.fr/ponts-et-passerelles/differentes-methodes-de-construction-des-ponts-en-beton>.
- [36] Zhang M., Wang X., Li Y. Fatigue Reliability Assessment of Bridges Under Heavy Traffic Loading Scenario. *Infrastructures*. 2024;9(12):238. DOI: 10.3390/infrastructures9120238.
- [37] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-vieillessement-pathologie-et-rehabilitation-du-batiment-tiacf/archive-1/pathologie-et-evaluation-des-ponts-existants-c4502/panorama-des-principaux-desordres-dans-les-ponts-c4502niv10001.html>
- [38] http://thesis.univ-biskra.dz/424/1/maintenances_entretien_et_reparation_des_sols.pdf
- [39] https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/cerema_guide_methodologique_analyse_de_risqu_des_ponts_en_site_affouillable_fevrier_2019_cle06a9c7.pdf.

- [40] Hamlaoui Salim. Maintenance, entretien et réparation des ponts.2012.
- [41] George W.Annadale. SCOUR TECHNOLOGY: prediction and management of water erosion of earth materials. Edition McGraw-Hill.2006.
- [42] GUEMOU Bouabdellah. Étude et modélisation de l'affouillement autour des piles de pont. Thèse de Doctorat en Sciences, spécialité Hydraulique, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen. 2016.
- [43] NEMILI ZAHRA & KALLA .MAHDI, Régimes des crues dans la région des hautes plateaux et risques d'affouillement a l'aval des ouvrages d'art. Actes des journées techniques/ risques naturels : inondation, prévision, protection batna 15/16/décembre 2004.
- [44] <https://www.senat.fr/rap/r18-609/r18-6095.html>
- [45] DEHMOUS, Hocine et KACI, Ouiza. Outil d'aide à la décision appliqué aux ouvrages d'art. Mémoire de Master Professionnel en Génie Civil, spécialité Voiries et Ouvrages d'Art. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du Génie de la Construction, Département de Génie Civil. 2017.
- [46] Sodiags. (n.d.). La corrosion dans le béton armé : mécanismes, causes et solutions. Consulté le 28 décembre 2024, à l'adresse <https://sodiags.fr/la-corrosion-dans-le-beton-arme-mecanismes-causes-et-solutions/>
- [47] LERM. (n.d.). La corrosion des armatures : danger majeur pour la durabilité des ouvrages en béton armé. Consulté le 28 décembre 2024, à l'adresse <https://doc.lerm.fr/la-corrosion-des-armatures-danger-majeur-pour-la-durabilite-des-ouvrages-en-beton-arme/>.
- [48] Techniques de l'ingénieur. (n.d.). Corrosion des structures en béton armé. Consulté le 28 décembre 2024, à l'adresse <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/pathologie-generale-pathologie-du-beton-42240210/corrosion-des-structures-en-beton-arme-c6151/>
- [49] Techniques de l'ingénieur. (n.d.). Comportement des structures en béton armé existantes. Consulté le 28 décembre 2024, à l'adresse <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/pathologie-generale-pathologie-du-beton-42240210/comportement-des-structures-en-beton-arme-existantes-c6153/conclusion-c6153niv10004.html>
- [50] Techniques de l'ingénieur. (n.d.). Mécanisme de l'alcali-réaction dans les structures en béton. Consulté le 28 décembre 2024, à l'adresse <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/pathologie-generale-pathologie-du-beton-42240210/alcali-reaction-dans-les-structures-en-beton-c2252/mecanisme-de-l-alcali-reaction-c2252niv10001.htm>.
- [51] SAIDIA Mohammed Aymen, SALAH Salah Mouncif. Influence de la corrosion dans les ouvrages en béton armé. Mémoire de Master. Département de Génie Civil et Hydraulique, Faculté

[52] Sénat. Rapport d'information sur le vieillissement des ponts et la nécessité d'une politique de préservation. Rapport n° 609, 2018. Disponible à l'adresse : [\[https://www.senat.fr/rap/r18-609/r18-6095.html\]](https://www.senat.fr/rap/r18-609/r18-6095.html)(<https://www.senat.fr/rap/r18-609/r18-6095.html>).

[53] INERIS. (2001). Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03) Rapport intermédiaire Comportement de structures soumises à un incendie. Premières réflexions. Direction des Risques Accidents. [En ligne] Disponible sur : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/10.pdf>.

[54] National Research Council Canada. (2020). Fire Resistance of Concrete Structures. NRC Publications Archive. [En ligne] Disponible sur : <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=5fa7b770-024c-42ce-b9bf-5f6b817f1f1d>.

[55] Cerema. Résistance à l'incendie des ponts routiers : un guide méthodologique. Collection Références. ISBN : 978-2-37180-281-0. 1er octobre 2018.

[56] Benhamouda, M., & Bouzid, A. "L'analyse des risques dans la gestion des ouvrages d'art." Journal of the Algerian Society of Public Works, vol. 6, no 6, 2020, pp. 1-15.

[57] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Pont-page-5.html>.

[58]https://geo.univ-batna2.dz/sites/default/files/geo/files/pathologie_des_constructions.pdf.

[59] <https://www.smabtp.fr/sma/assurance/infos-assurance/pathologie-et-prevention-batiment-et-tp/desordres-voiries>

[60]https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/md_catalogue_de_desordres_pont_en_maconnerie_avec_mur_aile_sept2009_cle258761.pdf

[61]https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CETU_Livre2_Guide_Catalogue_Desordres_Janvier2015-3.pdf.

[62] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Appareil-d-appui-page-2.html>.

[63] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/pathologie-de-l-humidite-des-parois-pathologie-des-ponts-42241210/pathologie-et-evaluation-des-ponts-existants-c7403/>

[64]<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/3533/1/HADJ%20RABAH.Amira.pdf>

[65]<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/td/?id=57d9d53a-7985-41f2-b716-3fc4c1c21242>].

- [66] <https://www.etsmtl.ca/etudes/cours/ctn784>
- [67] http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1152520/04_Determination_etats_limités_appuis.pdf
- [68] https://www.senat.fr/rap/r18-609/r18-609_mono.html.
- [69] <https://www.univ-chlef.dz/drupal/sites/default/files/36.pdf>
- [70] <https://south.euneighbours.eu/fr/publication/rapport-de-med-tso-les-indicateurs-cles-de-performance-du-systeme/>].
- [71] <https://fr.linkedin.com/advice/0/how-do-you-measure-bridge-efficiency-skills-structural-engineering?lang=fr>.
- [72] <https://www.appvizer.fr/magazine/analytique/bi/indicateurs-de-performance-entreprise>.
- [73] <https://www.tawi.com/fr/insights/indicateurs-cles-des-performances-utilises-dans-la-mesure-de-lefficacite-dun-entrepot/>.
- [74] <https://www.rinnovision.com/fr/blog-posts/evolution-techniques-inspection-ponts>.
- [75] <https://www.algerie360.com/lalgerie-se-dote-de-lun-des-plus-hauts-ponts-ferroviaires-du-monde-video/>.
- [76] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_de_Sidi_Rached.
- [77] [http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/4804/1/m%C3%A9moire%20\(2\).pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/4804/1/m%C3%A9moire%20(2).pdf).
- [78] http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0981031/06_Essais_chargement_evaluation_pont_beton_arme.pdf.
- [79] https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/Club_OA_21_06_12_Evaluation_OA_existants_cle71f121.pdf
- [80] https://www.atrsvv.dz/ressources/fichiers_produits/fichier_produit_390.pdf
- [81] <https://www.m-culture.gov.dz/images/Normalisation-des-infrastructures-et-equipements.pdf>
- [82] [http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/3875/1/m%C3%A9moire%20\(2\).pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/3875/1/m%C3%A9moire%20(2).pdf)
- [83] <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2015/F2015061.pdf>.
- [84] BELARIBI F.Z. 2021. Utilisation des méthodes d'aide multicritère à la décision dans la gestion des ressources en eau : Application de la méthode PROMETHEE à la sélection d'un procédé de dessalement de l'eau de mer. Thèse de doctorat en sciences économiques. Faculté des sciences économiques, commerciales et des sciences de gestion. Université Aboubekr BELKAID-Tlemcen.

- [85] Méthode mathématique d'analyse multicritère. Wikipedia. [En ligne] Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_math%C3%A9matique_d'analyse_multicrit%C3%A8re.
- [86] <https://www.3ds.com/fr/products/catia/electre>.
- [87] <https://www.hellopro.fr/logiciels-de-schematique-electrique-1001049-fr-1-feuille.html>.
- [88] <https://www.edrawsoft.com/fr/7-best-electrical-drawing-software.html>.
- [89] <https://www.capterra.fr/directory/31579/electrical-design/software>.
- [90] https://fr.wikipedia.org/wiki/Preference_ranking_organization_method_for_enrichment_evaluation
- [91] Vojislav T. et all. 2011. Promethee method implementation with multi-criteria decisions. Facta universitatis. Series: Mechanical Engineering Vol. 9, No 2, 2011, pp. 193 - 202.
- [92] Hamed Taherdoost, Mitra Madanchian. 2023. Using PROMETHEE Method for Multi-Criteria Decision Making: Applications and Procedures. [En ligne] Disponible sur : <https://irispublishers.com/ijebm/fulltext/using-promethee-method-for-multi-criteria-decision-making-applications-and-procedures.ID.000502.php>.
- [93] SAATY T. Évaluation des impacts environnementaux (EIE). 2011. Cours 5e Outils méthode de comparaison. [En ligne] Disponible sur : https://www.gci.ulaval.ca/fileadmin/gci/documents/rgalvez/Cours%20en%20classe/powder%20point%20_%20Guesdon/Cours%205e_Outils%20m%C3%A9thode%20de%20comparaison%20de%20Saaty.pdf. [Consulté le 18 janvier 2025].
- [94] Rivest, Robin. Techniques de simulation pour la recherche sur le perfectionnement de la méthode AHP. Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maîtrise ès sciences en gestion (M. Sc.), HEC Montréal, Mai 2019. [En ligne] Disponible sur : <https://biblos.hec.ca/biblio/memoires/m2019a612764.pdf> [Consulté le 18 janvier 2025].
- [95] <https://www.spicelogic.com/Products/ahp-software-30>
- [96] <https://le coursgratuit.com/15-methodes-et-outils-de-prise-de-decision/>
- [97] <https://www.6sigma.us/six-sigma-in-focus/analytic-hierarchy-process-ahp/>
- [98] <https://www.processmaker.com/fr/blog/20-best-process-analysis-tools-reviewed-in-2024/>
- [99] <https://www.ma-boutique-en-lean.fr/content/165-analytic-hierarchy-process>
- [100] La matrice de décision multicritère. [En ligne] Disponible sur : <https://www.e-marketing.fr/Thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/La-matrice-de-decision-multicritere-326121.htm> [Consulté le 18 janvier 2025].

- [101] Méthode mathématique d'analyse multicritère. Wikipedia. [En ligne] Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_math%C3%A9matique_d'analyse_multicrit%C3%A8re [Consulté le 18 janvier 2025].
- [102] Software Analysis Workbench (SAW). Galois. [En ligne] Disponible sur : <https://saw.galois.com> [Consulté le 18 janvier 2025].
- [103] https://www.researchgate.net/profile/Denis_Bouyssou/publication/265441342_Aide_Multicritere_a_la_Decision_Methodes_et_Cas/links/5a9575e0aca27214056922b6/Aide-Multicritere-a-la-Decision-Methodes-et-Cas.pdf
- [104] <http://www.fastercapital.com/fr/contenu/TOPSIS---Technique-de-preference-de-commande-par-similarite-avec-la-solution-ideale---Recherche-de-l-ideal---TOPSIS-dans-le-monde-de-MCDA.html>
- [105] <https://pdfprof.com/PDFV2/Documents1/21599/18/25>
- [106] https://cafesig.ulb.ac.be/pluginfile.php/3486/mod_resource/content/4/AMC_-_Introduction_2016.pdf.
- [107] https://indico.math.cnrs.fr/event/4598/contributions/4030/attachments/2490/3076/Toulon2019_AMC.pdf
- [108] <https://books.openedition.org/quae/pdf/42899>
- [109] <https://www.nouvelle-aquitaine.developpement->
- [110] Lallam, Faiza et al. (2018). Estimating the runoff coefficient using the analytic hierarchy process. Journal of Water and Land Development. 38. 67-74. 10.2478/jwld-2018-0043.
- [111] Ilham Ennaouri and Musandji Fuamba: Modeling Of Hydraulic And Structural Degradation Of Sewe And Storm Water Pipelines. Water resources planning and management de l'ASCE (2010).
- [112]: Saaty T. L. (1990).How to make a decision, The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research 48 (1990) 9-26.
- [113] <https://revues.imist.ma/index.php/REMAREM/article/download/3772/4433/18743>
- [114] https://hal.science/hal-01149774v1/file/Evaluation_des_risques_projet_par_une_approche_AHP_WPM.pdf.
- [115] <https://shs.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2018-2-page-54?lang=fr>
- [116] https://www.researchgate.net/publication/328840792_Aide_a_la_decision_par_l'application_de_la_methode_AHP_Analytic_Hierarchy_Process_a_l'analyse_multicritere_des_strategies_d'aménagement_du_Grand_Buech_a_la_Faurie
- [117] <https://www.ajol.info/index.php/cread/article/download/200670/189224>.

- [118] <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/25882/1/m%C3%A9moire%20finale.pdf>
- [119] https://www.researchgate.net/publication/278382003_Evaluation_des_risques-projet_par_une_approche_AHPWPM_Application_a_un_projet_reel_BTP
- [120] <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01337223v1/file/CHEVALLIER%20Matthieu.pdf>.
- [121] https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/30176/1/m%C3%A9moire%20M2%2016-06_compressed_compressed.pdf
- [122] https://www.researchgate.net/profile/Frederic-Cherqui/publication/341495946_Methodologie_d'evaluation_d'un_projet_d'amenagement_durable_d'un_quartier_-_methode_ADEQUA/links/5ec4644d92851c11a8777ea8/Methodologie-devaluation-dun-projet-damenagement-durable-dun-quartier-methode-ADEQUA.pdf.
- [123] Mathieu, H., & Denis, A. (2014). Incidences des tassements d'appuis sur le dimensionnement des ponts de portée moyenne. IABSE Congress Report. <https://doi.org/10.5169/seals-9658.>].
- [124] Norme NF EN 206/CN. (2013). En conformité avec l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1, Section 4, Article 4.2, Actions physiques et chimiques auxquelles la structure est exposée en plus des actions mécaniques). AFNOR Editions.
- [125] Guiraud, P. (2014). Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton, approche performancielle et évolutions normatives, les classes d'exposition. CEREMA, ENPC Marne-la-Vallée.