

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID - TLEMCEM



Faculté de Technologie

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Réhabilitation intelligente des bâtiments

Par : Souidi Adel et Metri Rabie

Thème

**Gestion du risque de défaillance structurelle
dans les bâtiments anciens réhabilités
à l'aide des réseaux bayésiens**

Soutenu publiquement, le / 06/2026, devant le jury composé de :

Mr DAHAOUI Hachimi	Dr	Univ.Tlemcen	Président
Mr TROUZINE Habib	Pr	Univ.Tlemcen	Examineur
Mme BENACHENHOU Kamila Amel	MCA	Univ.Tlemcen	Encadrant
Mr LAKERMI Anis	Dr	Univ.Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2025-2026

Remerciements

Au terme de ce travail, il nous est particulièrement agréable d'exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Nous adressons tout d'abord nos plus sincères remerciements à nos encadrants :

Mme K. Benachenhou et Mr LAKERMI Anis, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils, leurs orientations pertinentes ainsi que la confiance qu'ils nous ont accordée tout au long de ce travail. Leur accompagnement scientifique et leur rigueur ont constitué une source permanente de motivation.

Nous exprimons également notre reconnaissance aux membres du jury, Le président Mr DAHAOUI Hachimi et l'examineur Mr TROUZINE Habib pour l'intérêt porté à cette étude et pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Civil, qui ont contribué à notre formation universitaire et à l'acquisition des connaissances nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à nos collègues et amis pour leur soutien, leurs encouragements et les moments de partage qui ont rendu ce parcours plus agréable.

À toutes les personnes qui ont contribué, même modestement, à la réalisation de ce mémoire, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts,
de persévérance et de sacrifices,

À mes très chers parents, Fatima & Abdessamad, mes chères grands-mères Rabha & Fatiha
Aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement la profondeur de ma gratitude
et de mon affection envers vous. Merci pour votre amour inconditionnel,
votre patience infinie, vos sacrifices silencieux et vos prières qui ont éclairé chacun de mes
pas. Vous avez toujours été mon refuge, ma force et mon inspiration.
Puisse Allah vous accorder une longue vie remplie de santé, de bonheur et de sérénité.

À mes chères sœurs, Soraya, Djihene & Nihel, mon petit frère Walid,
& ma tante Amaria (Qu'Allah la guérise)
Pour votre présence constante, votre soutien indéfectible et vos précieux encouragements
dans les moments les plus exigeants de mon parcours. Merci d'avoir cru en moi

À la mémoire de mes grands-pères Amar & Abdelghani, ma grand-mère bien-aimés Maya,
Votre absence demeure une présence silencieuse dans mon cœur.
J'aurais tant souhaité vous voir partager ce moment. Puisse Allah vous accueillir
dans Son immense miséricorde et vous accorder les plus hautes demeures du Paradis.

À Imane,
Recevez l'expression de ma profonde reconnaissance pour votre affection, votre
bienveillance et votre soutien tout au long de mon parcours. Votre confiance a toujours
constitué une source précieuse de motivation.

À les amis les plus chers (Future Dr. Reda, Oussama, Nasro, Nadir, Bilel, Ryad, Walid,
AmineS., Youcef, Youcef, Anes & Largo)
En témoignage de notre sincère amitié, des souvenirs inoubliables que nous avons construits
ensemble et de tous les moments de partage qui ont enrichi ces années d'études.

Mes amis de toujours et à tous les étudiants et mes frères de ma promotion de Master En
souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons
passés ensemble.

Une pensée particulière pour mon binôme Rabie
Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué
à la réalisation de ce travail,
Qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude,
de mon respect le plus sincère et de ma reconnaissance éternelle.

Souidi Adel

Dédicace

Des années de travail, de sacrifices et de persévérance — tout cela, je vous le dois.

À la mémoire de mes très chers parents, Abd El Karim & Houria,
Vous êtes partis avant de voir ce jour, mais c'est grâce à vous que je suis là.
Vos sacrifices silencieux et votre amour inconditionnel ont été mon souffle.

Puisse Allah vous accorder Sa miséricorde infinie
et vous accueillir dans les plus hautes demeures du Paradis.
Reposez en paix.

À mes frères, mes sœurs et toute ma famille,
Vous avez comblé l'absence et été mon refuge tout au long de ce parcours.

Merci d'avoir été là, simplement là.
À la mémoire de mes grands-parents bien-aimés,
Puisse Allah vous accueillir dans Son immense miséricorde.
Votre souvenir m'a accompagné jusqu'ici.

À mes amis, Ismail, Houssein, Mohamed, Djamel, Fouad, Yassine,
Zakaria, Islem & Chakib,
Pour les encouragements, les silences complices et les nuits de travail partagées.
Vous avez rendu ce chemin plus léger et ces années inoubliables.
Ce travail est le mien, mais il n'aurait jamais existé sans vous tous.

Une pensée particulière pour mon binôme Adel,
sans qui ce chemin aurait été bien plus difficile.

À tous ceux que j'aime
Vous avez semé, aujourd'hui je récolte. J'espère vous rendre fiers.

Metri Rabie

Résumé

Ce mémoire propose une approche probabiliste pour l'évaluation et la gestion du risque de défaillance structurelle globale des bâtiments anciens réhabilités, dans un contexte d'incertitude liée au diagnostic pathologique et aux conditions d'exposition. La méthodologie repose sur l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), utilisée pour identifier et hiérarchiser les scénarios de dégradation, puis sur les réseaux bayésiens, permettant de formaliser les relations causales entre facteurs environnementaux, pathologies observables, perte de capacité portante et défaillance finale. La démarche est appliquée à deux cas d'étude en Algérie : des bâtiments anciens situés en milieu marin à Ghazaouet et le bloc internat du lycée Moufdi Zakaria à Maghnia, situé en milieu urbain continental. Les simulations probabilistes, complétées par une extension dynamique à l'horizon de dix ans, mettent en évidence les variables critiques influençant l'évolution du risque. Les résultats confirment l'intérêt des réseaux bayésiens comme outil d'aide à la décision pour le diagnostic, la maintenance et la réhabilitation des bâtiments anciens. L'approche proposée permet ainsi de hiérarchiser les priorités d'intervention selon le contexte environnemental et le niveau de vulnérabilité structurelle.

Mots-clés : Bâtiments anciens, Défaillance structurelle, Analyse Préliminaire des Risques (APR), Réseaux bayésiens, Modélisation probabiliste, Réhabilitation, Diagnostic structurel

Abstract

This dissertation proposes a probabilistic approach for the assessment and management of the risk of global structural failure in rehabilitated old buildings, within a context of uncertainty related to pathological diagnosis and exposure conditions. The methodology is based on Preliminary Risk Analysis (PRA), used to identify and prioritize degradation scenarios, and on Bayesian networks, which make it possible to formalize causal relationships between environmental factors, observable pathologies, loss of load-bearing capacity, and final failure. The approach is applied to two case studies in Algeria: old buildings located in a marine environment in Ghazaouet, and the boarding block of Moufdi Zakaria High School in Maghnia, located in a continental urban environment. The probabilistic simulations, complemented by a dynamic extension over a ten-year horizon, highlight the critical variables influencing the evolution of risk. The results confirm the relevance of Bayesian networks as a decision-support tool for the diagnosis, maintenance, and rehabilitation of old buildings. The proposed approach therefore makes it possible to prioritize intervention actions according to the environmental context and the level of structural vulnerability.

Keywords: Historic buildings, Structural failure, Preliminary Risk Analysis (PRA), Bayesian Networks, Probabilistic modeling, Rehabilitation, Structural diagnosis

الملخص

تقترح هذه المذكرة مقارنة احتمالية لتقييم وإدارة مخاطر الفشل الإنشائي الشامل للمباني القديمة المُعاد تأهيلها، في ظل حالة من عدم اليقين المرتبطة بالتشخيص المرضي للأضرار وظروف التعرض البيئي. تعتمد المنهجية على التحليل الأولي للمخاطر، الذي يُستخدم لتحديد سيناريوهات التدهور وترتيبها حسب درجة خطورتها، ثم على الشبكات البايزية التي تسمح بتمثيل العلاقات السببية بين العوامل البيئية، والأضرار الظاهرة، وفقدان القدرة التحملية، والفشل النهائي للمنشأ.

تم تطبيق هذه المقاربة على حالتين دراسيتين في الجزائر: مبانٍ قديمة تقع في وسط بحري بمدينة الغزوات، ومبنى الإقامة الداخلية لثانوية مفدي زكريا بمدينة مغنية الواقعة في وسط حضري قاري. وقد أبرزت المحاكاة الاحتمالية، المدعومة بامتداد ديناميكي على مدى زمني قدره عشر سنوات، المتغيرات الحرجة المؤثرة في تطور مستوى المخاطر. وتؤكد النتائج أهمية الشبكات البايزية كأداة مساعدة على اتخاذ القرار في مجالات التشخيص والصيانة وإعادة تأهيل المباني القديمة. كما تُمكن المقاربة المقترحة من ترتيب أولويات التدخل وفقاً للظروف البيئية ومستوى الهشاشة الإنشائية للمبنى.

الكلمات المفتاحية: المباني القديمة، الفشل الإنشائي، التحليل الأولي للمخاطر (APR)، الشبكات البايزية، النمذجة الاحتمالية، إعادة التأهيل، التشخيص الإنشائي

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
Résumé	iv
Abstract.....	v
الملخص	vi
Sommaire	vii
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xiv
Liste des abréviations	xv
Introduction générale	1

CHAPITRE I

Bâtiments anciens, pathologies et défaillances structurelles

I.1 Introduction	4
I.2 Définition et typologie des bâtiments anciens	4
I.3 Classification (âge, matériaux, systèmes constructifs)	4
I.3.1 Caractéristiques fondamentales	4
I.3.2 Matériaux et système structurel	5
I.3.3 Valeur patrimoniale et urbaine	5
I.4 Caractéristiques des bâtiments anciens	5
I.4.1 Matériaux traditionnels et naturels	5
I.4.1.1 La pierre	5
I.4.1.2 Le bois	6
I.4.1.3 La terre	7
I.4.1.4 Les mortiers de chaux	7
I.4.2 Spécificités structurelles	8
I.5 Pathologies fréquentes des bâtiments anciens	8
I.5.1 Définition et classification des pathologies	8
I.5.2 Pathologies mécaniques : la fissuration	9
I.5.2.1 Fissures de tassement	9
I.5.2.2 Fissures de cisaillement	9
I.5.2.3 Déformations globales	10
I.5.3 Pathologies liées à l'humidité	10

I.5.3.1 Remontées capillaires	10
I.5.3.2 Infiltrations	11
I.5.3.3 Cycles gel-dégel	11
I.5.4. Pathologies biologiques et chimiques	12
I.5.4.1 Dégradations biologiques	12
I.5.4.2 Corrosion des éléments métalliques	12
I.5.5. Interaction entre pathologies	13
I.6 Défaillance structurelle	13
I.6.1 Lien entre pathologies et défaillances	13
I.6.2 Modes de défaillance structurelle	14
I.7 Méthodes de diagnostic	14
I.7.1 L'inspection visuelle	15
I.7.1.1 Relevé des désordres	15
I.7.1.2 Analyse historique du bâtiment	15
I.7.1.3 Limites de l'inspection visuelle	15
I.7.2 Essais in situ (Contrôles non destructifs - CND)	15
I.7.2.1 Scléromètre	16
I.7.2.2 Ultrasons	16
I.7.2.3 Radar de structure (GPR)	16
I.7.2.4 Thermographie infrarouge	17
I.7.3 Essais semi-destructifs et analyses en laboratoire	17
I.7.3.1 Carottages et prélèvements	17
I.7.3.2 Analyses physico-chimiques	18
I.7.4 Modélisation numérique	18
I.7.4.1 Modèles déterministes	18
I.7.4.2 Modèles avancés	19
I.7.5 Synthèse du diagnostic	19
I.8 Limites des méthodes classiques et incertitude	19
I.8.1 Nature de l'incertitude	19
I.8.2 Limites des approches déterministes	19
I.8.3 Subjectivité du diagnostic	20
I.8.4 Complexité et interaction	20
I.8.5 Conséquence sur l'évaluation du risque	20
I.9 Conclusion	21

CHAPITRE II

Analyse et modélisation du risque de défaillance

II.1 Introduction	22
II.2 Le risque structurel dans le bâti ancien : définition et spécificités	22
II.2.1 Définition du risque	22
II.2.2 De la pathologie à la défaillance : une chaîne causale	23
II.2.3 Particularités du risque dans le patrimoine bâti ancien	23
II.3 Les méthodes d'identification des risques : panorama et choix méthodologique	24
II.3.1 L'AMDEC : une méthode rigoureuse mais exigeante en données	24
II.3.2 L'Arbre de défaillance : puissant mais binaire	25
II.3.3 L'Analyse préliminaire des risques (APR) : la méthode retenue	25
II.3.3.1 Principe général	25
II.3.3.2 Pourquoi l'APR est-elle la méthode la plus adaptée à ce travail ?	25
II.3.3.3 Application de l'APR au bâti ancien réhabilité	26
II.3.4 Comparaison synthétique des quatre approches	28
II.4 Définition des scénarios de risque propres à l'ouvrage étudié	29
II.4.1 Critères de sélection et de construction des scénarios	29
II.4.2 Présentation des cinq scénarios retenus	29
II.4.3 Interdépendances entre scénarios	31
II.5 Identification et caractérisation des variables du réseau bayésien	31
II.5.1 Trois types de nœuds	31
II.5.2 Tableau récapitulatif des nœuds	32
II.6 Conclusion	34

CHAPITRE III

Modélisation par les réseaux bayésiens

III.1 Introduction	35
III.2 Réseaux bayésiens	35
III.2.1 Définition	35
III.2.2 Théorie des réseaux bayésiens	35
III.2.2.1 Concepts fondamentaux	35
III.2.2.2 Probabilités conditionnelles	36
III.2.3 Définition des variables du modèle	36
III.2.3.1 Variables d'entrée (pathologies, environnement, structure)	36
III.2.3.2 Variables intermédiaires et de sortie (défaillance)	37
III.2.3 Construction du réseau	39
III.2.3.1 Composants des réseaux bayésiens	39

III.2.3.2 Fondements mathématiques des réseaux bayésiens	39
III.2.3.3 Méthodologie de l'application des réseaux bayésiens	40
III.2.3.4 Approche systémique et identification des nœuds via l'APR	42
III.2.3.5 Transition de la matrice de criticité statique vers un graphe causal de type PERT	44
III.2.4 Tables de probabilités conditionnelles (CPT)	45
III.2.4.1 Principe et méthode d'estimation des probabilités conditionnelles	45
III.2.4.2 Hypothèses adoptées pour la construction des CPT	48
III.2.5 Simulation et analyse des scénarios	49
III.2.5.1 Principe de propagation des probabilités	49
III.2.5.2 Analyse de sensibilité et identification des variables critiques	49
III.2.5.3 Détermination des probabilités des nœuds	50
III.2.5.4 Structure générale et logique de construction des scénarios de risque	50
III.3 Conclusion	51

CHAPITRE IV

Etude de cas

IV.1 Introduction	53
IV.2 Présentation des cas d'étude	53
IV.2.1 Milieu marin : Front de mer de Ghazaouet	53
IV.2.1.1 Description générale et contexte environnemental	53
IV.2.1.2 Pathologies observées - diagnostic visuel	55
IV.2.1.3 Analyse de l'état structurel	59
IV.2.1.4 Synthèse du diagnostic – site de Ghazaouet	60
IV.2.1.5 Recommandations de réhabilitation	60
IV.2.2 Milieu urbain : Lycée moufdi zakaria-Maghnia	61
IV.2.2.1 Description générale et contexte	61
IV.2.2.2 Pathologies observées – diagnostic visuel	62
IV.2.2.3 Analyse de l'état structurel	65
IV.2.2.4 Synthèse du diagnostic - Site de Maghnia	66
IV.2.2.5 Recommandations de réhabilitation	66
IV.3 Analyse comparative synthétique des deux sites	67
IV.4 Application du modèle bayésien	68
IV.4.1 Construction du réseau pour chaque cas	68
IV.4.2 Modélisation graphique du scénario de danger	68
IV.4.3 Formalisme mathématique des calculs	69
IV.4.4 Données d'entrée et tables de probabilités conditionnelles (CPT)	69
IV.4.4.1 Assignation des nœuds sans parents	69

IV.4.4.2 Tables de probabilités conditionnelles (CPT) des nœuds intermédiaires	70
IV.4.4.3 CPT du nœud final X (Défaillance structurelle globale)	71
IV.5 Développement des calculs par propagation des probabilités	72
IV.6 Interprétation scientifique des résultats	74
IV.7 Application des réseaux bayésiens dynamiques	74
IV.7.1 Introduction	74
IV.7.2 Modélisation graphique et temporelle du scénario de danger	74
IV.7.3 Données d'entrée et évolution des tables de probabilités (CPT)	75
IV.7.3.1 Variables environnementales permanentes	75
IV.7.3.2 Impact du temps sur les pathologies (Inférence dynamique)	75
IV.7.3.3 Table de probabilité conditionnelle du nœud de synthèse I3 (T10)	76
IV.7.4 Développement des calculs à l'échéance de 10 ans	76
IV.8 Interprétation scientifique de la trajectoire temporelle	77
IV.9 Simulation des scénarios de risque et représentation graphique du réseau bayésien	78
IV.9.1 Application des scénarios	79
IV.9.1.1 Scénario S1 - Dégradation statique en milieu marin	79
IV.9.1.2 Scénario 2 : Front maritime de Ghazaouet – échéance initiale à court terme (profil post-réhabilitation)	81
IV.9.1.3 Scénario 3 : Front maritime de Ghazaouet – évolution dynamique à long terme (profil vieillissement marin S3)	82
IV.9.1.4 Scénario 4 : Zone urbaine de Maghnia – impact du défaut de maintenance (Profil terrestre S4)	84
IV.9.1.5 Scénario 5 : Profil témoin optimal – structure sous maintenance préventive continue (S5)	85
IV.9.2 Synthèse comparative des performances du modèle	87
IV.10 Conclusion	88
Conclusion générale	90
Bibliographie	93

Liste des figures

CHAPITRE I

Figures I.1. Pierre.....	6
Figures I.2. Bois.....	7
Figures I.3. La terre.....	7
Figures I.4. La chaux.....	8
Figures 1.5. Fissures de tassement.....	9
Figures 1.6. Cisaillement.....	9
Figures 1.7. Déformations globales.....	10
Figures 1.8. Remontées capillaires.....	11
Figures 1.9. Infiltrations.....	11
Figures 1.10. Cycles gel-dégel.....	12
Figures 1.11. Dégradations biologiques.....	12
Figures 1.12. Corrosion des éléments métalliques.....	13
Figures 1.13. Ultrasons/ Scléromètre.....	16
Figures 1.14. Pachomètre.....	16
Figures 1.15. Caméra Thermographique.....	17
Figures 1.16. Echantillon de Carottages.....	18
Figures 1.17. Analyses physico-chimiques.....	18

CHAPITRE III

Figure III.1. Image d'une structure de réseau bayésien simple montrant des nœuds et des liens de causalité.....	36
Figure III.2. Composants d'un réseau bayésien.....	39
Figure III.3. Méthodologie de l'application des réseaux bayésiens.....	41
Figure III.4. Graphe acyclique dirigé (DAG) du réseau bayésien.....	45

CHAPITRE IV

Figure IV.1. Vue générale du bâtiment étudié sur le front maritime de Ghazaouet.....	54
Figure IV.2. Localisation du bâtiment étudié sur le front maritime de Ghazaouet (Wilaya de Tlemcen)	54
Figure IV.3. Éclatement total du béton d'enrobage en sous-face de balcon avec mise à nu et perte de section critique des armatures d'acier fortement corrodées.....	55
Figure IV.4. (a) Décollement d'enduit et fissuration à la jonction dalle, garde-corps plein, accentués par la présence d'équipements techniques rapportés. (b) Altération de la sous-face d'une dalle de balcon avec amorce d'éclatement du béton d'enrobage et corrosion des éléments de serrurerie.....	56
Figure IV.5. Fissure oblique et traversante sur mur de maçonnerie porteur, caractéristique d'un phénomène de tassement différentiel de l'infrastructure.....	57

Figure IV.6. Fissuration longitudinale majeure et ramifiée au niveau de la paillasse de l'escalier, indiquant un cisaillement structurel et une perte de capacité portante locale.....	57
Figure IV.7. Vue d'ensemble de la façade urbaine présentant une dégradation avancée des éléments architecturaux en encorbellement et des risques de chute de matériaux.....	58
Figure IV.8. (a) Effondrement localisé de l'enduit de plâtre au plafond avec mise à nu et rupture du lattis traditionnel en bois support de finition. (b) Vue d'ensemble de la cage d'escalier présentant un état de vétusté généralisé, des infiltrations d'eau chroniques et des décollements d'enduits en partie haute.....	59
Figure IV.9. (a) Façade principale de lycée Mofdi Zakaria (b) Position de bloc étudié.....	62
Figure IV.10. Écaillage prononcé de l'enduit en base de façade extérieure.....	63
Figure IV.11. Plafond de couloir intérieur - moisissures et infiltrations.....	64
Figure IV.12. (a) Détail plafond de chambre — dégradation avancée. (b) Ségrégation du béton sur poutre porteuse — amorce de corrosion des armatures.....	64
Figure IV.13. Poteaux intérieurs - décollement d'enduit, fissuration et amorce de corrosion.....	65
Figure IV.14. Arbre logique des 2 cas d'étude.....	79
Figure IV.15. Résultat de réseau bayésien pour S1.....	80
Figure IV.16. Résultat de réseau bayésien pour S2.....	82
Figure IV.17. Résultat de réseau bayésien pour S3.....	83
Figure IV.18. Résultat de réseau bayésien pour S4.....	85
Figure IV.19. Résultat de réseau bayésien pour S5.....	86

Liste des tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1. APR appliquée aux désordres structurels du bâti ancien.....	27
Tableau II.2. Comparaison des principales méthodes d'analyse des risques.....	28
Tableau II.3. Scénarios de risque retenus pour la modélisation bayésienne.....	30
Tableau II.4. Variables (nœuds) du réseau bayésien et leurs caractéristiques.....	33

CHAPITRE III

Tableau III.1. Échelle de gravité des Fissures.....	37
Tableau III.2. Échelle de caractérisation de l'agressivité a l'environnement.....	38
Tableau III.3. Indicateurs d'état pour l'évaluation de la vulnérabilité matérielle.....	38
Tableau III.4. Matrice APR : correspondance entre les dangers identifiés et les nœuds du réseau bayésien.....	43

CHAPITRE IV

Tableau IV.1. Synthèse du diagnostic.....	60
Tableau IV.2. Synthèse du diagnostic.....	66
Tableau IV.3. Comparaison synthétique des deux sites.....	67
Tableau IV.4. Probabilités marginales des nœuds parents (sans parents)	70
Tableau IV.5. CPT du nœud intermédiaire I1 (Corrosion)	70
Tableau IV.6. CPT du nœud intermédiaire I2 (Fissuration)	71
Tableau IV.7. CPT du nœud intermédiaire I3 (Perte de capacité portante)	71
Tableau IV.8. CPT du nœud final X (Défaillance Globale)	72
Tableau IV.9. CPT du Nœud de Synthèse I3 (T10)	76
Tableau IV.10. Tableau Comparative des performances du modèle.....	88

Liste des abréviations

ACI	American Concrete Institute (Institut américain du béton)
ADD / FTA	Arbre de Défaillance / Fault Tree Analysis
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
APR	Analyse Préliminaire des Risques.
BAEL	Béton Armé aux États Limites.
BIM	Building Information Modeling
Ca(OH)₂	Portlandite / Hydroxide de calcium.
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
Cl⁻	Ions Chlorures.
CO₂	Dioxyde de carbone.
CPT	Conditional Probability Table
DAF	Dynamic Amplification Factor
DAG	Directed Acyclic Graph
DTU	Document Technique Universitaire.
EM	Expectation-Maximization
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
GPR	Ground Penetrating Radar
IPR	Indice de Priorité de Risque.
ISO	International Organization for Standardization
MADS-MOSAR	Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes - Méthode d'Organigramme Systémique d'Analyse de Risque.
MLE	Maximum Likelihood Estimation
PERT	Project Evaluation and Review Technique
Ph	Potentiel Hydrogène (Mesure de l'acidité ou de l'alcalinité)

RDC	Rez-de-chaussée
R+1	Rez-de-chaussée + 1 étage
R+3	Rez-de-chaussée + 3 étages
SRB	Sulfate-Reducing Bacteria (Bactéries sulfato-réductrices).

Introduction générale

Les bâtiments anciens constituent une composante essentielle du patrimoine bâti en raison de leur valeur historique, architecturale, culturelle et socio-économique. Leur conservation et leur réhabilitation représentent un enjeu majeur pour les acteurs du génie civil, dans une perspective de préservation du patrimoine et de développement durable (Croci, 1998 ; ACI Committee 562, 2019). Toutefois, ces ouvrages sont soumis au vieillissement naturel des matériaux ainsi qu'à l'action continue de facteurs environnementaux, mécaniques et anthropiques, favorisant l'apparition de pathologies susceptibles d'altérer leur comportement structurel.

Le diagnostic des structures existantes constitue toutefois une tâche complexe. Contrairement aux ouvrages neufs, les bâtiments anciens présentent une connaissance souvent incomplète de leur historique, de leurs matériaux constitutifs ainsi que des modifications subies au cours du temps. Cette situation engendre des incertitudes importantes rendant difficile l'évaluation précise de leur niveau de sécurité (Fookes et al., 2000 ; Cauvin, 2007 ; Lakermi, 2021). Par ailleurs, les mécanismes de dégradation sont généralement interdépendants et évoluent selon des processus complexes, dont les effets sur le comportement structurel restent difficilement prévisibles (Farrar & Worden, 2012).

Dans ce contexte, l'approche par le risque apparaît comme une solution pertinente permettant d'améliorer la prise de décision dans les projets de réhabilitation. Selon la norme ISO 31000 (2018), le risque correspond à l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs. Dans le domaine des structures existantes, il peut être défini comme la combinaison de la probabilité d'occurrence d'une défaillance et de ses conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement (Baecher & Christian, 2005 ; Aven, 2016).

Néanmoins, l'analyse de la littérature met en évidence une limite importante des méthodes classiques. Les approches d'ingénierie traditionnelles reposent principalement sur des modèles déterministes nécessitant des données précises, souvent indisponibles dans le cas des bâtiments anciens. Ces méthodes restent ainsi limitées dans la prise en compte explicite de l'incertitude. À l'inverse, les expertises visuelles fournissent des informations qualitatives utiles, mais demeurent fortement dépendantes du jugement de l'expert. Elles permettent

difficilement une quantification rigoureuse du risque et prennent insuffisamment en compte les interactions complexes entre les différentes pathologies.

Afin de surmonter ces limitations, ce travail propose une approche probabiliste fondée sur les réseaux bayésiens. Ces derniers permettent de représenter de manière structurée les relations causales entre les différents facteurs influençant la défaillance structurelle. Fondés sur des graphes orientés acycliques, ils offrent une capacité d'analyse bidirectionnelle permettant à la fois de prévoir la probabilité de défaillance et d'identifier les causes d'un désordre observé (Pearl, 1988 ; Jensen & Nielsen, 2007). Ils permettent également une mise à jour dynamique du risque en fonction des nouvelles informations disponibles, constituant ainsi un outil d'aide à la décision particulièrement adapté au contexte des bâtiments anciens.

Dans ce cadre, la problématique de ce mémoire peut être formulée comme suit :

Comment évaluer et gérer le risque de défaillance structurelle des bâtiments anciens réhabilités en tenant compte des incertitudes du diagnostic et des interactions entre les différents mécanismes de dégradation ?

L'objectif principal de ce travail est de développer une méthodologie intégrée d'évaluation et de gestion du risque basée sur le couplage entre l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) et les réseaux bayésiens. Les objectifs spécifiques consistent à :

- Identifier les principales pathologies affectant les bâtiments anciens et leurs mécanismes d'évolution ;
- Analyser les facteurs environnementaux, physiques et mécaniques susceptibles de conduire à une défaillance structurelle ;
- Étudier les méthodes d'identification et d'évaluation des risques applicables au patrimoine bâti ancien ;
- Structurer la phase d'identification par l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) afin de définir des scénarios de risque hiérarchisés ;
- Construire un modèle de réseau bayésien capable de formaliser les relations causales entre facteurs déclenchants, pathologies et états de défaillance ;
- Réaliser des simulations probabilistes et des analyses de sensibilité afin d'identifier les variables critiques ;

- Appliquer et valider la méthodologie sur deux cas d'étude soumis à des contextes environnementaux contrastés : Ghazaouet en milieu marin et Maghnia en milieu urbain.

Une attention particulière est accordée à la comparaison entre ces deux cas d'étude afin d'analyser l'influence des conditions environnementales sur la cinétique de dégradation et le niveau de risque structurel.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art portant sur les caractéristiques du bâti ancien, les principales pathologies observées et les méthodes de diagnostic disponibles. Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse du risque et à la mise en œuvre de l'Analyse Préliminaire des Risques (APR). Le troisième chapitre expose les fondements théoriques des réseaux bayésiens et la démarche de modélisation probabiliste adoptée. Enfin, le quatrième chapitre présente l'application de cette approche aux deux cas d'étude et l'analyse comparative des résultats obtenus.

Ce travail vise ainsi à proposer une approche probabiliste permettant une meilleure compréhension des phénomènes de dégradation et une gestion plus efficace des risques dans le domaine de la réhabilitation des bâtiments anciens.

CHAPITRE I

BÂTIMENTS ANCIENS, PATHOLOGIES
ET DÉFAILLANCES STRUCTURELLES

I.1 Introduction

Le patrimoine bâti ancien constitue un héritage culturel, historique et technique d'une grande valeur (ISO 13822, 2010). Ces constructions, souvent réalisées selon des méthodes empiriques et avec des matériaux locaux, présentent aujourd'hui des enjeux majeurs en termes de sécurité, de durabilité et de réhabilitation.

Avec le vieillissement des structures et les modifications d'usage, ces bâtiments sont exposés à divers phénomènes de dégradation appelés pathologies, pouvant évoluer vers des défaillances structurelles (Hibbeler, 2017 ; ISO 31000, 2018). La compréhension de ces mécanismes est essentielle afin d'assurer une gestion efficace des risques et d'orienter les stratégies d'intervention.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales caractéristiques du bâti ancien, d'identifier les pathologies les plus fréquentes, d'analyser leur lien avec les défaillances structurelles et de présenter les principales méthodes de diagnostic applicables à ce type d'ouvrages.

I.2 Définition et typologie des bâtiments anciens

Les bâtiments anciens ne se définissent pas uniquement par leur ancienneté, mais également par leur mode de conception, leurs matériaux constitutifs et leur logique constructive. Ils correspondent généralement à des ouvrages réalisés avant la généralisation des normes modernes de calcul et de dimensionnement des structures.

I.3 Classification (âge, matériaux, systèmes constructifs)

I.3.1 Caractéristiques fondamentales

Contrairement aux structures contemporaines, les bâtiments anciens ont été conçus selon des règles empiriques fondées sur l'observation, le retour d'expérience et la transmission des savoir-faire constructifs. Ces règles reposaient principalement sur :

- l'observation du comportement des matériaux et des formes constructives ;
- la transmission d'un savoir-faire artisanal ;
- l'utilisation de la géométrie et de proportions éprouvées

I.3.2 Matériaux et système structurel

Les bâtiments anciens emploient principalement des matériaux locaux et naturels, tels que la pierre, la brique, le bois, la terre et la chaux. Leur stabilité repose généralement sur des principes de masse, d'équilibre et de continuité, notamment dans les systèmes à murs porteurs, arcs ou voûtes.

I.3.3 Valeur patrimoniale et urbaine

Au-delà de leur fonction structurelle, les bâtiments anciens constituent des témoins matériels des techniques constructives, de l'histoire des lieux et des cultures bâties. Ils participent à l'identité urbaine et paysagère des territoires. Leur réhabilitation ne relève donc pas uniquement d'une logique technique, mais également d'un enjeu patrimonial, environnemental et social.

Sur le plan environnemental, la réutilisation du bâti existant limite la démolition et la consommation de nouveaux matériaux. Sur le plan culturel et social, elle contribue à la préservation de la mémoire collective et au maintien de la qualité des cadres de vie. Sur le plan technique, elle nécessite des interventions compatibles avec les matériaux et les logiques constructives d'origine.

I.4 Caractéristiques des bâtiments anciens

Le comportement structurel de ces ouvrages est fondamentalement différent des structures en béton armé ou en acier.

I.4.1 Matériaux traditionnels et naturels

Ces constructions font appel à des matériaux issus de l'environnement immédiat. Les matériaux traditionnels incluent la pierre, le bois et la chaux. Leur hétérogénéité influence fortement le comportement structurel (Fookes et al., 2000). Ce qui leur confère une grande variabilité de propriétés :

I.4.1.1 La pierre

La pierre constitue l'un des matériaux les plus utilisés dans les constructions anciennes, notamment sous forme de moellons ou de blocs taillés. Elle se caractérise par :

- Une résistance élevée à la compression
- Une faible résistance à la traction
- Une sensibilité aux agents environnementaux (eau, gel, sels)

Toutefois, les propriétés mécaniques de la pierre varient fortement selon sa nature géologique (calcaire, grès, granit), ce qui introduit une incertitude importante dans l'évaluation de la résistance globale de la structure. La figure I.1 illustre un exemple de matériau en pierre utilisé dans les constructions anciennes.



Figure I.1. Exemple de matériau en pierre utilisé dans les constructions anciennes.

I.4.1.2 Le bois

Le bois est principalement utilisé dans les éléments horizontaux (planchers, charpentes) (figure I.2). Il présente :

- Une résistance élevée en traction et en flexion
- Un comportement anisotrope (dépend de la direction des fibres)
- Une sensibilité aux attaques biologiques (insectes, champignons)

Le comportement du bois dépend fortement des conditions d'humidité et de conservation, ce qui influence directement sa durabilité et sa capacité portante.



Figure I.2. Exemple d'utilisation du bois dans les structures anciennes.

I.4.1.3 La terre

Les constructions en terre (pisé, adobe) (figure I.3) sont fréquentes dans certaines régions. Elles présentent :

- Une bonne inertie thermique
- Une résistance mécanique relativement faible ;
- Une forte sensibilité à l'eau

Ces matériaux nécessitent une protection efficace contre l'humidité pour assurer leur pérennité.



Figure I.3. Exemple de construction traditionnelle en terre.

I.4.1.4 Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux (figure I.4) jouent un rôle essentiel dans la cohésion des maçonneries anciennes. Contrairement au ciment, ils présentent :

- Une souplesse mécanique
- Une perméabilité à la vapeur d'eau (respirabilité)
- Une capacité d'autocicatrisation partielle.

Cette compatibilité avec les matériaux anciens constitue un élément clé dans les interventions de réhabilitation.



Figure I.4. Mortier de chaux utilisé dans les constructions anciennes.

I.4.2 Spécificités structurelles

Les bâtiments anciens présentent plusieurs spécificités structurelles. D’abord, leurs propriétés mécaniques sont fortement hétérogènes, ce qui signifie que la résistance peut varier d’un point à l’autre de la structure. Ensuite, leur comportement est souvent non linéaire, en particulier sous l’effet de sollicitations importantes. Par ailleurs, leur stabilité dépend fortement de l’interaction sol-structure, notamment en raison du caractère souvent superficiel des fondations anciennes et de la sensibilité aux tassements différentiels. Enfin, la maçonnerie ancienne est principalement conçue pour travailler en compression, ce qui la rend particulièrement vulnérable aux efforts de traction.

I.5 Pathologies fréquentes des bâtiments anciens

I.5.1 Définition et classification des pathologies

Les pathologies structurelles correspondent à l’ensemble des désordres affectant un bâtiment et altérant ses performances mécaniques ou sa durabilité.

Ces pathologies peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Pathologies mécaniques
- Pathologies environnementales

- Pathologies physico-chimiques et biologiques

I.5.2 Pathologies mécaniques : la fissuration

La fissuration constitue l'indicateur le plus visible du comportement anormal d'une structure.

I.5.2.1 Fissures de tassement

Elles résultent de mouvements différentiels du sol. Elles traduisent généralement un mouvement différentiel des fondations ou du sol d'assise et constituent un indicateur important d'instabilité potentielle (figure I.5). Elles sont généralement :

- Verticales ou légèrement inclinées
- Localisées au niveau des zones de faiblesse



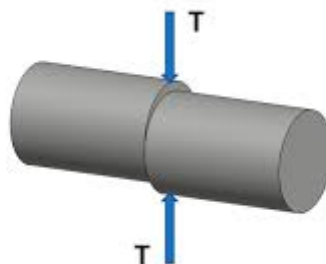
Figures I.5. Exemple de fissures de tassement.

(Source : <https://www.youtube.com/watch?v=cYHx9ysi9qo>)

I.5.2.2 Fissures de cisaillement

Elles apparaissent sous forme diagonale et traduisent (figure I.6):

- Une surcharge
- Une insuffisance de capacité portante



Figures 1.6. Exemple de fissures de cisaillement

I.5.2.3 Déformations globales

Elles incluent déformations indiquent une perte de stabilité progressive (figure I.7).

- Inclinaison des murs (faux-aplomb)
- Flèches excessives des planchers



Figures 1.7. Exemple de déformations globales

I.5.3 Pathologies liées à l'humidité

L'eau constitue l'un des principaux agents de dégradation des bâtiments anciens.

I.5.3.1 Remontées capillaires

L'eau présente dans le sol remonte dans les murs par capillarité (figure I.8), entraînant :

- La dissolution des sels
- La dégradation des mortiers
- L'effritement des matériaux



Figures I.8. Exemple de remontées capillaires

I.5.3.2 Infiltrations

Elles sont liées à :

- Des défauts de toiture
- Des problèmes d'étanchéité

Ces infiltrations favorisent la dégradation des enduits, le développement de moisissures et, à terme, l'altération des matériaux porteurs (figure I.9).

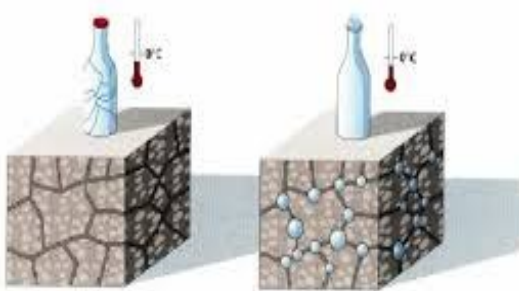


Figures I.9. Exemple d'infiltrations

I.5.3.3 Cycles gel-dégel

L'eau contenue dans les pores gèle (figure I.10), augmentant de volume et provoquant :

- Des microfissures
- L'éclatement des matériaux



Figures I.10. Exemple de Cycles gel-dégel

I.5.4. Pathologies biologiques et chimiques

I.5.4.1 Dégradations biologiques

Ces attaques affectent principalement les structures en bois (figure I.11).

- Champignons (mérule)
- Insectes xylophages



Figures I.11. Exemple de dégradations biologiques

I.5.4.2 Corrosion des éléments métalliques

La corrosion des éléments métalliques entraîne un gonflement des armatures, génère des contraintes internes dans le matériau environnant et peut provoquer des fissurations ou des éclatements (figure I.12).



Figures I.12. Exemple de corrosion des éléments métalliques

I.5.5. Interaction entre pathologies

Les pathologies ne sont généralement pas indépendantes. Au contraire, elles interagissent fréquemment entre elles : l'humidité favorise les attaques biologiques, les fissures facilitent les infiltrations, et la corrosion peut aggraver la fissuration. Cette interdépendance complexifie l'évaluation de l'état structurel et justifie le recours à des approches probabilistes capables de modéliser ces interactions.

I.6 Défaillance structurelle

La défaillance structurelle correspond à l'incapacité d'un élément ou d'un système porteur à remplir ses fonctions de sécurité, de résistance ou d'aptitude au service (ISO 13822, 2010 ; Melchers, 1999). Dans les bâtiments anciens, cette défaillance résulte généralement d'un processus progressif combinant dégradation des matériaux, sollicitations excessives et incertitudes sur l'état réel de l'ouvrage.

I.6.1 Lien entre pathologies et défaillances

- **Pathologies** : Les pathologies sont les manifestations visibles ou détectables des problèmes dans une structure, comme des fissures, la corrosion, les déformations, les infiltrations, etc. Elles indiquent un dysfonctionnement ou une altération des matériaux ou de la structure.
- **Défaillances** : Les défaillances sont les causes profondes ou les mécanismes qui entraînent la perte partielle ou totale de la capacité portante ou fonctionnelle de l'ouvrage, telles que la

fatigue des matériaux, la corrosion avancée, les tassements, les erreurs de conception, la surcharge, etc.

- **Lien entre les pathologies et les défaillances :** Il convient de distinguer la pathologie, qui correspond au symptôme observable (fissure, corrosion, déformation, humidité), de la défaillance, qui traduit une perte réelle de fonction ou de capacité portante de l'élément structurel. La pathologie constitue donc un indicateur visible d'un mécanisme de dégradation susceptible d'évoluer vers une défaillance si aucune intervention n'est engagée. L'identification et l'interprétation correctes des pathologies sont ainsi essentielles pour orienter le diagnostic et les mesures de réhabilitation.

Exemple concret :

Par exemple, l'éclatement du béton associé à la corrosion visible des armatures constitue une pathologie observable, tandis que la perte de section d'acier et la diminution de la capacité portante relèvent de la défaillance structurelle progressive.

I.6.2 Modes de défaillance structurelle

On distingue généralement trois modes de défaillance :

- le mode fragile, caractérisé par une rupture soudaine et peu annonciatrice ;
- le mode ductile, marqué par une déformation progressive avant rupture ;
- le mode mixte, qui associe des caractéristiques intermédiaires entre comportement fragile et ductile.

I.7 Méthodes de diagnostic

Le diagnostic des bâtiments anciens constitue une étape essentielle de toute démarche de réhabilitation. Il vise à identifier les désordres, à comprendre les mécanismes de dégradation et à évaluer le niveau de sécurité de la structure (ISO 13822, 2010).

Contrairement aux structures modernes, où les caractéristiques sont généralement connues, le diagnostic des bâtiments anciens repose sur des données partielles et souvent incertaines. Cette particularité impose une approche méthodologique rigoureuse intégrant différentes sources d'information.

I.7.1 L'inspection visuelle

C'est la première étape. Elle consiste à relever les désordres, à cartographier les fissures et à comprendre l'histoire du bâtiment (modifications passées, anciens travaux).

I.7.1.1 Relevé des désordres

Cette étape consiste à :

- Identifier les fissures (localisation, orientation, ouverture)
- Repérer les zones humides
- Détecter les déformations visibles

Une cartographie des désordres est généralement réalisée afin de structurer l'analyse.

I.7.1.2 Analyse historique du bâtiment

La compréhension de l'évolution du bâtiment est fondamentale. Elle inclut :

- Les transformations structurelles (ajouts, surélévations)
- Les changements d'usage
- Les interventions de réparation antérieures

I.7.1.3 Limites de l'inspection visuelle

Malgré son importance, cette méthode présente des limites :

- Subjectivité de l'expert
- Impossibilité de détecter les désordres internes
- Absence de quantification précise

I.7.2 Essais in situ (Contrôles non destructifs - CND)

Afin de compléter l'inspection visuelle, des techniques non destructives sont utilisées pour évaluer l'état interne des matériaux sans endommager la structure et pour ne pas fragiliser l'ouvrage patrimonial (Farrar & Worden, 2012).

I.7.2.1 Scléromètre :

Le scléromètre permet d'estimer la dureté superficielle d'un matériau à partir de la mesure du rebond d'une bille ou d'un poinçon calibré (Hibbeler, 2017).

I.7.2.2 Ultrasons

Le principe repose sur la propagation d'ondes dans le matériau et l'analyse de leur vitesse. Pour détecter des vides internes ou des zones de décohésion dans la maçonnerie (Farrar & Worden, 2012) (figure I.13).



Figures I.13. Ultrasons/Scléromètre

I.7.2.3 Radar de structure (GPR) :

Pour localiser des armatures ou des cavités derrière les murs (Farrar & Worden, 2012) (figure I.14).



Figures I.14. Exemple d'appareil de détection des armatures.

I.7.2.4 Thermographie infrarouge

Elle permet de détecter (figure I.15) :

- Les zones d'humidité
- Les défauts d'isolation
- Les décollements internes



Figures 1.15. Caméra Thermographique

I.7.3 Essais semi-destructifs et analyses en laboratoire

Dans certains cas, des prélèvements sont nécessaires pour obtenir des informations plus précises.

I.7.3.1 Carottages et prélèvements

Ils permettent :

- D'analyser la composition des matériaux
- D'évaluer leurs propriétés mécaniques

La figure I.16 illustre un échantillon de carottage.



Figures I.16. Echantillon de Carottage

I.7.3.2 Analyses physico-chimiques

Ces analyses (figure I.17) visent à :

- Identifier les sels présents
- Caractériser les mortiers
- Comprendre les mécanismes de dégradation



Figures 1.17. Analyses physico-chimiques

I.7.4 Modélisation numérique

La modélisation constitue un outil essentiel pour simuler le comportement structurel (Melchers, 1999 ; Hibbeler, 2017).

I.7.4.1 Modèles déterministes

Ils reposent sur :

- Des hypothèses simplificatrices
- Des paramètres supposés constants

I.7.4.2 Modèles avancés

Ils intègrent :

- Le comportement non linéaire
- La fissuration
- L'interaction sol-structure

I.7.5 Synthèse du diagnostic

Le diagnostic final résulte de la combinaison de plusieurs sources d'information, notamment les observations visuelles, les résultats expérimentaux et les simulations numériques.

I.8 Limites des méthodes classiques et incertitude

I.8.1 Nature de l'incertitude

L'incertitude constitue un élément central dans l'analyse des bâtiments anciens (Baecher & Christian, 2005 ; Melchers, 1999).

Elle peut être classée en plusieurs catégories :

- Incertitude liée aux matériaux
- Incertitude géométrique
- Incertitude sur les chargements

À ces incertitudes s'ajoutent souvent des lacunes documentaires concernant l'historique du bâtiment et les interventions antérieures.

I.8.2 Limites des approches déterministes

Les méthodes classiques reposent sur des modèles déterministes, supposant que les paramètres sont connus avec certitude. Or, dans le cas des bâtiments anciens :

- Les données sont incomplètes
- Les paramètres sont incertains
- Les interactions sont complexes

Comme le souligne Cauvin (2007), cette approche est insuffisante pour évaluer correctement le risque.

I.8.3 Subjectivité du diagnostic

Le diagnostic repose en grande partie sur l'expertise **humaine** (Cauvin, 2007 ; ISO 31000, 2018). Cela introduit :

- Une variabilité dans l'interprétation
- Un risque d'erreur
- Une dépendance à l'expérience de l'ingénieur

Par conséquent, l'évaluation du risque dans les bâtiments anciens ne peut pas reposer uniquement sur des approches déterministes. Elle nécessite des outils capables d'intégrer l'incertitude, la variabilité des matériaux et les interactions entre pathologies.

I.8.4 Complexité et interaction

Les pathologies sont souvent interdépendantes, ce qui rend leur analyse difficile :

- Humidité ↔ dégradation des matériaux
- Fissuration ↔ infiltration d'eau
- Sol ↔ structure

Cette complexité nécessite une approche systémique (ISO 31000, 2018 ; Lakermi, 2021).

I.8.5 Conséquence sur l'évaluation du risque

L'ensemble de ces incertitudes rend difficile (Melchers, 1999 ; ISO 31000, 2018) :

- La prévision du comportement futur
- L'évaluation de la sécurité
- La prise de décision

I.9 Conclusion

L'étude des bâtiments anciens met en évidence la diversité des matériaux, la complexité des mécanismes de dégradation et la forte interdépendance des pathologies observées. Les méthodes classiques de diagnostic, bien qu'indispensables, présentent certaines limites dès lors qu'il s'agit d'évaluer le risque de manière globale et de prendre en compte les incertitudes. Cette situation justifie le recours à une approche fondée sur l'analyse des risques, qui sera développée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

ANALYSE ET MODÉLISATION
DU RISQUE DE DÉFAILLANCE

II.1 Introduction

Le premier volet de notre étude a permis d'établir un état des lieux détaillé des pathologies structurelles les plus récurrentes au sein du bâti ancien. L'identification des pathologies constitue une étape indispensable pour comprendre la dégradation physique des ouvrages. Toutefois, cette étape demeure insuffisante pour orienter à elle seule une stratégie de réhabilitation. Il est donc nécessaire de hiérarchiser les désordres en fonction de leur criticité et d'analyser les mécanismes causaux susceptibles de conduire à une défaillance structurelle. (ISO 31000, 2018 ; Villemeur, 1988).

Dans cette optique, ce deuxième chapitre adopte une démarche essentiellement préparatoire et méthodologique. L'objectif est ici de structurer la "matière première" technique à savoir les dangers identifiés, les scénarios de défaillance possibles et les variables de terrain afin de disposer d'un cadre d'analyse cohérent pour la suite de nos travaux. L'objectif de ce chapitre est de structurer les informations issues du diagnostic afin de construire un cadre d'analyse cohérent, exploitable dans la modélisation probabiliste. (Foncsi, 2011).

Pour y parvenir, nous avons retenu l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) comme outil central d'identification. Ce choix se justifie par la simplicité de mise en œuvre de cette méthode et par sa capacité à structurer les informations sous une forme directement exploitable par un réseau bayésien. Nous présenterons également d'autres méthodes connues, afin de situer l'APR dans le paysage plus large des outils d'analyse des risques.

II.2 Le risque structurel dans le bâti ancien : définition et spécificités

II.2.1 Définition du risque

La notion de risque varie selon les domaines d'application. En génie civil et en sécurité des structures, elle est généralement définie comme la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable et de la gravité de ses conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement (Villemeur, 1988 ; ISO 31000, 2018).

Cette définition mérite toutefois d'être précisée dans le contexte du bâti ancien. En effet, le risque ne s'y manifeste que rarement de manière soudaine et isolée ; il résulte le plus souvent d'un processus de dégradation progressif et multifactoriel. Une fissure peut d'abord

apparaître, puis s'aggraver, favoriser les infiltrations d'humidité et, à terme, conduire à une corrosion des armatures avant l'apparition d'une défaillance structurelle (Verdel, 2007). Cette logique évolutive et causale justifie le recours aux réseaux bayésiens comme outil de modélisation.

La norme ISO 31000 (2018) définit le risque comme « l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs ». Bien que cette définition englobe à la fois les menaces et les opportunités, le présent travail se limite à sa dimension négative, c'est-à-dire aux scénarios susceptibles de compromettre la sécurité structurelle de l'ouvrage et celle de ses occupants.

II.2.2 De la pathologie à la défaillance : une chaîne causale

Dans la pratique de l'expertise du bâtiment, il est important de ne pas confondre trois niveaux de réalité distincts, souvent amalgamés dans le langage courant :

- La pathologie désigne le symptôme visible : une fissure, une tache d'humidité, une déformation. Elle signale qu'un processus de dégradation est en cours, mais n'implique pas encore une perte de fonction de l'élément concerné.
- La défaillance survient lorsqu'un élément structurel ne remplit plus sa fonction : un poteau qui ne reprend plus correctement les charges, une poutre qui fléchit au-delà des seuils admissibles. C'est un état fonctionnel, et non plus seulement symptomatique.
- Le risque, enfin, est la projection de cette défaillance dans le temps et l'espace : quelles en sont les chances d'occurrence ? Quelles en seraient les conséquences sur l'intégrité de la structure et la sécurité des personnes ?

Cette distinction est fondamentale pour la construction du réseau bayésien : les pathologies alimenteront les nœuds intermédiaires du graphe (les états observables), tandis que les défaillances constitueront les nœuds cibles sur lesquels portera l'inférence probabiliste (Pearl, 1988).

II.2.3 Particularités du risque dans le patrimoine bâti ancien

L'évaluation du risque dans les bâtiments anciens se distingue sur plusieurs points de ce que l'on fait habituellement dans le neuf. Il y a d'abord la question des matériaux : la maçonnerie traditionnelle, le bois, les mortiers à base de chaux présentent des comportements très

différents des matériaux normalisés d'aujourd'hui, avec une forte hétérogénéité et des résistances très variables d'un point à l'autre d'un même mur (Balayssac & Garnier, 2021).

Il y a ensuite le problème des interventions passées : des générations de propriétaires et d'artisans ont parfois ouvert des murs porteurs, ajouté des planchers, transformé des greniers en pièces de vie sans toujours respecter les règles de l'art ni laisser de trace. Ces modifications changent profondément la descente des charges et créent des zones de faiblesse invisibles à l'œil nu (Farsi & Belazougui, 2002).

Il faut mentionner enfin l'absence quasi systématique d'archives techniques fiables pour les bâtiments anciens. On ne dispose souvent ni de plans d'exécution, ni de résultats d'essais, ni de données sur la nature exacte du sol. Cette incertitude informationnelle est précisément l'une des raisons qui justifient le recours à une approche probabiliste plutôt qu'à un calcul déterministe classique (Foncsi, 2011).

II.3 Les méthodes d'identification des risques : panorama et choix méthodologique

Avant de construire un réseau bayésien, il faut d'abord savoir quoi modéliser. C'est le rôle des méthodes d'identification des risques. Leur objectif est de recenser, de manière aussi exhaustive que possible, les sources de danger, les mécanismes de défaillance et leurs conséquences potentielles. Il existe plusieurs approches éprouvées dans le domaine industriel et du génie civil ; nous en présentons trois avant de justifier notre choix

II.3.1 L'AMDEC : une méthode rigoureuse mais exigeante en données

L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie. L'AMDEC consiste à identifier, pour chaque composant d'un système, les modes de défaillance possibles, leurs causes, leurs conséquences et leur niveau de criticité (Villemeur, 1988 ; CEI 300-3-9, 1995).

L'AMDEC présente de solides avantages dans un contexte industriel où les composants sont standardisés et les historiques de défaillances bien documentés. Dans le cas du bâti ancien, son application reste limitée en raison de l'hétérogénéité des matériaux et de l'absence de données fiables permettant de quantifier précisément les modes de défaillance. Son utilisation

sera donc limitée dans ce travail à une aide à la structuration initiale de la réflexion (Perilhon, 2012).

II.3.2 L'Arbre de défaillance : puissant mais binaire

L'Arbre de Défaillance (ADD), ou Fault Tree Analysis (FTA) en anglais, adopte une logique inverse à celle de l'AMDEC : on part d'un événement indésirable global par exemple l'effondrement d'un plancher et on remonte vers ses causes profondes par décomposition logique, à l'aide de portes booléennes « ET » et « OU » (Vesely et al., 1981 ; IEC 61025, 2006).

Cette approche est très utile pour visualiser les enchaînements causaux et communiquer avec les maîtres d'ouvrage. Mais elle souffre d'une limitation importante : la logique binaire (défaillance ou non-défaillance) ne permet pas de rendre compte des états dégradés intermédiaires qui caractérisent le vieillissement progressif des structures. Par ailleurs, comme l'AMDEC, elle suppose des données statistiques fiables pour être quantifiée, ce qui est rarement le cas dans le bâti ancien (Modarres, 2006 ; Zwingelstein, 1996).

II.3.3 L'Analyse préliminaire des risques (APR) : la méthode retenue

II.3.3.1 Principe général

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode qualitative ou semi-quantitative mise en œuvre lorsque les informations disponibles sont encore limitées. Elle consiste à identifier les événements redoutés, leurs causes, leurs conséquences et leur niveau de criticité. Elle consiste à parcourir systématiquement les éléments d'un ouvrage, à identifier pour chacun les événements redoutés, leurs causes, leurs conséquences, et à leur attribuer un niveau de criticité sur la base d'une grille croisant probabilité et gravité (ISO 31000, 2018 ; Aven, 2016).

Le résultat se présente sous la forme d'un tableau structuré, où chaque ligne correspond à un événement redouté. Ce format est particulièrement précieux pour notre travail car il permet de passer directement à la construction du réseau bayésien : chaque cause devient un nœud parent, chaque événement redouté un nœud enfant, et les niveaux de criticité fournissent une base pour initialiser les probabilités conditionnelles a priori (Pearl, 1988).

II.3.3.2 Pourquoi l'APR est-elle la méthode la plus adaptée à ce travail ?

Trois raisons principales ont guidé ce choix :

- Sa rapidité de mise en œuvre : contrairement à l'AMDEC ou à l'arbre de défaillance, l'APR peut être menée à partir d'un simple retour d'expérience et d'un examen visuel de l'ouvrage, sans nécessiter de base de données statistiques exhaustive. C'est un avantage décisif dans le contexte algérien où les archives sur le bâti ancien sont souvent inexistantes (Farsi & Belazougui, 2002).
- Sa compatibilité structurelle avec le réseau bayésien : le tableau APR est organisé selon la même logique causale que le graphe bayésien. Les causes s'y trouvent naturellement positionnées en amont des événements redoutés, exactement comme les nœuds parents précèdent les nœuds enfants dans un réseau orienté (Pearl, 1988 ; Jensen & Nielsen, 2007).
- Son exhaustivité : en parcourant méthodiquement tous les éléments de la structure, l'APR limite les risques d'oubli. C'est important, car un nœud manquant dans le réseau bayésien peut fausser l'ensemble de l'inférence (Balayssac & Garnier, 2021).

Il convient cependant d'insister sur un point essentiel : l'APR est ici un outil d'identification, pas de modélisation. Elle permet de recenser les risques et de définir les nœuds du réseau. La quantification des probabilités conditionnelles et l'inférence bayésienne proprement dite relèvent exclusivement du chapitre 3.

II.3.3.3 Application de l'APR au bâti ancien réhabilité

Le tableau II.1 présente les résultats de l'APR appliquée aux principaux désordres identifiés au chapitre 1. Pour chaque événement redouté, on indique la cause principale, la conséquence structurelle, le niveau de criticité selon la grille APR (Négligeable / Majeur / Critique), ainsi que la mesure préventive ou corrective envisagée.

Tableau II.1. APR appliquée aux désordres structuraux du bâti ancien

(d'après Farsi & Belazougui (2002), ISO 31000 (2018), Balayssac & Garnier (2021))

Événement redouté	Cause / Source de danger	Conséquence structurelle	Criticité APR	Mesure préventive
Corrosion des armatures	Carbonatation du béton ou pénétration de chlorures	Perte de section résistante, risque de délaminage	Critique (C)	Injection époxy, protection cathodique
Fissuration des murs porteurs	Tassement différentiel, surcharge non prévue	Réduction de la capacité portante globale	Majeur (M)	Reprise en sous-œuvre, tirants d'ancrage
Humidité ascensionnelle	Sol saturé, absence de coupure capillaire	Dégradation des liants, développement fongique	Majeur (M)	Drainage périphérique, injection hydrophobe
Épaufrure du béton	Cycles gel-dégel, corrosion interne des aciers	Fragilisation locale, exposition des armatures	Critique (C)	Ragréage au mortier de réparation structurel
Décollement d'enduit	Incompatibilité chimique enduit/support ancien	Perte de la fonction protectrice de la paroi	Négligeable (N)	Réfection avec mortier à base de chaux
Flèche excessive des planchers	Fluage différé, surcharge imprévue	Déformation fonctionnelle, gêne des occupants	Majeur (M)	Renforcement par composite CFRP ou GFRP
Tassement différentiel des fondations	Sol argileux à fort retrait-gonflement	Désolidarisation des éléments porteurs	Critique (C)	Micropieux, injection de résine expansive
Pourrissement du bois de structure	Humidité persistante > 20%, champignons lignivores	Perte de rigidité à la flexion, rupture fragile	Majeur (M)	Traitement fongicide curatif ou remplacement

L'analyse du tableau II.1 montre que les désordres les plus critiques sont la corrosion des armatures, l'épaufrure du béton et le tassement différentiel des fondations. Ces phénomènes présentent un niveau de criticité élevé en raison de leur évolution progressive, souvent difficilement détectable à un stade précoce, et de leurs conséquences potentielles sur la stabilité structurelle. Ils constituent donc des variables prioritaires dans la construction du modèle bayésien.

II.3.4 Comparaison synthétique des quatre approches

Pour situer l'APR par rapport aux autres méthodes et justifier le rôle complémentaire des réseaux bayésiens dans la modélisation, le tableau II.2 propose une comparaison selon six critères opérationnels.

Tableau II.2. Comparaison des principales méthodes d'analyse des risques (d'après Villemeur (1988), Pearl (1988), Aven (2016), Melchers & Beck (2018))

Critère	AMDEC	Arbre de défaillance (FTA)	Analyse qualitative	Réseaux bayésiens
Logique de travail	Inductive du composant vers le système	Déductive de l'événement sommet vers les causes	Expérientielle jugement de l'expert	Inférentielle propagation probabiliste
Gestion de l'incertitude	Faible, données supposées certaines	Moyenne, probabilités d'occurrence estimées	Limitée par la subjectivité de l'expert	Élevée, intègre données partielles et avis d'expert
Interdépendances entre causes	Absente, analyse composant par composant	Partielle via logique booléenne binaire	Observée mais non formalisée	Complète grâce aux arcs de dépendance conditionnelle
Mise à jour du modèle	Statique, figé après construction	Statique, arbre non réévalué	Ponctuelle à chaque nouvelle inspection	Dynamique par actualisation selon Bayes
Résultat fourni	Indice IPR (Gravité × Fréquence × Détectabilité)	Probabilité de l'événement sommet	Matrice de criticité qualitative	Distribution de probabilités a posteriori
Adaptabilité au bâti ancien	Partielle suppose des données normalisées	Difficile manque de données statistiques	Oui repose sur l'inspection visuelle	Oui combine données de terrain et expertise

Cette comparaison met en évidence la complémentarité entre l'APR et les réseaux bayésiens : la première permet d'identifier et de structurer les risques, tandis que les seconds permettent de les représenter et de les quantifier dans un cadre probabiliste.

II.4 Définition des scénarios de risque propres à l'ouvrage étudié

Cette section constitue peut-être la contribution la plus opérationnelle de ce chapitre. Il ne s'agit pas ici de définir abstraitement ce qu'est un scénario de risque, mais de construire concrètement les scénarios qui serviront d'entrées au modèle bayésien. Un scénario, au sens où nous l'entendons, est la description d'un enchaînement causal reliant des facteurs déclencheurs identifiables à une défaillance structurelle redoutée, en passant par des états pathologiques intermédiaires observables sur le terrain (ISO 31000, 2018).

II.4.1 Critères de sélection et de construction des scénarios

Pour être exploitable par le réseau bayésien, un scénario doit répondre à plusieurs exigences:

- Il doit porter sur un élément structurel clairement identifié (mur, plancher, fondation, poteau, chaînage).
- Les facteurs déclencheurs doivent être des variables mesurables ou estimables, qui pourront être représentées par des nœuds dans le graphe bayésien.
- Les pathologies intermédiaires doivent être observables lors d'un diagnostic de terrain, car ce sont elles qui permettront la mise à jour des probabilités par inférence.
- La défaillance redoutée doit être suffisamment grave pour justifier une action préventive ou corrective.

Sur la base de ces critères et des résultats de l'APR (Tableau II.1), nous avons retenu cinq scénarios représentatifs des situations les plus courantes et les plus dangereuses dans le bâti ancien algérien (Farsi & Belazougui, 2002 ; Balayssac & Garnier, 2021).

II.4.2 Présentation des cinq scénarios retenus

À partir des résultats de l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) et des critères de sélection définis précédemment, cinq scénarios de risque ont été retenus pour la modélisation bayésienne. Ces scénarios associent, pour chaque cas, un élément structurel, des facteurs

déclencheurs, une pathologie observable et une défaillance redoutée. Le tableau II.3 en présente une synthèse structurée.

Tableau II.3. Scénarios de risque retenus pour la modélisation bayésienne (d'après l'APR (Tableau II.1), Villemeur (1988), Balayssac & Garnier (2021))

N°	Élément structurel	Facteurs déclencheurs	Pathologie observable	Défaillance redoutée	Niveau de risque
S1	Murs porteurs en maçonnerie (RDC)	Tassement différentiel couplé à une humidité ascensionnelle chronique	Fissuration diagonale > 3 mm sur plusieurs assises	Perte partielle de portance risque d'instabilité latérale	Élevé
S2	Planchers bois (étage courant)	Humidité prolongée (> 20 %) associée à un défaut d'entretien	Flèche > L/250 avec début de pourrissement des solives	Effondrement local sous charge d'exploitation normale	Critique
S3	Poteaux en béton armé (noyau central)	Carbonatation avancée aggravée par pénétration de chlorures	Épaufrures avec mise à nu des armatures corrodées	Rupture fragile par réduction progressive de la section	Critique
S4	Fondations superficielles (semelles filantes)	Variations hydriques saisonnières sur sol argileux gonflant	Tassement différentiel cumulé supérieur à 20 mm	Désolidarisation des éléments porteurs, instabilité d'ensemble	Élevé
S5	Châinages horizontaux en béton armé	Surcharge accidentelle conjuguée au vieillissement du béton	Fissures transversales et décollement du chaînage	Perte du comportement monolithique de la structure	Modéré

Ces scénarios constituent la base de la modélisation probabiliste développée dans le chapitre suivant. Ils seront ensuite mobilisés dans l'étude des deux cas retenus afin d'analyser l'influence des environnements marin et urbain sur la dynamique de dégradation ainsi que sur le niveau de risque structurel.

II.4.3 Interdépendances entre scénarios

Les scénarios retenus ne sont pas indépendants les uns des autres. En effet, certains mécanismes de dégradation peuvent interagir et amplifier mutuellement leurs effets. Par exemple, un tassement différentiel des fondations (S4) peut accentuer la fissuration des murs porteurs (S1), tandis qu'une corrosion avancée des poteaux en béton armé (S3) peut réduire leur capacité à redistribuer les charges et aggraver l'instabilité de l'ensemble de la structure. Ces interactions en cascade justifient le recours au réseau bayésien, capable de représenter les dépendances conditionnelles entre les différentes variables du système.

En s'inspirant du modèle proposé par Villemeur (1988), trois phases peuvent être distinguées dans l'évolution de chaque scénario de risque :

- Phase d'amorçage : les facteurs environnementaux ou structurels agissent progressivement et de manière souvent peu visible, comme la pénétration de l'humidité, la carbonatation lente ou les mouvements différentiels du sol ;
- Phase de propagation : les pathologies deviennent observables et les interactions entre variables s'intensifient, ce qui constitue une étape essentielle pour l'inspection et l'alimentation du réseau bayésien ;
- Phase critique : le cumul des dégradations dépasse la capacité résiduelle de la structure, rendant la défaillance globale de plus en plus probable.

II.5 Identification et caractérisation des variables du réseau bayésien

L'APR et les scénarios définis dans les sections précédentes nous permettent maintenant d'identifier avec précision les variables qui composeront le réseau bayésien. C'est une étape décisive : un réseau mal construit, avec des variables mal choisies ou des états mal définis, produira des résultats peu fiables, quelle que soit la sophistication des algorithmes d'inférence utilisés.

II.5.1 Trois types de nœuds

En suivant la classification proposée par Pearl (1988) et adaptée au génie civil par Melchers & Beck (2018), nous distinguons trois catégories de variables dans notre réseau :

- Les nœuds racines (ou nœuds parents sans parent) représentent les facteurs causaux primaires : données environnementales, mécaniques ou chimiques qui initient les processus de dégradation. Leurs probabilités a priori sont estimées à partir de données de terrain, de mesures in situ ou de la littérature spécialisée.
- Les nœuds intermédiaires représentent les pathologies observables qui relient les causes aux conséquences. Leurs probabilités conditionnelles — c'est-à-dire leur probabilité d'être dans un état donné sachant l'état de leurs nœuds parents — sont estimées grâce à l'APR et au jugement d'expert.
- Le nœud cible, enfin, correspond à la défaillance structurelle globale ou locale que l'on cherche à prédire. C'est sur lui que porte l'inférence bayésienne : en observant les états des nœuds intermédiaires lors d'un diagnostic, on peut mettre à jour la probabilité de défaillance du nœud cible (Pearl, 1988 ; Jensen & Nielsen, 2007).

II.5.2 Tableau récapitulatif des nœuds

Le tableau II.4 récapitule l'ensemble des variables retenues pour la construction du réseau bayésien. Pour chaque nœud, sont précisés sa catégorie fonctionnelle, ses états possibles, la source d'acquisition des données associées ainsi que ses principales connexions avec les autres variables du modèle. Ce tableau constitue ainsi une base structurée essentielle pour l'élaboration du graphe causal présenté dans le chapitre suivant.

Tableau II.4. Variables (nœuds) du réseau bayésien et leurs caractéristiques (d'après Pearl (1988), Jensen & Nielsen (2007), Melchers & Beck (2018), Balayssac & Garnier (2021))

Variable / Nœud	Type de nœud	États possibles	Source d'acquisition	Connexions sortantes
Taux d'humidité	Nœud racine facteur environnemental	Faible (< 12%) / Modérée (12–20%) / Élevée (> 20%)	Sonde hygrométrique, bombe à carbure, mesure gravimétrique	Corrosion armatures, Pourrissement bois
Degré de carbonatation	Nœud racine facteur chimique	Binaire : Non carbonaté / Carbonaté (pH < 9)	Test phénolphthaléine sur carotte de béton	Corrosion des armatures en acier
État de corrosion des armatures	Nœud intermédiaire pathologie interne	Nulle / Incipiente(débutant) / Active / Avancée	Inspection visuelle, potentiel électrochimique de demi-pile	Réduction de section, Épaufrure béton
Amplitude de tassement du sol	Nœud racine facteur mécanique	< 5 mm / 5 à 20 mm / > 20 mm	Nivellement topographique, capteurs de déplacement	Fissuration murs, Instabilité fondations
Degré de fissuration des murs	Nœud intermédiaire pathologie observable	Aucune / Fine < 1 mm / Modérée 1–5 mm / Large > 5 mm	Fissuromètre, relevé cartographique des désordres	Capacité portante résiduelle, Instabilité
Capacité portante résiduelle	Nœud intermédiaire variable structurelle	> 80% / 50–80% / < 50% de la capacité nominale	Calcul par éléments finis ou diagnostic d'expert agréé	Défaillance structurelle locale ou globale
Défaillance structurelle globale	Nœud cible variable de sortie	Binaire : Non défaillante / Défaillante	Variable calculée sortie de l'inférence bayésienne	Nœud terminal du graphe

Le choix de la discrétisation des variables continues mérite également d'être précisé. Dans les applications des réseaux bayésiens au génie civil, il est généralement recommandé de limiter le nombre d'états à trois ou quatre par variable afin de conserver des tables de probabilités conditionnelles de taille raisonnable et facilement interprétables. Cette logique a été retenue

dans le présent travail pour des variables telles que le taux d'humidité et l'amplitude du tassement (Jensen & Nielsen, 2007).

II.6 Conclusion

Ce deuxième chapitre avait une mission bien définie : préparer tout ce dont le réseau bayésien aura besoin pour fonctionner. En partant d'une réflexion sur la notion de risque structurel dans le bâti ancien, nous avons progressivement construit les trois types de données d'entrée indispensables à la modélisation probabiliste.

L'APR nous a permis, en premier lieu, d'identifier et de hiérarchiser les risques de manière structurée (Tableau II.1). Cette méthode, simple à mettre en œuvre et adaptée aux contextes où les données historiques font défaut, a fourni une première liste de variables candidates pour le réseau. Elle a également mis en évidence les désordres les plus critiques corrosion, épaufrure, tassement qui méritent une attention prioritaire dans la modélisation.

La construction de cinq scénarios de risque (Tableau II.3) a ensuite permis de donner une forme narrative et opérationnelle à ces résultats. Chaque scénario décrit un enchaînement causal complet, depuis les facteurs déclencheurs jusqu'à la défaillance redoutée, en passant par les pathologies observables. Ces scénarios définissent la topologie c'est-à-dire la structure des arcs du futur réseau bayésien.

Enfin, le tableau des variables (Tableau II.4) fournit la liste complète et caractérisée des nœuds du réseau : leurs états possibles, leurs sources de données et leurs connexions. C'est à partir de ce tableau que le chapitre 3 construira le graphe bayésien, estimera les tables de probabilités conditionnelles et procédera à l'inférence permettant d'évaluer le risque de défaillance structurelle globale.

CHAPITRE III

MODÉLISATION PAR LES RÉSEAUX BAYÉSIENS

III.1 Introduction

Dans le cas des bâtiments anciens, l'évaluation du risque de défaillance structurelle est rendue complexe par l'hétérogénéité des matériaux, le manque de données fiables et les interactions entre plusieurs mécanismes de dégradation. Les approches déterministes classiques montrent ainsi leurs limites lorsqu'il s'agit d'intégrer explicitement l'incertitude. Les réseaux bayésiens constituent une approche probabiliste particulièrement adaptée à ce contexte. Ils permettent de représenter les relations causales entre variables, d'intégrer à la fois les données de terrain et l'expertise, et de mettre à jour les probabilités à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles. L'objectif de ce chapitre est de présenter les fondements théoriques des réseaux bayésiens et de développer le modèle retenu pour l'analyse du risque de défaillance structurelle des bâtiments anciens.

III.2 Réseaux bayésiens

III.2.1 Définition

Les réseaux bayésiens sont des modèles probabilistes représentés sous forme de graphes orientés acycliques (DAG), dans lesquels les nœuds représentent des variables et les arcs traduisent des relations de dépendance causale entre ces variables. Chaque nœud est associé à une table de probabilités conditionnelles (CPT), qui permet de quantifier l'influence des variables parentes sur la variable considérée.

Dans le domaine du génie civil, les réseaux bayésiens sont particulièrement adaptés aux situations marquées par l'incertitude, la rareté des données disponibles et la complexité des interactions entre les différents facteurs de dégradation.

III.2.2 Théorie des réseaux bayésiens

III.2.2.1 Concepts fondamentaux

Un réseau bayésien repose sur deux composantes complémentaires : une composante qualitative, représentée par le graphe causal, et une composante quantitative, représentée par les probabilités associées à chaque nœud. Le graphe permet de formaliser les relations de dépendance entre variables, tandis que les tables de probabilités conditionnelles permettent d'effectuer les calculs d'inférence. La figure III.1 illustre la structure générale d'un réseau

bayésien simple, composée de nœuds représentant les variables et de liens traduisant les relations de causalité entre elles.

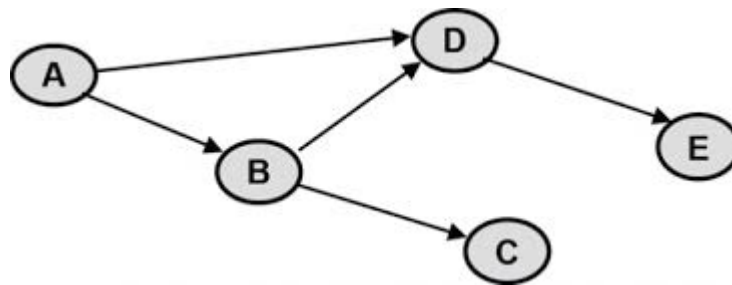


Figure III.1. Image d'une structure de réseau bayésien simple montrant des nœuds et des liens de causalité

III.2.2.2 Probabilités conditionnelles

Le fonctionnement d'un réseau bayésien repose sur le calcul des probabilités conditionnelles. Pour chaque nœud, la probabilité d'occurrence d'un état dépend des états des nœuds parents qui lui sont reliés. Cette logique permet de modéliser les relations de cause à effet tout en intégrant l'incertitude. Un principe fondamental du modèle est l'indépendance conditionnelle : une variable devient indépendante des autres variables non descendantes dès lors que l'état de ses parents est connu.

III.2.3 Définition des variables du modèle

III.2.3.1 Variables d'entrée (pathologies, environnement, structure)

La définition des variables du modèle constitue une étape essentielle dans la construction du réseau bayésien. Dans le cas du bâti ancien, trois grandes familles de variables d'entrée sont retenues :

- les pathologies, correspondant aux désordres observables tels que les fissures, la corrosion ou l'humidité ;
- les facteurs environnementaux, représentant les sollicitations extérieures susceptibles d'accélérer la dégradation ;
- les caractéristiques structurelles, traduisant les propriétés intrinsèques de l'ouvrage, telles que la nature des matériaux ou le système porteur.

Ces variables ne sont pas indépendantes ; elles interagissent au sein d'un même processus de dégradation, ce qui justifie leur représentation dans un cadre probabiliste.

III.2.3.2 Variables intermédiaires et de sortie (défaillance)

Outre les variables d'entrée, le modèle comporte des variables intermédiaires et une variable de sortie. Les variables intermédiaires représentent les mécanismes de dégradation ou les états structurels dégradés résultant des interactions entre les causes initiales et les pathologies observables. La variable de sortie correspond au niveau de défaillance structurelle que le réseau cherche à évaluer. Chaque variable est associée à un nombre limité d'états discrets, définis de manière mutuellement exclusive et exhaustive, afin de permettre une modélisation cohérente à l'aide de tables de probabilités conditionnelles. Afin d'assurer une représentation cohérente des variables dans le réseau bayésien, certaines grandeurs continues ont été transformées en échelles qualitatives discrètes. Les tableaux suivants présentent les niveaux retenus pour caractériser la gravité des fissures, l'agressivité environnementale et la vulnérabilité structurelle.

Le tableau III.1 présente l'échelle retenue pour caractériser la gravité des fissures, en fonction de leur ouverture et de leurs effets potentiels sur le comportement de l'élément concerné.

Tableau III.1. Échelle de gravité des Fissures

Note	État	Observations
1	Négligeable	Microfissures superficielles (<0.2mm) Aspect esthétique uniquement
2	Mineur	Fissures fines (0.2 à 1mm). Pas d'infiltration d'eau constatée
3	Modéré	Fissure traversantes (1 à 3 mm). Risque d'infiltration ou de corrosion locale
4	Majeur	Fissures larges (>3mm) avec signes de mouvement actif ou dégradation du matériau
5	Critique	Crevasse majeure menaçant la stabilité de l'élément ou de l'ouvrage

Le tableau III.2 présente l'échelle de caractérisation de l'agressivité environnementale, en tenant compte des conditions d'exposition susceptibles d'accélérer les mécanismes de dégradation.

Tableau III.2. Échelle de caractérisation de l'agressivité environnementale

Note	État	Observations
1	Très Faible	Milieu protégé, climat tempéré, aucune source de vibration ou pollution.
2	Faible	Exposition standard aux pluies, zone urbaine à faible trafic.
3	Modéré	Zone venteuse, humidité relative élevée, trafic urbain régulier.
4	Élevé	Proximité immédiate de mer (sel), zone industrielle polluée ou fort trafic lourd.
5	Sévère	Exposition directe à des chocs, inondations fréquentes ou sols très instables.

Le tableau III.3 présente les indicateurs d'état utilisés pour évaluer la vulnérabilité matérielle et structurelle de l'ouvrage.

Tableau III.3. Indicateurs d'état pour l'évaluation de la vulnérabilité matérielle

Note	État	Observations
1	Excellent	Matériaux nobles (pierre de taille), mise en œuvre soignée, aucun signe de fatigue.
2	Bon	Matériaux standards bien conservés, entretien régulier visible.
3	Passable	Matériaux hétérogènes, mortiers légèrement effrités, entretien ancien.
4	Médiocre	Matériaux dégradés (bois pourri, briques éclatées), système constructif obsolète.
5	Défaillant	Perte de section des porteurs, matériaux en fin de vie, instabilité structurelle.

Ces échelles de discrétisation permettent d'uniformiser l'évaluation des états du système et de limiter la complexité des tables de probabilités conditionnelles. Elles constituent ainsi une étape méthodologique importante dans la construction et l'exploitation du modèle bayésien.

III.2.3 Construction du réseau

III.2.3.1 Composants des réseaux bayésiens

Dans le cadre de ce travail, le réseau bayésien est représenté sous une forme graphique permettant de visualiser les nœuds du modèle ainsi que les relations causales qui les relient. Cette représentation facilite la lecture du graphe et améliore l'interprétation des interactions entre variables. La figure III.2 présente la structure générale retenue pour illustrer les principaux composants d'un réseau bayésien.

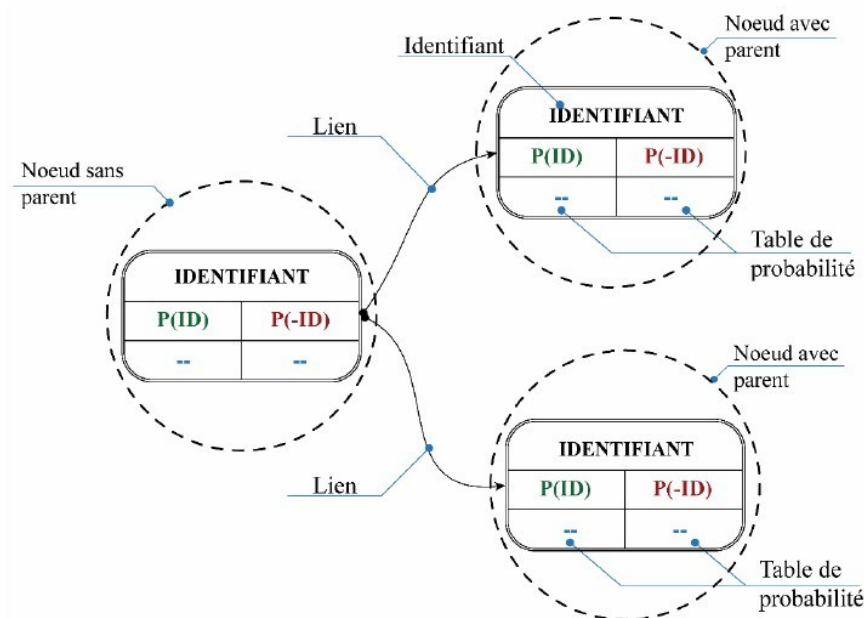


Figure III.2. Composants d'un réseau bayésien

Cette représentation permet également de mettre en évidence les trajectoires causales les plus significatives au sein du modèle. Elle constitue ainsi un support utile pour l'identification des scénarios les plus critiques et pour la hiérarchisation des actions de prévention ou de réhabilitation. Dans le présent mémoire, ce format graphique est retenu comme mode de représentation standard des scénarios étudiés.

III.2.3.2 Fondements mathématiques des réseaux bayésiens

Sur le plan mathématique, le réseau bayésien repose sur le théorème de Bayes, qui permet de mettre à jour la probabilité d'un événement à partir d'informations observées. Les relations entre causes et conséquences peuvent ainsi être quantifiées à travers les probabilités conditionnelles définies pour chaque nœud. Les formules utilisées sont les suivantes :

$$P(C_i|X) = P(X|C_i) \times P(C_i)/P(X) \quad (\text{III.1})$$

$$P(X) = \sum P(X|C_i) \times P(C_i) \quad (\text{III.2})$$

Où « C_i » représente l'ensemble des causes conduisant au risque, et « X » l'événement risque. Les nœuds « sans parents » sont ceux qui n'ont pas de dépendances avec d'autres nœuds. Les nœuds « avec parents » sont ceux qui ont des dépendances avec d'autres nœuds. Les lignes de connexion entre les nœuds représentent la causalité des différents nœuds et leurs influences.

III.2.3.3 Méthodologie de l'application des réseaux bayésiens

L'application des réseaux bayésiens à la gestion du risque repose sur une démarche structurée comprenant plusieurs étapes successives : identification des dangers, définition des variables, construction du graphe causal, estimation des probabilités conditionnelles, puis analyse des résultats par inférence. Cette méthodologie permet de transformer les données issues du diagnostic en un outil d'aide à la décision cohérent et exploitable. La figure III.3 présente les principales étapes de cette démarche.

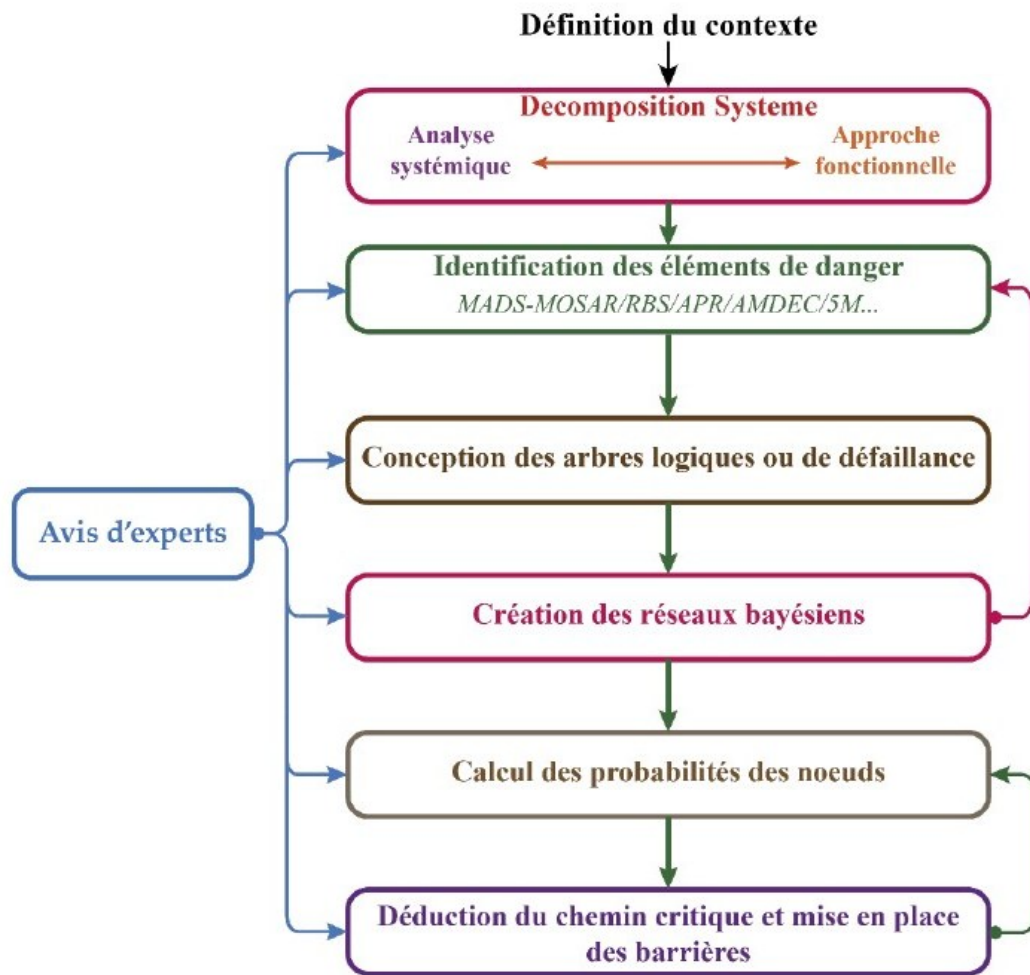


Figure III.3. Schéma méthodologique de l'application des réseaux bayésiens (adapté de Lakermi,)

Cette approche s'appuie sur une double lecture, à la fois systémique et fonctionnelle, qui permet de relier les sources de danger, les événements initiateurs, les pathologies observables et les états de défaillance. Dans ce cadre, l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) constitue une étape essentielle, car elle permet d'identifier de manière structurée les dangers et d'établir leur correspondance avec les nœuds du réseau bayésien. Par ailleurs, la construction du modèle nécessite le recours à l'expertise, notamment pour la définition des variables, l'estimation des probabilités conditionnelles et la validation de la cohérence du réseau. Le jugement d'experts occupe ainsi une place centrale dans la mise en œuvre de la démarche proposée.

III.2.3.4 Approche systémique et identification des nœuds via l'APR

Afin d'assurer une construction cohérente du réseau bayésien, l'identification des nœuds et des relations causales a été fondée sur une approche systémique de gestion des risques. Dans ce cadre, le bâtiment ancien réhabilité est considéré comme un système complexe, en interaction continue avec son environnement et soumis à plusieurs mécanismes de dégradation.

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) a été mobilisée pour structurer cette identification. Elle a permis de recenser, de manière séquentielle, trois niveaux essentiels :

- 1. les sources de danger et aléas, correspondant aux facteurs environnementaux et anthropiques ;*
- 2. les événements initiateurs, traduisant les mécanismes de déclenchement de la dégradation ;*
- 3. les pathologies observables et les états de défaillance, représentant les conséquences structurelles du processus évolutif.*

Le tableau III.4 présente la correspondance entre les dangers identifiés dans l'APR et les nœuds retenus dans le réseau bayésien. Il permet de justifier la structure du modèle en montrant comment chaque aléa, événement initiateur ou pathologie est traduit en variable de modélisation.

Tableau III.4. Matrice APR : correspondance entre les dangers identifiés et les nœuds du réseau bayésien

Source de danger / Aléa	Événement initiateur	Pathologie générée	Nœud RB associé	Type de nœud
Milieu marin (salinité)	Pénétration ions chlorures Cl^-	Corrosion des armatures	Corrosion	Intermédiaire
Humidité relative élevée	Infiltration capillaire dans les murs	Décollement enduit / délaminage	Dégradation matériau	Intermédiaire
Défaut de maintenance chronique	Absence d'inspection régulière	Dégradation non détectée / aggravée	Maintenance	Racine
Qualité initiale du béton médiocre	Porosité élevée de la matrice cimentaire	Carbonatation accélérée	Qualité béton	Racine
Surcharge d'exploitation	Dépassement des charges admissibles	Fissuration longitudinale / plastification	Surcharge	Racine
Pollution sol / nappe phréatique	Infiltration eau agressive (sulfates)	Attaque sulfatique — ettringite expansive	Attaque chimique	Intermédiaire
Gradient thermique saisonnier	Dilatation différentielle acier-béton	Fissures aux interfaces — desserrage	Choc thermique	Intermédiaire
Source vibratoire permanente (équipements)	Résonance structurelle (coïncidence de fréquences)	Fatigue des soudures / décohésion assemblages	Fatigue vibratoire	Intermédiaire
Convergence de plusieurs pathologies	Perte de section des porteurs (poteaux, poutres, murs maîtres)	Passage à l'état limite ultime	Défaillance structurelle globale	Sortie (puits)

Cette correspondance entre l'APR et le réseau bayésien montre que la structure du modèle repose sur une logique causale justifiée, directement issue de l'analyse des mécanismes de

dégradation. Elle garantit également la cohérence entre l'identification qualitative des risques et leur formalisation probabiliste dans le réseau bayésien.

III.2.3.5 Transition de la matrice de criticité statique vers un graphe causal de type PERT

Les approches classiques d'évaluation des risques, fondées sur des matrices de criticité croisant la probabilité d'occurrence et la gravité des conséquences, présentent certaines limites dans le cas du bâti ancien. D'une part, elles considèrent généralement les événements de manière isolée, sans représenter explicitement les relations de dépendance entre les pathologies. D'autre part, elles fournissent une lecture statique du risque, sans intégrer la dynamique d'évolution des dégradations. Enfin, le score obtenu à partir du croisement probabilité-gravité reste souvent abstrait et ne rend pas compte des mécanismes physiques à l'origine de la défaillance. Afin de dépasser ces limites, le réseau bayésien est ici structuré comme un graphe causal organisé selon une logique séquentielle inspirée des réseaux de type PERT. Dans cette représentation, les nœuds sont ordonnés selon une chaîne de dégradation progressive reliant les causes initiales aux conséquences structurelles finales, suivant l'enchaînement général :

[Causes/Aléas] → [Événements Initiateurs] → [Pathologies Intermédiaires] → [Défaillance Finale]

Cette organisation permet de représenter de manière cohérente les différentes étapes du processus de dégradation. Les nœuds racines traduisent les facteurs environnementaux ou structurels initiaux ; les événements initiateurs correspondent aux premiers mécanismes de déclenchement ; les nœuds intermédiaires décrivent les pathologies observables ; enfin, le nœud final représente l'état de défaillance structurelle.

L'intérêt principal de cette structuration est de permettre une double lecture du modèle. D'une part, l'analyse prédictive permet d'évaluer l'effet des causes et des conditions d'exposition sur la probabilité de défaillance. D'autre part, l'analyse diagnostique permet, à partir de désordres observés, de remonter vers les causes les plus probables. Cette double capacité constitue l'un des apports majeurs du réseau bayésien dans une perspective d'aide à la décision pour le diagnostic, la maintenance et la réhabilitation.

III.2.4 Tables de probabilités conditionnelles (CPT)

Dans un réseau bayésien, chaque nœud est associé à une table de probabilités conditionnelles, communément désignée par l'acronyme CPT (Conditional Probability Table). Ces tables constituent le cœur quantitatif du modèle, puisqu'elles définissent, pour chaque combinaison possible des états des nœuds parents, la distribution de probabilité du nœud considéré. La qualité de ces tables conditionne donc directement la pertinence et la fiabilité des résultats produits par le réseau bayésien (Jensen & Nielsen, 2007 ; Pearl, 1988).

La figure III.4 illustre la structure qualitative du réseau bayésien sous forme de graphe orienté acyclique (DAG). Cette représentation met en évidence les relations causales entre les nœuds, sur lesquelles s'appuie ensuite la construction des tables de probabilités conditionnelles.

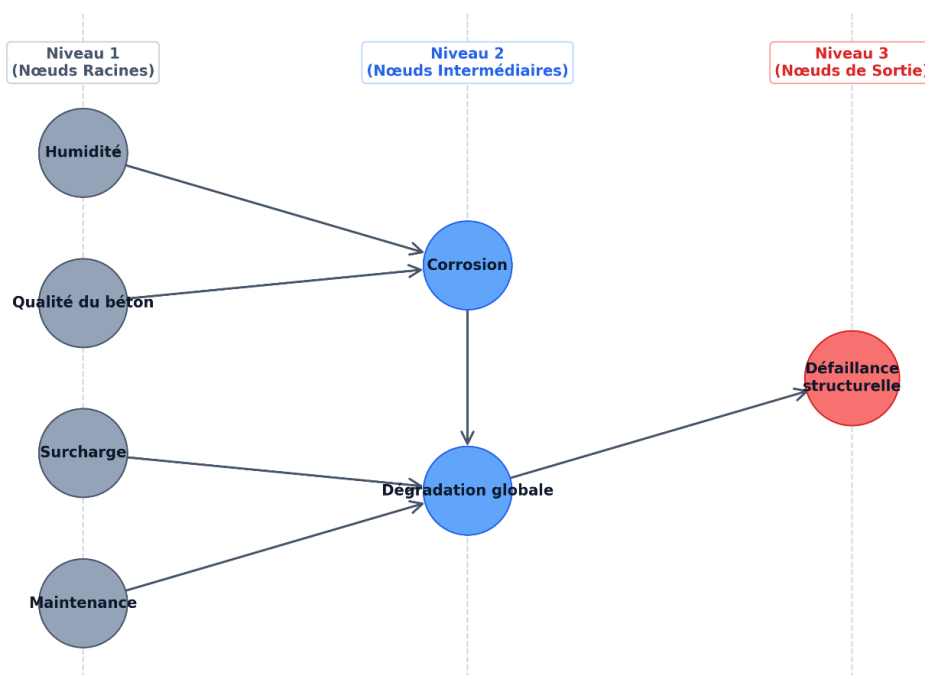


Figure III.4. Représentation du graphe orienté acyclique (DAG) du réseau bayésien

À partir de cette structure causale, les probabilités conditionnelles peuvent être définies pour chaque nœud en fonction de ses dépendances directes. La section suivante présente les principes méthodologiques retenus pour l'estimation de ces probabilités dans le cadre du présent travail.

III.2.4.1 Principe et méthode d'estimation des probabilités conditionnelles

Avant de présenter les valeurs numériques des CPT, il est nécessaire d'exposer leur mode d'estimation. Dans un réseau bayésien, l'évaluation des probabilités conditionnelles constitue

une étape déterminante, car chaque valeur doit être cohérente, justifiable et fondée sur une source fiable. La littérature distingue généralement deux grandes familles de méthodes — l'expertise et l'estimation statistique — dont la combinaison, qualifiée d'approche hybride, est particulièrement adaptée aux contextes où les données disponibles sont partielles et hétérogènes (Heckerman et al., 1995 ; Cooke, 1991).

a) Estimation par consultation d'experts

Lorsqu'un historique statistique est absent ou insuffisant — situation fréquente dans le domaine du patrimoine bâti ancien — l'avis collectif d'experts constitue une ressource essentielle pour renseigner les CPT. Parmi les protocoles disponibles, la méthode Delphi s'impose comme l'une des plus structurées et des plus reconnues (Cooke, 1991).

Son principe repose sur des séquences itératives de questionnaires soumis à un panel d'experts, avec restitution anonyme des résultats après chaque cycle. À chaque itération, les spécialistes réajustent leur estimation à la lumière du consensus partiel dégagé lors du tour précédent, en s'affranchissant des biais liés à la pression hiérarchique. Concrètement, pour chaque combinaison d'états des nœuds parents d'un nœud donné, l'expert répond à une question fermée du type : « Dans le cas où l'humidité est élevée et la qualité du béton médiocre, quelle est selon vous la probabilité que la corrosion atteigne un niveau élevé ? ». Les estimations individuelles sont ensuite agrégées par moyenne pondérée, les pondérations étant proportionnelles à l'expérience de chaque expert, mesurée en années de pratique et en nombre d'ouvrages diagnostiqués (Cooke, 1991 ; Heckerman et al., 1995).

b) Estimation à partir de données statistiques

Lorsqu'une base de données d'inspections est disponible, l'estimation des probabilités conditionnelles à partir des observations constitue une approche plus objective et plus reproductible. Le principe est celui du comptage : pour chaque état d'un nœud, on calcule la fréquence relative de son occurrence dans l'échantillon et on l'utilise comme estimateur de la probabilité.

L'approche classique lorsque les données sont complètes est le Maximum de Vraisemblance (MLE). Dans le cas des CPT, cela revient précisément au calcul des fréquences relatives (Dempster et al., 1977) :

$$P(\text{état } A) = \frac{\text{nombre d'occurrences de } A}{\text{nombre total d'observations}} \quad (\text{III.3})$$

Lorsqu'une partie des données est manquante (situation courante dans les rapports d'expertise anciens), l'algorithme Expectation-Maximisation (EM) prend le relais. Cet algorithme itératif traite les valeurs inconnues comme des variables latentes et alterne entre une étape E (estimation des valeurs manquantes à partir du modèle courant) et une étape M (mise à jour des paramètres du modèle à partir de ces estimations), jusqu'à convergence (Dempster et al., 1977 ; Lauritzen & Spiegelhalter, 1988).

Un problème pratique récurrent mérite d'être signalé : lorsqu'un état n'a jamais été observé dans l'échantillon, le comptage direct lui attribue une probabilité nulle, ce qui est physiquement absurde pour des phénomènes rares mais réels. Pour éviter cet écueil, on applique la correction de Laplace, selon la formule :

$$P(\text{état}) = \frac{n+1}{N+k} \quad (\text{III.4})$$

où n est le nombre d'observations de l'état, N le total des observations, et k le nombre d'états possibles du nœud (Smith, 2005).

c) Approche hybride retenue dans ce travail

Dans le contexte de cette étude, ni l'expertise seule ni l'estimation statistique seule ne permettent de renseigner l'ensemble des CPT de manière pleinement satisfaisante. La première se heurte à la subjectivité du jugement expert pour les nœuds les mieux documentés, tandis que la seconde se trouve en difficulté pour les nœuds impliquant des combinaisons parentales rares. C'est pourquoi une approche hybride a été retenue, combinant les deux sources selon la nature de chaque nœud. Cette approche, fortement recommandée par Heckerman et al. (1995), est reconnue comme la plus robuste dans les contextes de données partielles et hétérogènes.

Pour les quatre nœuds racines (Humidité, Qualité du béton, Surcharge, Maintenance), les probabilités a priori ont été estimées par comptage direct sur la base de données d'inspections de bâtiments anciens présentant des pathologies documentées, avec l'application systématique de la correction de Laplace pour les états rares. Ces nœuds, dépourvus de parents, se prêtent naturellement à l'estimation statistique puisque leur distribution ne dépend que des fréquences observées dans la population de référence (Smith, 2005 ; Lauritzen & Spiegelhalter, 1988).

Pour les nœuds intermédiaires et de sortie (Corrosion, Dégradation globale, Défaillance structurelle), la consultation d'experts a été privilégiée. Deux raisons principales justifient ce

choix : d'une part, le nombre de combinaisons parentales est élevé et les données d'inspection ne permettent pas de les couvrir statistiquement toutes ; d'autre part, certains événements finaux, comme la défaillance structurelle totale, sont suffisamment rares pour que le comptage direct produise des valeurs nulles ou statistiquement non significatives. Le recours à l'expertise permet de pallier ces limitations en s'appuyant sur le jugement de professionnels chevronnés ayant diagnostiqué un grand nombre d'ouvrages anciens (Cooke, 1991 ; Heckerman et al., 1995).

III.2.4.2 Hypothèses adoptées pour la construction des CPT

La construction des tables de probabilités conditionnelles (CPT) a nécessité l'adoption de plusieurs hypothèses simplificatrices, dictées à la fois par les contraintes pratiques de l'étude et par les caractéristiques générales du bâti ancien. Les principales hypothèses retenues sont les suivantes :

- **Stationnarité** : les probabilités conditionnelles sont supposées stables dans le temps, en l'absence d'intervention extérieure. Cette hypothèse est raisonnable sur un horizon de 5 à 10 ans et constitue une pratique courante dans la modélisation bayésienne de structures civiles (Jensen & Nielsen, 2007).
- **Indépendance conditionnelle (propriété de Markov)** : conformément à la structure du graphe orienté acyclique (DAG), chaque nœud est considéré comme conditionnellement indépendant de ses non-descendants dès lors que l'état de ses parents directs est connu. Cette propriété constitue un principe fondamental du formalisme bayésien (Pearl, 1988).
- **Discrétisation des variables continues** : les variables continues, telles que le taux d'humidité, la résistance des matériaux ou le niveau de surcharge, ont été discrétisées en un nombre limité d'états, à l'aide de seuils jugés physiquement significatifs et compatibles avec les références normatives utilisées (Eurocode 6 ; DTU 20.1).
- **Exhaustivité et exclusivité** : pour chaque nœud, les états ont été définis de manière mutuellement exclusive et exhaustive, de sorte que la somme des probabilités associées soit égale à 1, conformément aux principes de base du calcul probabiliste (Jensen & Nielsen, 2007).

Ces hypothèses ont été retenues afin de garantir un compromis entre réalisme physique, cohérence probabiliste et faisabilité de la modélisation dans un contexte de données limitées.

III.2.5 Simulation et analyse des scénarios

L'intérêt fondamental du réseau bayésien développé réside dans sa capacité à réaliser des inférences probabilistes bidirectionnelles, à la fois prédictives et diagnostiques. Cette section présente les principes de propagation des probabilités ainsi que les éléments d'analyse permettant d'identifier les variables critiques du modèle. Les applications numériques et leur interprétation physique seront développées dans le chapitre suivant.

III.2.5.1 Principe de propagation des probabilités

La propagation des probabilités, ou inférence bayésienne, consiste à mettre à jour la distribution de probabilité des nœuds du réseau lorsqu'une nouvelle information, appelée évidence, est observée sur une ou plusieurs variables. Sur le plan mathématique, cette mise à jour repose sur l'application du théorème de Bayes, permettant d'évaluer les probabilités a posteriori des états du réseau. Dans le cadre du modèle retenu, deux formes principales de propagation sont mobilisées :

- ***La propagation descendante (Inférence prédictive ou Top-Down)*** : elle permet d'évaluer l'effet des causes amont sur l'évolution des pathologies et sur la probabilité finale de défaillance structurelle. Par exemple, la fixation d'un état défavorable sur un nœud racine, tel qu'un niveau élevé de surcharge ou d'humidité, permet d'observer son impact sur les nœuds intermédiaires et sur le nœud final.
- ***La propagation ascendante (Inférence diagnostique ou Bottom-Up)*** : à l'inverse, lorsqu'un état de dégradation ou de défaillance est observé sur site, le modèle permet de remonter vers les causes les plus probables en réévaluant la distribution des nœuds racines. Cette démarche constitue un outil particulièrement utile pour le diagnostic pathologique.

Le calcul des probabilités marginales peut s'appuyer sur des algorithmes d'inférence exacts, tels que l'algorithme de l'arbre de jonction (Junction Tree), adapté aux réseaux bayésiens de taille modérée et permettant une propagation cohérente des probabilités au sein du graphe.

III.2.5.2 Analyse de sensibilité et identification des variables critiques

Afin d'évaluer la robustesse du modèle et de hiérarchiser les facteurs les plus influents sur le risque global, une analyse de sensibilité a été menée. Celle-ci vise à mesurer l'effet des variations des nœuds explicatifs sur le nœud cible, correspondant à la défaillance structurelle globale.

Dans le cadre des réseaux bayésiens, l'analyse de sensibilité peut être fondée sur la réduction de l'incertitude apportée par une variable explicative sur la variable cible, notamment à travers la notion d'information mutuelle. Cet indicateur permet d'identifier les variables dont l'influence sur le résultat final est la plus significative.

Les résultats obtenus montrent que certaines variables jouent un rôle plus déterminant que d'autres dans l'évaluation du risque. En particulier, les nœuds intermédiaires liés à la dégradation structurelle apparaissent comme des variables fortement influentes, car ils assurent la transition entre les causes initiales et l'état final de défaillance. Parmi les facteurs pathologiques, la corrosion se distingue comme une variable critique en raison de son rôle dans l'évolution de la capacité portante et dans l'aggravation des désordres observables. De même, parmi les nœuds racines, les variables liées à l'humidité et à la qualité initiale des matériaux apparaissent comme particulièrement sensibles, ce qui confirme leur importance dans la dynamique globale de dégradation. Cette analyse de sensibilité constitue ainsi un outil essentiel pour identifier les variables critiques du modèle et orienter, par la suite, les priorités en matière d'inspection, de maintenance et de réhabilitation.

III.2.5.3 Détermination des probabilités des nœuds

Dans le cadre du présent travail, les probabilités associées aux différents nœuds du réseau bayésien ont été déterminées à partir des tables de probabilités conditionnelles (CPT), construites selon une approche hybride combinant les informations issues de la littérature, les observations de terrain et l'agrégation structurée des jugements d'experts.

En raison du manque de données statistiques complètes sur le patrimoine bâti ancien étudié, une simulation de type Monte-Carlo n'a pas été retenue comme outil principal de quantification. Le recours à l'expertise a donc constitué la solution la plus adaptée pour renseigner les probabilités des nœuds racines, intermédiaires et de sortie, tout en assurant la cohérence globale du modèle. Ainsi, la propagation des probabilités dans le réseau repose principalement sur les mécanismes d'inférence bayésienne, permettant d'évaluer le niveau de risque à partir des états observés et des relations causales définies entre les variables.

III.2.5.4 Structure générale et logique de construction des scénarios de risque

Le réseau bayésien développé dans ce travail est conçu pour représenter plusieurs scénarios de dégradation correspondant aux principales pathologies susceptibles d'affecter les bâtiments anciens. Bien que ces scénarios puissent différer par leur mécanisme initiateur (mécanique,

physico-chimique, thermique ou vibratoire), ils reposent sur une architecture causale commune structurée en quatre niveaux :

[Causes/Aléas] → [Événements Initiateurs] → [Pathologies Intermédiaires] → [Défaillance Finale]

Cette organisation garantit la cohérence du modèle, quel que soit le scénario analysé. L'évaluation quantitative des probabilités associées à chaque trajectoire causale ainsi que leur interprétation physique seront développées dans le chapitre suivant, à partir des données issues des deux cas d'étude retenus.

III.3 Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de poser les bases théoriques et méthodologiques de la modélisation probabiliste du risque de défaillance structurelle appliquée aux bâtiments anciens. Il a mis en évidence la pertinence des réseaux bayésiens comme outil d'analyse dans un contexte marqué par l'hétérogénéité des matériaux, la rareté des données disponibles et la complexité des mécanismes de dégradation. Contrairement aux approches déterministes classiques, souvent limitées dans la prise en compte explicite de l'incertitude, les réseaux bayésiens offrent un cadre formel permettant de représenter les relations causales entre facteurs environnementaux, pathologies observables et états de défaillance.

La construction du modèle s'est appuyée sur une démarche structurée, fondée sur l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), qui a permis d'identifier les dangers, de hiérarchiser les scénarios de dégradation et de définir les variables pertinentes du réseau. L'organisation causale retenue, inspirée d'un formalisme de type PERT, a facilité la représentation des enchaînements progressifs entre causes, événements initiateurs, pathologies intermédiaires et défaillance finale. Cette structuration constitue un apport important du chapitre, car elle assure la cohérence entre l'analyse qualitative des risques et leur formalisation probabiliste. Le chapitre a également précisé les principes de construction des tables de probabilités conditionnelles (CPT), qui constituent le cœur quantitatif du modèle bayésien. Dans un contexte marqué par l'absence de bases de données statistiques complètes sur le patrimoine bâti ancien, une approche hybride a été retenue, combinant les données disponibles, les indications issues de la littérature et l'agrégation structurée des jugements experts. Les hypothèses adoptées pour la discrétisation des variables, l'indépendance conditionnelle et la

stabilité du modèle ont ainsi été explicitées afin de garantir la cohérence méthodologique de l'approche proposée.

Au-delà de sa dimension théorique, ce chapitre a montré que le réseau bayésien constitue un outil capable de réaliser à la fois une analyse prédictive, en estimant la probabilité de défaillance à partir des causes identifiées, et une analyse diagnostique, en reliant les pathologies observées aux causes les plus probables. Cette double capacité renforce l'intérêt du modèle dans une perspective d'aide à la décision pour le diagnostic, la maintenance et la réhabilitation des structures existantes.

L'ensemble des éléments développés dans ce chapitre fournit ainsi le cadre de référence nécessaire à l'application présentée dans le chapitre suivant. Celui-ci sera consacré à la mise en œuvre du modèle sur les deux cas d'étude retenus — le front maritime de Ghazaouet et le lycée Moufdi Zakaria à Maghnia — afin d'en analyser les résultats, de comparer l'influence des contextes environnementaux et d'évaluer la portée opérationnelle de la démarche proposée.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DE CAS

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente deux cas d'étude représentatifs de contextes environnementaux contrastés, afin d'analyser l'influence du milieu d'exposition sur la dégradation et le comportement des structures en béton armé et en maçonnerie. Le premier cas concerne des bâtiments situés en milieu marin, sur le front maritime de Ghazaouet, exposés à des conditions particulièrement agressives telles que l'humidité, les embruns salins et la carbonatation accélérée. Le second cas porte sur le bloc internat du lycée Moufdi Zakaria à Maghnia, situé en milieu urbain continental, principalement soumis au vieillissement naturel et au défaut prolongé de maintenance.

L'objectif de cette étude comparative est de mettre en évidence l'impact différencié des environnements marin et urbain sur l'évolution des pathologies observées, notamment la fissuration, la corrosion des armatures et la dégradation des revêtements. Cette analyse permet également de mieux comprendre le rôle déterminant des conditions d'exposition dans la durabilité des ouvrages et de justifier les choix de diagnostic, de maintenance et de réhabilitation adaptés à chaque contexte.

IV.2 Présentation des cas d'étude

IV.2.1 Milieu marin : Front de mer de Ghazaouet

IV.2.1.1 Description générale et contexte environnemental

Le premier cas porte sur un ensemble de bâtiments historiques implantés en première ligne du front maritime de Ghazaouet, ville côtière de la wilaya de Tlemcen. Édifiés durant la période coloniale (fin XIXe – début XXe siècle), ces ouvrages à usage mixte, commerces en rez-de-chaussée et logements aux étages constituent un patrimoine architectural et urbain d'intérêt historique reconnu.

Sur le plan constructif, le système porteur est constitué de murs en maçonnerie de pierres naturelles et briques liées par des mortiers traditionnels. Les éléments saillants (balcons en encorbellement, corniches et garde-corps) sont réalisés en béton armé et constituent les zones les plus vulnérables du bâtiment. Les figures IV.1 et IV.2 présentent respectivement une vue générale du bâtiment étudié et sa localisation sur le front maritime de Ghazaouet.



Figure IV.1. Vue générale du bâtiment étudié sur le front maritime de Ghazaouet



Figure IV.2. Localisation du bâtiment étudié sur le front maritime de Ghazaouet
(Wilaya de Tlemcen).

L'implantation en première ligne littorale soumet ces bâtiments à plusieurs formes d'agressions physico-chimiques combinées. Les embruns salins favorisent la pénétration des ions chlorure dans le béton et les maçonneries, ce qui accélère les phénomènes de corrosion, de fissuration et d'écaillage. L'humidité élevée et la carbonatation contribuent à la dépasseivation des armatures, tandis que la salinisation des sols et l'érosion côtière peuvent, à plus long terme, affecter la stabilité des fondations.

IV.2.1.2 Pathologies observées - diagnostic visuel

L'inspection visuelle a permis d'identifier cinq grandes familles de pathologies, décrites ci-après selon leur nature et leur importance dans le processus global de dégradation :

a) Corrosion avancée des armatures - pathologie dominante

Les balcons en encorbellement, les corniches et les garde-corps présentent des armatures apparentes fortement oxydées avec des pertes de section métallique significatives. Ce phénomène résulte de la conjonction de deux mécanismes : la pénétration des ions chlorure marins et la carbonatation progressive du béton, qui détruisent conjointement la couche passive protectrice de l'acier et déclenchent une corrosion électrochimique active. La figure IV.3 illustre un état avancé de corrosion des armatures associé à un éclatement du béton d'enrobage. La figure IV.3 illustre un état avancé de corrosion des armatures associé à un éclatement du béton d'enrobage.



Figure IV.3. Éclatement total du béton d'enrobage en sous-face de balcon avec mise à nu et perte de section critique des armatures d'acier fortement corrodées

b) Éclatement du béton d'enrobage

Les sous-faces de balcons et des éléments saillants présentent des éclatements importants du béton d'enrobage. Ce phénomène résulte directement de la corrosion : les produits de rouille formés occupent un volume deux à six fois supérieur à celui de l'acier initial, générant des pressions internes qui dépassent la résistance en traction du béton. La figure IV.4 montre des désordres localisés associés à la fissuration, au décollement d'enduit et à l'altération du béton d'enrobage.



(a)



(b)

Figure IV.4. (a) Décollement d'enduit et fissuration à la jonction dalle, garde-corps plein, accentués par la présence d'équipements techniques rapportés
(b) Altération de la sous-face d'une dalle de balcon avec amorce d'éclatement du béton d'enrobage et corrosion des éléments de serrurerie

c) Fissuration structurelle

Trois types principaux de fissuration ont été relevés : (a) des fissures diagonales traversantes dans les murs de maçonnerie, caractéristiques de tassements différentiels ; (b) des fissures longitudinales majeures sur les paillasse d'escaliers, traduisant une perte locale de continuité structurelle ; (c) des fissures de traction et de cisaillement en sous-face des balcons, résultant de l'expansion des armatures corrodées combinée aux sollicitations mécaniques des consoles. Les figures IV.5 et IV.6 illustrent deux formes caractéristiques de fissuration structurelle

relevées sur le site, tandis que la figure IV.7 présente une vue d'ensemble de la façade mettant en évidence l'ampleur des dégradations observées.



Figure IV.5. Fissure oblique et traversante sur mur de maçonnerie porteur, caractéristique d'un phénomène de tassement différentiel de l'infrastructure.



Figure IV.6. Fissuration longitudinale majeure et ramifiée au niveau de la paillasse de l'escalier, indiquant un cisaillement structurel et une perte de capacité portante locale



Figure IV.7. Vue d'ensemble de la façade urbaine présentant une dégradation avancée des éléments architecturaux en encorbellement et des risques de chute de matériaux

d) Dégradation des enduits et revêtements

Les enduits intérieurs (plâtre, chaux) présentent des phénomènes généralisés d'effritement, de désagrégation et de décollement. Les revêtements extérieurs sont affectés par des fissurations, des décollements et des salissures biologiques. La figure IV.8 présente des exemples de dégradation des enduits intérieurs et de désordres liés à l'humidité.



(a)



(b)

Figure IV.8. (a) Effondrement localisé de l'enduit de plâtre au plafond avec mise à nu et rupture du lattis traditionnel en bois support de finition.
(b) Vue d'ensemble de la cage d'escalier présentant un état de vétusté généralisé, des infiltrations d'eau chroniques et des décollements d'enduits en partie haute.

e) Humidité et efflorescences salines

Des auréoles de percolation, des taches de cristallisation saline ainsi que des développements de micro-organismes sont visibles sur l'ensemble des parois. L'humidité constitue le vecteur principal de l'ensemble des mécanismes de dégradation observés.

IV.2.1.3 Analyse de l'état structurel

Les observations réalisées mettent en évidence un état de dégradation structurelle avancé, particulièrement marqué au niveau des éléments en béton armé en encorbellement. La corrosion des armatures, associée à la perte d'enrobage et à la diminution de la section des aciers, entraîne une réduction significative de la capacité portante résiduelle des balcons, fortement sollicités en flexion et en cisaillement.

L'éclatement du béton d'enrobage engendre en outre un risque immédiat de chute de fragments, aussi bien pour les occupants que pour les usagers de l'espace public situé au pied des façades. Les fissures observées aux jonctions dalle-mur et sur les paillasse d'escaliers

traduisent des désordres structuraux actifs, nécessitant une surveillance rapprochée et une intervention rapide.

Enfin, bien qu'aucun désordre fondationnaire majeur n'ait été mis en évidence lors de l'inspection visuelle, l'influence potentielle des eaux salines et de l'érosion côtière constitue un facteur de vulnérabilité à moyen et à long terme. En l'absence d'intervention, la progression de la corrosion est susceptible d'accentuer les désordres observés et d'augmenter le risque de défaillance partielle des éléments porteurs.

IV.2.1.4 Synthèse du diagnostic – site de Ghazaouet :

Afin de synthétiser le diagnostic établi pour le site de Ghazaouet, le tableau IV.1 récapitule les principales pathologies observées, leur niveau de gravité et le type d'action recommandé.

Tableau IV.1. Synthèse du diagnostic

Niveau de gravité	Pathologies concernées	Action requise
SÉVÈRE	Corrosion avancée des armatures, éclatement du béton d'enrobage, fissuration structurelle des balcons/escaliers, perte locale de capacité portante	Intervention immédiate
MODÉRÉE	Dégradation des enduits, efflorescences, humidité persistante, corrosion localisée des éléments métalliques	Intervention à court terme
MINEURE	Salissures biologiques, altération esthétique des peintures, dégradation superficielle des façades	Maintenance préventive

IV.2.1.5 Recommandations de réhabilitation

- Niveau 1 - urgence immédiate (0–6 mois) : purge des bétons instables, pose d'étais provisoires, balisage des zones dangereuses en façade ainsi que et l'espace public.
- Niveau 2 - réhabilitation structurelle (6–18 mois) : nettoyage et passivation des armatures, remplacement des aciers présentant une perte de section supérieure à 25 %, reconstitution des zones dégradées par des mortiers adaptés au milieu marin, et renforcement des balcons par chemisage en béton armé ou matériaux composites de type FRP.
- Niveau 3 - protection durable et maintenance : reprise de l'étanchéité des balcons et terrasses, application de traitements hydrofuges résistants aux chlorures, et mise en place

d'un programme d'inspections semestrielles avec suivi électrochimique et mesures périodiques du front de carbonatation.

Ces recommandations peuvent être interprétées, dans le cadre du modèle bayésien, comme des mesures visant à réduire la probabilité d'activation des nœuds critiques. Les traitements anticorrosion et la reprise des zones dégradées agissent sur l'état de corrosion des armatures, tandis que l'amélioration de l'étanchéité contribue à réduire le taux d'humidité et, par conséquent, la probabilité de défaillance structurelle globale.

IV.2.2 Milieu urbain : Lycée moufdi zakaria-Maghnia

IV.2.2.1 Description générale et contexte

Le second cas porte sur le bloc internat du lycée Moufdi Zakaria (Lycée N°1), implanté à Maghnia, wilaya de Tlemcen, dans un tissu urbain dense et continental, totalement exempt d'agression marine. Ce bâtiment de type R+3, construit en 1975 dans le cadre du programme national d'infrastructure éducative, est réalisé selon une technique constructive mixte associant des panneaux de façade préfabriqués en béton et des ouvrages coulés en place (poteaux, poutres, dalles).

Fermé aux alentours de 1998 et converti en espace de stockage de mobilier scolaire, le bâtiment n'a bénéficié d'aucune opération d'entretien depuis sa mise hors service, soit plus de 25 ans d'abandon complet. Il est retenu dans cette étude comparative car il représente un cas de vieillissement naturel, sans agression chimique extérieure significative, et constitue ainsi une référence utile pour apprécier l'effet aggravant du milieu marin. La figure IV.9 présente la façade principale du lycée ainsi que la position du bloc étudié.



Figure IV.9. (a) Façade principale du lycée Moufdi Zakaria (b) Position de bloc étudié

IV.2.2.2 Pathologies observées – diagnostic visuel

a) Pathologies de façade

- Écaillage généralisé de l'enduit de finition sur l'ensemble des façades, particulièrement accentué en parties basses (remontées capillaires) et aux jonctions entre panneaux préfabriqués et éléments coulés, zones de micro-fissuration différentielle.
- Fissuration longitudinale et transversale des bandeaux et refends structuraux, d'ouverture modérée ($< 0,3$ mm pour la majorité), résultant du retrait différentiel entre préfabriqué et coulé en place, amplifié par la dilatation thermique saisonnière.

La figure IV.10 illustre un exemple d'écaillage prononcé de l'enduit en façade extérieure.



Figure IV.10. Écaillage prononcé de l'enduit en base de façade extérieure

b) Pathologies intérieures - Planchers et plafonds

- Infiltrations chroniques par la toiture-terrasse non entretenue depuis plusieurs décennies : auréoles jaunâtres, taches de percolation et développement extensif de moisissures grises à noires sur la quasi-totalité des plafonds des couloirs et chambres.
- Zones de ségrégation du béton sur plusieurs poutres et sous-faces de dalles, se traduisant par un faciès granuleux avec nid de gravier visible. Ces défauts d'exécution originels ont favorisé la pénétration d'humidité et une amorce de corrosion des armatures superficielles, ces phénomènes demeurant à un stade précoce à modéré, sans commune mesure avec ce qu'engendrerait un milieu marin. Les figures IV.11 et IV.12 présentent les principaux désordres relevés à l'intérieur du bâtiment, notamment les infiltrations et la dégradation localisée du béton.



Figure IV.11. Plafond de couloir intérieur - moisissures et infiltrations



(a)



(b)

Figure IV.12. (a) Détail plafond de chambre — dégradation avancée
(b) Ségrégation du béton sur poutre porteuse — amorce de corrosion des armatures

c) Pathologies des éléments verticaux - Poteaux et murs

Des fissures longitudinales sur les fûts de poteaux et des décollements généralisés d'enduit révèlent une carbonatation superficielle du béton. Des traces de rouille localisées témoignent également d'un enrobage insuffisant à la mise en œuvre.

Réseau de canalisations apparentes en état de corrosion avancée, source d'infiltrations secondaires entretenant l'humidité résiduelle des parois et générant des efflorescences salines blanchâtres en surface. La figure IV.13 montre l'état de certains poteaux intérieurs affectés par des décollements d'enduit, des fissures et des amorces de corrosion.

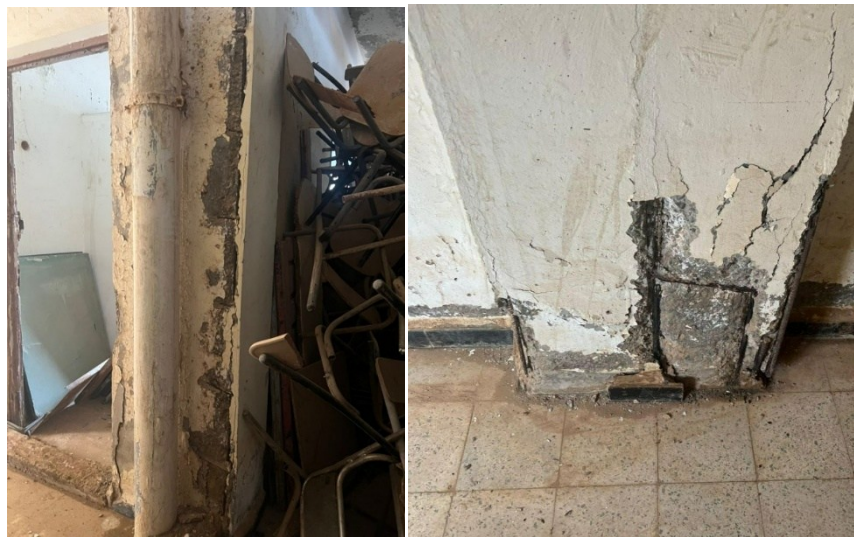


Figure IV.13. Poteaux intérieurs - décollement d'enduit, fissuration et amorce de corrosion

IV.2.2.3 Analyse de l'état structurel

L'état structurel général du bloc internat peut être qualifié de dégradé, sans pour autant présenter d'urgence structurelle critique. Cette caractérisation repose sur trois constats fondamentaux :

- Structure porteuse globalement intacte : les poteaux, poutres et dalles constituent le squelette porteur de l'ouvrage. Malgré des décollements d'enduit et des amorces de corrosion localisées, aucun signe de déformation excessive, de rupture partielle ou de désordre fondationnaire majeur n'a été observé. Le béton porteur des planchers reste intact.
- Pathologies de vieillissement ordinaire dominantes : les désordres recensés (écaillage d'enduit, humidité, moisissures, fissuration légère) appartiennent à la catégorie du

vieillessement naturel lié au défaut de maintenance, non à une agression chimique externe. Leur cinétique est lente et progressive.

- Zones localisées à surveiller : les jonctions entre panneaux préfabriqués et éléments coulés constituent des points de vulnérabilité potentiels à long terme. Les fissures plus prononcées aux angles des baies et dans les zones de jonction entre les deux corps de bâtiment méritent un suivi régulier.

Point de comparaison fondamental : dans ce milieu urbain continental, l'absence d'ions chlorure prive le béton de l'un de ses principaux facteurs d'accélération de la corrosion. La cinétique de dégradation apparaît ainsi plus lente et plus progressive que dans le cas du site de Ghazaouet.

IV.2.2.4 Synthèse du diagnostic - Site de Maghnia

Le tableau IV.2 synthétise les principaux désordres observés sur le site de Maghnia, leur niveau de gravité et les actions recommandées.

Tableau IV.2. Synthèse du diagnostic

Niveau de gravité	Pathologies concernées	Action requise
MODÉRÉE	Infiltrations chroniques en toiture, ségrégation béton, amorce de corrosion localisée, fissuration différentielle aux jonctions	Intervention à court terme
MINEURE	Écaillage généralisé des enduits, moisissures, efflorescences, corrosion des canalisations apparentes	Maintenance préventive

IV.2.2.5 Recommandations de réhabilitation

- Niveau 1- priorité immédiate (0–6 mois) : réhabilitation complète de l'étanchéité de la toiture-terrasse (couches d'étanchéité, évacuation pluviale et points singuliers), ainsi que remplacement du réseau de canalisations défaillant.
- Niveau 2 - réhabilitation préventive (6–12 mois) : réfection des enduits de façade (purge jusqu'au support sain et enduit compatible avec le béton ancien), traitement spécifique des joints entre panneaux préfabriqués et éléments coulés, ainsi que purge, passivation et reconstitution des zones de ségrégation.

- Niveau 3 - maintenance et suivi : inspections visuelles annuelles des façades et de l'étanchéité, suivi thermographique des façades, et contrôle biennuel des fissures au niveau des joints de liaison entre panneaux préfabriqués.

IV.3 Analyse comparative synthétique des deux sites

La comparaison des deux cas d'étude met en évidence l'influence déterminante du contexte environnemental sur la nature, la cinétique et la gravité des dégradations observées. Le tableau IV.3 en présente une synthèse.

Tableau IV.3. Comparaison synthétique des deux sites

Critère de comparaison	Ghazaouet - Milieu marin	Maghnia - Milieu urbain
Période / Système constructif	Période colonial-Maçonnerie pierres et briques avec éléments en béton armé	1975-Béton mixte préfabriqué et coulé en place
Environnement d'exposition	Littoral marin agressif : chlorures, humidité élevée, carbonatation accélérée	Urbain continental : vieillissement naturel, sans agression chimique marine
Pathologie dominante	Corrosion avancée des armatures et éclatement béton d'enrobage	Écaillage généralisé des enduits et infiltrations chroniques en toiture
État structurel	Dégradé sévère, avec réduction de la capacité portante des encorbellements	Dégradé modéré, avec structure porteuse globalement intacte
Mécanisme principal	Dépassement par chlorures et corrosion électrochimique auto-catalytique	Vieillissement naturel et défaut prolongé de maintenance
Cinétique de dégradation	Rapide et potentiellement non linéaire	Lente et progressive
Détectabilité	Faible, avec progression interne peu visible	Moyenne, avec désordres principalement visibles
Type de réhabilitation	Réhabilitation structurelle lourde : réparation des armatures et renforcement	Réhabilitation préventive et conservatoire: sans renforcements lourds
Urgence d'intervention	Élevée, en raison du risque immédiat de chute de matériaux	Modérée, avec intervention préventive à court terme
Facteur critique n°1	Qualité initiale du béton et porosité	Défaut chronique de maintenance

L'analyse comparative met en évidence des profils de dégradation nettement différenciés entre les deux sites. Le contexte marin de Ghazaouet favorise une dégradation plus rapide,

dominée par la corrosion des armatures et l'altération du béton d'enrobage, ce qui impose des interventions structurelles plus lourdes et plus urgentes. À l'inverse, le site de Maghnia présente des désordres principalement liés au vieillissement naturel et au défaut de maintenance, avec une cinétique de dégradation plus lente et des besoins de réhabilitation essentiellement préventifs et conservatoires.

IV.4 Application du modèle bayésien

IV.4.1 Construction du réseau pour chaque cas

La construction du réseau bayésien pour chacun des deux cas d'étude s'appuie sur la topologie générale définie au chapitre III, à savoir une architecture causale en quatre niveaux :

[Causes/Aléas] → [Événements Initiateurs] → [Pathologies Intermédiaires] → [Défaillance Finale]

Cette structure commune garantit la comparabilité des résultats entre les deux sites, tout en permettant d'adapter les probabilités d'entrée à chaque contexte environnemental spécifique (Pearl, 1988).

Pour le cas marin de Ghazaouet, les probabilités d'activation des nœuds racines ont été définies de manière à refléter l'agressivité du milieu côtier. Pour le cas urbain de Maghnia, les variables liées à l'agression marine ont été considérées comme négligeables, tandis que les facteurs dominants retenus sont le vieillissement du bâti et l'absence prolongée de maintenance.

IV.4.2 Modélisation graphique du scénario de danger

Afin de limiter la complexité du modèle tout en conservant les mécanismes essentiels de dégradation, le réseau bayésien retenu a été structuré autour d'un nombre limité de nœuds représentatifs. Dans cette représentation condensée, certains niveaux méthodologiques de la structure causale générale sont regroupés afin de faciliter l'analyse probabiliste.

Le graphe orienté acyclique (DAG) est organisé en trois niveaux :

1. Les Nœuds Parents (Variables d'entrée) :

- C1 : Proximité immédiate de la mer / embruns salins.
- C2 : Taux d'humidité.
- C3 : Âge du bâti ancien / vétusté.
- C4 : Vibrations mécaniques.

2. Les Nœuds Intermédiaires (Pathologies d'évolution) :

- I1 : État de corrosion des armatures.
- I2 : Degré de fissuration des éléments porteurs.
- I3 : Perte de capacité portante.

3. Le Nœud Enfant Terminal (Événement redouté) :

- X : Défaillance structurelle globale.

IV.4.3 Formalisme mathématique des calculs

Les probabilités du réseau sont évaluées de proche en proche à partir des distributions a priori des nœuds racines et des tables de probabilités conditionnelles définies pour les nœuds dépendants. Pour les nœuds sans parents, on considère une distribution marginale, tandis que pour les nœuds dépendants, la probabilité absolue est calculée à partir de la formule des probabilités totales.

Dans le présent modèle, chaque variable est discrétisée en deux états : Vrai (présence du facteur ou du risque) et Faux (absence du facteur ou du risque).

IV.4.4 Données d'entrée et tables de probabilités conditionnelles (CPT)

IV.4.4.1 Assignation des nœuds sans parents

Sur la base du diagnostic technique du site de Ghazaouet et des données environnementales locales, les probabilités a priori des nœuds parents sont définies dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4. Probabilités marginales des nœuds parents (sans parents)

ID	Désignation de la variable	Probabilité P(C)	Probabilité complémentaire P (Non C)
C1	Proximité immédiate de la mer / embruns salins	0,350	0,650
C2	Taux d'humidité	0,400	0,600
C3	Âge du bâti ancien (vétusté)	0,650	0,350
C4	Vibrations mécaniques	0,250	0,750

IV.4.4.2 Tables de probabilités conditionnelles (CPT) des nœuds intermédiaires

Pour l'estimation des probabilités conditionnelles des nœuds dépendants, nous nous sommes appuyés sur des jugements d'experts issus du domaine du génie civil et de la durabilité du bâti. Les tables de probabilités conditionnelles des nœuds intermédiaires sont présentées dans les tableaux IV.5 à IV.7, en fonction des dépendances causales retenues dans le modèle.

- **Nœud I1 (État de corrosion des armatures)** : il dépend directement des nœuds parents C1 et C2.

Tableau IV.5. CPT du nœud intermédiaire I1 (État de corrosion des armatures)

État de C1 (Embruns salins)	État de C2 (Humidité)	P (I1 C1, C2)	P (Non I1 C1, C2)
Vrai (C1)	Vrai (C2)	0,750	0,250
Vrai (C1)	Faux (Non C2)	0,400	0,600
Faux (Non C1)	Vrai (C2)	0,150	0,850
Faux (Non C1)	Faux (Non C2)	0,020	0,980

- **Nœud I2 (Degré de fissuration des éléments porteurs) :** il dépend des nœuds parents C3 (vétusté) et C4 (vibrations mécaniques).

Tableau IV.6. CPT du nœud intermédiaire I2 (Degré de fissuration des éléments porteurs)

État de C3 (Âge)	État de C4 (Vibrations)	P (I2 C3, C4)	P (Non I2 C3, C4)
Vrai (C3)	Vrai (C4)	0,650	0,350
Vrai (C3)	Faux (Non C4)	0,300	0,700
Faux (Non C3)	Vrai (C4)	0,200	0,800
Faux (Non C3)	Faux (Non C4)	0,010	0,990

- **Nœud I3 (Perte de capacité portante) :** il synthétise l'effet croisé des deux pathologies majeures I1 (état de corrosion des armatures) et I2 (degré de fissuration des éléments porteurs).

Tableau IV.7. CPT du nœud intermédiaire I3 (Perte de capacité portante)

État de I1 (Corrosion)	État de I2 (Fissuration)	P (I3 I1, I2)	P (Non I3 I1, I2)
Vrai (I1)	Vrai (I2)	0,850	0,150
Vrai (I1)	Faux (Non I2)	0,450	0,550
Faux (Non I1)	Vrai (I2)	0,500	0,500
Faux (Non I1)	Faux (Non I2)	0,005	0,995

IV.4.4.3 CPT du nœud final X (Défaillance structurelle globale)

Le nœud final X, correspondant à la défaillance structurelle globale, dépend directement de l'état du nœud I3, représentant la perte de capacité portante. Le tableau IV.8 présente la table de probabilités conditionnelles associée au nœud final de défaillance structurelle globale.

Tableau IV.8. CPT du nœud final X (Défaillance structurelle globale)

Etat de la perte de capacité portante (I3)	P (X I3)	P (Non X I3)
Vrai (I3)	0,250	0,750
Faux (Non I3)	0,001	0,999

IV.5 Développement des calculs par propagation des probabilités

En appliquant la formule des probabilités totales, les probabilités absolues des nœuds intermédiaires puis du nœud final peuvent être calculées pas à pas, selon la structure causale du réseau. Les calculs suivants sont présentés pour le cas du site de Ghazaouet, à partir des probabilités marginales des nœuds parents et des tables de probabilités conditionnelles définies précédemment.

1. Calcul de la probabilité absolue du nœud I1 (État de corrosion des armatures) P(I1) :

$$\begin{aligned}
 P(I1) = & [P(I1|C1, C2) \times P(C1) \times P(C2)] + [P(I1|C1, \text{Non } C2) \times P(C1) \times P(\text{Non } C2)] \\
 & + [P(I1|\text{Non } C1, C2) \times P(\text{Non } C1) \times P(C2)] \\
 & + [P(I1|\text{Non } C1, \text{Non } C2) \times P(\text{Non } C1) \times P(\text{Non } C2)]
 \end{aligned}$$

- Produit des configurations d'entrée :
 - $P(C1) \times P(C2) = 0,35 \times 0,40 = 0,140$
 - $P(C1) \times P(\text{Non } C2) = 0,35 \times 0,60 = 0,210$
 - $P(\text{Non } C1) \times P(C2) = 0,65 \times 0,40 = 0,260$
 - $P(\text{Non } C1) \times P(\text{Non } C2) = 0,65 \times 0,60 = 0,390$

$$P(I1) = (0,75 \times 0,140) + (0,40 \times 0,210) + (0,15 \times 0,260) + (0,02 \times 0,390)$$

$$P(I1) = 0,1050 + 0,0840 + 0,0390 + 0,0078 = \mathbf{0,2358 \text{ (soit 23,58\%)}}$$

$$\text{D'où : } P(\text{Non } I1) = 1 - 0,2358 = 0,7642$$

2. Calcul de la probabilité absolue du nœud I2 (Degré de fissuration des éléments porteurs) P(I2) :

$$P(I2) = [P(I2|C3, C4) \times P(C3) \times P(C4)] + [P(I2|C3, \text{Non } C4) \times P(C3) \times P(\text{Non } C4)] \\ + [P(I2|\text{Non } C3, C4) \times P(\text{Non } C3) \times P(C4)] \\ + [P(I2|\text{Non } C3, \text{Non } C4) \times P(\text{Non } C3) \times P(\text{Non } C4)]$$

- Produit des configurations d'entrée :
 - $P(C3) \times P(C4) = 0,65 \times 0,25 = 0,1625$
 - $P(C3) \times P(\text{Non } C4) = 0,65 \times 0,75 = 0,4875$
 - $P(\text{Non } C3) \times P(C4) = 0,35 \times 0,25 = 0,0875$
 - $P(\text{Non } C3) \times P(\text{Non } C4) = 0,35 \times 0,75 = 0,2625$

$$P(I2) = (0,65 \times 0,1625) + (0,30 \times 0,4875) + (0,20 \times 0,0875) + (0,01 \times 0,2625)$$

$$P(I2) = 0,1056 + 0,1463 + 0,0175 + 0,0026 = \mathbf{0,2720 \text{ (soit 27,20\%)}}$$

$$\text{D'où : } P(\text{Non } I2) = 1 - 0,2720 = 0,7280$$

3. Calcul de la probabilité absolue du nœud I3 (Perte de capacité portante) P(I3) :

Sous l'hypothèse d'indépendance conditionnelle entre les deux branches intermédiaires I1 et I2, les probabilités correspondantes sont combinées pour estimer la probabilité du nœud I3.

- $P(I1) \times P(I2) = 0,2358 \times 0,2720 = 0,0641$
- $P(I1) \times P(\text{Non } I2) = 0,2358 \times 0,7280 = 0,1717$
- $P(\text{Non } I1) \times P(I2) = 0,7642 \times 0,2720 = 0,2079$
- $P(\text{Non } I1) \times P(\text{Non } I2) = 0,7642 \times 0,7280 = 0,5563$

$$P(I3) = (0,85 \times 0,0641) + (0,45 \times 0,1717) + (0,50 \times 0,2079) + (0,005 \times 0,5563)$$

$$P(I3) = 0,0545 + 0,0773 + 0,1040 + 0,0028 = \mathbf{0,2385 \text{ (soit 23,85\%)}}$$

$$\text{D'où : } P(\text{Non } I3) = 1 - 0,2385 = 0,7615$$

4. Calcul de la probabilité finale du nœud X (Défaillance structurelle globale) P(X) :

$$P(X) = [P(X|I3) \times P(I3)] + [P(X|\text{Non } I3) \times P(\text{Non } I3)]$$

$$P(X) = (0,25 \times 0,2386) + (0,001 \times 0,7614)$$

$$P(X) = 0,0596 + 0,0008 = \mathbf{0,0604 \text{ (soit 6,04\%)}}$$

IV.6 Interprétation scientifique des résultats

L'analyse bayésienne conduit à une probabilité finale de défaillance structurelle globale estimée à 6,04 %. Ce résultat permet d'affiner l'évaluation du risque en tenant compte à la fois des probabilités conditionnelles des pathologies intermédiaires et de leurs possibilités réelles de cooccurrence. L'approche probabiliste permet ainsi de dépasser une appréciation purement qualitative du risque et de fournir une estimation plus nuancée de la vulnérabilité structurelle du système étudié.

Dans le cas considéré, cette valeur apparaît compatible avec l'état de dégradation observé sur les bâtiments du front maritime de Ghazaouet. Elle met en évidence l'intérêt du modèle bayésien comme outil d'aide à la décision pour hiérarchiser les priorités d'inspection, de maintenance et de réhabilitation.

IV.7 Application des réseaux bayésiens dynamiques

IV.7.1 Introduction

Cette partie introduit une dimension temporelle à travers le formalisme des réseaux bayésiens dynamiques (RBD). Cette extension permet de suivre l'évolution des dégradations à différents instants, notamment à T0 (immédiatement après réhabilitation) et à T10 (après dix ans d'exposition continue à l'environnement marin).

IV.7.2 Modélisation graphique et temporelle du scénario de danger

Dans cette version dynamique, le réseau a été volontairement simplifié afin de se concentrer sur les variables les plus influentes dans le contexte marin. Certains nœuds secondaires du modèle statique ont ainsi été écartés pour privilégier les facteurs dont l'évolution temporelle est la plus significative. Le réseau dynamique est structuré autour de quatre catégories de nœuds :

1. Les Nœuds parents invariants (variables environnementales permanentes) :

- C1 : Proximité immédiate de la mer / embruns salins ;
- C2 : Taux d'humidité ;
- C4 : Vibrations mécaniques.

2. **Nœuds intermédiaires dynamiques (évalués à T0 et T10) :**
 - I1(T0) et I1(T10) : État de corrosion des armatures.
 - I2(T0) et I2(T10) : Degré de fissuration des éléments porteurs.
3. **Nœud de synthèse à l'instant T10 :**
 - I3(T10) : Perte de capacité portante.
4. **Nœud terminal :**
 - X(T10) : Défaillance structurelle globale.

IV.7.3 Données d'entrée et évolution des tables de probabilités (CPT)

IV.7.3.1 Variables environnementales permanentes

Dans le cadre du modèle dynamique appliqué au site de Ghazaouet, les probabilités marginales des facteurs environnementaux permanents sont considérées comme constantes sur l'horizon d'étude :

- $P(C1 : \text{Proximité immédiate de la mer / embruns salins}) = 0,35$
- $P(C2 : \text{Taux d'humidité}) = 0,40$
- $P(C4 : \text{Vibrations mécaniques}) = 0,25$

IV.7.3.2 Impact du temps sur les pathologies (Inférence dynamique)

À l'instant T0, c'est-à-dire immédiatement après la réhabilitation, l'ouvrage est supposé réparé et les probabilités d'activation des pathologies restent faibles. À l'instant T10, après dix ans d'exposition continue à l'environnement marin, ces probabilités augmentent sous l'effet cumulé des agressions extérieures.

- **Évolution du nœud I1 (État de corrosion des armatures):**

À l'instant T0 : La probabilité absolue reste faible en raison des opérations de réparation et de reconstitution du béton, soit $(P(I1 \text{ à } T0)=0,05)$ (5 %).

À l'instant T10 : sous l'effet des embruns salins (C1) et du taux d'humidité (C2), la pénétration des chlorures et la reprise des mécanismes de corrosion conduisent à une augmentation de cette probabilité, soit $(P(I1 \text{ à } T10)=0,28)$ (28 %).

- **Évolution du nœud I2 (Degré de fissuration des éléments porteurs) :**

À l'instant T0 : les désordres initiaux étant supposés traités, la probabilité reste limitée, soit (**P(I2 à T0)=0,08**) (**8 %**).

À l'instant T10 : sous l'effet des vibrations mécaniques (C4) et du vieillissement progressif des matériaux, la probabilité de fissuration augmente pour atteindre (**P(I2 à T10)=0,32**) (**32 %**).

IV.7.3.3 Table de probabilité conditionnelle du nœud de synthèse I3 (T10)

La perte de capacité portante à 10 ans dépend du croisement des deux pathologies à l'instant T10. Le tableau IV.9 présente la table de probabilités conditionnelles retenue pour le nœud I3 à l'instant T10, en fonction de l'état des deux pathologies intermédiaires.

Tableau IV.9. CPT du nœud I3 à l'instant T10 (Perte de capacité portante))

État de I1 à T10 (Corrosion)	État de I2 à T10 (Fissuration)	P (I3 à T10 I1, I2)	P (Non I3 à T10 I1, I2)
Vrai	Vrai	0,850	0,150
Vrai	Faux	0,450	0,550
Faux	Vrai	0,500	0,500
Faux	Faux	0,005	0,995

IV.7.4 Développement des calculs à l'échéance de 10 ans

Pour obtenir le risque final de défaillance à l'instant T10, on calcule d'abord la probabilité du nœud I3 à T10, correspondant à la perte de capacité portante, à partir des probabilités des deux pathologies intermédiaires évaluées au même instant.

Les configurations de probabilité à T10 sont les suivantes :

- $P(I1 \text{ à } T10) \times P(I2 \text{ à } T10) = 0,28 \times 0,32 = 0,0896$
- $P(I1 \text{ à } T10) \times P(\text{Non } I2 \text{ à } T10) = 0,28 \times 0,68 = 0,1904$

- $P(\text{Non I1 à T10}) \times P(\text{I2 à T10}) = 0,72 \times 0,32 = 0,2304$
- $P(\text{Non I1 à T10}) \times P(\text{Non I2 à T10}) = 0,72 \times 0,68 = 0,4896$

L'application de la formule des probabilités totales conduit alors à :

$$P(\text{I3 à T10}) = (0,85 \times 0,0896) + (0,45 \times 0,1904) + (0,50 \times 0,2304) + (0,005 \times 0,4896)$$

$$P(\text{I3 à T10}) = 0,0761 + 0,0856 + 0,1152 + 0,0024 = 0,2793$$

Soit :

$$\mathbf{P(\text{I3 à T10}) = 27,93 \%}$$

Le calcul du nœud final de défaillance structurelle globale s'écrit ensuite :

$$P(\text{X à T10}) = [P(\text{X} | \text{I3}) \times P(\text{I3})] + [P(\text{X} | \text{Non I3}) \times P(\text{Non I3})]$$

Avec :

$$- P(\text{X à T10} | \text{I3 à T10} = \text{Vrai}) = 0,250$$

$$- P(\text{X à T10} | \text{I3 à T10} = \text{Faux}) = 0,001$$

On obtient ainsi :

$$P(\text{X à T10}) = (0,25 \times 0,2793) + (0,001 \times 0,7207)$$

$$P(\text{X à T10}) = 0,0698 + 0,0007 = 0,0705$$

Soit une probabilité finale de défaillance structurelle globale de **7,05 %** à l'échéance de **dix ans**.

IV.8 Interprétation scientifique de la trajectoire temporelle

L'introduction d'une dimension temporelle met en évidence la cinétique de dégradation des structures situées sur le front maritime de Ghazaouet. À l'instant T0, immédiatement après réhabilitation, le risque de défaillance structurelle globale demeure faible. Toutefois, l'exposition continue aux agressions environnementales entraîne une augmentation progressive de ce risque au cours du temps.

À l'échéance de dix ans, la probabilité associée à l'état de corrosion des armatures passe de 5 % à 28 %, tandis que celle du degré de fissuration des éléments porteurs évolue de 8 % à 32 %. Le formalisme bayésien dynamique conduit ainsi à une probabilité finale de défaillance structurelle globale estimée à 7,05 % à T10.

Ces résultats montrent que l'évolution du risque est directement liée à l'effet cumulé des agressions environnementales dans le temps. Le recours aux réseaux bayésiens dynamiques permet ainsi de quantifier l'usure progressive de l'ouvrage et d'identifier un horizon d'intervention pertinent pour la mise en œuvre de stratégies de maintenance préventive avant l'apparition de désordres majeurs.

IV.9 Simulation des scénarios de risque et représentation graphique du réseau bayésien

Les cinq scénarios de dégradation définis au chapitre III sont appliqués dans cette section aux cas d'étude de Ghazaouet et de Maghnia. Pour chacun d'eux, la structure causale du réseau bayésien est mobilisée afin d'évaluer la probabilité de défaillance structurelle globale à partir des relations entre nœuds parents, pathologies intermédiaires et nœud final.

Les calculs probabilistes associés aux scénarios ont été vérifiés à l'aide d'une implémentation numérique sous Python, en cohérence avec les tables de probabilités conditionnelles et les hypothèses retenues dans le modèle. Les représentations graphiques des réseaux bayésiens présentées dans cette section ont également été générées de manière programmatique afin d'assurer la cohérence entre la structure causale, les probabilités des nœuds et les résultats de simulation.

Dans la représentation des scénarios ci-après, l'expression « chemin critique » est utilisée au sens de chemin causal dominant du réseau bayésien, en cohérence avec la logique de structuration issue de l'approche PERT. Elle ne correspond pas à un calcul de durée ou d'ordonnancement de projet.

La figure IV.14 présente un schéma synthétique de la structure logique générale retenue pour l'application des scénarios aux deux cas d'étude.

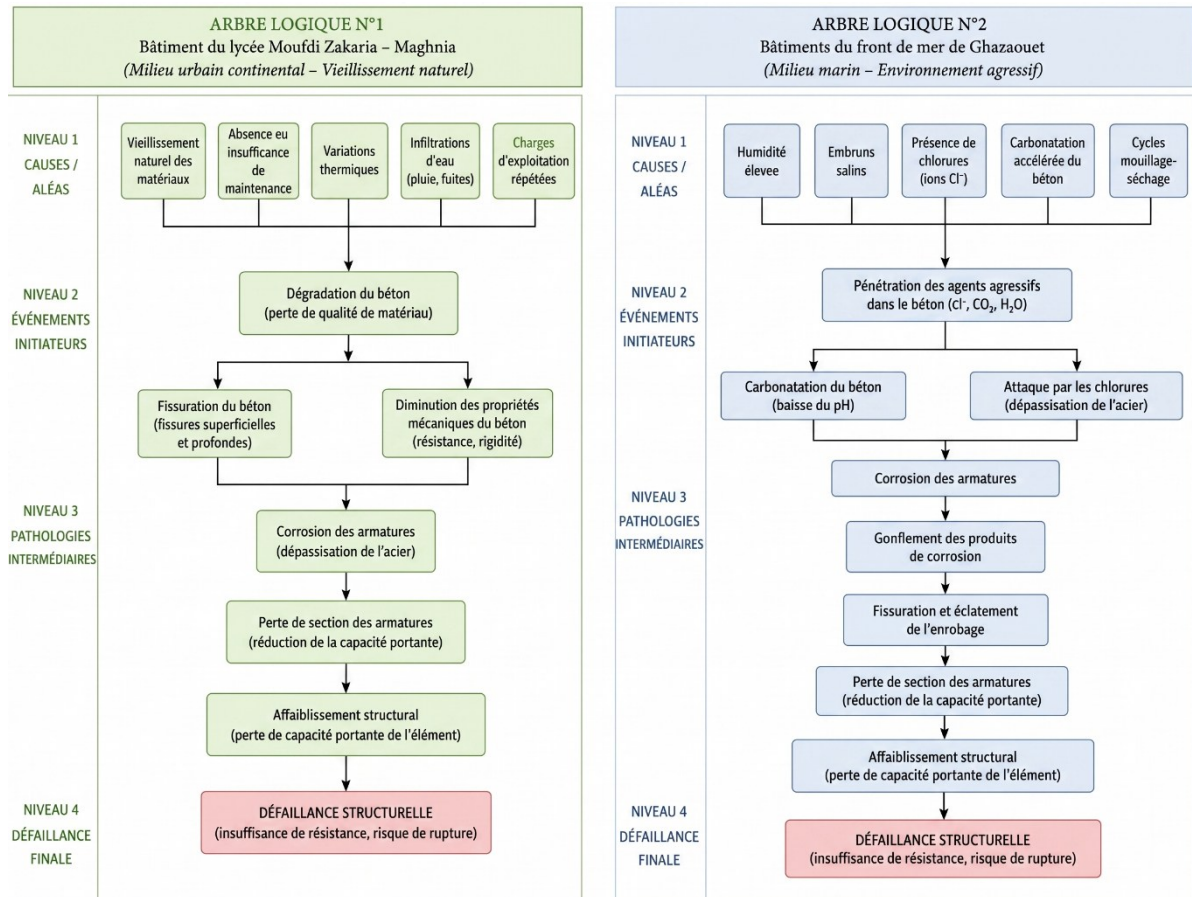


Figure IV.14. Schéma synthétique de la structure causale appliquée aux deux cas d'étude

IV.9.1 Application des scénarios

IV.9.1.1 Scénario S1 - Dégradation statique en milieu marin

Ce scénario correspond à l'évaluation statique de référence du réseau bayésien en milieu marin. Il combine les principaux facteurs environnementaux agressifs (embruns salins, humidité) et les sollicitations mécaniques retenues dans le modèle, sans prise en compte explicite de l'évolution temporelle.

- **Cinétique et indicateurs** : La probabilité finale de défaillance structurelle globale estimée par le modèle pour ce scénario est de 6,04 %. La détectabilité de ce phénomène en phase initiale sur site peut être qualifiée de moyenne, les désordres se manifestant progressivement par des efflorescences ou de fines fissures visibles sur les façades.
- **Trajectoire causale** : Proximité de la mer ($C1 = 0,35$) et taux d'humidité ($C2 = 0,40$) → état de corrosion des armatures ($I1 = 23,58\%$) ; âge du bâti ($C3 = 0,65$) et vibrations mécaniques ($C4 = 0,25$) → degré de fissuration des éléments porteurs ($I2 = 27,20\%$)

; combinaison des deux pathologies → perte de capacité portante ($I3 = 23,85 \%$) ;
probabilité finale de défaillance structurelle globale $P(X) = 6,04 \%$.

- **Interprétation technique :** L'action conjointe de l'humidité élevée et de la pénétration des chlorures favorise la dépasseivation des armatures au sein des éléments en béton armé et contribue à la dégradation des mortiers de liaison de la maçonnerie ancienne. Les vibrations mécaniques répétées liées au contexte portuaire accentuent l'ouverture des fissures et participent à l'évolution des désordres. Le modèle probabiliste met ainsi en évidence l'interaction entre ces mécanismes de dégradation et conduit à une probabilité finale de défaillance structurelle globale estimée à 6,04 %, correspondant à un niveau de risque modéré.

La figure IV.15 illustre la représentation graphique du réseau bayésien associée au scénario S1.

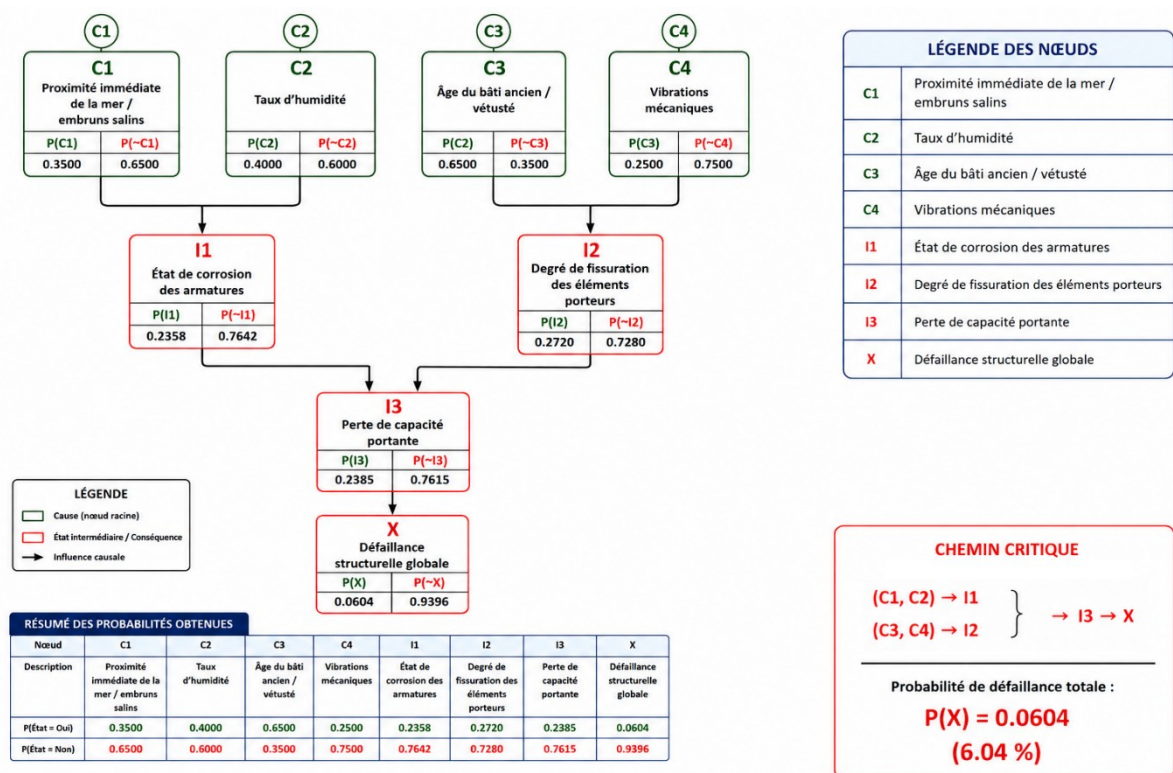


Figure IV.15. Représentation du réseau bayésien associée au scénario S1

IV.9.1.2 Scénario 2 : Front maritime de Ghazaouet – échéance initiale à court terme (profil post-réhabilitation)

Ce scénario représente l'état du bâtiment immédiatement après une réhabilitation lourde, incluant notamment la réparation des fissures, la reprise locale des sections dégradées et les traitements de protection des éléments en béton armé.

- **Cinétique et indicateurs** : La probabilité finale de défaillance structurelle globale est ramenée à un niveau faible, estimé à 1,76 % à l'instant T0. La détectabilité sur site est très élevée, les structures faisant l'objet d'un contrôle rapproché à l'issue des travaux.
- **Trajectoire causale** : après réhabilitation, les probabilités d'activation des pathologies restent faibles, avec un état de corrosion des armatures limité à 5,00 % et un degré de fissuration des éléments porteurs évalué à 8,00 %. La combinaison de ces deux états conduit à une perte de capacité portante estimée à 6,65 %, puis à une probabilité finale de défaillance structurelle globale de **1,76 %**.
- **Interprétation technique** : Les opérations de réhabilitation ont permis de réduire fortement la présence des pathologies majeures et de restaurer un niveau satisfaisant de sécurité structurelle. Le risque résiduel ne traduit pas un danger immédiat, mais correspond à une marge d'incertitude résiduelle liée au comportement futur des matériaux réparés et aux conditions d'exposition du site.

La figure IV.16 illustre la représentation graphique du réseau bayésien associée au scénario S2.

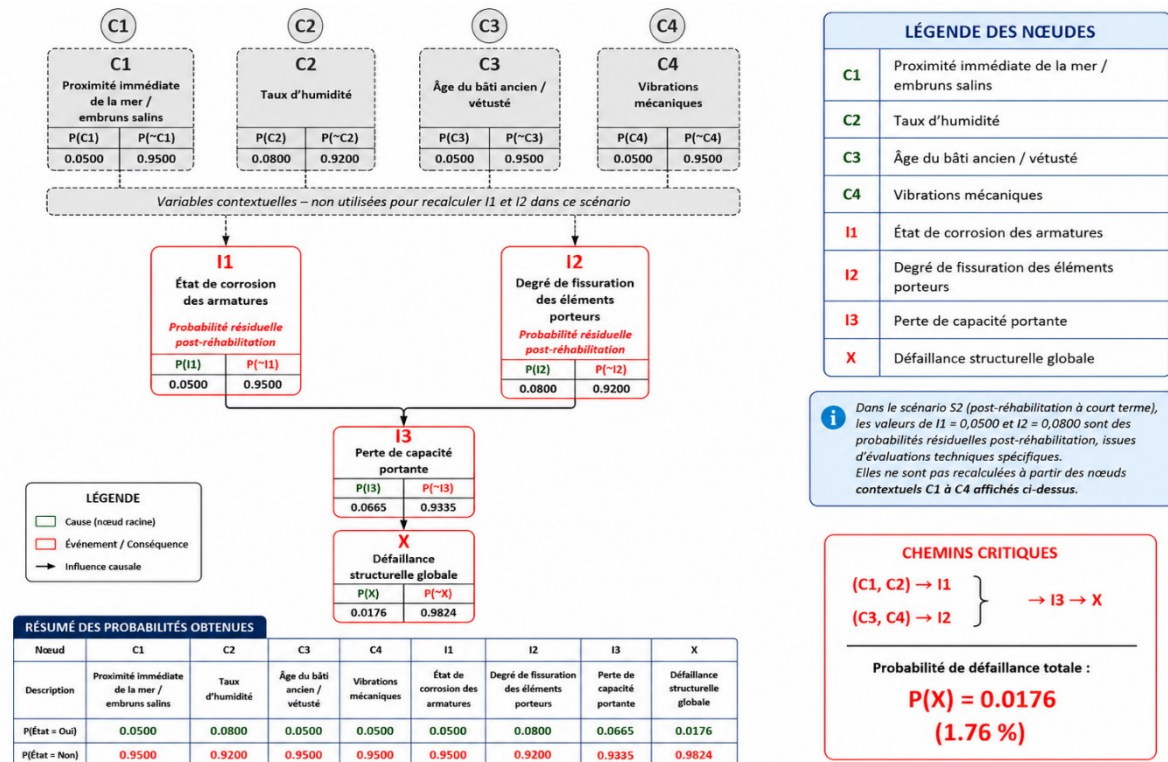


Figure IV.16. Représentation du réseau bayésien associée au scénario S2

Note : Dans ce scénario, les valeurs de I1 et I2 correspondent à des probabilités résiduelles post-réhabilitation et ne sont pas recalculées directement à partir des nœuds contextuels C1 à C4.

IV.9.1.3 Scénario 3 : Front maritime de Ghazaouet – évolution dynamique à long terme (profil vieillissement marin S3)

Ce scénario modélise l'évolution temporelle à long terme d'une structure réhabilitée soumise à une exposition continue à l'environnement marin agressif, sur un horizon de dix ans, en l'absence de campagnes régulières de maintenance préventive.

- **Cinétique et indicateurs :** Sous l'effet cumulatif du temps, la probabilité finale de défaillance structurelle globale augmente pour atteindre 7,05 % à l'échéance T10. La détectabilité de la progression des pathologies internes reste faible en l'absence d'instrumentation spécifique.
- **Trajectoire causale :** Exposition marine continue pendant dix ans → augmentation progressive de l'état de corrosion des armatures (I1 = 28,00 %) et du degré de

fissuration des éléments porteurs ($I2 = 32,00 \%$) → perte de capacité portante cumulée ($I3 = 27,93 \%$) → probabilité finale de défaillance structurelle globale **$P(X) = 7,05 \%$** .

- **Interprétation technique :** Après une décennie d'exposition, les agents agressifs peuvent progressivement altérer les protections superficielles mises en place lors de la réhabilitation. La reprise des mécanismes de corrosion contribue à la réduction de la section utile des aciers et à l'apparition de pressions internes liées aux produits de corrosion. Les cycles thermiques et hygrométriques en zone côtière favorisent également l'évolution de la microfissuration. Grâce au formalisme bayésien dynamique, il devient possible de quantifier l'évolution probabiliste du risque dans le temps, montrant qu'après dix ans d'exposition continue, le risque reste modéré mais non négligeable, ce qui justifie la mise en place d'une maintenance préventive régulière.

La figure IV.17 illustre la représentation graphique du réseau bayésien associée au scénario S3.

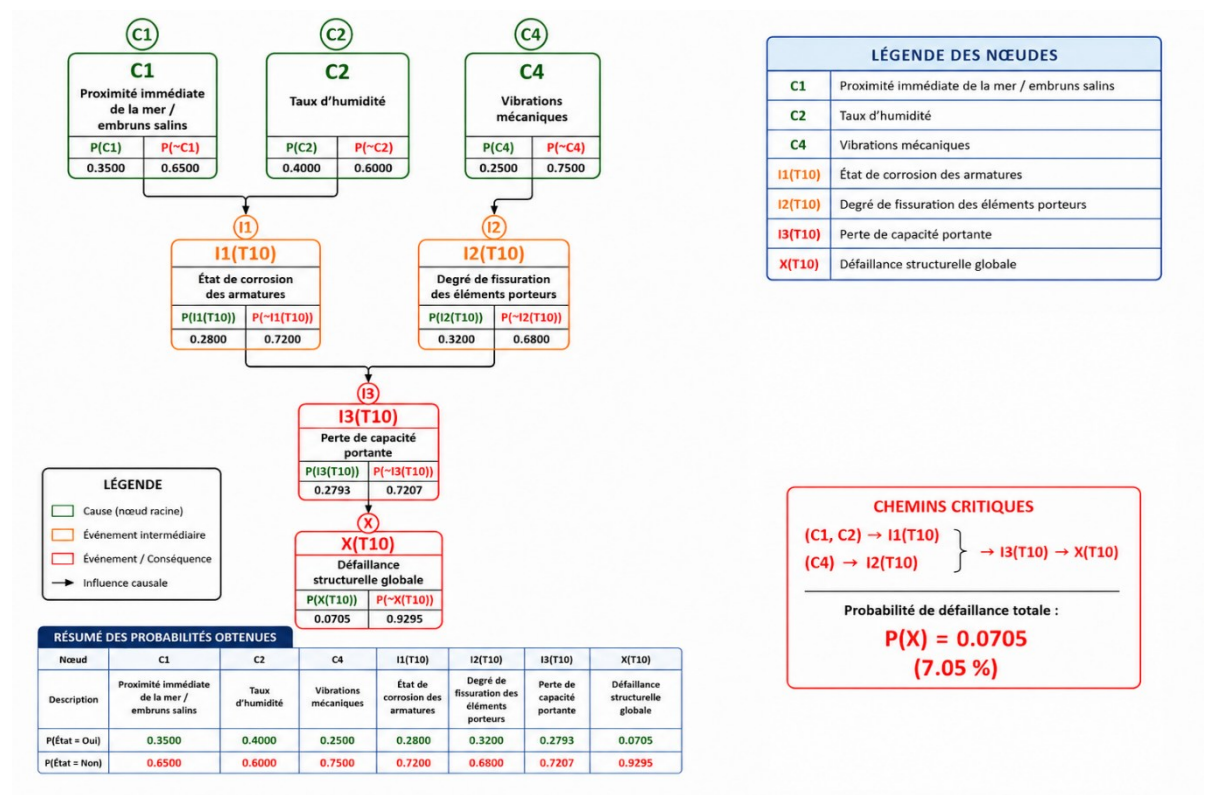


Figure IV.17. Représentation du réseau bayésien associée au scénario S3

IV.9.1.4 Scénario 4 : Zone Urbaine de Maghnia – impact du défaut de maintenance (Profil terrestre S4)

Ce scénario constitue le cas comparatif en milieu urbain continental pour un bâtiment ancien non exposé aux agressions marines. Il représente une situation dominée par le vieillissement naturel, le défaut prolongé de maintenance et des sollicitations mécaniques faibles à modérées.

- **Cinétique et indicateurs** : La probabilité finale de défaillance structurelle globale à l'horizon de dix ans est estimée à 2,00 %. La détectabilité sur site est élevée, les désordres restant essentiellement visibles et d'évolution lente.
- **Trajectoire causale** : en l'absence d'agression marine, l'état de corrosion des armatures reste faible, tandis que le degré de fissuration des éléments porteurs demeure principalement lié à la vétusté, aux infiltrations ponctuelles et au défaut prolongé de maintenance. Dans l'hypothèse retenue pour ce scénario, un état de corrosion limité à 3,00 % et un degré de fissuration de 12,00 % conduisent à une perte de capacité portante estimée à 7,74 %, puis à une probabilité finale de défaillance structurelle globale de 2,03 %, soit un niveau de risque arrondi à 2,00 %.
- **Interprétation technique** : En milieu urbain continental, l'absence d'exposition marine réduit fortement la probabilité de corrosion active et ralentit la cinétique de dégradation. Les désordres observés relèvent principalement du vieillissement naturel des matériaux, des infiltrations ponctuelles et du manque d'entretien. Le risque final reste faible, mais il justifie néanmoins une stratégie de maintenance préventive afin d'éviter l'accumulation progressive des désordres.

La figure IV.18 illustre la représentation graphique du réseau bayésien associée au scénario S4.

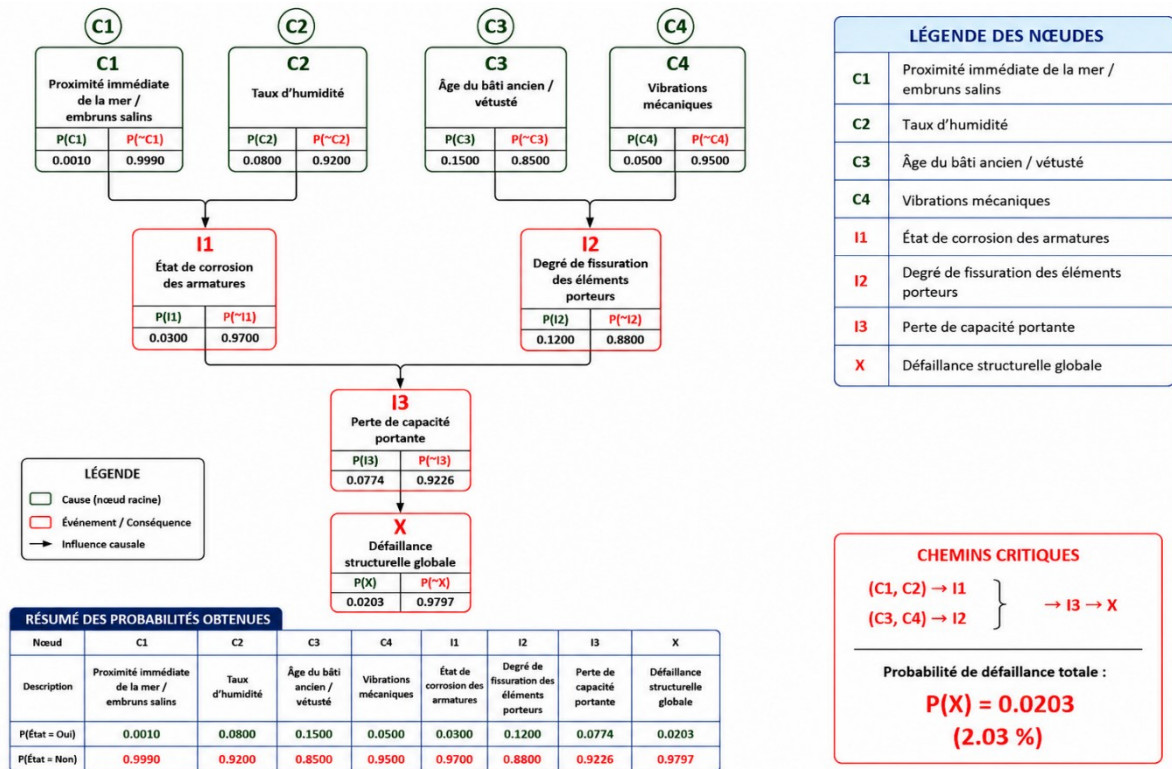


Figure IV.18. Représentation du réseau bayésien associée au scénario S4

Note : Dans le scénario S4, les valeurs des nœuds parents traduisent un contexte urbain continental, caractérisé par une agression marine négligeable et une dégradation principalement liée à la vétusté et au défaut de maintenance.

IV.9.1.5 Scénario 5 : Profil témoin optimal – structure sous maintenance préventive continue (S5)

Ce scénario représente le comportement d'un bâtiment réhabilité bénéficiant d'une maintenance préventive continue, d'un entretien périodique des protections et d'une réduction des sollicitations mécaniques les plus défavorables.

- **Cinétique et indicateurs :** La probabilité finale de défaillance structurelle globale à long terme est maintenue à un niveau faible, estimé à 3,00 %. La détectabilité reste très élevée grâce à une surveillance régulière et planifiée.
- **Trajectoire causale :** dans l'hypothèse d'un suivi préventif continu, l'état de corrosion des armatures et le degré de fissuration des éléments porteurs demeurent limités à 12,00 % chacun. La combinaison de ces deux états conduit à une perte de

capacité portante estimée à 11,64 %, puis à une probabilité finale de défaillance structurelle globale de 3,00 %.

- **Interprétation technique :** La maintenance préventive permet de réduire l'intensité et la propagation des pathologies, tout en maintenant un niveau de sécurité satisfaisant au cours du temps. Même en contexte marin, l'entretien régulier des protections, le traitement précoce des fissures et la surveillance des zones sensibles contribuent à contenir le risque de défaillance structurelle globale à un niveau faible.

La figure IV.19 présente la représentation graphique du réseau bayésien associée au scénario S5.

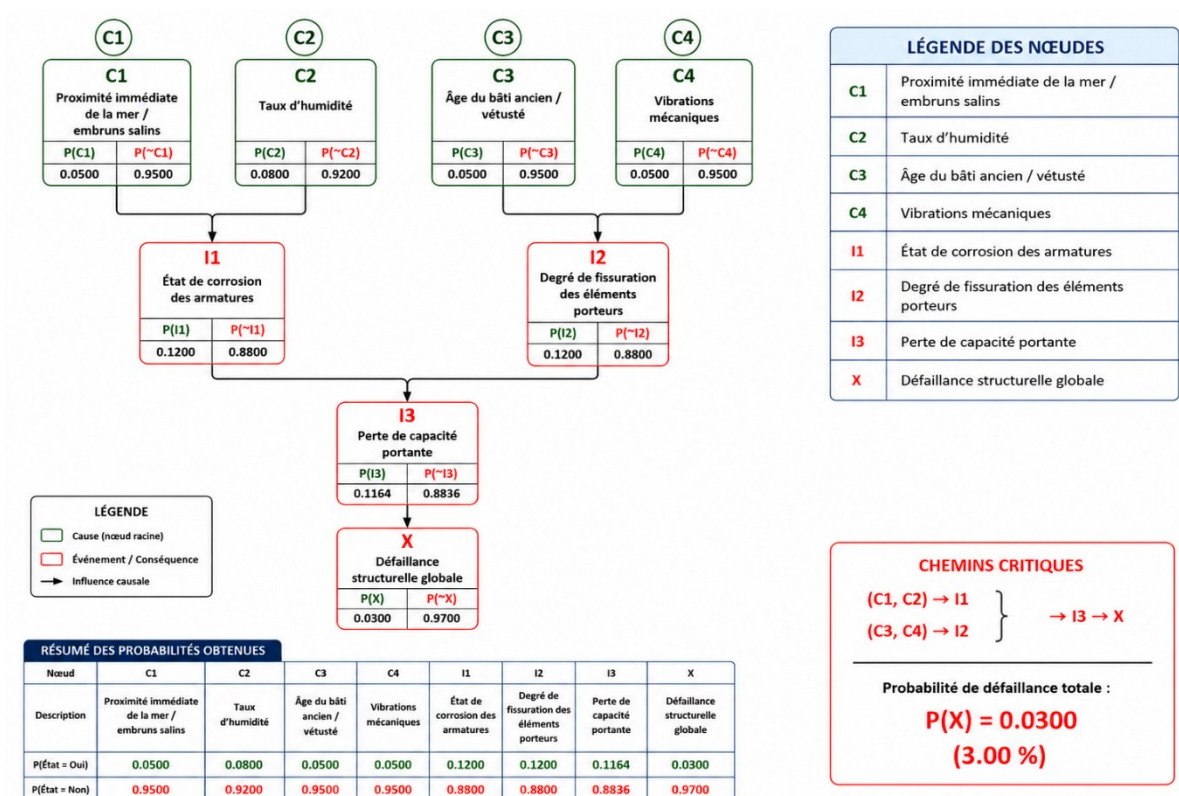


Figure IV.19. Représentation du réseau bayésien associée au scénario S5

Note : Dans le scénario S5, les probabilités associées aux nœuds I1 et I2 correspondent à des probabilités résiduelles sous maintenance préventive continue. Elles ne sont donc pas recalculées directement à partir des valeurs affichées des nœuds parents C1 à C4, mais traduisent l'effet global des actions de maintenance sur la limitation de la corrosion et de la fissuration.

À partir des résultats obtenus pour les cinq scénarios, plusieurs barrières de maîtrise peuvent être proposées afin de réduire la probabilité d'activation des nœuds critiques du réseau bayésien. Ces barrières ne constituent pas des nœuds supplémentaires du modèle, mais des actions opérationnelles déduites de l'analyse probabiliste. Elles concernent principalement la réduction des facteurs d'exposition, la limitation de l'évolution des pathologies intermédiaires et la maîtrise de la perte de capacité portante.

Les principales barrières retenues sont les suivantes :

- réduction de l'exposition à l'humidité et aux embruns salins par des traitements d'étanchéité et des protections hydrofuges ;
- surveillance de l'état de corrosion des armatures par inspections régulières et, si nécessaire, suivi électrochimique ;
- traitement précoce des fissures et reprise des zones de béton dégradé ;
- limitation des sollicitations mécaniques défavorables, notamment les vibrations et les surcharges locales ;
- renforcement structurel ciblé des éléments les plus vulnérables ;
- mise en place d'un programme de maintenance préventive adapté au niveau de risque de chaque site.

IV.9.2 Synthèse comparative des performances du modèle

L'analyse comparative des scénarios met en évidence une hiérarchie claire des niveaux de risque selon les contextes d'exposition et les stratégies de gestion adoptées. Le scénario S3, correspondant au vieillissement marin à long terme, présente la probabilité finale de défaillance structurelle globale la plus élevée (7,05 %), ce qui confirme l'effet aggravant de l'exposition continue à l'environnement marin. Le scénario S1, représentant l'état statique de référence en milieu marin, conduit également à un niveau de risque significatif (6,04 %). À l'inverse, le scénario S2, correspondant à l'état immédiatement post-réhabilitation, présente le niveau de risque le plus faible (1,76 %), traduisant l'effet bénéfique des réparations structurelles à court terme. Le scénario S5 montre qu'une maintenance préventive continue permet de maintenir le risque à un niveau faible (3,00 %), tandis que le scénario S4 met en évidence qu'en milieu urbain non marin, le défaut de maintenance entraîne une probabilité de défaillance globalement modérée, de l'ordre de 2,00 %.

Le tableau IV.10 synthétise les principaux résultats obtenus pour les cinq scénarios simulés, en mettant en regard la typologie du risque, la probabilité de défaillance structurelle globale, l'horizon temporel et le niveau de détectabilité.

Tableau IV.10. Synthèse comparative des performances du modèle

Code	Typologie du risque	Probabilité de défaillance structurelle globale (P)	Horizon temporel	Détectabilité terrain
S1	Dégradation statique en milieu marin (Ghazaouet)	6,04 %	Évaluation de référence	Moyenne
S2	Profil post-réhabilitation à court terme (Ghazaouet)	1,76 %	Immédiat (T0)	Très Élevée
S3	Vieillissement marin à long terme (Ghazaouet)	7,05 %	Échéance à 10 ans (T10)	Faible
S4	Profil urbain / défaut de maintenance (Maghnia)	2 %	Échéance à 10 ans (T10)	Élevée
S5	Profil témoin optimal / maintenance préventive continue	3 %	Long Terme	Très Élevée

IV.10 Conclusion

Ce quatrième chapitre a permis de mettre en application la démarche probabiliste développée dans ce mémoire à travers deux cas d'étude contrastés : le front maritime de Ghazaouet, représentatif d'un environnement marin agressif, et le lycée Moufdi Zakaria à Maghnia, situé en milieu urbain continental. Cette double application a permis d'évaluer la sensibilité du

modèle bayésien face à des signatures pathologiques distinctes et de mettre en évidence l'influence déterminante du contexte environnemental sur la dynamique de dégradation.

Les simulations réalisées sur les différents scénarios montrent que le milieu marin constitue un facteur majeur d'aggravation du risque. Le scénario S1, correspondant à l'état statique de référence en milieu marin, conduit à une probabilité finale de défaillance structurelle globale de 6,04 %, tandis que le scénario dynamique S3, simulant une exposition continue pendant dix ans, porte ce niveau à 7,05 %. À l'inverse, le scénario S2 met en évidence l'effet bénéfique immédiat d'une réhabilitation lourde, avec une probabilité finale réduite à 1,76 %. En milieu urbain, le scénario S4 confirme que, malgré la présence de désordres liés au vieillissement et au défaut de maintenance, le risque global reste plus faible qu'en contexte marin, avec une valeur de l'ordre de 2,00 %. Enfin, le scénario S5 montre qu'une stratégie de maintenance préventive continue permet de maintenir le risque à un niveau faible, voisin de 3,00 %.

Sur le plan méthodologique, ce chapitre confirme l'intérêt des réseaux bayésiens pour structurer l'analyse du risque de défaillance des bâtiments anciens. Le modèle permet de représenter les relations causales entre les facteurs d'exposition, les pathologies intermédiaires et la défaillance finale, tout en quantifiant l'effet des différents scénarios de gestion. L'introduction d'une dimension temporelle à travers le modèle dynamique renforce cette capacité en permettant d'apprécier l'évolution progressive du risque dans le temps.

Ainsi, la démarche proposée montre que l'approche bayésienne constitue un outil pertinent d'aide à la décision pour le diagnostic, la maintenance et la réhabilitation du patrimoine bâti ancien. Elle offre un cadre cohérent pour hiérarchiser les priorités d'intervention, orienter les campagnes d'inspection et adapter les stratégies de maintenance aux spécificités de chaque site étudié. Ainsi, la démarche proposée montre que l'approche bayésienne constitue un outil pertinent d'aide à la décision pour le diagnostic, la maintenance et la réhabilitation du patrimoine bâti ancien. Elle offre un cadre cohérent pour hiérarchiser les priorités d'intervention, orienter les campagnes d'inspection et adapter les stratégies de maintenance aux spécificités de chaque site étudié.

Conclusion générale

Au terme de ce travail de mémoire, il convient de dresser un bilan synthétique de la démarche entreprise, de mettre en évidence les principaux enseignements obtenus et d'identifier les limites ainsi que les perspectives d'amélioration de l'approche proposée.

L'objectif principal de ce mémoire était de développer une démarche d'évaluation et de gestion du risque de défaillance structurelle des bâtiments anciens réhabilités, en tenant compte des incertitudes liées au diagnostic pathologique, aux conditions d'exposition et à l'évolution des mécanismes de dégradation. Pour répondre à cette problématique, le travail s'est appuyé sur l'application combinée de l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) et des réseaux bayésiens, afin de structurer les relations causales entre les facteurs d'exposition, les pathologies intermédiaires et la défaillance structurelle globale.

La démarche proposée a été appliquée à deux cas d'étude situés dans la wilaya de Tlemcen et représentatifs de contextes environnementaux contrastés. Le premier cas concerne des bâtiments anciens implantés sur le front maritime de Ghazaouet, soumis à un environnement marin agressif marqué par l'humidité, les embruns salins, la pénétration des chlorures et la carbonatation du béton. Le second cas porte sur le bloc internat du lycée Moufdi Zakaria à Maghnia, situé en milieu urbain continental, principalement affecté par le vieillissement naturel, le défaut prolongé de maintenance, les infiltrations et la dégradation progressive des matériaux.

Sur le plan pathologique, l'étude comparative a mis en évidence des profils de dégradation nettement différenciés. Dans le cas de Ghazaouet, les désordres les plus critiques sont liés à la corrosion avancée des armatures, à l'éclatement du béton d'enrobage, à la fissuration des éléments en encorbellement et à la perte locale de capacité portante. Ces mécanismes sont fortement influencés par l'exposition marine, qui accélère la cinétique de dégradation et impose des interventions structurelles lourdes. À l'inverse, le cas de Maghnia présente une dégradation plus lente et progressive, dominée par les infiltrations, l'écaillage des enduits, les amorces localisées de corrosion et les fissurations différentielles aux jonctions constructives. L'absence d'agression marine y limite fortement la progression des mécanismes physico-chimiques de corrosion.

Sur le plan méthodologique, l'intégration des réseaux bayésiens a permis de formaliser les incertitudes du diagnostic et de quantifier la probabilité de défaillance structurelle globale à partir des probabilités marginales des facteurs d'entrée et des tables de probabilités conditionnelles. Le modèle statique appliqué au site de Ghazaouet a conduit à une probabilité finale de défaillance structurelle globale de 6,04 %, correspondant à un niveau de risque modéré mais significatif. L'introduction d'une dimension temporelle à travers les réseaux bayésiens dynamiques a permis de simuler l'évolution des pathologies à l'horizon de dix ans, avec une probabilité finale estimée à 7,05 % dans le scénario de vieillissement marin.

La simulation des scénarios de risque a également permis de comparer plusieurs situations de gestion. Le scénario post-réhabilitation à court terme a montré une réduction importante du risque, avec une probabilité finale de défaillance structurelle globale estimée à 1,76 %. Le scénario urbain de Maghnia, en l'absence d'agression marine, conduit à un niveau de risque faible à modéré, de l'ordre de 2,00 %. Enfin, le scénario de maintenance préventive continue montre qu'une stratégie régulière de surveillance, d'entretien et de traitement précoce des désordres permet de maintenir la probabilité de défaillance à un niveau faible, voisin de 3,00 %. Ces résultats confirment l'intérêt du modèle bayésien comme outil d'aide à la décision pour hiérarchiser les priorités d'inspection, orienter les interventions de réhabilitation et planifier les actions de maintenance préventive.

L'intérêt principal de cette approche réside dans sa capacité à combiner des informations hétérogènes issues du diagnostic visuel, de l'expertise technique et des hypothèses probabilistes. Elle permet de dépasser une appréciation purement qualitative du risque en proposant une estimation structurée, progressive et transparente de la vulnérabilité structurelle. Les réseaux bayésiens offrent ainsi un cadre pertinent pour représenter les dépendances causales entre les facteurs environnementaux, les pathologies observées et les conséquences structurelles potentielles.

Toutefois, ce travail présente certaines limites qu'il convient de souligner. La première concerne la dépendance partielle aux jugements d'experts pour la définition des probabilités marginales et des tables de probabilités conditionnelles, en raison du manque de bases de données statistiques suffisamment documentées sur le bâti ancien étudié. La deuxième limite tient à la simplification nécessaire du modèle, qui repose sur un nombre réduit de nœuds représentatifs afin de conserver une structure lisible et exploitable. Enfin, le modèle

dynamique proposé reste limité à deux instants principaux, T0 et T10, et ne décrit pas encore de manière continue l'évolution temporelle des pathologies.

Ces limites ouvrent plusieurs perspectives de recherche. Une première perspective consisterait à enrichir les réseaux bayésiens dynamiques par l'introduction de plusieurs horizons temporels intermédiaires, afin de mieux représenter la cinétique réelle de dégradation des matériaux. Une seconde perspective porterait sur le couplage du modèle avec des données issues de l'instrumentation et du monitoring, telles que le suivi de l'ouverture des fissures, les mesures d'humidité, les contrôles de corrosion ou les relevés électrochimiques. Ces données permettraient de mettre à jour les probabilités du réseau de manière plus objective et progressive. Enfin, l'application de la démarche à un échantillon plus large de bâtiments anciens, appartenant à différentes typologies constructives, permettrait d'enrichir la base de connaissances et d'améliorer la robustesse du modèle.

En somme, ce mémoire montre que l'association de l'Analyse Préliminaire des Risques et du formalisme bayésien constitue une démarche pertinente pour l'évaluation du risque de défaillance structurelle des bâtiments anciens réhabilités. Elle permet de rationaliser le diagnostic, de quantifier les incertitudes, d'identifier les facteurs critiques et de proposer une aide à la décision adaptée aux spécificités de chaque site. Cette approche contribue ainsi à une gestion plus rigoureuse, plus préventive et plus durable du patrimoine bâti ancien.

Bibliographie

- Abramson, B., & Ng, R. T. (1993). *Using Bayesian Belief Networks for Forecasting Oil Prices*. University of British Columbia, Canada.
- AFNOR (2003). Norme NF X 60-510 : Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC). Association Française de Normalisation.
- Agostinelli, S., & Rotondi, R. (2003). Bayesian Belief Networks for Seismic Risk Assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 82(1), 1–13.
- American Concrete Institute (ACI). (2019). *ACI 562-19: Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures*. ACI Committee 562.
- Aven, T. (2016). Risk Assessment and Risk Management : Review of Recent Advances on Their Foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13.
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons, Chichester, Royaume-Uni.
- Balayssac, J.-P. & Garnier, V. (Éds.) (2021). *Non-Destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures*. Elsevier.
- Becker, A., & Nadim, W. (1999). Bayesian Networks for Fraud Detection in Banking Systems. *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Applications*, 23–29.
- Benachenhou, S. (2019). *Gestion des risques industriels : Approche systémique et méthode MADS-MOSAR*. Alger : OPU.
- Bertolini, L., Elsener, B., Polder, R., & Polder, R. B. (2013). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley-VCH.
- Cauvin, S. (2007). *L'incertitude et le risque : mieux les comprendre pour mieux les gérer*. AFNOR Éditions, Paris, France.
- CEI 300-3-9 (1995). Gestion de la sûreté de fonctionnement — Partie 3-9 : Analyse des risques dans les systèmes technologiques. Commission Électrotechnique Internationale.
- Cooke, R. M. (1991). *Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science*. New York: Oxford University Press.
- Croci, G. (1998). *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*. Computational Mechanics Publications.

- Dempster, A. P., Laird, N. M., & Rubin, D. B. (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 39(1), 1–38.
- DTU 20.1. (2013). *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments – Parois et murs*. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).
- Eurocode 6. (2005). *Calcul des ouvrages en maçonnerie (EN 1996)*. Comité Européen de Normalisation (CEN).
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons, Chichester, Royaume-Uni.
- Farsi, M. A. & Belazougui, M. (2002). Vulnérabilité sismique des bâtiments en Algérie. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (236), 5–20.
- Foncsi (2011). Les risques : définitions et concepts de base. Fondation pour une Culture de Sécurité Industrielle, Cahier n°2011-01, Toulouse.
- Fookes, P. G., Baynes, F. J., & Hutchinson, J. N. (2000). Total geological history: A model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. In *GeoEng2000 : International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, Australie.
- Heckerman, D., Mamdani, A., & Wellman, M. P. (1995). Real-World Applications of Bayesian Networks. *Communications of the ACM*, 38(3), 24–26.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Structural Analysis* (10th ed.). Pearson Education, New York, États-Unis.
- IEC 61025 (2006). Fault Tree Analysis (FTA). International Electrotechnical Commission.
- ISO 31000 (2018). Risk Management — Guidelines. International Organization for Standardization.
- ISO. (2010). *ISO 13822 :2010 – Bases for Design of Structures – Assessment of Existing Structures*. International Organization for Standardization, Genève, Suisse.
- Jensen, F. V. & Nielsen, T. D. (2007). *Bayesian Networks and Decision Graphs* (2e éd.). Springer.
- Kwag, S., Gupta, A., & Dinh, L. T. (2018). Risk Assessment Using Bayesian Networks and Critical Path Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(9), 04018080.

- Lakermi, A. (2021). *Analyse des risques géotechniques*. Cours et notes pédagogiques en géotechnique, Université de Tlemcen, Algérie.
- Lauritzen, S. L., & Spiegelhalter, D. J. (1988). Local Computations with Probabilities on Graphical Structures and Their Application to Expert Systems. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 50(2), 157–224.
- Lee, W. (2001). Bayesian Network-Based Diagnostic Systems for Equipment Maintenance. *Expert Systems with Applications*, 20(1), 57–63.
- Lefebvre, J. F., Gendreau, M., Hébert, J., & Boukari, M. (1995). Application of Bayesian Networks to Road Maintenance Management. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(5), 987–995.
- Lemaire, M. (2014). *Structural Reliability*. London : ISTE Ltd & John Wiley & Sons.
- McCabe, B., Abourizk, S., & Goebel, R. (1998). Belief Networks for Construction Performance Diagnostics. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(2), 93–100.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Melchers, R. E. & Beck, A. T. (2018). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (3e éd.). Wiley.
- Melchers, R. E. (1999). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Chichester, Royaume-Uni.
- Modarres, M. (2006). *Risk Analysis in Engineering*. CRC Press.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Pearl, J. (1988). *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann.
- Perilhon, P. (2012). *AMDEC : Guide pratique* (3e éd.). AFNOR Éditions.
- Smith, J. Q. (2005). *Bayesian Decision Analysis: Principles and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Thomas Bayes. (1763). *An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 53, 370–418.
- Verdel, T. (2007). *Analyse et gestion des risques géotechniques*. École des Mines de Nancy.
- Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H. & Haasl, D. F. (1981). *Fault Tree Handbook*. US Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0492.
- Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Eyrolles.

- Villemeur, A. (1992). *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*. Wiley.
- Zwingelstein, G. (1996). *Diagnostic des défaillances*. Hermès.