

Inférence bayésienne de la fiabilité structurelle d'une passe vannée de barrage à partir de son arbre de défaillance

[Bayesian inference of the structural reliability of a spillway gate from its fault tree]

Guy-de-Patience FTATSI MBETMI¹, François Juvenaul TAMO CHEKAM¹, Frédéric DUPRAT², and Wolfgang NZIE³

¹LASE, Université de Ngaoundéré, IUT, P.O. Box 455, Ngaoundéré, Cameroon

²LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04, France

³LA2MP, Université de Ngaoundéré, ENSAI, P.O. Box 455, Ngaoundéré, Cameroon

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Bayesian networks have shown their interest in the field of reliability to model the degradation of dynamical systems. The objective of this work is to set up a Bayesian network to model the degradation of the structural reliability of a spillway. For this purpose, a structural fault tree from the literature was transformed into a Bayesian network using equivalences with the various logic gates. Then, the distributions of the structural reliability of each node, determined in the literature by the condition index method, were implemented, and the Bayesian network was calculated. The inferences were made on the Bayesian lattice using the Monte Carlo algorithm. The Bayesian network built was deployed to assess the temporal evolution of the structural reliability of a spillway over a 100-year period.

KEYWORDS: transformation of a fault tree, Bayesian network, structural reliability, spillway, logic gates.

RESUME: Les réseaux bayésiens ont montré leurs intérêts dans le domaine de la fiabilité pour modéliser la dégradation des systèmes dynamiques. L'objectif de ce travail est de mettre en place un réseau bayésien permettant de modéliser la dégradation de la fiabilité structurelle d'un évacuateur de crues. À cet effet, un arbre de défaillances structurelles tiré de la littérature a été transformé en réseau bayésien en utilisant des équivalences avec les diverses portes logiques. Ensuite, les lois de distributions de la fiabilité structurelle de chaque nœud, déterminées dans la littérature par la méthode d'indice de condition, ont été implémentées, puis le réseau bayésien calculé. Les inférences ont été faites sur le réseau bayésien en utilisant l'algorithme de Monte Carlo. Le réseau bayésien construit a été déployé pour évaluer l'évolution temporelle de la fiabilité structurelle d'un évacuateur de crues sur une période de 100 ans.

MOTS-CLEFS: transformation d'un arbre de défaillance, réseau bayésien, fiabilité structurelle, évacuateur de crues, portes logiques.

1 INTRODUCTION

Compte tenu de l'importance des barrages en général, et des évacuateurs de crues (voir figure 1) en particulier, certains travaux de recherche ont été menés pour améliorer l'analyse de leurs fiabilités, à l'instar de [1], [2], [3], ainsi que le suivi de la détérioration de leurs structures [3], [4], [5], [6]. De manière générale, au nombre d'approches les plus populaires pour l'analyse fiabiliste l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) et les ADD (Arbres De Défaillances) peuvent être comptés. Cependant, ces dernières négligent les dépendances et dynamiques internes aux

systèmes, contrairement à l'utilisation des Réseaux Bayésiens (RB) par exemple. Dans ce travail, une brève présentation des RB sera faite, ainsi que le processus de leur construction à partir d'un ADD. Les résultats de l'application de cette méthodologie pour évaluer la fiabilité structurelle d'une passe vannée de barrage au cours du temps seront présentés.

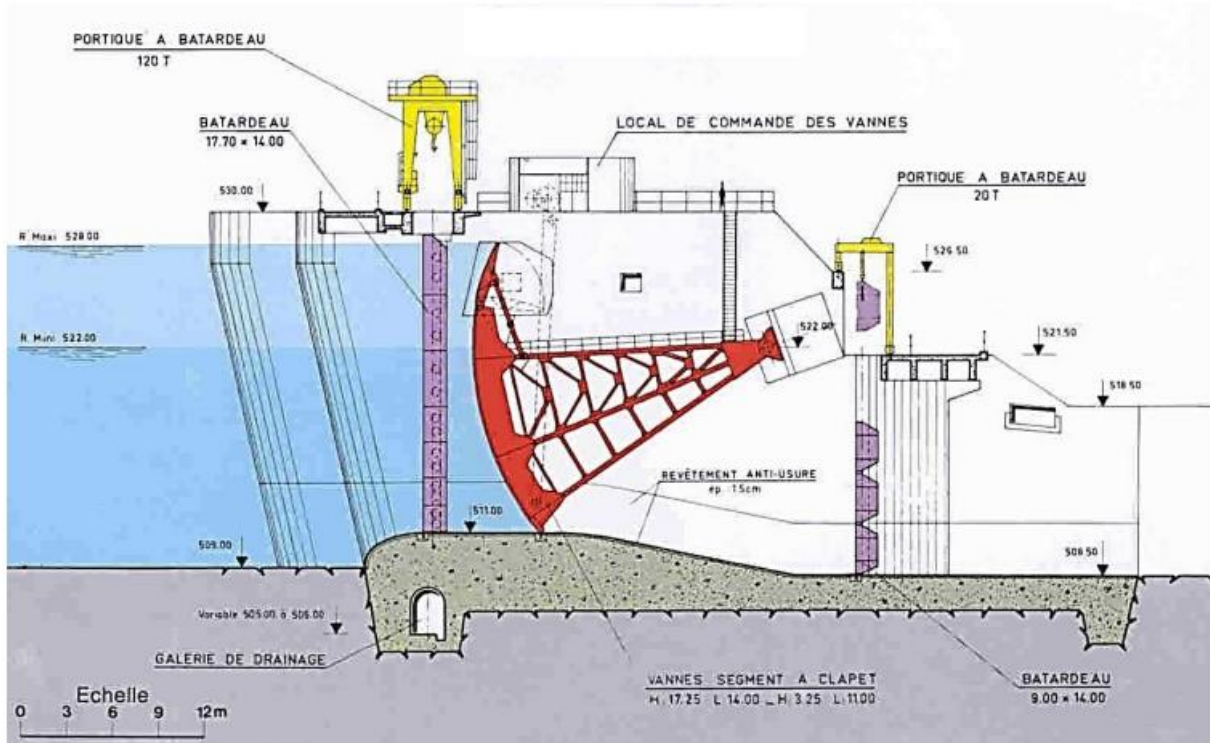


Fig. 1. Vue d'ensemble d'un évacuateur de crues [3], [7]

2 GENERALITES SUR LES RESEAUX BAYESIENS

Un réseau bayésien [8], [9] est un graphe orienté sans circuit, dans lequel chaque nœud représente une variable du système, et chaque arc représente une relation de dépendance directe entre deux variables. C'est un outil mathématique reposant sur la théorie des probabilités et la théorie des graphes. Le théorème de Bayes s'écrit selon l'équation 1 découlant de la figure 2.

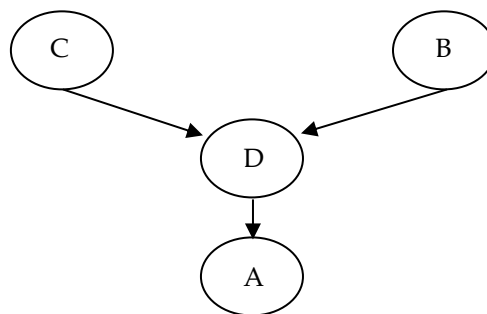


Fig. 2. Exemple d'un Réseau bayésien à quatre (04) nœuds

$$P\left(\frac{A}{B}, c\right) = \frac{P\left(\frac{B}{A|c}\right) \times P\left(\frac{A}{c}\right)}{P\left(\frac{B}{c}\right)} \quad (1)$$

Où: $P(A|B, c)$ est la probabilité a posteriori de l'événement A, $P(A|c)$ est la probabilité a priori de l'événement A, $P(B|A, c)$ est la probabilité de B si l'on suppose que A est vrai dans un contexte c, Elle est appelée aussi la "vraisemblance"; et $P(B|c)$ est la normalisation.

3 METHODOLOGIE ADOPTÉE

En utilisant la procédure indiquée par [10], [11] et illustrée par l'exemple de la figure 3 ci-après, l'arbre de défaillances (ADD) structurelles de la figure 4, présenté à l'origine par [12], puis par [2], [3], sera transformé en réseau bayésien (RB).

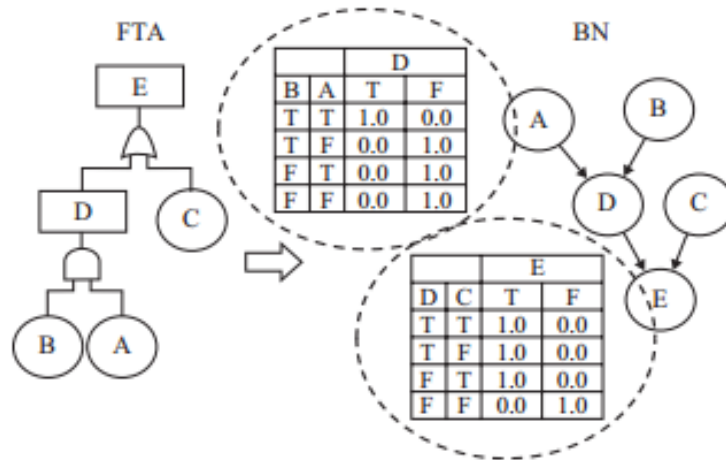


Fig. 3. Processus de transformation d'un arbre de défaillances en réseau bayésien

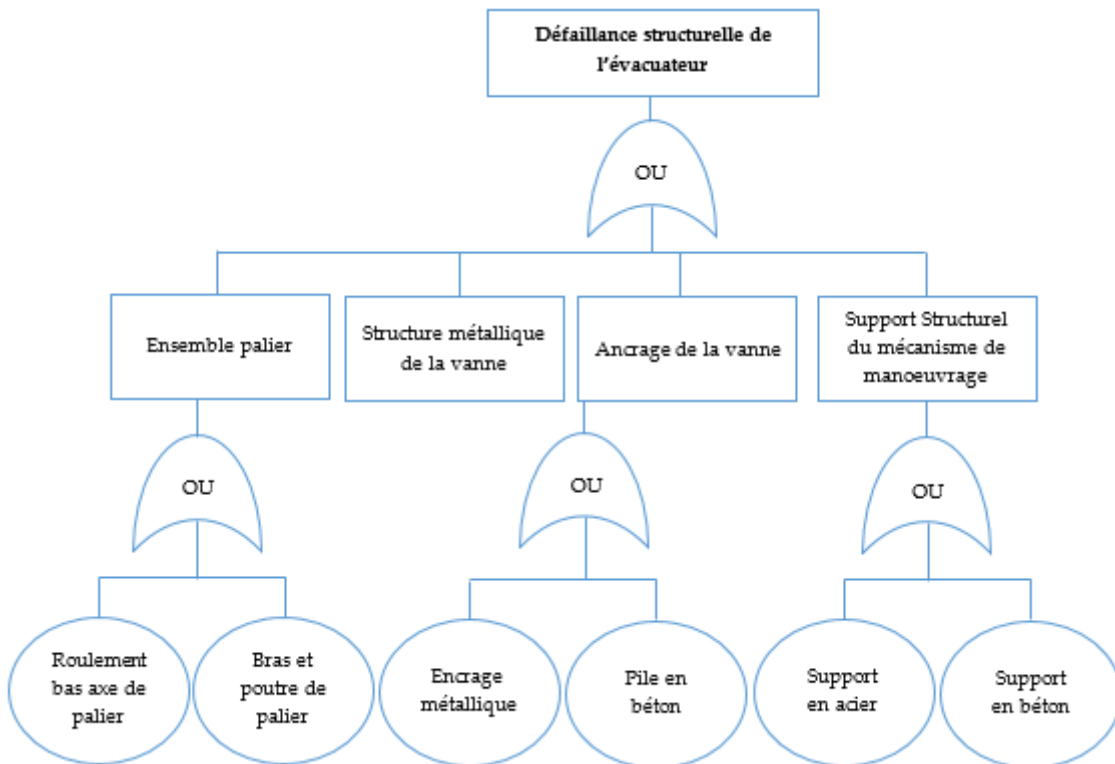


Fig. 4. Arbre de défaillance structurelle de l'évacuateur de crues

Les évènements de base (respectivement intermédiaires et redoutés) de l'ADD deviennent les nœuds racines (respectivement intermédiaires et feuilles) du RB. Les probabilités de défaillance des évènements de base de l'ADD deviennent les probabilités à priori des nœuds du RB. Les tables de vérité des portes logiques de l'ADD deviennent les tables de probabilités conditionnelles initiales du RB.

Ensuite, les lois de distributions pour l'apprentissage ont été déterminées du retour d'expérience présenté dans la littérature [1], [13], ainsi que calculer par la méthode d'indice de condition [14].

Enfin, l'inférence approchée par la méthode de Monte Carlo, adoptée en raison de ses meilleures performances, se fait selon l'expression ci-dessous.

$$P(X(1), X(2), X(3), \dots, X(T)) = \prod_{t=1}^T \prod_{i=1}^n P\left(\frac{X_i(t)}{\text{parents}(X_i(t))}\right) \quad (2)$$

Où t est l'indice temporel sur les T intervalles de temps considérés, et n est le nombre de variables qui interviennent dans le processus d'évaluation de la fiabilité de l'évacuateur de crues dans le temps.

La création, l'apprentissage et l'inférence du modèle du réseau bayésien construit ont été programmés avec le langage python en utilisant principalement la bibliothèque pyAgrum.

4 RESULTATS

4.1 IDENTIFICATION DES VARIABLES ET STRUCTURE DU RESEAU

Les désignations et codification des variables du réseau bayésien déduit de l'arbre de défaillances structurelles d'une passe vannée de barrage sont données dans le tableau 1.

Les lois de distribution de fiabilité du système à considérer pour les différents nœuds du réseau Bayésien [14], qui ont été obtenues par l'application de la méthode d'Indice de Condition aux données de retours d'expériences de [15], sont également indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1. Codification et lois de distributions des variables du réseau bayésien

Codification	Désignation	Loi	Paramètres	Périodes d'observation (année)
R_B_A_P	Roulement Bas Axe de Palier	Weibull	$\alpha = 129 ; \beta = 5,18$	100
B_P_P	Bras et Poutre de Palier	Weibull	$\alpha = 65,47 ; \beta = 4,00$	100
E_M	Ancrage Métallique	Weibull	$\alpha = 70,86 ; \beta = 3,35$	100
P_B	Pile en Béton	Weibull	$\alpha = 74,15 ; \beta = 5,05$	100
S_A	Support en Acier	Weibull	$\alpha = 67,73 ; \beta = 5,41$	100
S_B	Support en Béton	Weibull	$\alpha = 67,73 ; \beta = 5,42$	100
S_M_V	Structure Métallique de la Vanne	Weibull	$\alpha = 89,10 ; \beta = 5,32$	100

Où l'expression de la fiabilité de la loi de Weibull à deux paramètres est:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3)$$

Et en faisant un développement mathématique, on obtient celui du temps t (avec $t \in [0; 100]$) en fonction de la fonction de densité qui est comme suit:

$$t = \alpha \left[\ln\left(\frac{1}{R}\right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

4.2 STRUCTURE DU RESEAU

La méthodologie de conversion d'un arbre de défaillance en réseau bayésien, illustrée graphiquement plus haut à la figure 3, appliquée à l'arbre de défaillances structurelles de l'évacuateur de crues présenté à la figure 4, donne la structure graphique du réseau bayésien présentée à la figure 5. L'indépendance entre les nœuds de bases (nœuds parents) est justifiée par la structure du système.

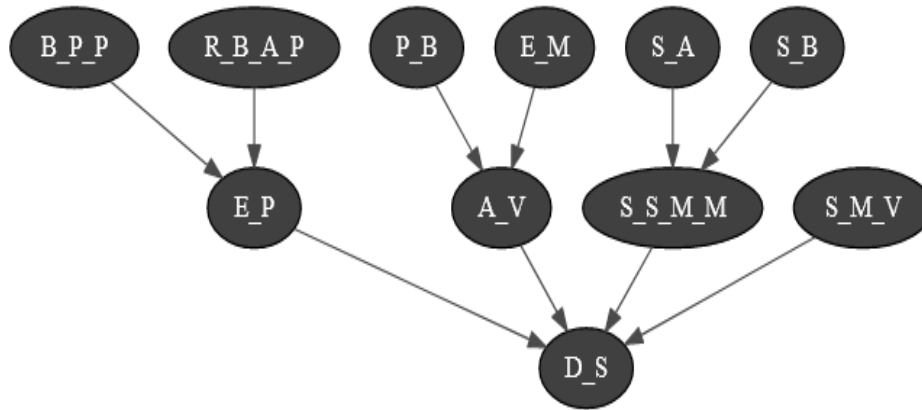


Fig. 5. Réseau bayésien des défaillances structurales d'un évacuateur de crues

4.3 LOIS DE DISTRIBUTIONS DES NŒUDS DU RESEAU ET IMPLEMENTATION

Les différentes lois ainsi que leurs paramètres respectifs utilisées pour la simulation du réseau sont présentées dans le tableau 1, et obtenus de [14]. Les données utilisées dans le cadre de ce travail pour le réseau ont été générées par les simulations de Monte-Carlo sur ces lois.

L'implémentation du réseau bayésien s'est faite en utilisant en langage python certaines fonction de la bibliothèque pyAgrum.

Sur la figure 6 ci-dessous est présentée l'inférence effectuée sur le réseau dans le cadre de son utilisation pour le calcul de la fiabilité structurelle de l'évacuateur de crue sur une période de cent ans (100 ans).

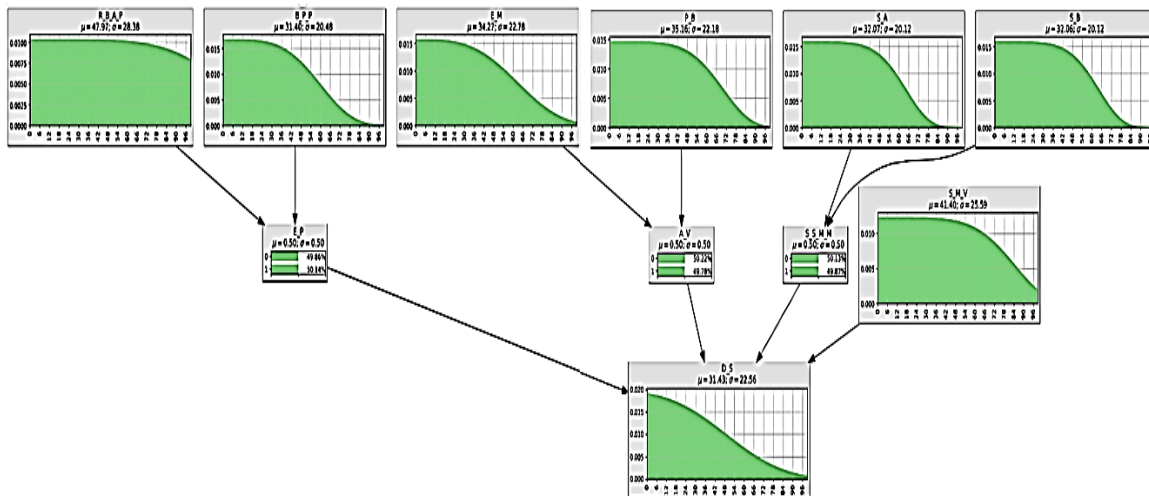


Fig. 6. Inférence sur le réseau bayésien construit

4.4 FIABILITÉ DE L'ÉVACUATEUR DE CRUE

Après la construction, la caractérisation et le calcul du réseau, il a été utilisé pour évaluer la fiabilité structurelle de l'évacuateur de crues dans le temps conformément aux équations 2, 3 et 4. La figure 7 nous présente la courbe de fiabilité de la défaillance structurelle d'un évacuateur de crues obtenue après simulation du réseau bayésien sur une période de 100 ans.

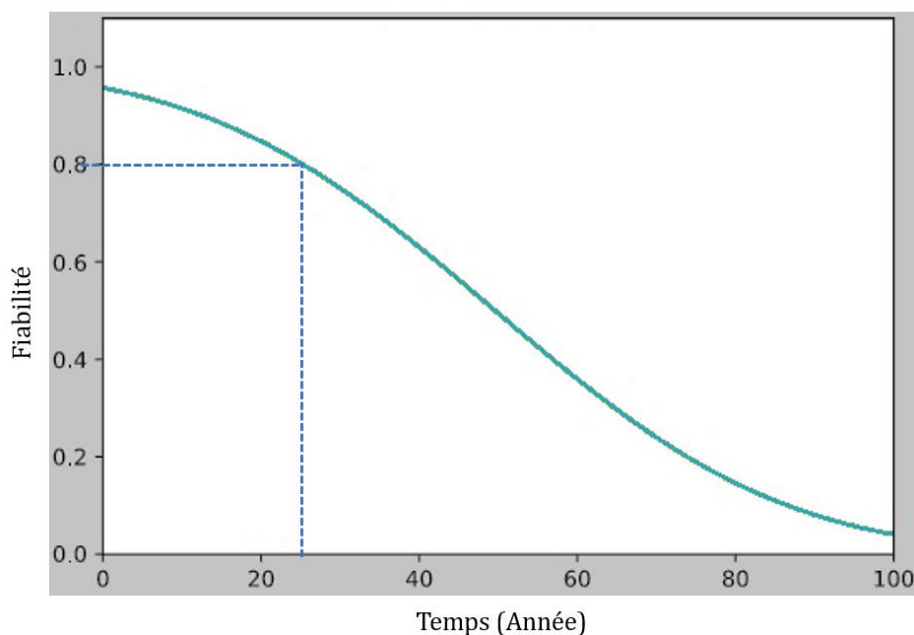


Fig. 7. Évolution de la Fiabilité de l'évacuateur de crue dans le temps

Nous constatons, sans surprise, que la fiabilité structurelle de l'évacuateur de crue diminue plus rapidement dans le temps que celles des éléments qui le constituent. Au bout de vingt-cinq années de service, la fiabilité structurelle de l'évacuateur de crues prédite est d'environ 80%. Plus couramment, une telle courbe pourrait servir à planifier les opérations de maintenance à partir d'un seuil de fiabilité. Le réseau bayésien de la figure 6 peut être utilisé pour actualiser la courbe d'évolution de la fiabilité chaque fois que de nouvelles informations sont collectées sur l'état des éléments structurels de l'évacuateur de crue, notamment suite à des inspections.

5 CONCLUSION

Ce travail développe un réseau bayésien permettant de calculer la probabilité de défaillance structurelle des évacuateurs de crues dans le but de mettre en place une politique de maintenance prévisionnelle. Suite à la transformation de l'arbre de défaillances structurelles d'un évacuateur de crues et à l'utilisation de lois de fiabilité indiquées dans la littérature, un réseau bayésien a été construit et déployé. Il permet d'évaluer dans le temps, l'évolution de la fiabilité structurelle d'un évacuateur de crues sur une période de 100 ans. Ce changement d'outils méthodologique permet de passer d'une évaluation statique à une évaluation dynamique de la fiabilité structurelle d'un évacuateur de crues. Le réseau bayésien obtenu offre également la possibilité de mettre à jour le modèle global de fiabilité chaque fois qu'il y a de nouvelles informations sur l'état de ses composants. La procédure d'actualisation de modèles bayésiens, ainsi que leur utilisation pour l'analyse de sensibilité de la variation d'états des composants sur l'état du système pourraient être abordées ultérieurement.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les différents laboratoires pour le cadre fourni et mis à notre disposition pour l'accomplissement de ce travail.

REFERENCES

- [1] P. Broy, « Evaluation de la sûreté de systèmes dynamiques hybrides complexes: application aux systèmes hydrauliques », PhD Thesis, Troyes, 2014.
- [2] M. Kalantarnia, L. Chouinard, et S. Foltz, « Objective procedure for optimization of inspection and testing strategies for spillways », *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 22, n° 1, p. 04015011, 2016.
- [3] G. Ftatsi Mbetmi, « Fiabilité résiduelle des ouvrages en béton dégradés par réaction alcali-granulat: application au barrage hydroélectrique de Song Loulou », PhD Thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2018.
- [4] E. Bismut et D. Straub, « Optimal adaptive inspection and maintenance planning for deteriorating structural systems », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 215, p. 107891, 2021.
- [5] F. Duprat, N. T. Vu, et A. Sellier, « Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures », *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, p. 597-605, sept. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.103.
- [6] D. Straub et A. Der Kiureghian, « Bayesian network enhanced with structural reliability methods: methodology », *J. Eng. Mech.*, vol. 136, n° 10, p. 1248-1258, 2010.
- [7] K. F. K. Donchi, Ftatsi Mbetmi Guy-De-Patience, B. Djeumako, et Fotsa Mbogne David Jaurès, « Modélisation et estimation de la fiabilité dynamique d'un évacuateur de crues par réseaux de Petri stochastiques », 2022.
- [8] J. Pearl, « Bayesian networks: A model of self-activated memory for evidential reasoning », in Proceedings of the 7th Conference of the Cognitive Science Society, University of California, Irvine, CA, USA, 1985, p. 15-17.
- [9] P. Naïm, P. Wuillemin, P. Leray, O. Pourret, et A. Becker, « Introduction aux réseaux bayésiens », *Réseaux Bayésiens*, p. 20-22, 2007.
- [10] A. Bobbio, L. Portinale, M. Minichino, et E. Ciancamerla, « Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 71, n° 3, p. 249-260, 2001.
- [11] S. Kabir et Y. Papadopoulos, « Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review », *Saf. Sci.*, vol. 115, p. 154-175, 2019.
- [12] R. C. Patev, C. Putcha, et S. D. Foltz, « Methodology for risk analysis of dam gates and associated operating equipment using fault tree analysis », ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS, 2005.
- [13] M. Barker, B. Vivian, et D. S. Bowles, « Reliability assessment for a spillway gate upgrade design in Queensland, Australia », in *United States Society on Dams Conference*, Citeseer, 2006.
- [14] G. Ftatsi Mbetmi, F. J. Tamo Chekam, F. Duprat, et G. E. Ntamack, « Détermination des lois de distribution des éléments structurels des évacuateurs de crue par la méthode d'indice de condition », *Int. J. Innov. Sci. Res.*, vol. 78, no 1, p. 112-124, 2025.
- [15] L. Chouinard, S. Foltz, J.-G. Robichaud, et R. Wittebolle, « Condition assessment methodology for spillways », 2008.