



**HAL**  
open science

# Modélisation et estimation de la fiabilité dynamique d'un évacuateur de crues par réseaux de Petri stochastiques

Kagho Floris Khalil Donchi, Guy-De-Patience Ftatsi Mbetmi, David Jaurès  
Fotsa-Mbogne, Bonaventure Djeumako

► **To cite this version:**

Kagho Floris Khalil Donchi, Guy-De-Patience Ftatsi Mbetmi, David Jaurès Fotsa-Mbogne, Bonaventure Djeumako. Modélisation et estimation de la fiabilité dynamique d'un évacuateur de crues par réseaux de Petri stochastiques. 2022. hal-03714733

**HAL Id: hal-03714733**

**<https://inria.hal.science/hal-03714733>**

Preprint submitted on 5 Jul 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation et estimation de la fiabilité dynamique d'un évacuateur de crues par réseaux de Petri stochastiques

Kagho Floris Khalil Donchi<sup>1</sup>, Guy-de-patience Ftatsi Mbetmi<sup>2</sup>, David Jaurès Fotsa-Mbogne<sup>3</sup>,  
Bonaventure Djeumako<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie mécanique, ENSAI, Université de Ngaoundéré, Cameroun

<sup>2</sup>Département de Génie Mécanique, IUT, Université de Ngaoundéré, Cameroun

<sup>3</sup>Département de Mathématiques et Informatique, ENSAI, Université de Ngaoundéré, Cameroun

\*E-mail : donchi.khalil@gmail.com; guy.ftatsi@univ-ndere.cm; mjd.fotsa@univ-ndere.cm

---

## Résumé

La présente étude propose une méthodologie permettant d'évaluer la probabilité de défaillance d'origine électrique d'une vanne d'évacuateur de crues dans le temps par l'implémentation des réseaux de Petri stochastiques. Pour ce faire, l'arbre de défaillance du blocage d'origine électrique d'une vanne d'évacuateur de crues tiré de la littérature nous a servi de point de départ. En appliquant les équivalences « porte logique-réseau de Petri » à ces derniers, nous avons pu construire le réseau de Petri stochastique avec réparation modélisant les différents états de fonctionnement de la vanne. La littérature a permis de déterminer les différentes lois de distribution des événements de base à attribuer à chaque transition du réseau. L'implémentation et les calculs ont été menés sur le logiciel de simulation des réseaux de Petri stochastique GRIF (Graphique Interactif pour la Fiabilité) développé par JP-SIGNORET. L'évolution de la fiabilité électrique d'un évacuateur de crues dans le temps a été estimée à l'issue des simulations.

## Mots-Clés

Fiabilité dynamique ; évacuateur de crue ; réseaux de Petri stochastiques

---

## I INTRODUCTION

Les barrages sont protégés des crues par un système de décharge appelé évacuateur de crues (Annexe 1). Il est constitué des organes qui permettent le transit des crues à travers le barrage en contrôlant les côtes maximales atteintes par le barrage de manière à ce qu'elles restent inférieures aux côtes assurant la stabilité de l'ouvrage [1].

La fiabilité à la gestion d'un barrage d'accumulation dépend essentiellement de la sécurité des évacuateurs de crue, de l'exploitation des débits solides (transport solide) et de l'exploitation optimale des apports au profit de la consommation. En effet, le dysfonctionnement ou le blocage d'un évacuateur de crues peut conduire à la rupture du barrage entraînant l'écoulement à l'aval de la totalité du volume d'eau de la retenue occasionnant ainsi des conséquences dramatiques sur l'environnement et le matériel ainsi que des pertes en vies humaines. Ce fut le cas par exemple de la rupture des 62 barrages en Chine en août 1975 durant une tempête extrême ayant causé la mort de plus de 26 000 personnes [2].

La sûreté de fonctionnement dispose de plusieurs approches dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes parmi lesquels les arbres de défaillance et les réseaux de Petri. L'analyse par arbre de défaillances porte sur un événement particulier et son application à tout un système peut s'avérer fastidieuse. Les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) quant à eux se sont révélés être un outil populaire et utile pour la modélisation et l'analyse des performances des systèmes stochastiques complexes. Ils sont bien adaptés à la représentation de la concurrence, la synchronisation, la préséance et la priorité [3].

A l'exemple des travaux de [4,7], le présent travail s'inscrit dans le cadre de la modélisation et de l'estimation de la fiabilité dynamique électrique d'un évacuateur de crues. Pour ce faire, un réseau de Petri stochastique sera élaboré par transformation d'un arbre de défaillance électrique tiré de la littérature. L'implémentation et la simulation de ce réseau permettra de déterminer l'évolution de la fiabilité.

La suite de ce papier s'organise autour de la Section 2 qui présente une revue de la littérature sur la fiabilité des évacuateurs de crues. La Section 3 s'intéresse au matériel utilisé et aux méthodes implémentées dans ce travail. La Section 4 donne l'essentiel des résultats obtenus et leur discussion à la lumière de la littérature, tandis que la Section 5 conclut le papier.

## II REVUE DE LA LITTÉRATURE

Lors d'une crue, la défaillance d'un évacuateur de crue est susceptible d'avoir des conséquences lourdes en termes de vies humaines [8], de pertes économiques et de dommages environnementales.

Fort de ces enjeux, il convient en conséquence de prolonger la durée de service autant que possible grâce à une conception et une réalisation conforme, un suivi et une maintenance appropriée au travers d'outils de contrôle et d'aide à la décision efficaces. Pour ce faire, plusieurs travaux ont été effectués pour répondre à cette préoccupation.

Dans ses travaux, Parent [9] fait reposer l'aspect aléatoire sur le débit entrant, et non sur le fonctionnement des composants : le réservoir est considéré comme fiable et agrégé en une seule entité.

Dans ses travaux, Patev [10] a effectué une étude statique sur les évacuateurs de crue et a pu ressortir les arbres de défaillance relativement à l'évènement redouté qu'est le blocage de la vanne

L'US Army Corps évalue le risque de défaillance pour les évacuateurs de crues vannés en utilisant la méthode statique des index de condition (Condition Indexing ou CI) [11].

Les études de Barker [12] reposent sur les arbres d'événements, les arbres de défaillances ou les méthodes de type AMDEC. Elles prennent plusieurs paramètres en compte, notamment ceux relatifs à la fiabilité humaine ou à l'architecture globale du système. Cependant, la plupart des groupes de composants sont agrégés en sous-systèmes, et le temps n'est pas pris en compte.

Kalantarnia [13] se sert des arbres de défaillance proposés par [10] pour évaluer l'indisponibilité et la fiabilité dormante d'une vanne par la méthode des index de condition et une plateforme développée personnellement.

Broy [14] évalue la fiabilité des EC grâce à l'outil GASPART qui est une base de connaissances dédiée à la modélisation des évacuateurs de crues. Cette base de connaissances, qui se sert des systèmes experts, est développée sur la plate-forme logicielle KB3.

Les travaux de Ftatsi Mbetmi [15] abordent le problème du blocage des vannes d'évacuation de crues dû au gonflement de piles en béton par des modèles de substitution.

Leclercq [16] applique une méthodologie pour la considération des incertitudes de modélisation dans la performance sismique des évacuateurs de crues.

### III MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les évacuateurs de crues (Annexe 1) sont des ouvrages hydrauliques équipant de nombreux barrages car ils permettent le maintien d'une cote maximale tout en transitant sans surélévation notable des débits des crues importantes. Ils ont l'important rôle de garantir la sécurité du barrage et des personnes. La caractéristique principale d'un évacuateur, quel que soit son type, est sa débitance qui va permettre le transit de crues très importantes, sans mettre en péril le barrage.

#### 3.1 Les arbres de défaillance statiques

Les arbres de défaillances, représentations graphiques de type arbre généalogique, modélisent l'ensemble des combinaisons d'événements, qui conduisent à un événement redouté (ER). C'est une démarche d'analyse d'événement dont les objectifs sont résumés en quatre points :

- La recherche des événements élémentaires, ou leurs combinaisons qui conduisent à un ER.
- La représentation graphique des liaisons entre les événements. Il existe une représentation de la logique de défaillance du système pour chaque ER ; ce qui implique qu'il y aura autant d'arbres de défaillances à construire que d'ER retenus.
- L'analyse qualitative qui permet de déterminer les faiblesses du système. Elle est faite dans le but de proposer des modifications pour améliorer la fiabilité du système.
- Il est possible d'évaluer la probabilité d'apparition de l'ER connaissant la probabilité des événements élémentaires.

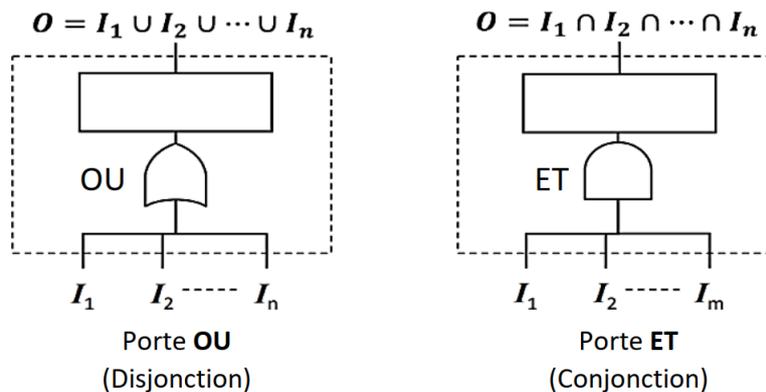


FIGURE 1 – Exemple de portes logiques [17]

#### 3.2 Les réseaux de Petri stochastiques

Un réseau de Petri (Figure 2) est un outil de modélisation graphique et mathématique utilisé pour l'analyse des systèmes complexes, distribués et concurrents. C'est un graph bipartite défini par le sextuple  $N = (P, T, A, K, W, M0)$ , où :

- $P = p1, p2, p3, \dots, pn$  est un ensemble fini de places généralement représentées par des cercles ;
- $T = t1, t2, t3, \dots, tm$  est un ensemble fini de transition matérialisées par des barres rectangulaires ;
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  est un ensemble fini d'arcs reliant soit une place à une transition soit une transition à une place ;
- $K = 1, 2, 3, \dots$  est le nombre de jetons que peut prendre la place P, les jetons sont représentés par des points ;
- $W : A \rightarrow 1, 2, 3, \dots$  est le poids d'un arc (Une transition est dite « franchissable » si chacune de ses places d'entrée contient un nombre de jetons supérieur ou égal à celui indiqué sur la flèche correspondante (poids de l'arc)) ;
- $M0 : P \rightarrow 1, 2, 3, \dots$  est le marquage initial du réseau de Petri.

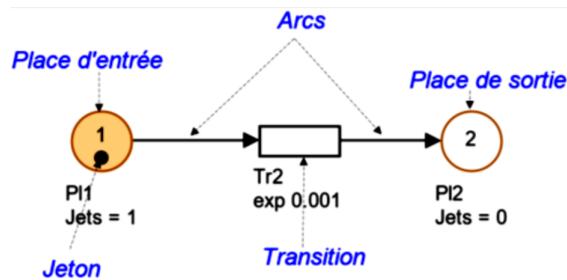


FIGURE 2 – Exemple de réseau de Petri de base

Les réseaux de Petri stochastiques ont été introduits par Natkin et Molloy qui ont introduit cette nouvelle extension (RdPS) pour répondre à certains problèmes d'évaluation quantitative des systèmes informatiques industriels [18]. L'introduction explicite du temps dans les réseaux de Petri est nécessaire pour modéliser des phénomènes où le temps joue un rôle majeur (systèmes à temps réel industriel à titre d'exemple), et/ou si l'on veut obtenir des mesures de performance du système étudié. L'aspect stochastique de ce type de réseaux de Petri est dû à ses transitions qui suivent des lois de probabilités découlant des observations sur les divers changements d'état du système modélisé.

### 3.3 Passage de l'Arbre de défaillance aux Réseaux de Petri

Une relation logique entre les réseaux de Petri et les arbres de défaillance peut être établie [19,20]. La Figure ci-après présente les équivalences de conversion pour les portes « OU » et « ET ».

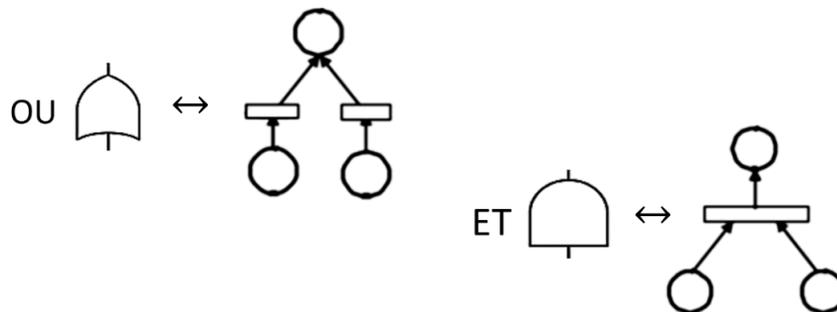


FIGURE 3 – Equivalences entre portes logiques « OU » et « ET » et réseaux de Petri

## IV RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.1 Construction du RdPS de la défaillance électrique d'une vanne

L'Annexe 2 représente l'arbre de défaillance d'une vanne d'évacuateur de crues du point de vue électrique. Nous pouvons ainsi observer l'ensemble des combinaisons de causes conduisant à l'événement redouté (défaillance électrique) au tableau 1.

TABLE 1 – Description tabulaire de l'arbre de défaillance du point de vue électrique de la vanne

| Entrée(s)   | Sortie(s)                                    | Porte logique |
|---|--|---------------|
| Turbo-alternateur 1<br>Turbo-alternateur 2  | Turbo-alternateur                            | ET            |
| Lignes de transmission<br>Equipements de station de distribution<br>/ Poste de transformation | Système de transmission au réseau commercial | ET            |
| Turbo-alternateur<br>Système de transmission au réseau commercial                             | Alimentation poste de transformation         | ET            |
| Alimentation poste de transformation<br>Alimentation de secours                               | Panne de la source d'alimentation            | ET            |
| Panne moteur<br>Panne de la source d'alimentation<br>Panne du circuit de contrôle             | Défaillance Electrique                       | OU            |

A partir de cet arbre de défaillance statique et en se référant aux différentes méthodes de transformation ou équivalences entre portes logiques et réseau de Petri, vu précédemment, nous construisons ainsi le réseau de Petri stochastique de défaillance avec réparation (Figure 4).

Les lois de probabilités à considérer pour les transitions stochastiques du réseau de Petri obtenu sont tirées des résultats de traitement de données de retour d'expérience de l'annexe C de [13], du tableau 2.

TABLE 2 – Lois de probabilité déterminées à partir de la revue de la littérature [Kalantarnia]

| Organe  | Lois de distribution | Paramètres               | Age actuel du composant (Années) |
|---|----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Panne moteur (PM)   | Weibull              | $\alpha = 68, \beta = 1$ | 50                               |
| Panne du circuit de contrôle (PCC)                                      | Weibull              | $\alpha = 83, \beta = 1$ | 50                               |
| Alimentation de secours (AS)  | Weibull              | $\alpha = 50, \beta = 1$ | 50                               |
| Turbo alternateur 1 (TA1)   | Weibull              | $\alpha = 55, \beta = 1$ | 50                               |
| Turbo alternateur 2 (TA2)   | Weibull              | $\alpha = 55, \beta = 1$ | 50                               |
| Lignes de transmission (LT)   | Weibull              | $\alpha = 28, \beta = 1$ | 50                               |
| Equipements de station de distribution /poste de transformation (ESDPT) | Weibull              | $\alpha = 4, \beta = 1$  | 50                               |

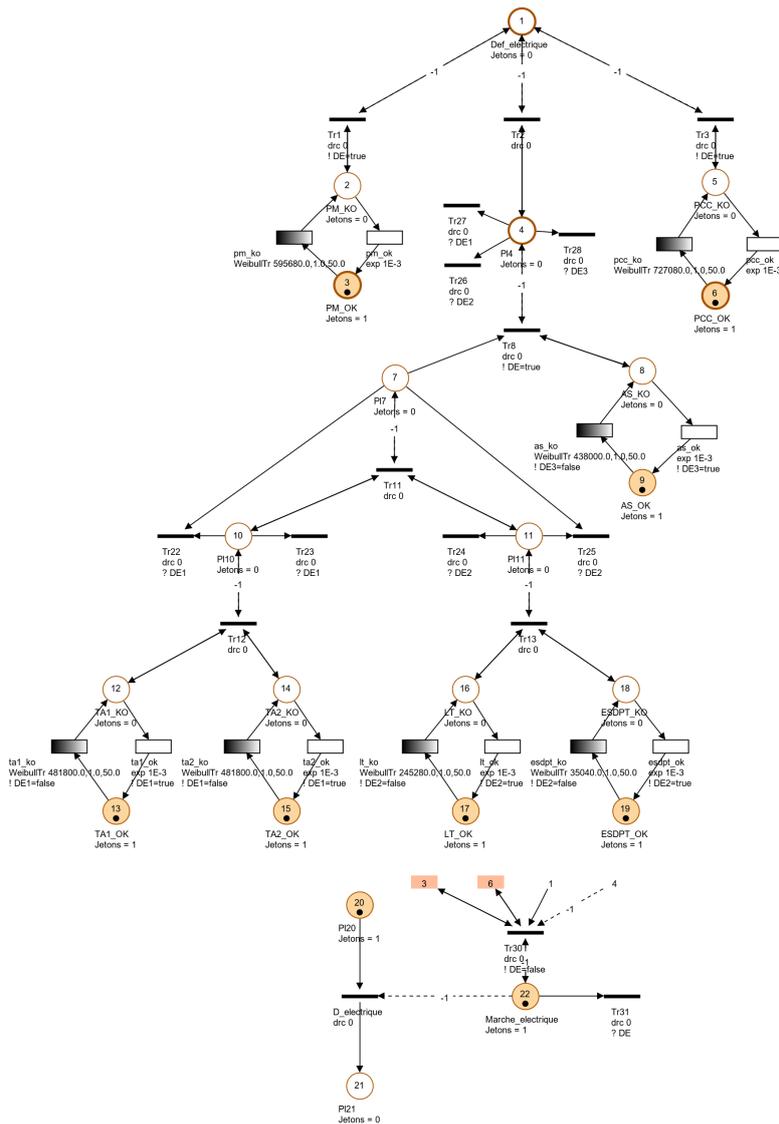


FIGURE 4 – Réseau de Petri stochastique du bloc "défaillance électrique" de la vanne

TABLE 3 – Variables du réseau

| Domaine | Nom | Définition/Valeur initiale | Valeur |
|---------|-----|----------------------------|--------|
| Booléen | DE  | false                      | false  |
| Booléen | DE1 | false                      | false  |
| Booléen | DE2 | false                      | false  |
| Booléen | DE3 | false                      | false  |

Les messages utilisés sur les transitions sont des variables booléennes permettant la communication entre les différentes transitions lors de leur franchissement et ainsi, modéliser le plus simplement possible le comportement dynamique de tous les états du système. Les variables utilisées sur le réseau de Petri stochastique de notre système sont indiquées dans le tableau 3.

## 4.2 Evolution de la Fiabilité électrique de la vanne au cours du temps

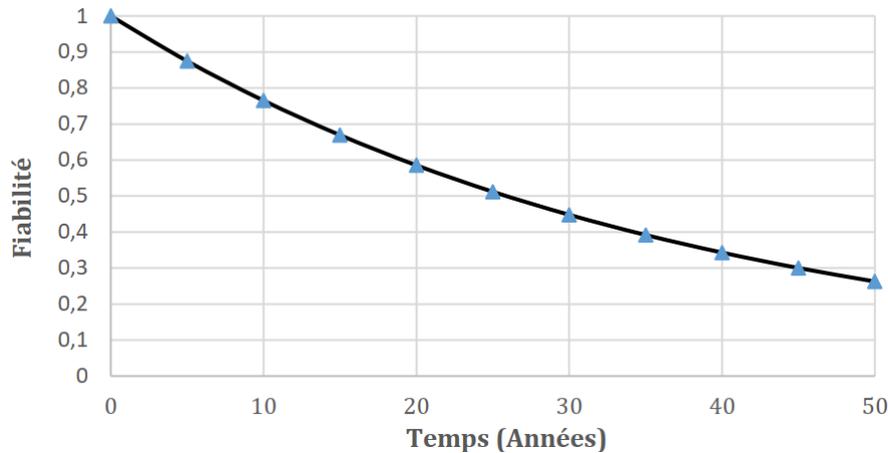


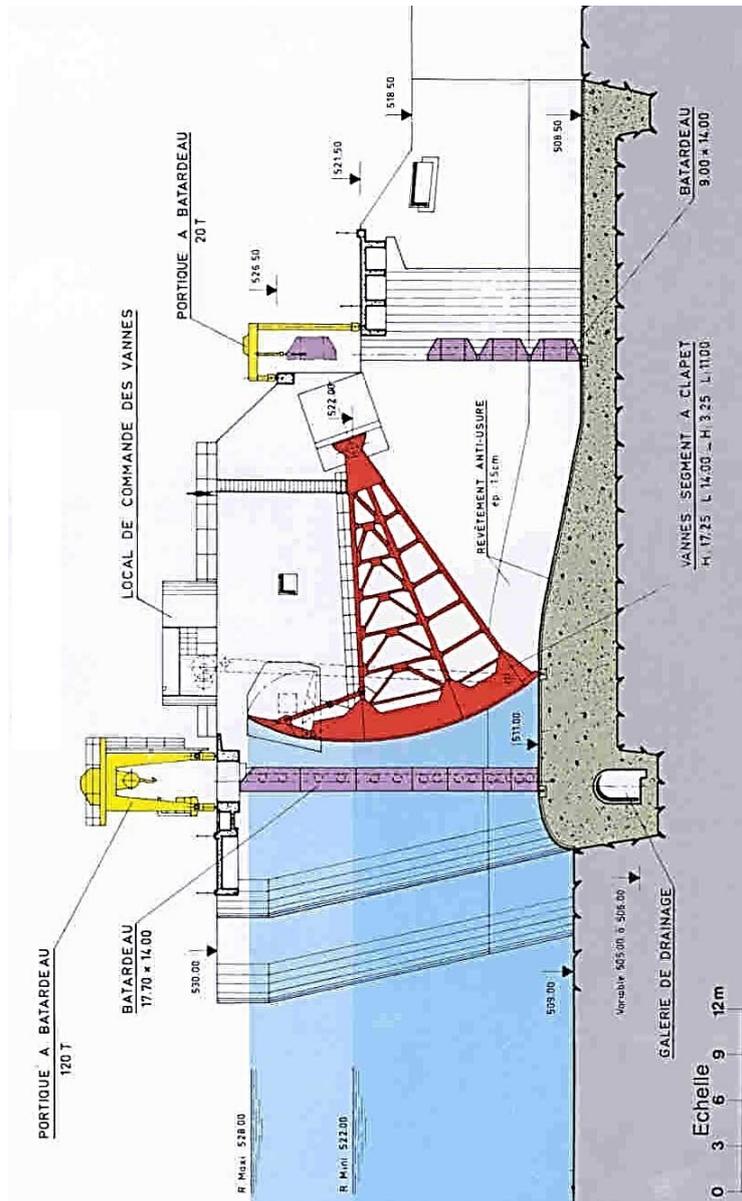
FIGURE 5 – Evolution de la Fiabilité électrique de la vanne au cours du temps

Après implémentation et simulations du RDPS élaboré précédemment, nous avons ainsi déterminé la probabilité de défaillance de la vanne en scrutant, lors de chaque histoire, la fréquence de tir de la transition  $D_{\text{électrique}}$  aux instants successifs  $t = 5, 10, 15, \dots, 50$  ans. Pour chacune de ces estimations, nous avons procédé à  $N = 107$  simulations qui ont toutes pris moins de 5 minutes sur un micro-ordinateur HP EliteBook i5. Les résultats ainsi obtenus sont représentés par la Figure 5. [10] est le principal auteur ayant ressorti les arbres de défaillance statique d'un évacuateur de crue. La plupart des études relativement à la fiabilité de cet équipement s'en sont servis comme base objective pour aboutir à leur fin [13], [15] Avec 73.74% de chances pouvant conduire au blocage de la vanne dans 50 années d'exploitation de l'évacuateur de crues, les défaillances électriques est l'une des causes principales après le processus de décision (80%) et la collecte d'information (76%) évalué par [Kalantarnia]. Ceci après avoir pris en compte le nombre réel de composants (du point de vue électrique) de la vanne en y intégrant la composante dynamique comme l'a fait [14].

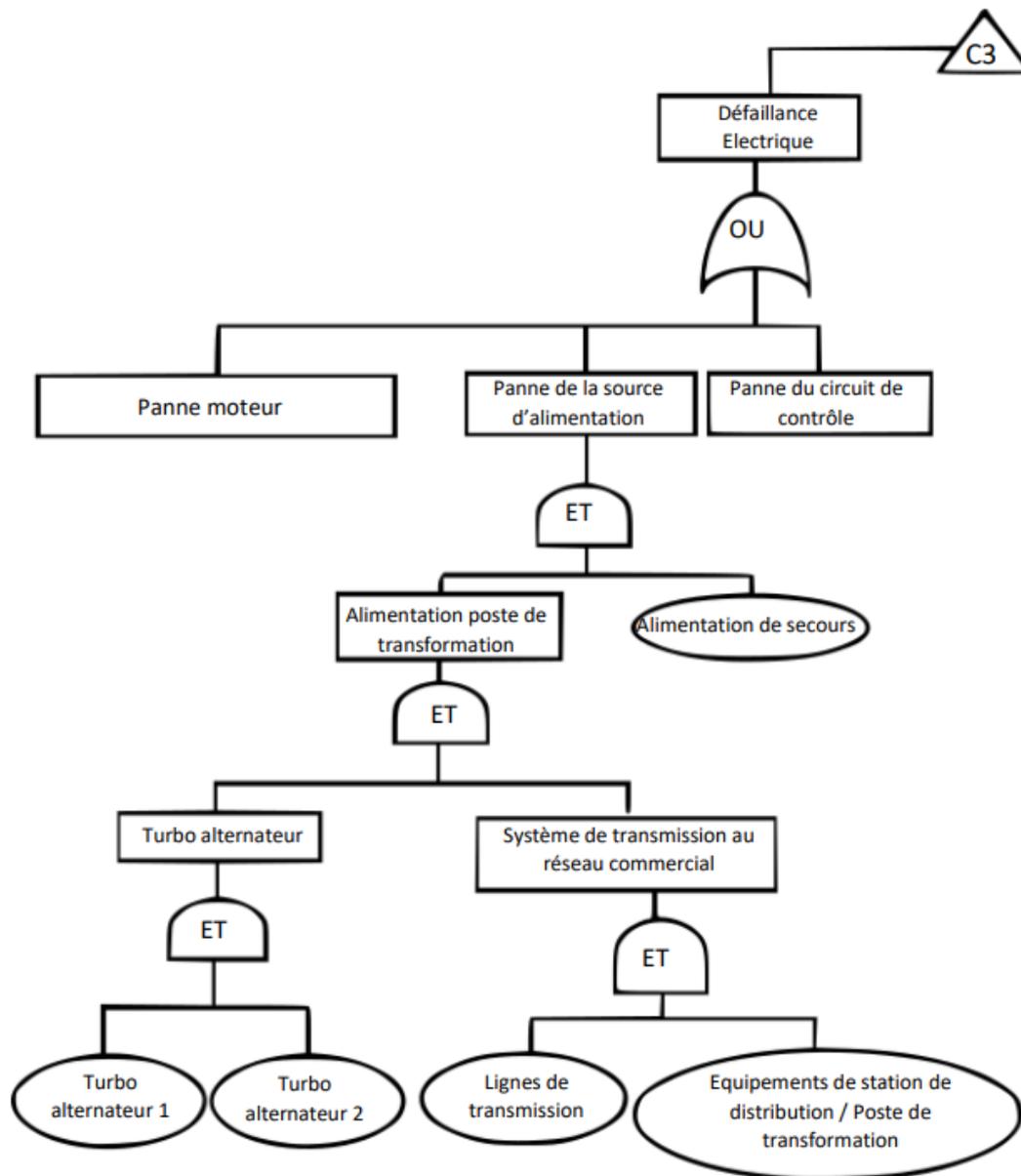
## V CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer la fiabilité associée aux défaillances électriques d'une vanne d'évacuateur de crues sur une période de 50 ans par les réseaux de Petri stochastiques. Après avoir transformé l'arbre de défaillance électrique en réseau de Petri par l'utilisation d'équivalences, nous avons déterminé les lois de probabilités à considérer sur les transitions stochastiques à partir de données de retour d'expérience traitées dans la littérature. Nous avons procédé à des simulations de Monte Carlo après implémentation sous GRIF pour obtenir les résultats escomptés. La démarche d'évaluation de la probabilité de défaillance fait intervenir un réseau de Petri auxiliaire qui permet, grâce à la fréquence de tir de sa transition (puisqu'elle est mono coup), d'évaluer la fiabilité de notre système. Afin d'améliorer l'étude proposée et pour s'inscrire dans un contexte plus large, on pourrait associer un autre réseau de Petri complémentaire qui permettra d'évaluer la disponibilité du point de vue électrique de la vanne. Il s'agirait d'un réseau de Petri généralement appelé observateur temporel. Les variables booléennes ne permettent pas de tenir compte de paramètre continu (comme la puissance, le courant, ...). Il n'est ainsi pas possible de tenir compte des phénomènes de dégradation du système.

# A ANNEXE : EVACUATEUR DE CRUES [15]



## B ANNEXE : ARBRES DE DÉFAILLANCES ÉLECTRIQUES DE LA VANNE [13]



## RÉFÉRENCES

- [1] J. FRY A. VOGEL J. COURIVAUD, ET J. BLAIS Dam Accident Data Base DADB-The Web Based Data Collection of ICOLD, in *Long-term benefits and performance of dams : Proceedings of the 13th Conference of the British Dam Society and the ICOLD European Club meeting held at the University of Kent, Canterbury, UK from 22 to 26 June 2004.*, 2004, p. 298-304.
- [2] N. RU ET Y. NIU Embankment dam-incidents and safety of large dams , *China Water Power Press Beijing*, p. 242-250, 2001.
- [3] P. J. HAAS *Stochastic petri nets : Modelling, stability, simulation*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [4] T. ELUSAKIN ET M. SHAFIEE Reliability analysis of subsea blowout preventers with condition-based maintenance using stochastic Petri nets , *J. Loss Prev. Process Ind.*, 63, p. 104026, 2020.
- [5] R. M. FRICKS ET K. S. TRIVEDI Modeling failure dependencies in reliability analysis using stochastic petri nets, in *Proceedings of European Simulation Multiconference (ESM 97), Istanbul, Turkey, 1997*, p. 355 ?368.
- [6] R. ZENG, Y. JIANG C. LIN, ET X. SHEN Dependability analysis of control center networks in smart grid using stochastic petri nets , *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, 23, no 9, p. 1721-1730, 2012.

- [7] A. ZIMMERMANN Reliability modelling and evaluation of dynamic systems with stochastic Petri nets (tutorial), in *Proceedings of the 7th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, 2013, p. 324-327.
- [8] N. ADAMO, N. AL-ANSARI, V. SISSAKIAN N. AL-ANSARI V. SISSAKIAN J. LAUE, ET S. KNUTSSON Dam safety and earthquakes , *J. Earth Sci. Geotech. Eng.*, 10, no 6, p. 79-132, 2020.
- [9] É. PARENT Elaboration des consignes de gestion des barrages-réservoirs , PhD Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1991.
- [10] 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.
- [11] A. ESTES, S. FOLTZ, ET D. MCKAY Estimating risk from spillway gate systems on dams using condition assessment data , 2005.
- [12] M. BARKER, B. VIVIAN, ET D. S. BOWLES Reliability assessment for a spillway gate upgrade design in Queensland, Australia , 2006.
- [13] M. KALANTARNIA, RELIABILITY ANALYSIS OF SPILLWAY GATE SYSTEMS , PhD Thesis, McGill University, 2013.
- [14] P. BROY, S. FOLTZ, ET D. MCKAY « Evaluation de la sûreté de systèmes dynamiques hybrides complexes : application aux systèmes hydrauliques , PhD Thesis, Troyes, 2014.
- [15] 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.
- [16] R. LECLERCQ, Performance Sismique Des évacuateurs De Crues : Application D'une méthodologie Pour La considération Des Incertitudes De modélisation , PhD Thesis, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2019.
- [17] J.-P. SIGNORET ET A. LEROY, Petri Net Modelling , in *Reliability Assessment of Safety and Production Systems*, Springer, 2021, p. 587-660.
- [18] J.-P. SIGNORET, Analyse des risques des systèmes dynamiques : réseaux de Petri-Exemples de modélisation , 2008.
- [19] S. KABIR ET Y. PAPADOPOULOS, Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments : A review , *Saf. Sci.*, 115, p. 154-175, 2019.
- [20] X. YANG, J. LI, W. LIU, ET P. GUO Petri net model and reliability evaluation for wind turbine hydraulic variable pitch systems , *Energies*, 4, no 6, p. 978-997, 2011.