



Aide à la Décision pour la Maintenance Préventive des Ouvrages de Protection Contre les Risques Naturels en Montagne

Nour Chahrour, Jean-Marc Tacnet, Christophe Bérenguer, Cyrille Folleau,
Céline Vinuesa

► To cite this version:

Nour Chahrour, Jean-Marc Tacnet, Christophe Bérenguer, Cyrille Folleau, Céline Vinuesa. Aide à la Décision pour la Maintenance Préventive des Ouvrages de Protection Contre les Risques Naturels en Montagne. Lambda Mu 22 (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre (e-congrès), France. pp.490-499. hal-03029180

HAL Id: hal-03029180

<https://hal.science/hal-03029180v1>

Submitted on 27 Nov 2020

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.

Aide à la Décision pour la Maintenance Préventive des Ouvrages de Protection Contre les Risques Naturels en Montagne

Nour Chahrour
Univ. Grenoble, Alpes
INRAE - ETNA
Grenoble, France
nour.chahrour@inrae.fr

Jean-Marc Tacnet
Univ. Grenoble Alpes
INRAE - ETNA
Grenoble, France
jean-marc.tacnet@inrae.fr

Christophe Bérenguer
Univ. Grenoble Alpes, CNRS
Grenoble-INP, GIPSA-lab
Grenoble, France
christophe.berenguer@grenoble-inp.fr

Cyrille Folleau
SATODEV
Mérignac, France
cyrille.folleau@satodev.fr

Céline Vinuesa
SATODEV
Mérignac, France
celine.vinuesa@satodev.fr

Résumé—En montagne, les ouvrages de protection existent afin de protéger les personnes, les biens et les infrastructures situées en aval et exposées à différents phénomènes naturels tels que les inondations torrentielles. Les barrages de correction torrentielle sont des types spécifiques d'ouvrages qui visent, par exemple, à réduire la production de sédiments des zones amont ou à stocker les volumes transportés. Du fait de l'intensité des phénomènes auxquels ils sont soumis et de l'instabilité géotechnique de leurs sites d'implantation, la dégradation de ces structures dans le temps est inévitable et peut du même coup avoir des conséquences négatives sur l'augmentation du niveau de risque induit pour les enjeux protégés en aval. Sur ces bases, l'évaluation et le suivi de l'efficacité des ouvrages de protection et la priorisation des stratégies de maintenance appliquées sur les critères multiples s'avèrent primordiales. L'approche présentée dans cet article, propose une méthodologie innovante d'aide à la décision, qui permet de sélectionner la stratégie de maintenance préventive la plus adaptée en fonction des ressources humaines et budgétaires disponibles pour l'entretien des ouvrages de protection en montagne. Il analyse d'abord la physique de l'hydraulique torrentielle, les modes de défaillance et leurs interactions auxquels les barrages de correction torrentielle sont soumis au cours de leur vie. Les réseaux de Petri Stochastique permettent ensuite de modéliser les transitions entre les états stochastiques des barrages en fonction des temps et d'évaluer les stratégies de maintenance.

Mots clés—ouvrages de protection, risques naturels, sûreté de fonctionnement, réseau de Petri, transitions stochastiques, maintenance préventive, aide à la décision

I. INTRODUCTION

En montagne, les processus géomorphologiques tels que l'érosion, les crues torrentielles, les glissements de terrain, les avalanches, les chutes de blocs génèrent des risques pour les populations, les infrastructures, les activités et plus généralement la société dans les vallées [1]. Causés et aggravés par la topographie, la géologie, le climat

spécifique, ces phénomènes dits gravitaires (plus ou moins rapides) se propagent de l'amont vers l'aval.

Les bassins versants torrentiels, dans les régions montagneuses, sont physiquement composés de trois parties contribuant au processus de production, de transfert et de dépôt de matériaux solides [2]. Les crues torrentielles y transportent des mélanges complexes de matériaux liquides et solides [3].

L'érosion se produit sur les versants du bassin de réception ou dans le lit du chenal d'écoulement. Les torrents présentent des zones de dépôts et de creusement qui alternent le long du profil en long et sur les berges. Une grande partie des sédiments produits sont finalement transportés jusqu'au cône de déjection en aval où se trouvent les enjeux menacés (population, infrastructures).

Dès le XIX^e siècle, les services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) de l'Office National des Forêts (ONF) ont cherché à réduire les risques naturels dans les territoires montagneux français. En plus des forêts de protection, de nombreux barrages et digues de correction torrentielle ont été construits dans les forêts domaniales et gérés par l'Etat [4]. Aujourd'hui, plus de 21 000 ouvrages, dont 14 000 barrages de correction torrentiels, sont identifiés, surveillés et entretenus par le service RTM. Chaque ouvrage de protection a sa propre fonction et vise à limiter soit les causes du danger (par exemple, réduire la production et le transport des sédiments) soit ses conséquences (e.g. stocker les matériaux, éviter les débordements, etc.). Les barrages de correction torrentielle, dits de consolidation, tels que représentés en figure 1 sont des ouvrages de génie civil similaires aux murs de soutènement mais dotés de fonctions hydrauliques supplémentaires. Ils sont mis en œuvre en série dans le chenal d'écoulement réduire l'incision et l'érosion longitudinale et pour centrer l'écoulement, des berges latérales (Fig. 2) [5, 6].



Fig. 1. Barrages de correction torrentiels. Bassin versant de Saint Antoine, France, 2014 (Source : INRAE, Unité de recherche ETNA).

Bien qu'ils soient conçus pour résister et fonctionner efficacement, leur exposition à des phénomènes de forte intensité au cours de leur vie affecte leur niveau de performance d'un point de vue fonctionnel (stabilisation globale et locale du profil en long, centrage de l'écoulement...) et structural (stabilité globale, résistance et vieillissement des matériaux).

Même si cela n'est pas complètement évitable, l'accumulation de dommages sur les ouvrages de protection peut être limitée si l'occurrence de défaillances directes (perte de stabilité) et indirectes (affouillement) et leurs dépendances sont identifiées suffisamment tôt, et si les actions de maintenance préventive sont effectuées à un moment approprié en fonction de la criticité du niveau de dommage. Une compréhension globale des possibles mécanismes et scénarios de défaillance des ouvrages permet ainsi d'envisager puis choisir des stratégies de maintenance efficaces. Elles doivent ainsi être soigneusement étudiées en fonction de contraintes budgétaires et d'aspects pratiques liés à la fréquence des inspections nécessitant une méthodologie pluridisciplinaire. Des approches récentes ont ainsi couplé des méthodes économiques (analyse coûts bénéfices (ACB, d'aide multicritères à la décision (AMC) et des méthodes de sûreté de fonctionnement (SdF) (analyse d'arbre de fautes, analyse d'arbre d'événements, analyse de mode de défaillance et effet (AMDE, etc.) pour analyser l'efficacité des ouvrages à un instant donné [8]. Les approches existantes ne permettent par contre qu'une vision statique de l'état de l'ouvrage à un instant donné et pas sur l'ensemble de sa durée de vie.

L'objectif est donc d'analyser les différents scénarios de comportement d'un ouvrage soumis à la fois à des mécanismes de détérioration et à des opérations de maintenance pour choisir la meilleure stratégie et planification des actions d'inspection et de réparation.

Les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) peuvent être utilisés pour modéliser l'évolution du statut d'un système complexe entre différents états discrets (état neuf, dégradé, défaillant) au cours du temps grâce à des règles/lois de transition temporelles [9]. Les modèles à base de RdPS peuvent être évalués par des simulations de Monte Carlo, ce

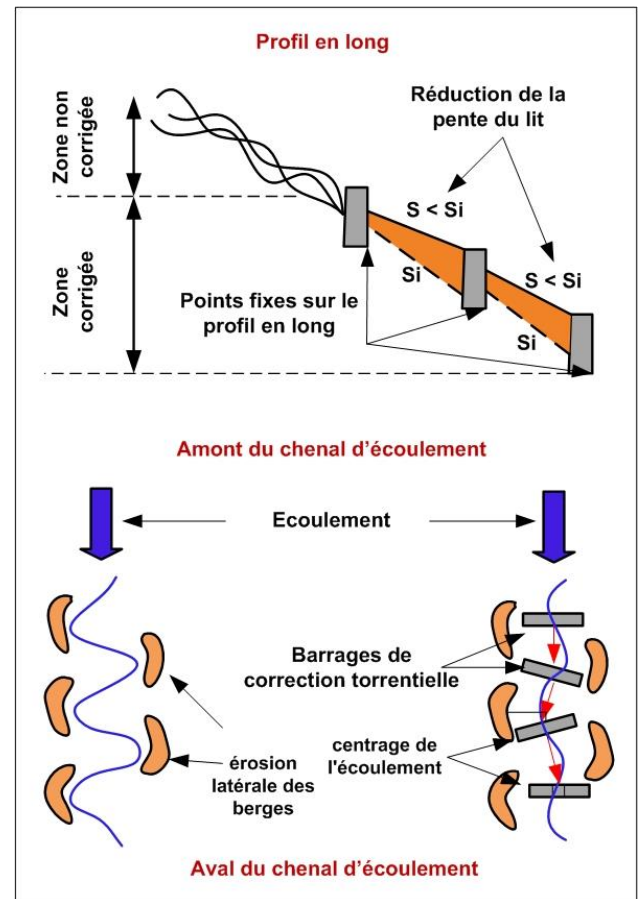


Fig. 2. Fonctions des barrages de correction torrentielle (d'après [7])

qui permet d'estimer les lois de distribution de probabilité (ou des grandeurs statistiques choisies) des variables aléatoires d'intérêt pour la prise de décision. La maintenance préventive peut, quant à elle, être réalisée soit de manière systématique, soit de manière conditionnelle (CM). Dans ce dernier cas, les opérations de maintenance sont choisies en fonction de l'état du système révélé après le diagnostic [10]. Dans notre contexte, la modélisation des politiques de maintenance conditionnelle par les RdPS offre, a priori, un outil flexible et efficace qui permet à la fois de modéliser le comportement dynamique d'un système et de faciliter la prise de décision en matière de maintenance. Une telle approche intégrée a été récemment utilisée dans la modélisation de la détérioration et de la maintenance de structures technologiques et de systèmes d'infrastructure tels que les réseaux ferroviaires [11] et les ponts [12] mais jamais dans le contexte particulier d'ouvrages de génie civil de protection exposés à des phénomènes naturels.

L'objectif est donc de développer un modèle RdPS pour comparer, tout au long de la durée de vie de l'ouvrage, l'influence des différentes stratégies de maintenance proposées sur l'augmentation du temps de disponibilité du barrage et pour améliorer la prise de décision de maintenance en tenant compte des contraintes économiques. Il s'agit pour cela d'explorer les scénarios de défaillances du barrage au fil du temps grâce à une modélisation hydraulique et une analyse de stabilité prenant en compte les dépendances entre défaillances (affouillement déclenchant une perte de stabilité externe).

Malgré l'intérêt de cette approche, plusieurs verrous demeurent pour l'application des RdPS au domaine des risques naturels. Dans un modèle RdPS, les temps et lois de transition stochastiques qui relient les états dégradés du système en fonction du temps, sont des éléments cruciaux mais délicats à identifier. Peu de données précises de suivi sont en effet disponibles pour décrire les évolutions des pathologies des ouvrages de protection. Pour estimer la distribution de probabilité temporelle de ces transitions certains chercheurs supposent, en première hypothèse et par souci de simplicité, de considérer une distribution exponentielle, donc avec un taux de défaillance λ constant. Suivant cette approche classiquement retenue, des premiers modèles RdPS, avec des transitions stochastiques suivant des distributions exponentielles, ont été appliqués à des barrages de correction torrentielle [13, 14]. Dans le même temps, d'autres chercheurs conviennent que les distributions exponentielles ne sont pas satisfaisantes lorsque l'on considère le vieillissement du système et les mécanismes de détérioration dépendant du temps. En raison de la criticité des ouvrages de protection, il est donc très important d'améliorer les modèles existants avec des approches plus réalistes et informatives pour la prise des décisions de gestion. Sur ces bases, cet article propose une méthodologie globale de mise en œuvre des RdPS avec une contribution originale visant à déterminer et justifier de manière indirecte les distributions de probabilité pour les temps de transition entre les états dégradés d'un système alors même que les données réelles sur le comportement du barrage sont mal connues.

L'application concerne le comportement réel d'un barrage de correction torrentielle lorsqu'il est soumis, sur toute sa durée de vie, à une succession de crues torrentielles modifiant successivement le profil en long par dépôt, érosion de matériaux, causant un affouillement du pied de l'ouvrage et pouvant au final déstabiliser la structure. Le suivi des ouvrages repose actuellement largement sur des processus d'expertise durant lesquels les techniciens imaginent l'évolution de l'état des ouvrages de protection à court, moyen et long terme selon les scénarios de combinaison de phénomènes physiques. Dans le contexte particulier des risques naturels, les processus d'expertise doivent souvent composer avec une information imparfaite (lacunaire, imprécise, incertaine...) résultant de sources plus ou moins fiables telles que des données historiques, des expertises et des simulations numériques [15]. Notre démarche permet donc aussi de rendre la description des scénarios plus objective et d'en tracer les hypothèses et conditions.

L'article est organisé de la façon suivante : la présente section 1 présente le contexte général et les objectifs. La section 2 décrit la méthodologie utilisée, décrivant à la fois les modèles numériques et analytiques (hydraulique, génie civil) et les modèles de fiabilité (RdPS). Le cas d'étude et ses résultats sont proposés puis discutés dans la section 3. Enfin, les conclusions et perspectives sont présentées dans la section 4.

II. MÉTHODOLOGIE

Une compréhension globale de la réponse physique et mécanique de ces ouvrages soumis à des événements extérieurs.

Notre objectif est de modéliser la détérioration en fonction du temps des barrages de correction torrentielle lorsqu'ils sont exposés à une série de crues torrentielles pour aider à choisir la meilleure stratégie de maintenance conditionnelle.

L'approche comprend les étapes suivantes : 1) Recréer une série fictive de crues sur la durée de vie espérée de l'ouvrage (100 ans) ; 2) Analyser et vérifier l'évolution du niveau de stabilité du barrage (état de dégradation) après chaque événement sur la base d'une combinaison d'un modèle hydraulique et mécanique ; 3) Dédire les distributions de probabilité des temps de transition entre les états définis de la structure ; 4) Construire et évaluer un modèle RdPS pour comparer les différentes stratégies de maintenance en termes d'efficacité et de coût.

Cette section décrit les deux phases principales de la méthodologie : II A) Modélisation numérique couplée et détermination des états et des lois de transitions et B) Conception et analyse des scénarios de maintenance conditionnelles utilisant des RdPS et des simulations de Monte Carlo.

A. Couplage numérique entre l'hydraulique torrentielle et l'analyse de la stabilité externe des barrages de correction torrentielle

L'hydraulique torrentielle diffère de l'hydraulique classique du fait du transport des sédiments est plus important dans les rivières de montagne en raison des pentes abruptes et des processus géomorphologiques (érosion, dépôt). Des outils de modélisation spécifiques, basés le couplage de l'hydraulique et de lois de transport solide sont nécessaires. LOGICAR [16] est un outil numérique 1D développé par l'INRAE (unité de recherche ETNA) pour modéliser l'évolution globale d'un lit torrentiel lorsqu'il est soumis à des crues sans toutefois permettre d'analyser les creusements (affouillements) localisés à l'aval des ouvrages du fait de l'accélération de l'eau en raison de la hauteur de chute. L'affouillement correspond à l'érosion du sol en aval d'une structure créant une fosse dont les dimensions dépendent du débit, du type de flux (eau claire, transport de sédiments), et de la granulométrie. Même si le profil en long est globalement stable, l'affouillement local est inévitable. Sans mesures spécifiques [17], le risque est que la fosse d'affouillement se développe sous la fondation de l'ouvrage causant une déstabilisation par suppression des appuis. La démarche d'analyse des dépendances entre l'équilibre global du profil en long, l'affouillement local et la perte de stabilité externe des barrages est illustrée sur la figure 3 et détaillée dans les sous-sections ci-dessous.

A.1) *Modélisation de l'évolution globale du profil en long du torrent lit via LOGICAR*

Avant de lancer des simulations via LOGICAR, plusieurs données requises comme entrées dans le logiciel doivent être collectées et / ou supposées. Comme illustré sur la

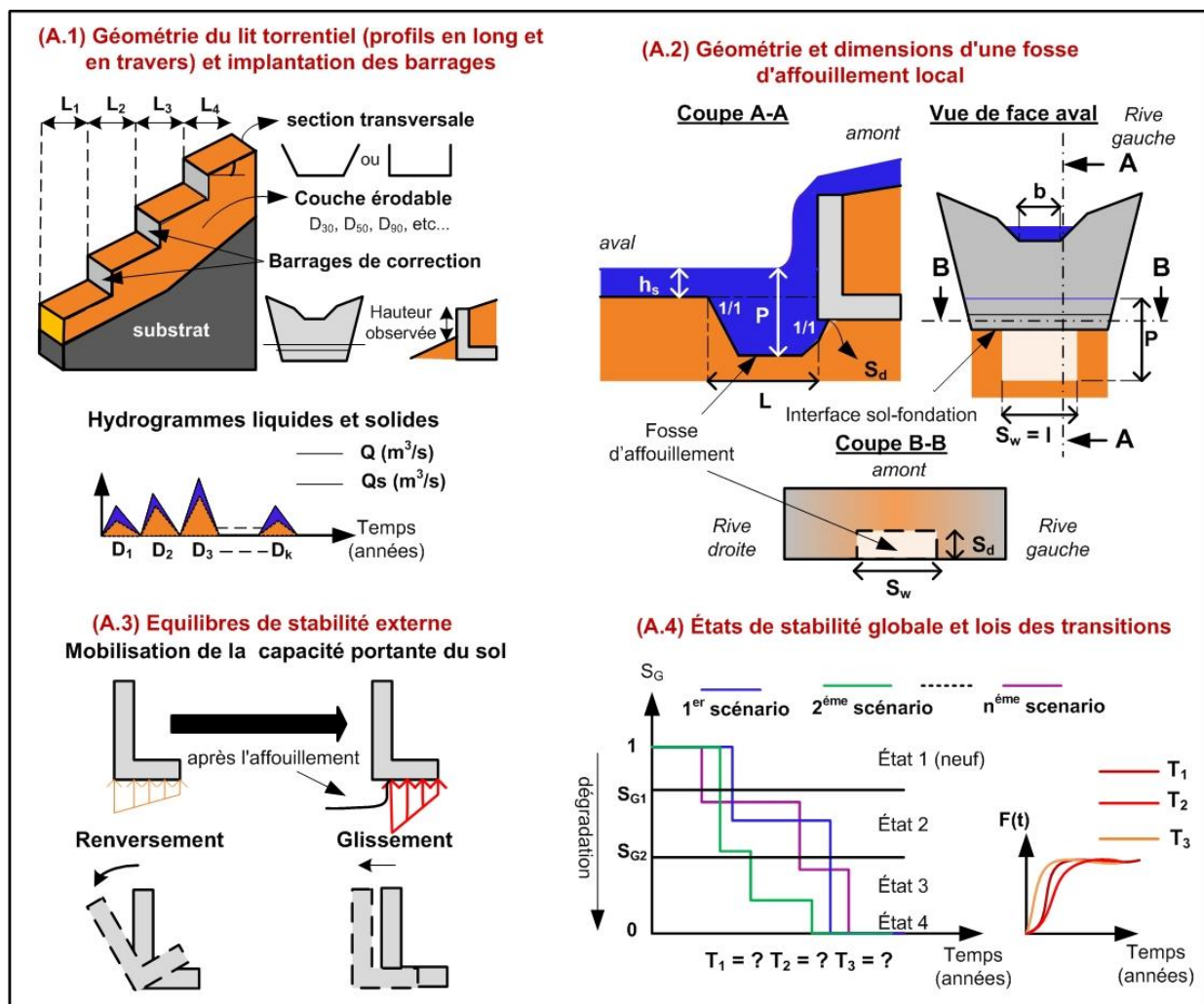


Fig. 3. Étapes impliquées lors de la modélisation des inondations torrentielles, de l'affouillement et de la stabilité externe des barrages de correction.

figure 3, (a), les principales données d'entrée sont les suivantes:

a) *Géométrie et caractéristiques du profil en long et scénarios de crue*: les données concernent la pente, la longueur des tronçons du profil longitudinal, les profils en travers (section trapézoïdale ou rectangulaire, largeur du chenal, hauteurs et pentes des berges) et les caractéristiques du sol (granulométrie, épaisseur de la couche érodable).

b) *Système de protection: les barrages de correction* sont décrits par leur emplacement sur le profil longitudinal et la hauteur sous cuvette (deversoir) de chaque barrage.

c) *Hydrogrammes liquides et solides* : chaque crue est représentée par des hydrogrammes simplifiée de forme triangulaire défini par sa durée et le pic de débit.

Pour estimer les distributions des temps de transition entre les états dégradés de la structure, il est nécessaire de générer un caractère aléatoire en considérant une ou plusieurs variables aléatoires. Dans le contexte des risques naturels, le caractère aléatoire concerne l'enchaînement des crues d'une intensité variable. On crée ici une série d'événements de crue successifs, chacun d'entre eux étant caractérisé de manière aléatoire par un débit d'eau

maximal, un débit solide maximal et sa date d'occurrence. En considérant différentes sources de données (par exemple, enregistrements historiques des débits moyens, hypothèses d'experts, etc.), on peut postuler une loi de probabilité pour les variables aléatoires choisies permettant d'exécuter un nombre spécifique de scénarios de crue (50, 100..., ou n scénarios).

Pour chaque série de crues générée sur une période de temps correspondant à la durée de vie de l'ouvrage escomptée (100 ans), chacune des crues est simulée successivement via LOGICAR. En fonction des données d'entrée données et des lois physiques choisies concernant le transport des sédiments (Rickenmann, Meunier, Lefort ou Recking), le logiciel fournit plusieurs sorties dont la hauteur de l'eau (m), la vitesse de l'eau (m/s), la pente du lit (m/m), variation du niveau du lit (m), le niveau réel du lit (m) et le débit solide (m³/s) réalisés pendant toute la durée de la simulation. Ces résultats sont fournis sur des points de balayage spatiaux (en aval et en amont de chaque barrage) et temporels (avant, au milieu et après chaque inondation) spécifiques choisis par l'opérateur. Les résultats d'une crue deviennent les données de la suivante.

A.2) *Estimation des dimensions de la fosse d'affouillement local*

Plusieurs méthodes et outils ont été développés pour estimer la géométrie et la taille d'une fosse d'affouillement en aval d'une structure (Fig. 3, (b)) sur la base de relations complexes entre les caractéristiques hydrauliques et sédimentaires et de tests en laboratoire, d'analyse d'ouvrages réels. Celles de la VAWE et SOGREAH [18] sont deux formules couramment utilisées pour les travaux hydrauliques torrentiels et les travaux de protection. Celle de la VAWE est un modèle bidimensionnel qui permet d'estimer la hauteur maximale (P_{vawe} (m)) et la longueur (L_{vawe} (m)) de la fosse à affouillement. La formule de SOGREAH a étendu la méthode de VAWE en multipliant les dimensions données par la VAWE par des coefficients de correction non dimensionnels liés à l'effet de la contraction de l'écoulement. Elle estime également la largeur ($I_{sogreah}$ (m)) de la fosse à affouillement et fournit donc un modèle tridimensionnel. SOGREAH suppose également une géométrie trapézoïdale de la fosse d'affouillement avec des côtés de pente 1/1. Plus récemment, Comiti et al. [19] ont proposé une approche qui estime la hauteur maximale (S_{comiti} (m)) de la fosse à affouillement sur la base d'expériences en laboratoire et de mesures sur le terrain.

Par rapport à d'autres méthodes, la formule de SOGREAH est la seule permettant d'estimer les trois dimensions de la fosse à affouillement. Cependant, la méthode développée par Comiti et al. est plus récente que les autres méthodes et a été testée sur des barrages de correction torrentielle. Dans cette étude, on propose une combinaison originale où les dimensions de la fosse à affouillement sont calculées en combinant les formules de SOGREAH et de Comiti et al. en remplaçant la profondeur P_{vawe} , utilisée dans la formule de SOGREAH, par la profondeur P_{comiti} calculée comme indiqué dans les équations suivantes.

$$S_{comiti} = 2 * Z * (H_s/Z)^{0.59} * (b/B)^{2.34} * (\Delta * D_{90}/Z)^{-0.09} \quad (1)$$

$$P_{comiti} = S_{comiti} + h_s \quad (2)$$

$$P = P_{comiti} * R \quad (3)$$

$$I = P_{comiti} * R' \quad (4)$$

$$L = P_{comiti} * R'' \quad (5)$$

où Z (m) est la hauteur de chute, H_s (m) est la tête hydraulique, b (m) est la largeur inférieure du déversoir du barrage, B (m) est la largeur du chenal, D_{90} (m) est la taille du passant à 90% (90% des sédiments sont plus fins) Δ est la densité relative de sédiments sous-fusionnée, h_s (m) est le niveau de l'eau, P (m), I (m) et L (m) sont respectivement la hauteur, largeur et longueur de la fosse à affouillement et R , R' et R'' sont les coefficients de correction de contraction utilisés dans la méthode SOGREAH.

Les résultats fournis par LOGICAR constituent des données d'entrée pour estimer la géométrie et la taille de la fosse d'affouillement en utilisant (1) - (5). L'estimation des dimensions de la fosse d'affouillement et de son extension sous la fondation sont nécessaires pour analyser la stabilité des barrages. Les deux principales dimensions locales sont la largeur d'affouillement (S_w (m)) et la profondeur de

l'affouillement (S_d (m)). S_w est égal à I , qui est calculée à l'aide de (4). L'estimation de S_d résulte d'un simple calcul géométrique qui dépend principalement de P et d'une hypothèse sur la pente amont de la fosse d'affouillement.

A.3) Vérification des trois équilibres de stabilité externe

L'affouillement local provoque la suppression du sol d'appui sous la fondation du barrage pouvant entraîner. Une défaillance structurale en raison d'une perte de stabilité externe du barrage. Deymier et al. (voir [17]) ont fourni une référence technique pour la conception et la justification de la stabilité des barrages de correction torrentielle qui nécessitent des approches spécifiques par rapport ouvrages de génie civil classiques. Après avoir calculé les charges agissant sur l'ensemble de la structure (poids du barrage, de l'atterrissement, sédiments, poussée des terres, surcharge de liquide et force d'impact), il est possible d'estimer les moments de stabilisation M_s et de déstabilisation M_D et les composantes verticales R_v et horizontales R_H de la force résultante R . Les justifications se font normalement selon les règlements de calcul, on considère ici, de manière simplifiée trois équilibres (Fig. 3, (c)) vérifiés de la manière simplifiée suivante :

a) *Capacité portante du sol*: l'affouillement local entraîne une redistribution des contraintes normales induites par la composante verticale R_v de la force résultante. Cet équilibre correspond à la capacité du sol à résister à ces contraintes et se vérifie lorsque:

$$\sigma_{adm} > q'_{ref} \quad (6)$$

où σ_{adm} est la contrainte admissible du sol et q'_{ref} est la contrainte résultant du diagramme de contrainte normal appliqué au sol.

b) *Renversement*: il se produit lorsque le moment de déstabilisation M_D dépasse le moment de stabilisation M_s tout en tenant compte des facteurs de sécurité liés à l'état limite considéré. Pour éviter le renversement du barrage, la condition suivante doit être vérifiée (Etat limite ultime):

$$M_s / M_D \geq 1.5 \quad (7)$$

c) *Glissement*: il se produit lorsque la composante horizontale R_H de la force résultante dépasse la force de frottement résistante maximale R_{GL} qui s'oppose au glissement. Pour éviter le glissement d'un barrage, la condition suivante doit être vérifiée:

$$R_H \leq R_{GL} \quad (8)$$

Chacune de ces conditions d'équilibre donne un indicateur de stabilité modélisable dans le temps. On définit trois ratios de stabilité qui vont permettre de caractériser le niveau de stabilité du barrage (i.e. son état de stabilité ou dégradation) par rapport à chaque équilibre. Ils sont obtenus en normalisant les indicateurs de stabilité comme suit:

- Ratio de stabilité de capacité portante :

$$S_{CP} = (\sigma_{adm} - q'_{ref}) / \sigma_{adm} \quad (9)$$

- Ratio de stabilité au renversement :

$$S_{RE} = (M_S - M_O) / M_S \quad (10)$$

- Ratio de stabilité de glissement :

$$S_{GL} = (R_{GL} - R_H) / R_{GL} \quad (11)$$

A.4) États de stabilité global et lois des transitions

On définit ensuite un indicateur d'état global, qui agrège les indicateurs de toutes les défaillances possibles. Dans cette étude, seuls les défauts de stabilité externe, induits par des phénomènes d'affouillement locaux sont pris en compte. L'indicateur d'état global S_G [20] est défini comme une combinaison des trois ratios de stabilité externe comme suit:

$$S_G = (S_{CP} * S_{RE} * S_{GL})^{1/3} \quad (12)$$

$S_G \in [0, 1]$. La valeur 1 correspond à un niveau de stabilité parfait (initial) et 0 correspond à une défaillance totale de la stabilité externe du barrage (survenant dès qu'un équilibre au moins est instable, d'après l'expression (12)). On définit ensuite des intervalles de valeur de S_G , correspondant à plusieurs états du barrage (bon, mauvais, très mauvais et échoué) sur la base de seuils spécifiés. On peut donc, au final, estimer quand l'ouvrage se trouve dans tel ou tel état ce qui permet également, en considérant l'ensemble des simulations, d'estimer les temps de transition entre ces états (Fig. 3, (d)).

Les simulations des n scénarios d'inondation générés fournissent n réalisations différentes des temps de transition ; à partir de ces n réalisations, il est possible d'estimer la distribution de probabilité de chaque transition reliant deux états dégradés consécutifs du barrage.

B. Couplage du modèle physique et du modèle de SdF à l'aide de RdPS

Dans cette étape, les informations obtenues par le biais d'une modélisation physique des phénomènes de dégradation affectant le système étudié peuvent être intégrées dans une modélisation SdF à base de RdPS, dans le but d'en améliorer la qualité. Dans cette section, un modèle RdPS représentant l'évolution de l'état d'un système se détériorant est présenté. L'objectif final de ce modèle est de fournir un outil d'aide à la décision qui permet de comparer différentes stratégies de maintenance et de choisir la meilleure. Le modèle RdPS développé est implanté à l'aide de l'atelier GRIF développé par TOTAL et SATODEV [21] et simulé à l'aide du moteur de calcul MOCA-RP.

Un modèle RdPS est constitué d'une collection de quatre éléments principaux: (1) les places, symbolisées par des cercles, représentent les états du système, par exemple les différents états de détérioration; (2) les jetons, symbolisés par des cercles noirs pleins, révélant l'état du système qui correspond à l'endroit où ils sont présents; (3) les transitions, symbolisées par des rectangles, sont responsables des autorisent ou bloquent le passage des jetons des places amont vers les places aval; et (4) des arcs, représentés par des flèches, relient les places aux transitions et vice versa. De plus, les arcs sont associés à des multiplicités (nombres naturels) qui contrôlent le fonctionnement du RdPS et le nombre de jetons pouvant

transiter sur cet arc. Si un arc n'indique aucune multiplicité, la valeur est 1 par défaut. Une fois le modèle RdPS construit, et pour une durée de simulation spécifiée, les mouvements des jetons d'un état à un autre sont simulés selon les règles suivantes:

- Si le nombre de jetons à la place amont d'une transition est au moins égal à la multiplicité de l'arc les reliant, la transition devient active et se déclenche ensuite en fonction du temps de transition déterministe ou stochastique associé à la transition;
- Lorsqu'une transition est déclenchée, un nombre de jetons égal à la multiplicité de l'arc est retiré des places amont et ajouté aux places aval;
- Si une transition est connectée à un arc inhibiteur (arc en pointillés), elle ne peut plus être déclenchée si le nombre de jetons présente à la place associée à cet arc est supérieur ou égal à la multiplicité de l'arc.

Le modèle RdPS développé est représenté sur la figure 4. Il se compose de trois processus décrits dans les sous-sections suivantes.

B.1) Processus de dégradation

On considère que le système peut être dans un état parmi 4 états de détérioration possibles : « bon », « mauvais », « très mauvais », « totalement défaillant » ; ces 4 états sont représentés, respectivement par les quatre places P_1 - P_4 comme indiqué sur la figure 4. À $t = 0$, un jeton est ajouté à P_1 révélant que, initialement, le système est en bon état. Les transitions conditionnelles entre les quatre états décrits sont présentées par les transitions stochastiques T_1 - T_3 . Les distributions de probabilités des temps de transition associés à ces transitions stochastiques sont estimées sur la base de la modélisation physique présentée dans la section précédente. Il s'agit là d'un des points clefs de l'approche de modélisation proposée, qui permet de faire le lien entre modèle physique et modèle stochastique de SdF par le biais de ces lois de transition ainsi élaborées. Ce point clef de la détermination des lois de transition du processus de dégradation est illustrée dans la section III.

B.2) Processus d'inspection

On considère qu'une inspection est nécessaire pour détecter l'état du système, ce qui correspond à la réalité des structures de génie civil considérées dans ce travail. Dans le modèle présenté, on suppose que les inspections ont lieu à un intervalle de temps régulier déterminé de longueur T_{insp} qui correspond au déclenchement de la transition T_5 liée à la place P_5 qui révèle la condition à laquelle l'inspection doit avoir lieu. Par conséquent, tous les T_{insp} , la transition T_5 se déclenche, ce qui signifie qu'une date d'inspection est arrivée. P_6 est la place qui révèle que l'inspection est en cours. Après le déclenchement de T_5 , la transition T_4 se déclenche immédiatement en renvoyant le jeton de P_6 à P_5 afin que l'inspection puisse avoir lieu tous les T_{insp} . Les transitions immédiates T_6 - T_8 sont responsables de la détection de l'état du système, dans lequel un jeton

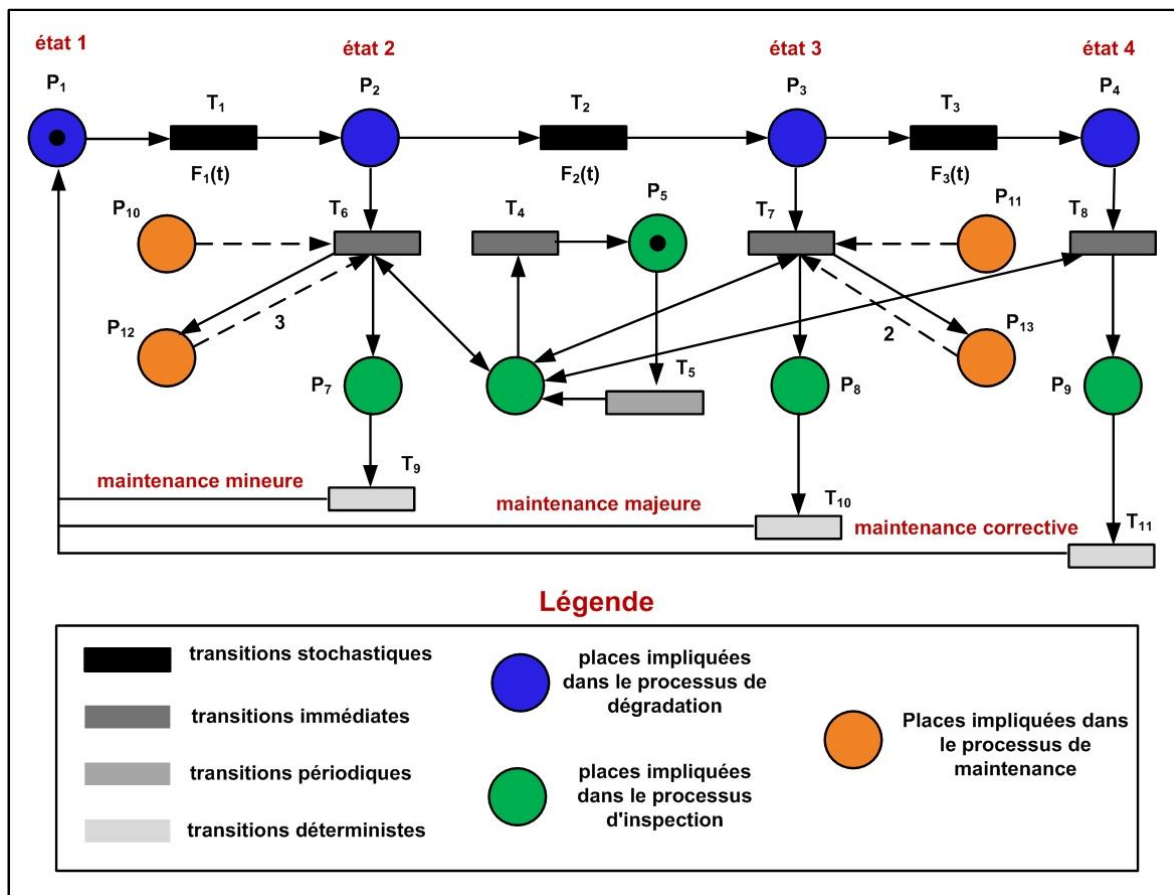


Fig. 4. Modèle RdPS intégrant les processus de dégradation, d'inspection et de maintenance.

apparaît à l'une des trois places P_7 - P_9 selon que le système est respectivement dans un état mauvais, très mauvais ou défaillant.

B.3) Processus de maintenance

Lorsque l'état du système est révélé, le type de maintenance approprié peut être appliqué pour restaurer le système à son état initial « bon ». Si le système est en bon état, aucune maintenance n'est requise. S'il est en mauvais état, des opérations préventives mineures sont nécessaires pour limiter de nouvelles détériorations. S'il est en très mauvais état, des opérations préventives majeures sont nécessaires pour éviter une défaillance complète. Enfin, si le système tombe complètement en panne, des opérations correctives doivent être effectuées, qui se traduisent par la reconstruction du système. Les temps associés aux transitions T_9 - T_{11} , représentent le temps de planification des réparations pour chaque opération de maintenance. Dans ce modèle, trois opérations mineures et deux opérations majeures sont autorisées avant une opération corrective. Donc, T_{11} fonctionne également comme une transition de réinitialisation, dans laquelle, lors de son déclenchement, les jetons de P_{12} et P_{13} sont supprimés afin que les maintenances mineure et majeure puissent être effectuées à nouveau.

Afin de comparer plusieurs stratégies de maintenance, les places P_{10} et P_{11} sont ajoutées au modèle. Elles sont associées à des arcs inhibiteurs qui inhibent le déclenchement des transitions auxquelles ils sont attachés. Par conséquent, si un jeton est présent dans P_{10} , T_6 est

inhibé et aucun entretien mineur ne peut avoir lieu. De même, si un jeton est présent dans T_{11} , T_7 est inhibé et aucune maintenance majeure ne peut avoir lieu pendant toute la durée de la simulation.

III. APPLICATION, RESULTATS ET DISCUSSIONS

Afin d'illustrer les capacités de l'approche holistique développée, elle est appliquée dans cette section à une étude de cas réel [22]. Un barrage de correction, situé dans le bassin versant du Manival à Saint-Ismier dans les Chartreuses des Préalpes septentrionales françaises, est choisi à cet effet. Le bassin versant du Manival s'étend sur plus de 7 km et contient environ 180 barrages de correction construits depuis les années 1890 et surveillés par le service français de contrôle forestier et torrentiel du département de l'Isère (ONF-RTM 38).

A. Modélisation physique de tronçon en aval de la plage de dépôt dans le bassin versant Manival

Pour la modélisation physique, le tronçon, s'étendant sur 1 km en aval du barrage de rétention du bassin versant Manival et contenant 39 barrages correcteurs, est considéré. Le barrage de rétention est implanté à l'extrémité du chenal d'écoulement du bassin versant. Il est construit pour fermer de la plage de dépôt de 25 000 m³ afin d'empêcher le passage des matériaux. Les données nécessaires à l'entrée de LOGICAR concernant les caractéristiques du bassin versant, des barrages de correction et des inondations torrentielles sont extraites de la base de données ONF-RTM [23] et des enquêtes GIS

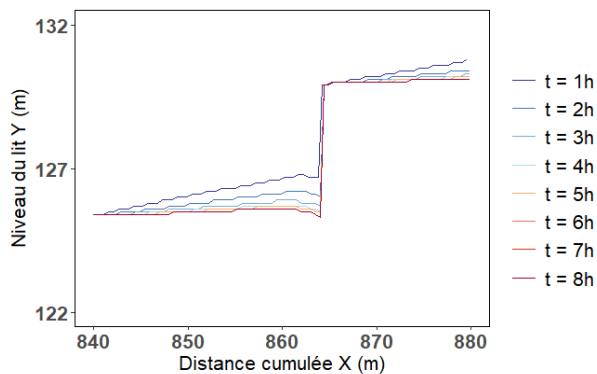


Fig. 5. Variation du niveau du lit en amont et en aval du barrage de correction # 54 à Manival après chaque inondation impliquée dans la série d'événements - Scénario1.

réalisées en 2009. Pour les scénarios d'inondation, tous les événements sont supposés être crues d'eau claire en supposant que les matériaux solides sont piégés dans le bassin de rétention des sédiments avant d'arriver au tronçon étudié et seuls les événements avec une période de retour de 10 ans sont pris en compte. De plus, les hydrogrammes sont supposés avoir une forme triangulaire avec un débit de pointe atteint au milieu de la crue d'une heure. De plus, sur une période de 100 ans, les débits de pointe et les dates des événements sont obtenus en appliquant un caractère aléatoire en supposant respectivement les lois Gamma et Poisson. En effet, 50 scénarios différents, correspondant à 50 séries différentes d'inondations, sont obtenus. Toutes les données et hypothèses mentionnées précédemment sont insérées dans LOGICHAR afin d'exécuter des simulations sur une période de 100 ans.

L'analyse contre la défaillance par stabilité externe déclenchée par le phénomène d'affouillement est réalisée sur un barrage de correction en béton armé (n°54 à Manival), situé à environ 70 m en aval du barrage de retenue. La figure 5 illustre l'évolution du lit en aval et en amont du barrage de correction à analyser. Les résultats de la modélisation LOGICHAR, concernant les caractéristiques hydrauliques torrentielles, sont utilisés avec d'autres résultats pour les calculs d'affouillement et de stabilité. Les résultats fournis par LOGICHAR permettent de modéliser l'évolution des indicateurs correspondant à la justification externe de la stabilité (S_{CP} , S_{RE} et S_{GL}) qui à son tour donnent l'évolution de l'indicateur global de stabilité S_G . La figure 6 représente l'évolution de S_G du barrage de correction étudié dans le temps, sur la base des résultats des 5 premiers scénarios d'inondation générés.

Pour estimer les temps de transition entre les états définis, il convient de définir des seuils spécifiques correspondant aux différents états de stabilité du barrage. Dans cette application, les seuils des états dégradés sont supposés comme suit :

- État 1: Initiale - bon état $\rightarrow 0,7 < S_G \leq 1$;

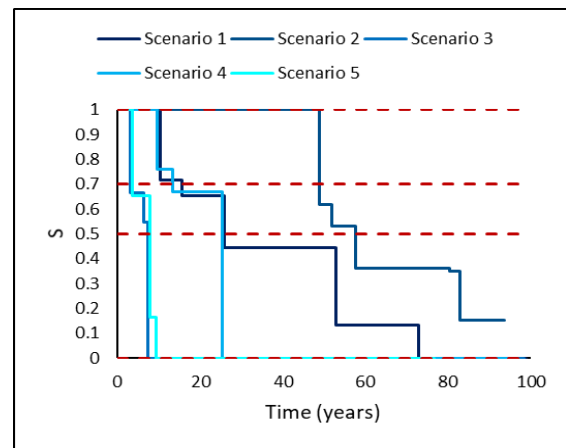


Fig. 6. Evolution de S_G au fil du temps. Les lignes pointillées rouges correspondent aux seuils d'indicateur ($S_{G1} = 1$, $S_{G2} = 0,7$, $S_{G3} = 0,5$ et $S_{G4} = 0$).

- État 2: Mauvais état $\rightarrow 0,5 < S_G \leq 0,7$;
- État 3: Très mauvais état $\rightarrow 0 < S_G \leq 0,5$;
- État 4: États totalement défectueux $\rightarrow S_G = 0$.

Par conséquent, les 50 scénarios générés permettent d'observer 50 fois une réalisation du temps passé dans chacun des états définis et permettent donc d'estimer la distribution de probabilité des temps de transition $T_1 - T_3$ impliqués dans le processus de dégradation du modèle RdPS. La figure 7 présente la distribution de probabilité cumulative de chaque transition ainsi estimée.

B. Analyse de SdF et aide à la décision d'entretien du barrage de correction à l'étude

Les distributions de probabilité estimées (Fig. 7), fournies par les informations basées sur la physique, sont utilisées pour instancier les transitions stochastiques $T_1 - T_3$ du processus de dégradation du modèle RdPS (Fig. 4). De plus, les temps constants, correspondant aux transitions déterministes des processus d'inspection et de maintenance impliqués dans le modèle, sont supposés basés sur les connaissances des experts. L'inspection est supposée être périodique et avoir lieu chaque année (T_5) et les temps de réalisation constants requis pour les opérations de maintenance mineure, de maintenance et de maintenance corrective à effectuer sont respectivement de 5 jours (T_9), 1 mois (T_{10}) et 4 mois (T_{11}).

Afin d'atteindre l'objectif d'aide la prise de décision pour la maintenance du barrage de correction étudié, quatre stratégies de la maintenance différentes sont définies pour être comparées et hiérarchisées :

- Stratégie 1: toutes les opérations de maintenance sont autorisées;
- Stratégie 2: la maintenance mineure est inhibée;
- Stratégie 3: la maintenance majeure est inhibée;

- Stratégie 4: seule la maintenance corrective est autorisée.

Dans l'application actuelle, la convergence des résultats du modèle RdPS est atteinte après 200 simulations de Monte Carlo pour toutes les stratégies de maintenance définies. Toutes les stratégies sont analysées pour une période de 100 ans. Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux I et II.

Le tableau I révèle l'influence de chaque stratégie d'entretien sur le temps de séjour moyen du barrage dans ses quatre états définis. Dans les stratégies 1 et 3, le barrage demeure en bon état pendant une plus longue période de temps par rapport aux stratégies 2 et 4. Cela est dû au fait que dans les stratégies 1 et 3, l'entretien est appliqué dès que le barrage n'est pas plus en bon état en utilisant des opérations mineures. En revanche, pour les stratégies 2 et 4, où un entretien mineur est empêché, le barrage reste en mauvais état pendant une plus longue période. Dans la stratégie 3, étant donné que l'entretien majeur est inhibé, le barrage est en très mauvais état pendant une longue période par rapport aux stratégies où les opérations majeures sont autorisées. Concernant la stratégie 4 dans laquelle seules les opérations correctives sont autorisées, le barrage passe plus de temps dans les états dégradés 2 et 3 par rapport aux autres stratégies. La raison derrière cela est que le barrage continue de se détériorer sans aucune réparation jusqu'à ce qu'il défaille complètement, moment où il est alors remplacé par un nouveau barrage.

TABLE I. TEMPS DE SEJOUR MOYEN (ANNEES) PASSE PAR LE BARRAGE DANS CHAQUE ÉTAT SUR UNE PERIODE DE 100 ANS.

Stratégie	État 1 Bon	État 2 Mauvais	État 3 Très mauvais	État 4 Totalement défaillants
1	90.42	8.20	0.63	0.38
2	68.36	27.70	2.44	0.81
3	82.63	5.64	10.78	0.55
4	51.26	24.57	22.31	1.10

TABLE II. NOMBRE MOYEN PREVU D'OPERATIONS DE MAINTENANCE SUR UNE PERIODE DE 100 ANS.

Stratégie	Maintenance mineure	Maintenance majeure	Maintenance corrective
1	3	1	1

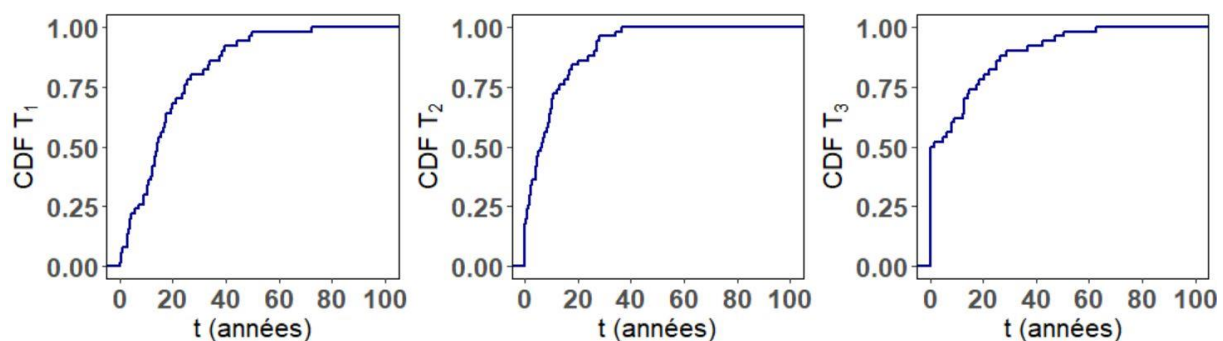


Fig. 7. Fonctions de distribution cumulative des transitions stochastiques impliquées dans le processus de dégradation du modèle RdPS.

Les statistiques sur le nombre d'opérations de maintenance appliquées, fournies dans le tableau II, permettent de calculer le coût total attendu de chaque stratégie de maintenance. En supposant que la reconstruction du barrage coûte 150000 € et que les opérations majeures et mineures coûtent respectivement 50% et 5% du coût de reconstruction, le coût total de chaque stratégie de maintenance peut être calculé (tableau III). Les résultats obtenus révèlent que la stratégie 3 est la moins chère. Dans cette stratégie, le barrage est réparé sur sa légère détérioration par les opérations mineures qui sont les moins chères parmi les autres opérations. D'un autre côté, la stratégie 2 est la plus coûteuse car l'entretien n'est appliqué que lorsque le barrage atteint les états 3 et 4 où les opérations coûteuses sont nécessaires. Par conséquent, une telle analyse facilite le tri, la comparaison et le choix de la meilleure stratégie de maintenance tout en tenant compte des aspects économiques.

TABLE III. COUT TOTAL (€) DE CHAQUE STRATEGIE DE MAINTENANCE.

Stratégie	Coût des opérations mineures	Coût des opérations majeures	Coût des opérations correctives	Coût total de la stratégie
1	22500	75000	150000	247500
2	0	150000	300000	450000
3	22500	0	150000	172500
4	0	0	300000	300000

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Alors que les méthodes classiques et existantes, liées à l'ingénierie des ouvrages de protection, se sont concentrées sur l'évaluation de l'efficacité de ces structures d'un point de vue statique (en un instant donné), cet article analyse leur comportement dynamique sur toute leur durée de vie lorsqu'elles sont soumises à des aléas naturels en montagne en tenant compte de plusieurs complexités (dépendances de défaillance, scénarios d'inondation, transitions stochastiques, etc.). L'approche présentée propose une nouvelle approche d'aide à la décision pour la gestion patrimoniale de ces infrastructures de protection au cours de leur durée de vie. L'intérêt principal des travaux présentés réside dans le couplage d'approches multidisciplinaires : (1) la modélisation numérique

hydraulique et mécanique (physique des phénomènes torrentiels, transport des sédiments et calcul de la stabilité structurale) et (2) un modèle de SdF (RdPS, CM et Monte Carlo, etc.) afin de soutenir les décisions de maintenance conditionnelle basées sur des données brutes et des connaissances d'experts. Dans le domaine de l'analyse de SdF, cette démarche innove par une approche indirecte des lois de transition basée entre le couplage de la modélisation numérique du comportement de détérioration et la modélisation stochastique pour l'évaluation de la fiabilité et de la maintenance.

La méthode nécessitera encore des développements tels que l'identification de modes de défaillance supplémentaires (e.g. la stabilité interne du barrage), la réalisation d'une analyse de sensibilité concernant les informations imparfaites et l'analyse des dépendances bidirectionnelles entre les barrages de correction situés en série (effets en cascade).

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du support de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme d'investissement d'avenir (ANR-15-IDEX-02) et du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Direction Générale de la Prévention des Risques (MTES/DGPR).

REFERENCES

- [1] Bernard, "Cours de Restauration des Montagnes," Ecole Nationale des Eaux et Forêts Nancy, 1925.
- [2] A. Surell, "Étude sur les torrents des Hautes-Alpes," Carilian-Goeury, 1841.
- [3] J.-M. Tacnet, "Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information," Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2009.
- [4] S. Carladous, "Approche intégrée d'aide à la décision basée sur la propagation de l'imperfection de l'information-application à l'efficacité des mesures de protection torrentielle," Thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, 2017.
- [5] J.-M. Tacnet and D. Richard, "De la conception à la sûreté des barrages de correction torrentielle," *Sciences Eaux & Territoires*, (2); 164-175, 2010.
- [6] G. Piton, S. Carladous, A. Recking, J.-M. Tacnet, F. Liébault, D. Kuss, Y. Quefféléan, and O. Marco, "Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience," in *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 91-108, 2017.
- [7] J.-M. Tacnet, G. Degoutte, "Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement," Paris, France : Quae. chapter "Principes de conception des ouvrages de protection contre les risques torrentiels," 2013.
- [8] S. Carladous, J.-M. Tacnet, M. Batton-Hubert, J. Dezert, and O. Marco, "Managing protection in torrential mountain watersheds: A new conceptual integrated decision-aiding framework," in *Land Use Policy*, 80, 464 - 479, 2019.
- [9] J.P. Signoret, "Dependability & safety modeling and calculation: Petri nets," IFAC Proceedings, Volumes 42, 203 - 208, 2009.
- [10] S. Alaswad and Y. Xiang, "A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system," in *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 54 - 63, 2017.
- [11] H. Shang, "Maintenance modelling, simulation and performance assessment for railway asset management," Thèse de doctorat, Optimisation et Sûreté des Systèmes, Troyes, 2015.
- [12] B. Le, J. Andrews, and C. Fecarotti, "A Petri net model for railway bridge maintenance. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers," Part O in Risk and Reliability, 231, 306-323, 2017.
- [13] N. Chahrour, S. Hariri, J.-M. Tacnet, C. Bérenguer, "A Modeling Framework for Efficacy Assessment and Preventive Maintenance of Torrential Protection Works," in: Zio, M.E. (Ed.), 29th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2019, Hannover, Germany. pp. 444-451, 2019.
- [14] N. Chahrour, S. Hariri, J.-M. Tacnet, C. Bérenguer, "Degradation Analysis and Preventive Maintenance Modelling and Assessment for Improved Resilience of Critical Infrastructures - Application to Torrent Check dams," in: 56th ESReDA Seminar On Critical Services continuity, Resilience and Security, European Safety and Reliability Data Association, Linz, Austria. pp. Paper #11 - 12 pages, 2019.
- [15] J.-M. Tacnet, J. Dezert, C. Curt, M. Batton-Hubert, and E. Chojnacki, "How to manage natural risks in mountain areas in a context of imperfect information? New frameworks and paradigms for expert assessments and decision-making. Environment Systems and Decisions," 34, 2014.
- [16] D. Laigle, 2008. Logichar. <https://forge.irstea.fr/projects/logichar>.
- [17] C. Deymier, J.-M. Tacnet, and N. Mathys, "Conception et calcul de barrages de correction torrentielle," Grenoble, France: Cemagref Editions, 287p, 1995.
- [18] B. Couvert, B. Lefebvre, Ph. Lefort, and E. Morin, "Etude générale sur les seuils de correction torrentielle et les plages de dépôts," *La Houille Blanche*, 449-456, 1991.
- [19] F. Comiti, M. Lenzi, and L. Mao, "Check Dams, Morphological Adjustments and Erosion Control in Torrential Streams," chapter Local scouring at check-dams in mountain rivers, pages 263-282, 2013.
- [20] M. Nasr, "Assessment of structural and functional efficacy of protection measures: Application to torrent check dams," Master's thesis, Grenoble INP, France, 2019.
- [21] GRIF, 2018. GRIF-Workshop. TOTAL and SATODEV. <https://grif-workshop.fr/>.
- [22] N. Chahrour, M. Nasr, J.-M. Tacnet, and C. Bérenguer, "Dynamic Deterioration and Maintenance Modeling of Torrent Protection Systems using Physics-Informed Stochastic Petri Nets: Application to Check Dams Subjected to Scouring Phenomenon," Technical report, Submitted to the journal of Reliability Engineering and System Safety, 2020 (unpublished).
- [23] ONF-RTM, "Etude de Bassin de Risques Division domaniale RTM du Manival versant contre les crues," Technical Report. Office Nationales Forêts, Service de Restauration des Terrains en Montagne du Département de l'Isère, Grenoble, 2016.