

Application de l'approche des mécanismes de défaillance potentiels dans l'analyse des défauts des ouvrages en béton

Keyvan Maleki, ing., Ph.D.

Études de sécurité, Hydro-Québec Production, Montréal

Résumé

L'évaluation des défauts observés lors d'une inspection des ouvrages en béton (comme les fissures, les éclatements, les zones d'érosion, etc.) suscite un grand intérêt pour des spécialistes impliqués dans la maintenance des structures. Plusieurs efforts à Hydro-Québec ont permis d'archiver et de surveiller d'une manière efficace les défauts observés sur les barrages en béton. Cependant, la classification de ces défauts en ordre d'importance demeure un sujet de préoccupation qui est abordé par cet article.

La méthode présentée propose une façon d'attribuer un degré d'importance aux défauts observés et répertoriés. Celle-ci est basée sur deux volets principaux : premièrement, grâce à l'approche dite REMR (Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation) développée par US Corps of engineering, on attribue un degré de sévérité aux défauts observés, indépendamment de leur emplacement sur les éléments structuraux. Puis, selon l'approche des mécanismes de défaillance potentiels (MDP), on attribue un deuxième degré d'importance aux défauts. Ce dernier indice dépend de la position des défauts sur la structure et du rôle de l'élément concerné dans la fonctionnalité globale de l'ouvrage. La combinaison des deux indices permet de sélectionner les défauts les plus importants. Les résultats du processus demeurent assujettis au jugement de l'ingénieur responsable.

L'application de l'approche des MDP dans cette méthode est une idée innovatrice par rapport aux autres approches basées sur le fonctionnement des éléments structuraux, sur le temps requis pour l'intervention, ou encore sur la durée de vie des composantes structurales, etc.

La méthode proposée a été employée dans le cadre de l'évaluation de la sécurité d'un ouvrage de retenues à Hydro-Québec. Grâce à cette approche, un nombre élevé de défauts archivés a été évalué et seuls quelques-uns ont été retenus comme étant des défauts « à surveiller ».

1. Introduction

La Loi sur la sécurité des barrages exige une surveillance systématique sur les ouvrages de retenue par leurs propriétaires. Une procédure de surveillance est mise en pratique à Hydro-Québec qui correspond aux exigences de la Loi. Il s'agit d'une série d'inspections qui permet de préparer un inventaire des défauts importants et établir un suivi sur leur comportement. Cependant, la connaissance de l'importance relative des défauts est primordiale pour allouer d'une façon optimale le budget de maintenance et de réhabilitation. Cette importance prend d'autant plus d'ampleur quand on parle du parc des installations d'Hydro-Québec réparti à l'échelle de la province.

Plusieurs méthodes opérationnelles chez les propriétaires des ouvrages permettent de juger de l'importance des défauts. Cet article propose une nouvelle méthode pour évaluer les défauts

observés. La simplicité et la rapidité d'application de cette méthode sont deux avantages qui permettent de l'employer facilement dans l'évaluation des ouvrages.

2. Mise en contexte

L'approche proposée dans cet article permet d'identifier les défauts qui peuvent avoir un impact sur la sécurité ou la stabilité des ouvrages. Celle-ci est basée sur deux volets. D'abord, un degré de sévérité est attribué à chaque défaut, indépendamment de son emplacement ou de la fonction de l'élément structural affecté. Ce degré de sévérité prend en considération le défaut seul d'une échelle proche et donc il est nommé « *Micro-Indice* ».

D'autre part, il faut considérer le rôle de l'élément structural affecté par le défaut en question dans la sécurité globale de l'ouvrage. Puisque nous regardons à cette étape la structure totale, alors le paramètre rattaché au rôle de l'élément est nommé « *Macro-Indice* ». Afin d'étudier le comportement des composantes structurales et d'attribuer un *Macro-Indice*, l'approche dite « mécanismes de défaillance potentiels » (MDP) est employée.

La combinaison des deux indices résulte en un paramètre déterminant l'importance du défaut étudié, nommé ici « *Indicateur de suivi* ». La Figure 1 permet d'illustrer les deux volets mentionnés pour la détermination de l'*Indicateur de suivi*.

Il est évident que les défauts sélectionnés importants par la méthode proposée seront le sujet d'une vérification selon le jugement de l'ingénieur responsable. La connaissance technique sur la structure, l'étude sur l'historique des observations, la réalisation des inspections particulières ou des essais in situ, etc. peuvent aider l'ingénieur à concrétiser son jugement. Par la suite, l'ingénieur responsable sera en mesure de donner la suite aux défauts dans le cadre d'une intervention. L'analyse de la stabilité lors de l'étude d'évaluation de la sécurité¹, la réhabilitation de l'ouvrage, la surveillance particulières, etc. peuvent être considérés comme les différents types d'intervention. D'autre part, il se peut que les résultats des analyses démontrent que certains défauts n'ont pas vraiment d'impact considérable sur l'état structural. Ils peuvent alors être décotés de leur *Indicateur de suivi*. C'est pourquoi le lien entre l'*Indicateur de suivi* et l'intervention est une flèche gauche-droite. Comme on peut le constater, l'un des avantages de la méthode proposée est de prendre en compte à la fois l'impact de la défectuosité matérielle et la sécurité structurale.

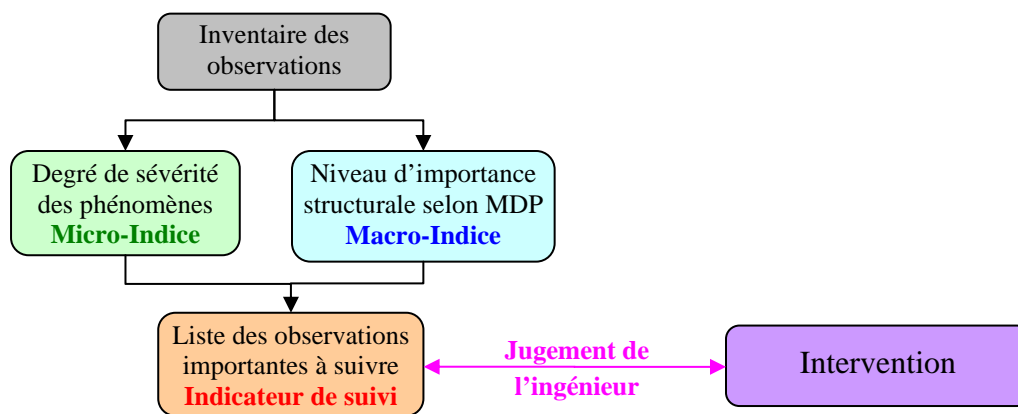


Figure 1. Schéma de l'analyse des observations

¹ Rapport produit par Hydro-Québec et envoyé au gouvernement selon la Loi pour prouver la sécurité d'un barrage.

3. Degré de sévérité des défauts ou Micro-Indice

Pour attribuer le *Micro-Indice*, il est avantageux d'établir une grille indiquant le degré de sévérité de chaque défaut structural en fonction de ses caractéristiques. Il faut mentionner que le nombre des références dans la littérature technique qui permettent d'attribuer un degré de sévérité aux défauts sur les ouvrages en béton de masse est limité. L'une des méthodes proposées par US Corps of engineering dans le domaine des barrages, qui a été utilisé par la suite à Hydro-Québec, est l'indice de condition. La grille de cette méthode est présentée au Tableau 1 qui a été établie par un comité d'expert à Hydro-Québec. Un compte rendu résumant cette méthode est produit (voir Chouinard et col. 2004). Ces indices sont, par ailleurs, validés grâce à une série d'analyses sur quelques aménagements hydroélectriques à Hydro-Québec.

Tableau 1. Échelle des défauts pour les structures en béton de masse (Chouinard et col. 2004)

Mass concrete (masonry) quality and reinforcement for dam/interface									
Function	To provide mechanical resistance and weight for stability								
Excellent	Mechanical properties and weight are within design criteria No sign of deterioration								
Failed	Displacement on horizontal joints (concrete). Shear zones with displacement (concrete and masonry dams). Results of coring indicate unacceptable mechanical properties (Refer to design parameters). Significant loss of section.								
Indicator	0 -- 9	10 -- 24	25 -- 39	40 -- 54	55 -- 69	70 -- 84	85 -- 100	Score	Comments
Deterioration leading to loss of section									
Superficial (0 to 10 cm)						X	X		
Extensive	X	X	X	X					
Lift joints (dry)									
Superficial deterioration						X	X		
Opening of lift joints				X	X	X			
Extensive deterioration			X	X	X				
Shear displacement on the lift joint		X	X						
Lift joints (wet)									
Superficial deterioration					X	X			
Opening of lift joints			X	X	X				
Extensive deterioration		X	X	X					
Shear displacement on the lift joint	X	X							
Cement leaching									
Cement leaching (stable)					X	X			
Cement leaching (Increasing)			X	X	X				
Presence of cracks (dry)									
Thermal and shrinkage crack						X	X		
Polygonal cracking						X	X		
Cracks caused by freeze-thaw					X	X			
Cracks caused by swelling			X	X	X				
Differential displacement on diagonal crack		X	X	X					
Presence of cracks (wet)									
Cracks caused by freeze-thaw			X	X	X				
Diagonal cracks		X	X	X					
Cracks caused by swelling		X	X	X					
Cantilever tension cracks (upstream face)		X	X	X					
Differential displacement on diagonal crack	X	X	X						
Measurement:									
Mechanical properties									
Mechanical properties above requirement for stability						X	X		
Mechanical properties below requirement for stability	X	X	X						
Reinforcement and tendons:									
Loss of post tensioning (non-grouted tendons only)									
No loss							X		
Acceptable loss (for stability)					X	X			
Unacceptable loss (for stability)	X	X	X						
Reinforcement and tendons:									
Loss of post tensioning (grouted tendons only)									
Loss of post tensioning	X	X	X	X					
Additional information (e.g. defects)									

Tel que montré, les défauts classés au tableau sont répartis sur une échelle de 0 à 100. Cette échelle est basée sur l'approche dite REMR (Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation) employée par US Corps of engineering pour caractériser des barrages. Le Tableau 2 (venant de la référence Anderson et Torrey 1995) permet de visualiser cette approche. L'indice de condition présenté varie de 0 à 100 en fonction de l'état de l'élément structural considéré.

Les indices supérieurs à 70 (marqués en vert) ne rendent pas nécessaire une intervention immédiate alors que les indices faibles et inférieurs à 40 (marqués en rouge) exigent une intervention. Les indices intermédiaires en jaune recommandent plutôt une analyse économique pour choisir la meilleure solution qu'une intervention immédiate.

Tableau 2. Échelle des défauts selon la méthode REMR (Anderson et Torrey 1995)

Zone	Condition Index	Condition Description	Recommended action
1	85 to 100	Excellent: No noticeable defects. Some aging or wear may be visible.	Immediate action is not required
	70 to 84	Good: Only minor deterioration or defects are evident.	
2	55 to 69	Fair: Some deterioration or defects are evident. But function is not significantly affected.	Economic analysis of repair alternatives is recommended to determine appropriate action.
	40 to 54	Marginal: Moderate deterioration. Function is still adequate.	
3	25 to 39	Poor: Serious deterioration in at least some portions of the structure. Function is inadequate.	Detailed evaluation is required to determine the need for repair, rehabilitation, or reconstruction. Safety evaluation is recommended.
	10 to 24	Very poor: Extensive deterioration. Barely functional.	
	0 to 9	Failed: No longer functions. General failure or complete failure or a major structural component.	

La dernière étape afin d'attribuer le *Micro-Indice* est d'identifier les défauts importants qui amènent la structure dans la zone rouge ou bien ceux qui la gardent dans la zone verte du tableau précédent. À cet effet, selon l'historique et l'expérience à Hydro-Québec, le présent article propose un regroupement des défauts observé selon quatre catégories :

- Léger : qui signifie un défaut peu important. En absence d'évolution, il peut être jugé inactif par l'ingénieur responsable ;
- Moyen : d'une importance modérée qui doit être observé lors des inspections régulières ;
- Important : qui donne la référence à un défaut dont le suivi particulier est requis et
- Très important : qui se définit comme un défaut nécessitant une éventuelle intervention.

Le Tableau 3 présente le *Micro-Indice* attribué aux défauts. Ce tableau ressemble aux autres approches équivalentes, par exemple la méthode d'inspection employée par le MTQ (voir MTQ 2012). Cependant, il faut souligner que dans ce tableau, les défauts sont regroupés en fonction des caractéristiques des barrages en tant que des ouvrages massifs en contact avec l'eau.

Tableau 3. Degré de sévérité des défauts des ouvrages massifs en béton

Description des défauts	Degré de sévérité ou Micro-Indice			
	Léger	Moyen	Important	Très important
	Peut devenir inactif	Inspection requise	Surveillance requise	Intervention requise
Érosion (Frottement de glace/écoulement)	Profondeur < 10 mm	10 mm < Profondeur < 30 mm et Longueur < 2 m	30 mm < Profondeur < 50 mm ou 2m < Longueur < 5 m	Profondeur > 50 mm ou Longueur > 5 m
Éclatement (Bris de béton)	Profondeur < 10 mm	10 mm < Profondeur < 30 mm et longueur < 1 m	30 mm < Profondeur < 50 mm ou 1m < Longueur < 2 m	Profondeur > 50 mm ou Longueur > 2 m
Fissure (Ouverture dans le béton)	Ouverture < 1 mm Thermique-Retrait	1mm < Ouverture < 5 mm Longueur < 5 m Polygonale	5 mm < Ouverture < 10 mm et Longueur > 5 m Diagonale-Structurale	10 mm < Ouverture Diagonale-Structurale avec évolution
Venue d'eau (Infiltration à travers joint/fissure)	Humide mais sans écoulement Longueur < 5 m	Suintement ou Débit/m Joint < 0,5 L/min. Longueur < 5 m	0,5 L/min.<Débit/m Joint<1 L/min. Longueur > 5 m	Débit/m joint > 1 L/min. En contact avec le réservoir
Joint défectueux (Endommagement / Décrochement)	Larg. d'endom. aux lèvres<2 cm	2 cm<Larg. d'endom. aux lèvres<10cm	10cm<Larg. d'endom.aux lèvres<20cm et Décrochement < 2 cm	Larg. d'endom. aux lèvres>20cm ou Décrochement > 2 cm

4. Importance de la composante structurale ou Macro-Indice

Le deuxième indice de classification est basé sur l'importance de l'élément structural sur lequel se trouve le défaut concerné. À titre d'exemple, une fissure placée sur une poutre peu sollicitée qui ne joue pas de rôle essentiel dans l'intégrité d'une structure mérite moins de surveillance devant une fissure qui se trouve à un endroit critique de l'ouvrage. Afin d'attribuer un degré d'importance aux éléments structuraux, nous avons employé l'approche des mécanismes de défaillance potentielles (MDP). Cette approche est basée sur l'analyse du risque de l'ouvrage étudié. Concernant la sécurité des barrages, le risque peut être calculé par l'équation suivante (USBR 2003) :

$$Risque = \sum_{i=1}^{Cas \text{ chargement}} \left(P(\text{chargement}) \times \sum_{J=1}^{Réponse \text{ Possible}} (P(\text{Rupture}) \times \text{Conséquence}) \right) \quad \text{Équation 1}$$

Selon cette équation, la première étape pour déterminer les MDP d'une structure est de tracer son diagramme Rupture/Conséquence. En effet, les événements fâcheux dans le cadre de la sécurité des ouvrages de retenue peuvent être de deux catégories : « Rupture structurale » ou « Conséquence grave ». Tout ce qui peut être à l'origine d'un problème structural pouvant produire le bris de barrage est parmi les causes « Rupture ». Les fissures, le décrochement des joints ou le glissement de la structure au contact béton-rocher, la rupture par compression, etc. sont des exemples pour cette famille d'événements. Par ailleurs, les phénomènes pouvant entraîner une conséquence grave, sans compromettre l'état structural à une éventuelle rupture, sont classés parmi les phénomènes de la « Conséquence ». La perte de vie humaine, la perte de la production ou la perte des actifs (perte monétaire), le mal fonctionnement des vannes, l'inaccessibilité de la route sont des exemples pour la catégorie de conséquences.

Les étapes pour établir un diagramme de rupture/conséquence ainsi que définir les MDP sont expliquées plus en détail dans l'exemple donné à la section 6.

5. Indicateur de Suivi

Après avoir défini les *Micro* et *Macro-Indice*, nous sommes en mesure de produire un *Indicateur de suivi*. Ce paramètre permet d'avoir un jugement sur l'importance de chaque défaut évalué. D'un point de vue structural, les deux indices mentionnés peuvent être dépendants. Autrement dit, la probabilité pour que par exemple un élément structural important (dont le nombre de sollicitations est élevé) crée un défaut important est grande. Cependant, nous avons supposé que les deux indices mentionnés sont indépendants. Cette hypothèse crée une probabilité plus élevée et donc plus conservatrice. Cette idée est illustrée à l'aide des diagrammes de Venn sur la Figure 2. Comme on peut le constater, l'aire de la probabilité pour produire l'*Indicateur de suivi* dans le cas où les *Micro* et *Macro-Indice* sont indépendants est plus grande que le cas réel où les deux indices sont dépendants.

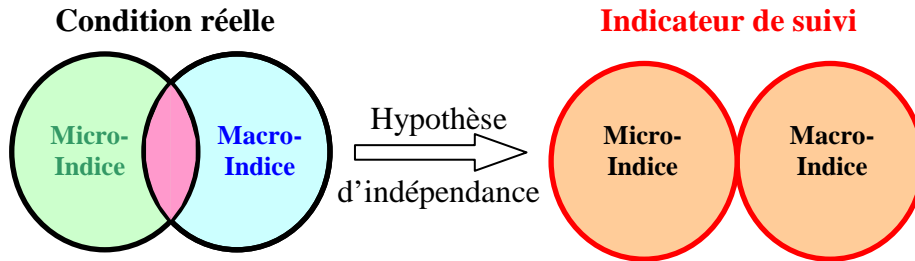


Figure 2. Diagrammes de Venn de Micro/Macro-Indice

En supposant l'hypothèse d'indépendance entre les deux indices et conformément aux règles statistiques, la probabilité de l'*Indicateur de suivi* selon la figure précédente sera :

$$\left. \begin{array}{l} P_{(\text{Micro-Indice})} \cap P_{(\text{Macro-Indice})} = 0 \\ P_{(\text{Micro}|\text{Macro})} = P_{(\text{Micro})} \\ P_{(\text{Macro}|\text{Micro})} = P_{(\text{Macro})} \end{array} \right\} \Rightarrow P_{(\text{Indicateur de suivi})} = P_{(\text{Micro-Indice})} \times P_{(\text{Macro-Indice})} \quad \text{Équation 2}$$

Selon cette approche, si par exemple l'un des deux indices est coté important (ou très important), l'*Indicateur de suivi* deviendrait important (ou très important). D'autre part, suivant l'hypothèse d'indépendance révélée ci-haut, on suppose qu'il n'y a pas d'amplification dans la combinaison des indices pour produire l'*Indicateur de suivi*. Par exemple, la combinaison de *Micro* et *Macro-Indice* classés par exemple « Moyen » ne peut produire un *Indicateur de suivi* classé « Important ». Le tableau des défauts présentés à la section 6.5 aide à mieux comprendre les explications données.

6. Mise en application

La méthode proposée a été employée dans le cadre d'une évaluation de la sécurité menée pour l'évacuateur L-1². Il s'agit d'un ouvrage de retenue vannée en béton qui permet d'évacuer le surplus du réservoir au besoin. La Figure 3 montre une vue en aval de l'évacuateur en indiquant ses composantes. Il possède deux passages hydrauliques sur les coursiers munis des vannes qui sont séparées par un pilier intermédiaire. Deux murs en béton aux extrémités séparent également la structure de l'évacuateur des parois rocheuses.

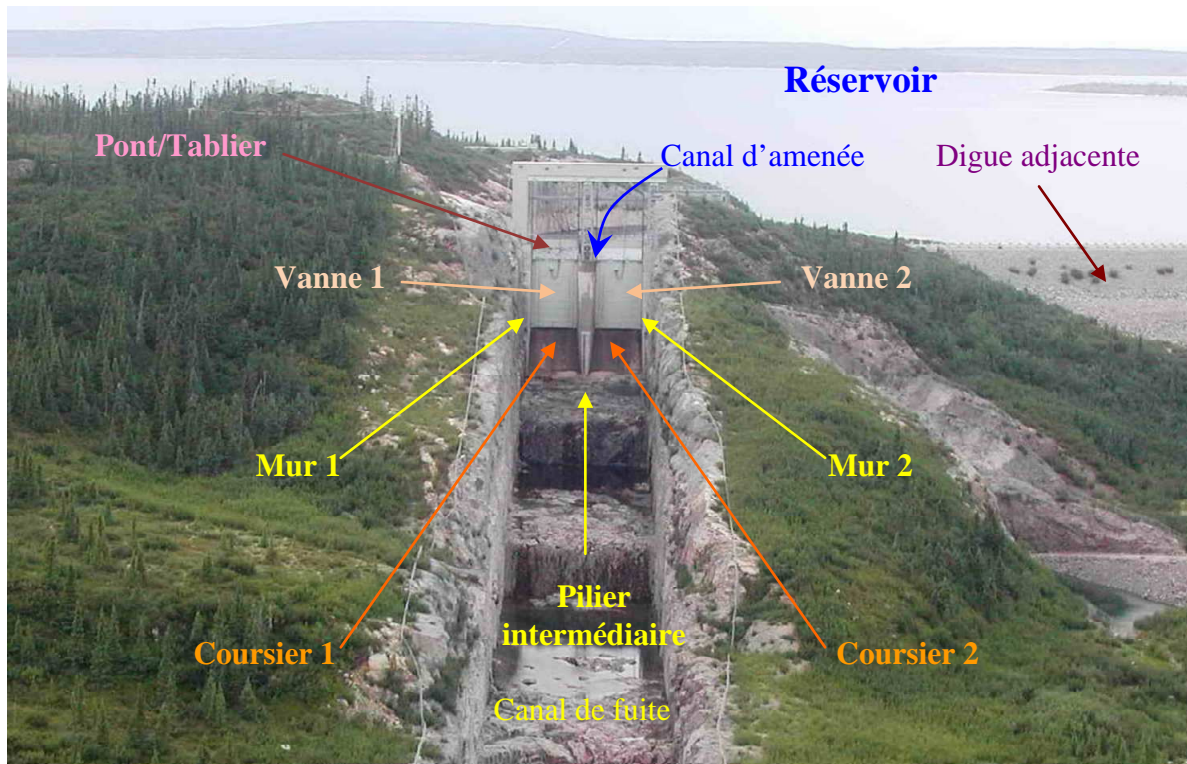


Figure 3. Vue en aval de l'évacuateur L-1

Dans le système d'inventaire des défauts, la structure de l'évacuateur est divisée en cinq éléments principaux soit le pilier intermédiaire, les deux murs externes, le coursier, les canaux de fuite et d'amenée et le pont/tablier. Le Tableau 4 présente l'inventaire des défauts archivés.

Les canaux d'amenée et de fuite qui se trouvent respectivement en amont et en aval de l'évacuateur sont exclus de cette liste. Comme on peut le constater, l'évacuateur L-1 possède un total de 246 observations.

Une partie des observations est déjà rendue inactive. L'état inactif dans ce tableau révèle des défauts dont le comportement n'a pas évolué et qui ne sont plus surveillés. En revanche, les défauts actifs sont les observations qui sont jugées pertinentes par l'ingénieur responsable d'être suivies lors des inspections. Le nombre des observations actives dans le tableau est grand et nécessite une analyse afin d'en déterminer les défauts importants.

² L-1 et L-2 sont les pseudonymes utilisés dans cet article pour les ouvrages étudiés.

Tableau 4. Inventaire des défauts à l'évacuateur L-1

Phénomène \ Composant		Composant					Somme
		Coursier	Mur 1	Mur 2	Pilier intermédiaire	Pont/Tablier	
Éclatement	actif	1	-	2	5	-	8
	inactif	1	10	8	2	1	22
Érosion	actif	5	1	1	1	-	8
	inactif	2	-	-	-	-	2
Fissure	actif	5	16	16	1	-	38
	inactif	22	21	22	32	-	97
Venue d'eau	actif	6	24	22	-	-	52
	inactif	1	7	1	6	-	15
Joint défectueux	actif	-	-	-	-	2	2
	inactif	-	-	-	2	-	2
Somme	actif	17	41	41	7	2	246
	inactif	26	38	31	42	1	
	Total	43	79	72	49	3	

6.1. Diagramme rupture-conséquence de l'évacuateur L-1

Selon les explications données, afin de définir le *Macro-Indice* pour les défauts inventoriés, la courbe de la probabilité de rupture versus la conséquence doit être tracée. Ce diagramme pour l'évacuateur L-1 est illustré à la Figure 4. Tel que montré, le point de départ correspond à l'état normal de l'évacuateur (niveau normal du réservoir). Le mal fonctionnement d'une vanne pourrait causer l'augmentation du niveau jusqu'à un niveau critique. Selon les analyses de stabilité, ce niveau ne cause ni la rupture de l'évacuateur ni la rupture des digues adjacentes. Cependant, il se peut que ce niveau cause la diminution du rendement des turbines et donc la perte de production. C'est la raison pour laquelle la ligne reliant le niveau normal au critique est parfaitement horizontale avec seulement un impact sur la conséquence et pas sur la rupture. Le mal fonctionnement de la deuxième vanne peut augmenter le niveau du réservoir jusqu'au niveau de la rupture des digues. À ce niveau, non seulement nous pouvons constater la perte dans le rendement des turbines (conséquence) mais aussi le risque de la rupture est présent. La ligne de cette partie est ainsi oblique avec une composante sur chacun des axes. Finalement, il faut prendre en compte l'impact d'une telle rupture sur l'aménagement L-2 situé en aval de L-1. Il se peut qu'à la suite de la rupture dans l'une des digues de L-1, le niveau monte à L-2. Cette situation peut causer à la fois la perte de production et menace la stabilité des ouvrages à l'aménagement L-2. Par conséquent, cette dernière ligne, illustrée en vert sur le diagramme suivant a aussi une composante sur les deux axes.

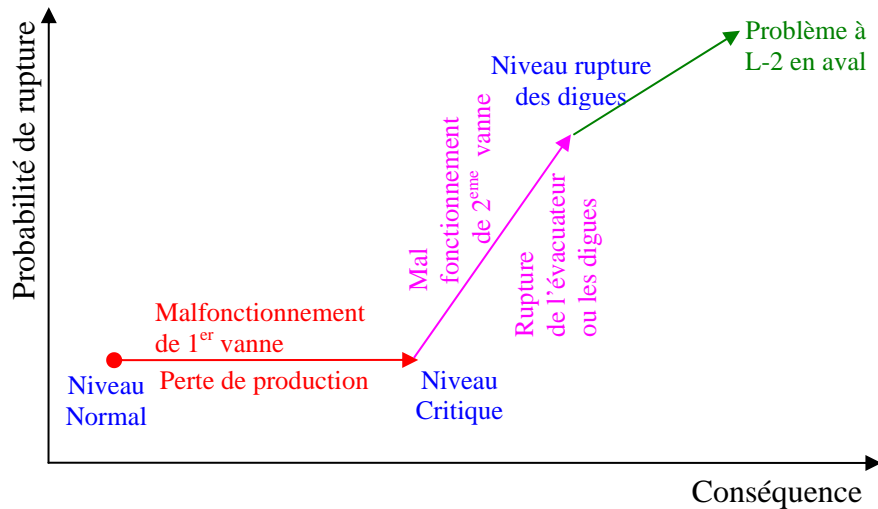


Figure 4. Diagramme de rupture-conséquence de l'évacuateur L-1

6.2. Mécanismes de défaillance

En détaillant les paramètres qui peuvent influencer la conséquence ou causer la rupture dans la section précédente, nous sommes en mesure d'établir le mécanisme de défaillance de l'évacuateur L-1. Ceci est présenté dans le diagramme suivant (Figure 5) sous la forme d'un arbre d'événements.

Comme nous pouvons le constater, le mécanisme de défaillance commence avec la possibilité d'occurrence d'un problème structural à chacune des sous-composantes de l'ouvrage. Il est supposé que le canal d'amenée n'a aucun impact sur l'évacuateur. Il faut également mentionner que l'importance de pont/tablier pour assurer la sécurité et donner accès aux vannes ou aux installations est évidente. Cet élément est surveillé par l'unité d'infrastructure à Hydro-Québec. Cependant, il ne joue pas de rôle important dans la sécurité de l'évacuateur en tant qu'un ouvrage de retenue. Par conséquent, nous supposons que le problème du pont/tablier ne peut influencer la stabilité ou la fonctionnalité de l'évacuateur. C'est pourquoi la sortie de cette sous-composante dans le diagramme est bloquée. Par ailleurs, nous avons supposé que le problème structural dans le canal de fuite ne peut non plus menacer la stabilité ni la fonctionnalité de l'évacuateur. Alors, la sortie de cette sous-composante est aussi bloquée.

En ce qui concerne les problèmes de la discipline civile qui peuvent influencer la fonctionnalité de l'évacuateur, seulement deux éléments sont pris ici en compte. Il s'agit du pilier intermédiaire et des deux murs externes. Quant au coursier, il est supposé que seulement sa partie proche des vannes (surtout à l'endroit du pilier intermédiaire) peut influencer la fonctionnalité de l'évacuateur.

Suivant l'approche des MDP, le problème essentiel de l'évacuateur correspond à l'état non opérationnel de ses vannes (montré en mauve sur l'image). Les analyses hydrauliques basées sur les caractéristiques du site étudié montrent que le mal fonctionnement simultané des deux vannes évacuatrices pourrait sous certaines conditions entraîner le rehaussement du réservoir à un niveau critique. Il s'agit d'un niveau qui peut menacer la sécurité structurale des ouvrages. Cette partie dans le diagramme est marquée par les analyses hydrauliques avec un cadre bleu. Cela facilite la production de l'arbre des événements car une fois qu'il est établi, il ne change pas dans le temps.

Par ailleurs, souvent l'arbre d'événements sous la forme de l'algorithme montré à la Figure 5 peut être employé pour les ouvrages qui se ressemblent. À titre d'exemple, le mécanisme établi pour l'évacuateur de L-1 peut être utile dans la préparation d'un tel mécanisme pour un autre évacuateur dont la forme structurale ou l'application sont similaires à ceux de l'évacuateur L-1. La série des événements dangereux comme la rupture de l'évacuateur ou des digues est montrée en rouge sur la figure. En ce qui concerne la rupture de l'évacuateur, il faut souligner que les problèmes structuraux de son pilier intermédiaire qui influencent les deux vannes sont considérables.

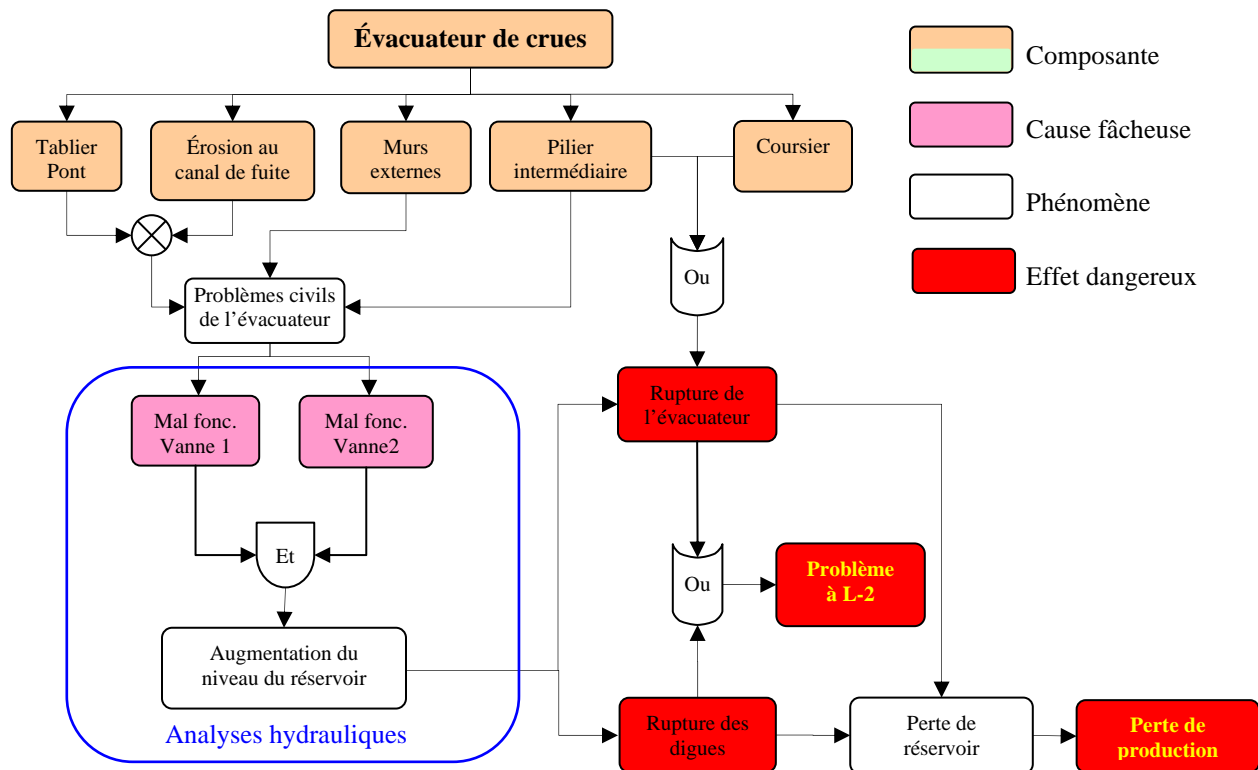


Figure 5. Arbres des événements de l'évacuateur L-1 selon les MDP

Basé sur les explications données, les niveaux d'importance structurale (ou *Macro-Indice*) attribués aux composantes selon l'approche des MDP sont présentés au Tableau 5.

Comme nous l'avons vu dans l'arbre des événements (Figure 5) seulement le mal fonctionnement des deux vannes pourrait entraîner une conséquence. Alors la partie structurale reliée à cette cause, soit le béton à proximité des vannes du pilier intermédiaire est classée très importante. Le reste de ce pilier puisqu'il joue un rôle important dans la stabilité de l'évacuateur est classé important. Par ailleurs, le béton à proximité des vannes des murs externes (qui peut causer le problème pour une seule vanne) est aussi classé important. Il faut mentionner que le reste des murs externes selon leurs caractéristiques n'est pas important. En effet, ils sont des ouvrages goujonnés dans les parois rocheuses dont la probabilité de rupture est faible. Quant au coursier, vu la bonne qualité du roc de la fondation au site, sa classe est légère sauf la zone proche des vannes qui peut endommager les vannes (avec un risque faible). Le reste de la structure a un degré d'importance léger.

Dans ce qui suit, à titre d'exemple nous allons présenter une série d'images sur trois sous-composantes structurales soit le coursier et les deux murs externes.

Tableau 5. Degrés de sévérité attribués aux éléments structuraux selon l'approche des MDP

Élément structural	Niveau d'importance structural ou Macro-Indice
Zones proches des vannes du pilier intermédiaire	Très important
Reste du pilier intermédiaire	Important
Zones proches des vannes des murs externes	
Reste des murs externes	Moyen
Zones proches des vannes du coursier	
Reste du coursier	Léger
Canal d'amené et canal de fuite	
Pont/Tablier	

6.3. Murs externes

Le mur 1 de l'évacuateur contient un total de 79 observations dont 41 sont présentement actives. Il s'agit d'une érosion, seize fissures et vingt-quatre venues d'eau (voir le Tableau 4). La Figure 6 permet de visualiser l'emplacement des observations sur le mur 1. Comme nous l'avons mentionné, seulement les défauts proches des rainures de la vanne qui peuvent causer le mal fonctionnement de cette dernière ont le *Macro-Indice* important. La fissure n°68 en est un exemple. Cette fissure est probablement due au retrait du béton ou à la variation thermique. Cependant, le *Macro-Indice* attribué à cette fissure à cause de sa position proche de la vanne est « Important ». Le reste de ce mur est goujonné dans la paroi rocheuse et sa stabilité n'est pas menacée. Alors son *Macro-indice* est moyen.

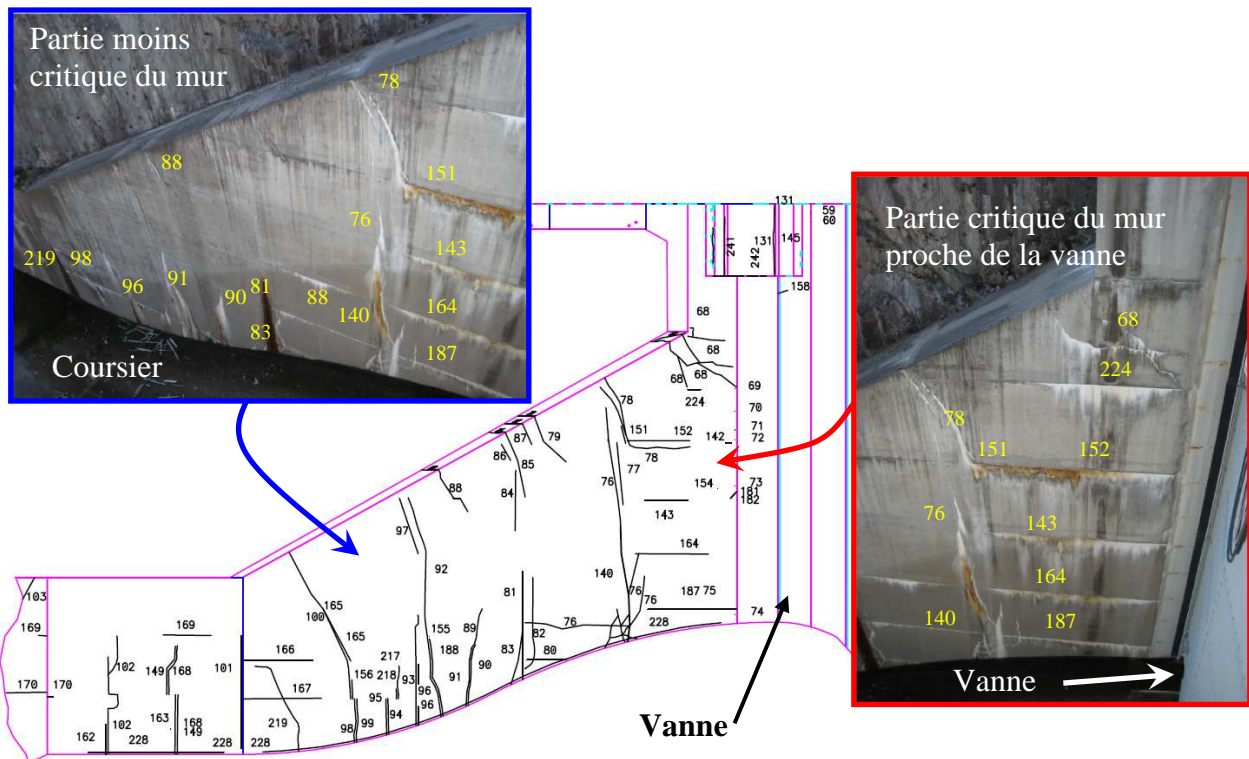


Figure 6. Relevé des observations sur le mur 1 et emplacement des défauts importants

En ce qui concerne le mur 2 de l'évacuateur, il contient un total de 72 observations dont 41 sont présentement actives (voir le Tableau 4). La Figure 7 montre le relevé des observations et les défauts importants placés sur le mur 2. Les *Macro-Indices* attribués à ce mur sont similaires à ceux du mur 1.

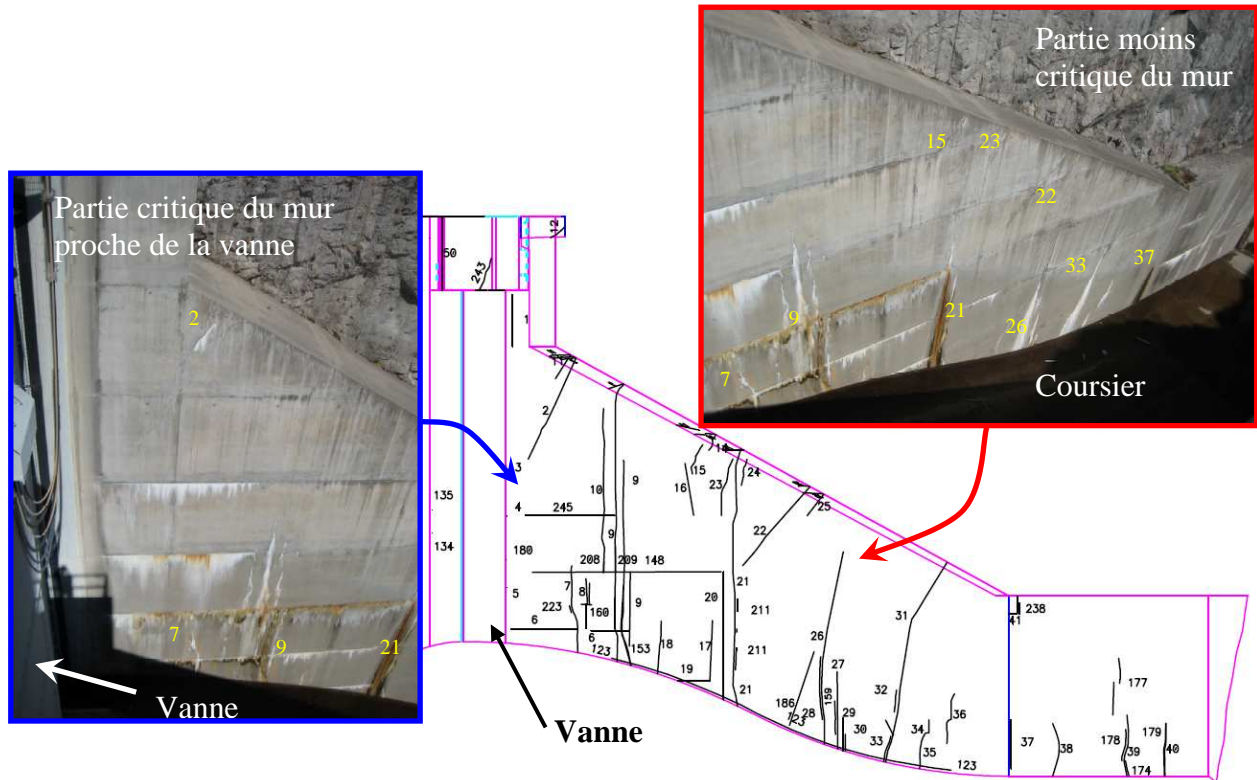


Figure 7. Relevé des observations sur le mur 2 et emplacement des défauts importants

6.4. Coursier

Le coursier de l'évacuateur contient un total de 43 observations dont 17 sont présentement actives. Il s'agit d'un éclatement, cinq érosions, cinq fissures et six venues d'eau (voir le Tableau 4). Les coursiers sont construits sur le roc de bonne qualité et aucun signe de glissement et de défaut n'a été observé. Alors son impact sur la stabilité de l'évacuateur est faible. Sauf la partie qui se trouve proche des vannes. Cette zone peut causer le manque d'étanchéité et éventuellement la formation de glace qui favorise l'endommagement ou le mal fonctionnement des vannes. Alors cette zone a le *Macro-Indice* moyen (voir le Tableau 5). Le relevé des observations et les défauts importants placés sur les deux coursiers sont présentés à la Figure 8.

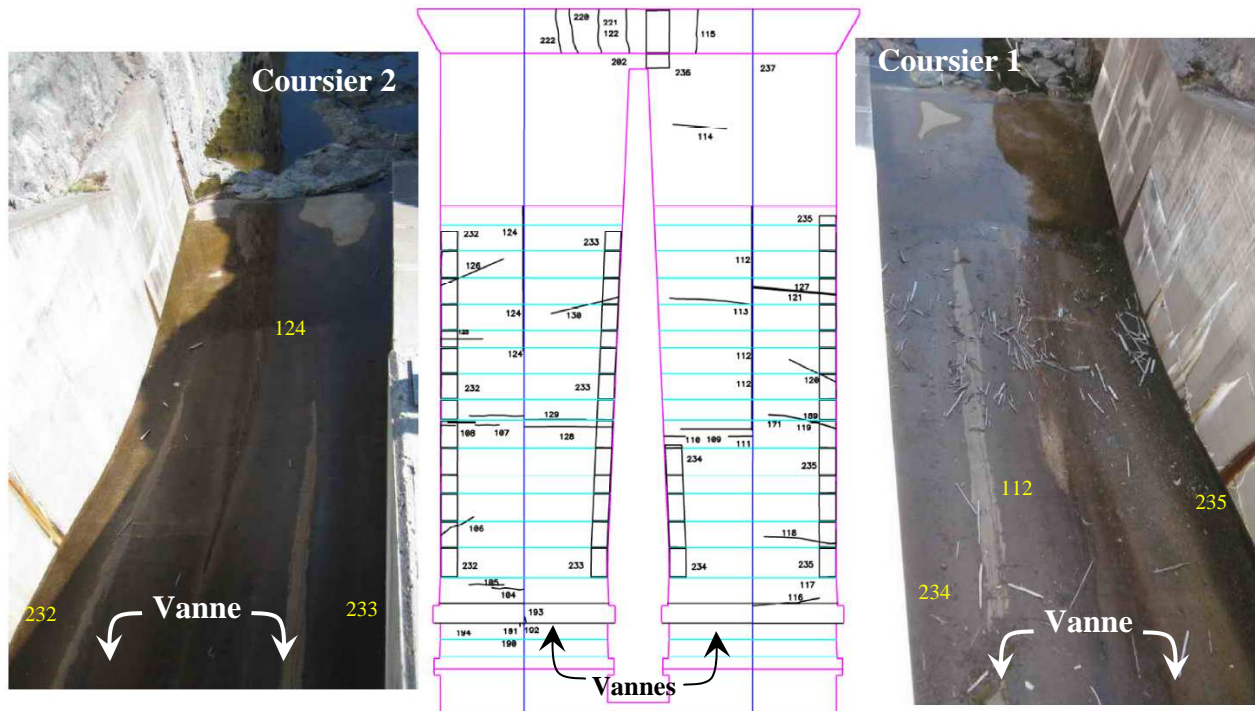


Figure 8. Relevé des observations et défauts importants des coursiers de l'évacuateur L-1

6.5. Analyse des observations

Comme nous l'avons vu à la Figure 1, l'*Indicateur de suivi* provient de deux volets parallèles soit le degré de sévérité attribué selon les caractéristiques de chaque anomalie (*Micro-Indice*) et le degré de sévérité donné selon le mécanisme de défaillance (*Macro-Indice*). Le Tableau 6 permet de présenter le résumé des analyses données sur les défauts. Les trois dernières colonnes de ce tableau montrent les indices discutés. Rappelons que la dernière colonne soit l'*Indicateur de suivi* est obtenue à l'aide de la combinaison des deux colonnes des indices. Ce paramètre permet de clarifier l'état de surveillance élaboré pour chaque observation.

Comme on peut le constater, le nombre des défauts cotés « très important » dans le tableau est limité. Le nombre des défauts « important » n'est pas considérable non plus. Ce tableau peut jouer un rôle important dans le jugement sur l'importance des défauts en vue de la sécurité des ouvrages.

Tableau 6. Analyse sur la surveillance des défauts

No.	Élément structural	Phénomène	Type	Qualifi. 1	Qualifi. 2	Long. (m)	Largeur (m)	Profond. (mm)	Surface (m²)	Débit (l/min)	Micro-Indice	Macro-Indice	Indicateur de suivi
194	COURSIER	Eclatement	Local			0,15	0,1	35			Important	Moyen	Important
232	COURSIER	Erosion	Étendu	Par abrasion			1,3	10	24,19		Moyen	Léger	Moyen
233	COURSIER	Erosion	Étendu	Par abrasion			1,3	10	23,72		Moyen	Léger	Moyen
234	COURSIER	Erosion	Étendu	Par abrasion			1,3	5	9,27		Léger	Léger	Léger
235	COURSIER	Erosion	Étendu	Par abrasion			1,3	10	25,49		Moyen	Léger	Moyen
236	COURSIER	Erosion	Étendu	Par abrasion			1,5	10	6,25		Moyen	Léger	Moyen
119	COURSIER	Fissure	Unique	Oblique		4,56	Très fine, < 0,5 mm.				Léger	Léger	Léger
121	COURSIER	Fissure	Unique	Oblique		5,51	Très fine, < 0,5 mm.				Moyen	Léger	Moyen
191	COURSIER	Fissure	Unique	Longitudinale		0,21	Très fine, < 0,5 mm.				Léger	Moyen	Moyen
192	COURSIER	Fissure	Unique	Longitudinale		0,35	Très fine, < 0,5 mm.				Léger	Moyen	Moyen
193	COURSIER	Fissure	Unique	Oblique		0,39	Très fine, < 0,5 mm.				Léger	Moyen	Moyen
112	COURSIER	Venue d'eau	Étalé	Claire	Efflorescente	15,22				Suintement (Q<=0,1)	Moyen	Léger	Moyen
124	COURSIER	Venue d'eau	Étalé	Claire	Efflorescente	9,63				0,1	Important	Léger	Important
125	COURSIER	Venue d'eau	Étalé	Claire	Efflorescente	2,79				Suintement (Q<=0,1)	Moyen	Léger	Moyen
127	COURSIER	Venue d'eau	Étalé	Claire	Efflorescente	5,51				0,1	Important	Léger	Important
189	COURSIER	Venue d'eau	Étalé	Claire	Efflorescente	4,56				Humide, pas d'écoulement	Moyen	Léger	Moyen
190	COURSIER	Venue d'eau	ensembl	Jailissante	Claire					1	Très important	Léger	Très important

Tableau 6. Suite

No.	Élément structural	Phénomène	Type	Qualifi. 1	Qualifi. 2	Long. (m)	Largeur (m)	Profond. (mm)	Surface (m²)	Débit (l/min)	Micro-Indice	Macro-Indice	Indicateur de suivi
228	MUR 1	Érosion	Étalé	Par abrasion		31.23	0.04				Moyen	Moyen	Moyen
68	MUR 1	Fissure	Ensemble	Oblique	Transversale	13.82	Très fine, < 0.5 mm	20			Moyen	Important	Important
76	MUR 1	Fissure	Ensemble	Horizontale	Verticale	27.03	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
78	MUR 1	Fissure	Ensemble	Oblique	Horizontale	9.2	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
89	MUR 1	Fissure	Unique	Oblique		4.71	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
92	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		10.55	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
93	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		5.27	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
94	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		1.68	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
98	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		2.07	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
100	MUR 1	Fissure	Unique	Oblique		7.71	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
102	MUR 1	Fissure	Ensemble	Verticale		7.32	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
147	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		0.59	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
149	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		5.22	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
207	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		5.48	Très fine, < 0.5 mm				Moyen	Moyen	Moyen
217	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		1.55	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
241	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale	Oblique	2.83	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
242	MUR 1	Fissure	Unique	Verticale		1.68	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
80	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.96				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
81	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	5.04				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
90	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente					Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
95	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.68				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
96	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.77				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
99	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	2.03				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
101	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	5.24				0.5	Important	Moyen	Important
140	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	5.45				Humide, pas d'écoulement	Important	Moyen	Important
143	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	2.2				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
151	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	0.83				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
152	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	3.2				Nul, sec ou asséché (Q=0)	Léger	Moyen	Moyen
156	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	0.9				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
162	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.4				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
163	MUR 1	Venue d'eau	Unique	Clair	Efflorescente					Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
164	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Efflorescente		3.71				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
165	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	2.81				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
166	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	3.55				Nul, sec ou asséché (Q=0)	Léger	Moyen	Moyen
167	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	3.99				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
168	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	5.23				Humide, pas d'écoulement	Important	Moyen	Important
170	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	2.22				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
187	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Efflorescente	Clair	4.52				Humide, pas d'écoulement	Léger	Important	Important
188	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	3.72				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
218	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	0.47				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
224	MUR 1	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	0.65				Nul, sec ou asséché (Q=0)	Léger	Important	Important
134	MUR 2	Eclatement	Local			0.3	0.2				Léger	Important	Important
135	MUR 2	Eclatement	Local			0.3	0.2				Léger	Important	Important
123	MUR 2	Érosion	Étalé	Par abrasion		17.85	0.05	10			Moyen	Moyen	Moyen
7	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		4.06	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Important	Important
9	MUR 2	Fissure	Ensemble	Verticale	Transversale	28.69	Très fine, < 0.5 mm				Important	Moyen	Important
10	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		7.61	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
21	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		14.34	Très fine, < 0.5 mm				Important	Moyen	Important
26	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale	Oblique	8.97	Très fine, < 0.5 mm				Important	Moyen	Important
27	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		3.56	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
29	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		1.48	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
31	MUR 2	Fissure	Ensemb	Oblique		10.69	Très fine, < 0.5 mm				Important	Moyen	Important
34	MUR 2	Fissure	Unique	Oblique		2.46	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
39	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		2.86	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
40	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		2.42	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
41	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale	Horizontale	1.22	0.5				Léger	Moyen	Moyen
204	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		2.78	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
205	MUR 2	Fissure	Unique	Verticale		2.18	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
206	MUR 2	Fissure	Unique	Oblique		2.9	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Moyen	Moyen
243	MUR 2	Fissure	Unique	Oblique		1.6	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Important	Important
6	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	5.18				Suintement (Q<=0.1)	Important	Moyen	Important
19	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.56				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
20	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	5.87				Suintement (Q<=0.1)	Important	Moyen	Important
28	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	2.91				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
30	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	0.75				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
32	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.02				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
33	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.24				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
35	MUR 2	Venue d'eau	Unique	Clair	Efflorescente					Nul, sec ou asséché (Q=0)	Léger	Moyen	Moyen
37	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	2.25				0.3	Important	Moyen	Important
148	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	9.46				Humide, pas d'écoulement	Important	Moyen	Important
153	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	5.16				Suintement (Q<=0.1)	Important	Moyen	Important
159	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.55				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
174	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	0.73				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
178	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Efflorescente		1.49				Nul, sec ou asséché (Q=0)	Léger	Moyen	Moyen
179	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair		2.42				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
180	MUR 2	Venue d'eau	Unique	Clair						Nul, sec ou asséché (Q=0)	Léger	Important	Important
208	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Efflorescente	Clair	0.5				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
209	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Efflorescente	Clair	1.15				Humide, pas d'écoulement	Léger	Moyen	Moyen
211	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	1.68				Suintement (Q<=0.1)	Moyen	Moyen	Moyen
223	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair	Efflorescente	0.34				Humide, pas d'écoulement	Léger	Important	Important
238	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair		0.46				Nul, sec ou asséché (Q=0)	Léger	Moyen	Moyen
245	MUR 2	Venue d'eau	Étalé	Clair		4.48				Petit (0.1<Q<=4)	Important	Important	Important
57	PILIR INTER	Eclatement	Local			0.24	0.11				Léger	Très important	Très important
136	PILIR INTER	Eclatement	Local			0.2	0.1				Léger	Important	Important
138	PILIR INTER	Eclatement	Local			0.2	0.15				Léger	Très important	Très important
244	PILIR INTER	Eclatement	Local			0.38	0.19	35			Important	Très important	Très important
246	PILIR INTER	Eclatement	Étendu					30			Important	Très important	Très important
231	PILIR INTER	Érosion	Étalé	Par abrasion		5	0.035	10			Moyen	Important	Important
240	PILIR INTER	Fissure	Unique	Transversale		2.41	Très fine, < 0.5 mm				Léger	Important	Important
133	Pont/Tablier	Joint défectueux	Local			0.7	0.1				Léger	Léger	Léger
239	Pont/Tablier	Joint défectueux	Local			0.5	0.1				Léger	Léger	Léger

Il faut souligner que le jugement de l'ingénieur joue un rôle essentiel afin de recommander une intervention pour les défauts dont l'Indicateur de suivi est important (voir la Figure 1). À titre d'exemple, l'Indicateur de suivi de la fissure n°68 expliquée ci-haut et montrée sur la Figure 6 est important à cause de sa position proche de la vanne. Toutefois, si l'évolution de cette fissure avec le temps n'est pas considérable, l'ingénieur responsable pourrait décaler son Indicateur de suivi.

7. Conclusion

L'examen détaillé des défauts affectant le comportement structural est un enjeu essentiel dans l'analyse de la sécurité des ouvrages. Il est important dans le diagnostic d'un ouvrage de pouvoir sélectionner les défauts qui peuvent compromettre son intégrité ou sa sécurité structurale. Par ailleurs, la gestion des structures et la contribution logique du budget de réhabilitation, nécessitent également un outil pour évaluer les défauts.

À cet effet, une approche méthodique pour réaliser une surveillance optimale et efficace sur les défauts structuraux est présentée par cet article. Cet outil est applicable autant pour le suivi du comportement que pour la sécurité des barrages. De plus, il permet d'appuyer le jugement de l'ingénieur responsable sur l'état du comportement structural. Parmi les autres avantages de cette méthode, on peut mentionner son application pour harmoniser les avis techniques sur les défauts. Par ailleurs, l'approche méthodique permet d'assurer la répétitivité, la reproductivité et la continuité dans les avis techniques.

Malgré que l'approche des MDP peut sembler compliquée au départ, elle permet d'acquérir une compréhension approfondie sur l'importance des éléments structuraux. Il faut également souligner qu'une fois le mécanisme de défaillance pour un ouvrage est établi, celui-ci restera souvent sans changement durant la vie utile de la structure. De plus, l'analyse de mécanismes de défaillance peut être générale pour tous les ouvrages similaires. Ce qui rend encore plus facile son application.

Il est évident que les paramètres présentés dans cette méthode, autant pour la calibration des indices que pour les détails techniques, ont besoin de vérification et de validation. L'historique des suivis du comportement et le retour sur la méthode permettront de faire la lumière sur la pertinence des paramètres choisis.

8. Références

Chouinard L., Bourdarot E., De Laleu V., Larivière R. Maniez J., Robichaud J.G. et Schellenberg G., 2004 « Condition assessment methodology for gravity dams. »

Andersen G.R. et Torrey V.H., 1995 « Function-based condition indexing for embankment dams.» *Journal of geotechnical engineering* 121 no 8, pp 579-588.

MTQ – Gouvernement du Québec, 2012 « Manuel d'inspection des structures. »

USB, 2003, « Dam Safety Risk Analysis Methodology.»