

Système d'évaluation et de gestion des ponts du réseau routier

Bah, Abdoul Salam¹, Sasai, Kotaro², Kamileris, Nathalie³, Conciatori, David⁴, Chouinard, Luc⁵, Power, Gabriel⁶, Zufferey, Nicolas⁷ and Thomas Sanchez⁸

¹ Université Laval, Québec, Canada, abdoul-salam.bah.1@ulaval.ca

² McGill University, kotaro.sasai@mail.mcgill.ca

³ Université Laval, Québec, Canada, nathalie.kamileris.1@ulaval.ca

⁴ Université Laval, Québec, Canada, david.conciatori@gci.ulaval.ca

⁵ McGill University, luc.chouinard@mcgill.ca

⁶ Université Laval, Québec, Canada, gabriel.power@fsa.ulaval.ca

⁷ GSEM – University of Geneva, Genève, Suisse n.zufferey@unige.ch

⁸ Université de Lyon, Lyon, France, thomas.sanchez@univ-lyon1.fr

RESUME La congestion du réseau routier et les pertes de service sont associées aux activités d'entretien et de réparation du réseau. Ce phénomène est fréquent dans les zones urbaines densément peuplées où la congestion des ponts, des autoroutes ou des petites rues a une incidence négative sur les coûts et la pollution liés à l'utilisation d'un véhicule (usure des pneus, entretien, carburant, émissions) et sur les temps de déplacement en raison des détours. Les systèmes actuels de gestion des ponts (par exemple Pontis, Bridgit, Kuba, Danbro, FINNRA) sont basés sur des chaînes de Markov et l'optimisation numérique pour évaluer l'évolution de l'état d'un pont et utilisés pour planifier les activités d'entretien et de réparation sur des structures individuelles indépendamment les unes des autres. Ils négligent les impacts négatifs de ces activités sur le réseau et ses utilisateurs. Cet article présente une procédure pour évaluer l'état d'un réseau routier en fonction de l'état des ponts individuels et de l'impact des fermetures partielles ou complètes des ponts et de l'augmentation des temps de parcours par les utilisateurs. L'impact des fermetures est évalué au moyen d'une procédure qui réaffecte le trafic sur la base de l'équation de Wardrop pour une analyse locale origine-destination des détours de trafic pour chaque pont et évalue les impacts sur les coûts pour les utilisateurs du réseau. L'état général du réseau est déterminé comme une somme pondérée de l'état de chaque pont et des niveaux de trafic. Les évaluations du réseau peuvent être utilisées par les décideurs pour planifier les activités d'entretien et de réparation qui maximisent l'efficacité globale du réseau. La procédure proposée est démontrée pour un réseau de référence de trois ponts à Montréal et divers scénarios de réparation et d'entretien.

Mots-clés ponts urbains, gestion, analyse réseau, impact sur les utilisateurs

I. INTRODUCTION

La gestion du trafic pendant les travaux d'entretien ou de réhabilitation des réseaux routiers en milieu urbain représente un défi pour les gestionnaires d'infrastructures. L'analyse de réseau peut être utilisée pour optimiser les activités d'entretien dans l'espace et dans le temps afin de réduire les impacts négatifs sur les temps de parcours, les coûts liés à l'utilisation d'un véhicule (usure des pneus, entretien, carburant), les accidents et la pollution urbaine. Les coûts socio-économiques annuels associés aux perturbations de ces activités ont été estimés à 4.2 milliards de dollars CAD en 2018 pour la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM), à 1.3 milliard de dollars CAD pour Laval et la Côte-Nord, et à 2.9 milliards de dollars CAD pour Longueuil et la banlieue sud (LAPRESSE, 2018).

Plusieurs systèmes de gestion des ponts (BMS- Bridge Management Systems) ont été développés dans le but d'évaluer l'état des ponts individuels et de prévoir les activités futures d'entretien, de réparation et de remplacement. Cependant, ces systèmes sont principalement utilisés pour l'évaluation des ponts individuels et ne peuvent pas être utilisés pour effectuer des analyses qui tiennent compte des impacts sur le niveau de service du réseau (Adey et al., 2003 ; Orcesi et Cremona, 2010 ; Nili et al., 2021). Au fil des ans, le déficit d'entretien cumulé a été important et a entraîné une augmentation des activités annuelles d'entretien et de réparation qui nécessitent une planification dans le temps et dans l'espace (ASCE, 2021).

Plusieurs modèles de gestion intégrée des ponts dans les réseaux routiers ont été proposés. Ces modèles sont basés sur des estimations des taux de détérioration, de la fiabilité, des risques, de la résilience et des coûts, afin de programmer les réparations majeures et/ou le remplacement des structures du réseau (Banerjee et al., 2019 ; Cavalline et al., 2015 ; Dong et al., 2014 ; Guo et al., 2017 ; Liu et Frangopol, 2006). Cependant, l'optimisation des activités dans l'espace et le temps ne prend pas en compte la fermeture partielle ou totale des ponts et les impacts sur les usagers. Par conséquent, ces outils d'analyse décisionnelle n'ont pas réussi à fournir des estimations précises des avantages ou des résultats attendus dans la gestion des actifs d'infrastructure routière (Frangopol et Bocchini, 2012). La hiérarchisation et la priorisation des structures à entretenir ou à réhabiliter sont un choix important pour les gestionnaires afin de fournir des rendements économiques optimaux aux utilisateurs et aux propriétaires des infrastructures.

Cet article présente une méthodologie originale pour la gestion intégrée des ponts routiers. Une cotation de réseau est proposée pour évaluer le niveau de performance du réseau routier qui tient compte de la fermeture partielle ou totale d'un ou plusieurs ponts au trafic routier. La cotation du réseau fournit des informations aux gestionnaires d'infrastructures pour choisir les réparations de ponts à privilégier. La cotation du réseau prend en compte l'état des composants du pont dans le réseau et les caractéristiques du trafic sur le réseau. La robustesse du modèle est démontrée par un réseau de trois ponts à Montréal. Aussi, cet article comprend 3 parties, (1) évaluation de la cotation d'une structure, résumant des travaux antérieurs déjà publiés, (2) évaluation de la cotation de l'état d'un réseau routier, (3) résultats et discussions sur (a) le réseau simplifié de Montréal en 2018, (b) les retards des usagers du réseau routier, (c) les impacts financiers au niveau des retards occasionnés sur les usagers et la dépréciation des véhicules routiers.

II. ÉVALUATION DE LA COTATION D'UNE STRUCTURE

Le modèle de transport (TransChlor[®]) est utilisé pour le transport non linéaire unidimensionnel des ions chlorures dans le béton. Il prend en compte la diffusion thermique, le transport de l'eau par diffusion et par capillarité, la diffusion des ions chlorures et la carbonatation. Le modèle utilise des éléments finis pour résoudre les équations de transport des ions chlorures en fonction de la profondeur et du temps par différences finies (Conciatori et al., 2008).

Le modèle considère le lieu géographique d'un pont à Montréal et les conditions climatiques à partir des données horaires provenant de stations météorologiques, c.-à-d. la température, l'humidité externe et les précipitations. La cinétique des véhicules permet de définir les zones d'exposition aux produits salants. Le degré et le type d'exposition au microclimat environnant sont évalués pour chaque élément du pont. Le moment de passage de la saleuse et la concentration épanchée sont des paramètres importants pour connaître les concentrations en ions chlorures à l'interface du béton. Une intervention de salage dépend des conditions microclimatiques, c.-à-d. des précipitations ou d'un haut taux d'humidité relative dans l'air reliés à une température de l'air en dessous de 0°C (obtenue par itération). Cette itération se fait sur le nombre de passages de la saleuse qui est estimé par la consommation annuelle de sel dans une région (quantité de sel déposée par la saleuse lors de son passage) (Conciatori et al., 2010).

Des tests non destructifs ont permis de caractériser les propriétés de perméabilité du béton. Le transport d'ions, de gaz et d'eau dans le béton dépend directement de sa perméabilité. La perméabilité à l'air du béton et sa résistivité ont été mesurées sur le béton de peau de différents éléments structuraux du pont (dalle, mur de front et au niveau des murs de soutènement). Ces mesures sont sensibles à la teneur en eau dans le réseau poral : la teneur en eau réduit la perméabilité à l'air et la résistivité du béton. Si un béton est totalement saturé, soit une résistivité électrique inférieure à $\rho = 1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, la mesure de perméabilité à l'air est impossible. Le coefficient de perméabilité à l'air k_T est mesuré avec l'appareil de perméabilité Torrent[®] (Denarié, et al., 2005 ; Torrent, 1997). La résistivité électrique du béton est mesurée avec l'appareil Wenner[®] (Conciatori, 2006 ; Gowers et Millard, 1999). Les données du modèle TransChlor[®], comme le coefficient de diffusion de l'eau, des concentrations en ions chlorures et le coefficient de capillarité, sont directement déduites de ces résultats d'essai de perméabilité à l'air.

Les simulations avec le modèle de détérioration TransChlor[®] sont validées avec des mesures provenant de carottes prélevées sur la face inférieure et supérieure de la dalle. Pour le dessous de la dalle, le modèle suppose une exposition au brouillard chargé de sel, tandis qu'une exposition directe protégée par le bitume est prise en compte pour le dessus de la dalle. La dalle du pont étudié ne comporte pas de membrane de protection. Les profils des ions chlorures dans la dalle obtenue avec le modèle de détérioration TransChlor[®] corrélaient avec les tests expérimentaux. La variabilité observée sur les carottes est due au fait qu'elles ont été prélevées de manière dispersée sur la dalle où certaines carottes étaient situées à des expositions plus sévères aux chlorures (Keserle et al., 2021).

La variation temporelle de la teneur en chlorure total est évaluée à différentes profondeurs dans le béton. Le seuil de concentration des ions chlorures nécessaire à l'initiation de la corrosion est entre 0.025 et 0.030% par poids de béton et est basé sur les données de la Federal Highway Administration (More, 2001). Cette évolution est très rapide à 25 mm d'enrobage, car la succion capillaire domine

les processus de transport. À des profondeurs plus importantes (> 50 mm), le profil de concentration en ions chlorures augmente plus lentement avec le temps puisque le transport est majoritairement diffusif. La diffusion est également prédominante pour la partie supérieure de la dalle (Bah et al., 2022). La probabilité d'initiation de la corrosion est obtenue par le produit de convolution entre les distributions de probabilité de la concentration en ions chlorures au niveau des aciers d'armature et la distribution de probabilité cumulée de la résistance des aciers aux chlorures pour initier la corrosion à une profondeur dans le béton.

La cotation d'un élément structural s'évalue au travers de deux cotes, la cote de matériau et la cote de comportement. *Cote matériau* : l'état du matériau d'un élément structural est une fonction probabiliste représentant la possibilité de corrosion de l'acier d'armature P_f (en %). Par exemple, le mur de front est exposé aux éclaboussures dues au trafic et à leur vitesse de circulation. La partie supérieure, quant à elle, est exposée au brouillard salin. La hauteur maximale a été considérée pour déterminer les différentes surfaces exposées (Keserle et al., 2021). Ces deux zones d'exposition sont dissociées en deux éléments distincts ayant la même sensibilité face aux sollicitations climatique et environnementale. *Cote comportement* : l'évaluation du comportement d'un élément dépend de l'incidence de ses défauts. La note de comportement quantifie l'impact d'un élément structural sur la fonctionnalité de la structure. Une cote de comportement 4 correspond à un élément dont les défauts n'affectent aucunement ou conduisent seulement à une légère incidence sur son comportement. Lorsqu'elle est égale à 1, cette cote représente un élément dont les défauts ont une incidence très importante sur son comportement. Les éléments de pont sont classés en deux catégories : principaux et secondaires. Des critères généraux permettent d'évaluer la diminution de l'aptitude d'un élément à jouer son rôle dans le comportement global d'une structure (Bah et al., 2022). L'importance d'un élément dans la structure et l'incidence des défauts sur sa fonctionnalité ont été identifiées selon le manuel d'inspection des structures du Ministère des Transport du Québec (MTQ, 2017).

L'approche de type "parent-enfant", basée sur l'analyse de l'arbre de décision, permet d'identifier le lien entre la performance de l'élément à l'échelle locale et la performance globale du pont. Par exemple, une défaillance du sol se répercute sur la fondation de la culée, qui se répercute à son tour sur l'assise du pont, puis sur la dalle, etc. Cette approche permet de considérer, dans la cotation de la structure, l'incidence d'une défaillance d'un élément sur les autres éléments auquel il est lié. Aussi, cette démarche permet de pondérer plus massivement les éléments qui ont un impact important sur l'ensemble de l'ouvrage (Bah et al., 2022).

III. ÉVALUATION DE LA COTATION DE L'ÉTAT DU RÉSEAU ROUTIER

La cotation du réseau évalue le réseau routier en fonction de la notation de chaque pont du réseau et de sa capacité de trafic. L'état des structures est évalué à deux niveaux : (i) une évaluation du matériau qui estime le niveau de dégradation des structures, comme introduit précédemment (ii) une évaluation du comportement qui apprécie l'impact de la dégradation sur le comportement et la sécurité des structures. Les caractéristiques du trafic routier prises en compte sont la vitesse affichée (v), le trafic journalier moyen (Q), la capacité (C) et la disponibilité d'itinéraires alternatifs (D).

3.1 Réseau urbain simplifié

Un réseau de trois ponts dans la ville de Montréal (Fig. 1) a été sélectionné pour appliquer le modèle de cotation du réseau. Le réseau est situé dans une zone à forte densité de population de la ville et les structures étudiées sont des structures vieillissantes. Le réseau idéalisé est représenté sur la Fig. 1 et se compose de trois ponts en parallèle qui fournissent un accès NW-SE à travers la ville. Un scénario de fermeture du pont 1 est illustré avec des détours acheminés par les ponts 2 et 3. Les trois ponts sont situés sur des artères routières majeures et les routes secondaires ne sont pas prises en compte.



FIGURE 1. Réseau urbain à l'étude avec 3 ponts (P1 à P3)

Le réseau est modélisé en considérant des structures situées sur une autoroute (P1) et sur des artères principales (P2 et P3). Différentes configurations de trafic sont étudiées en fonction d'une ou plusieurs fermetures partielles ou totales de ponts, correspondant à des réparations mineures ou majeures. Les détours sont représentés pour les différentes combinaisons de fermetures de ponts en considérant l'origine et la destination présentées par les nœuds noirs pour les scénarios de (a) à (f) (Fig. 2).

TABLEAU 1. Caractéristiques du trafic

Ponts	Vitesse affichée (km/h)	Détour affiché (km)	Nombre de voies/direction du trafic	Capacité (Vh/h)	Débit (Vh/h)	Cotation	
						Matériau	Comportement (%)
P1	100	13.5	3	9373	8888	88.40	100
P2	50	13.95	3	4362	2651	83.40	88.40
P3	50	15.8	3	2402	2066	70.7	81.90

Les données de trafic régulier comprennent le trafic journalier moyen (Q_0), la capacité (C_0), la vitesse affichée (v), le nombre de voies par direction et la longueur des déviations (D) pour les différents scénarios de fermeture du pont (Tableau 1). Le détour moyen est obtenu en fonction du taux de distribution du trafic sur les liens de détour présentés dans l'équation 3. Les valeurs de capacité et de débit sont données pour un sens de circulation à l'heure de pointe.

3.2 Cotation du réseau

Le système d'évaluation du réseau comprend une cotation d'état de service et une cotation de sécurité qui caractérisent les performances du réseau. Les perturbations dues aux fermetures totales ou partielles de ponts sur le réseau pendant les activités de maintenance sont prises en compte. Le principe de transport de la distribution du trafic de Wardrop est utilisé pour évaluer l'effet des

fermetures des ponts sur le trafic à travers le réseau. La distribution du trafic considère un maximum de deux détours alternatifs entre le nœud (origine) et le nœud (destination) de chaque scénario de (a) à (f) (Fig. 2). Le choix d'un détour est déterminé par le premier principe de Wardrop (Matsoukis et Michalopoulos, 1986) :

$$t_f = t_0 * \left(1 + \varepsilon \left[\frac{V}{Q}\right]^\omega\right) \tag{1}$$

où t_f est le temps de parcours; t_0 est le temps de parcours sans fermeture (écoulement libre), V est le volume de trafic affecté à une déviation, Q est l'écoulement de la liaison sans fermeture et ε & ω sont des paramètres empiriques fixés à 0.15 & 4.0 (Matsoukis et Michalopoulos, 1986). Le volume de trafic sur le pont fermé est redistribué à chaque déviation de telle sorte que le temps de parcours de chaque déviation soit égal. Le gestionnaire peut donc identifier le détour et les retards les plus probables pour chaque scénario de fermeture partielle ou totale.

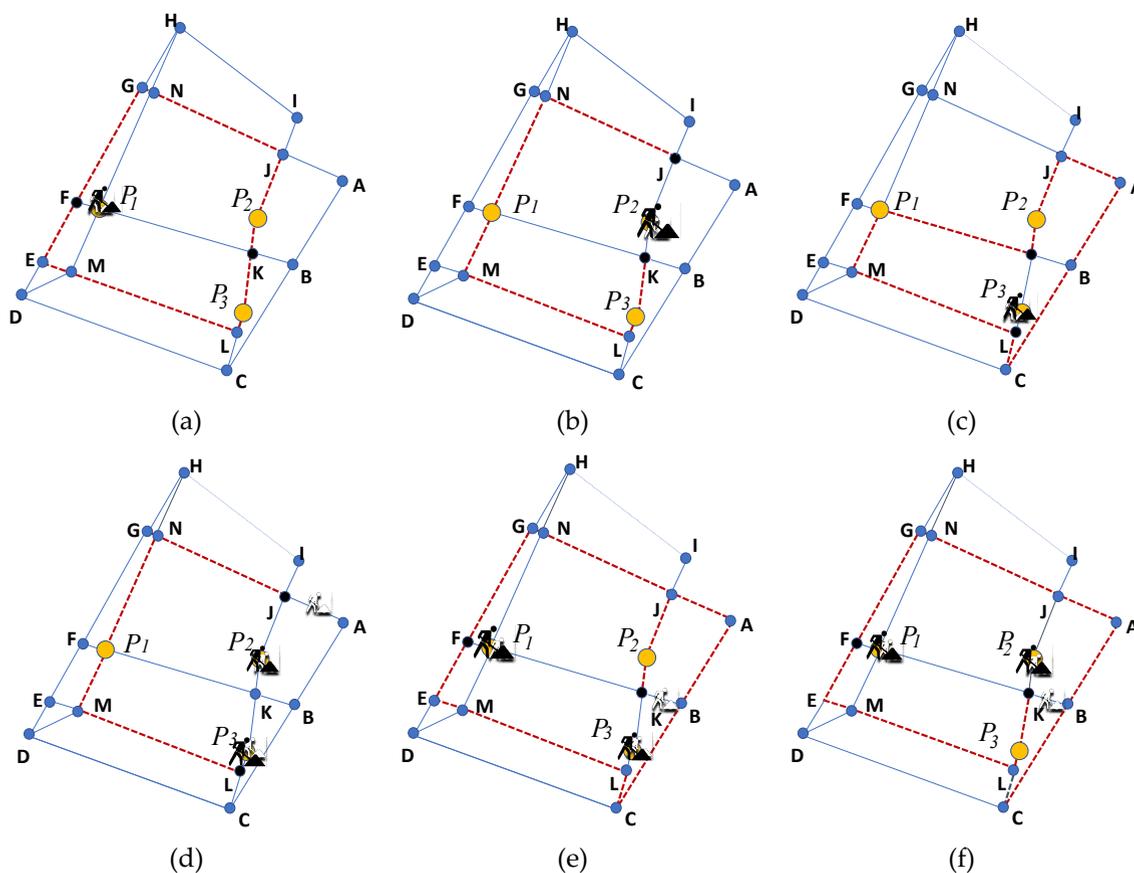


FIGURE 2. Réseau d'étude simplifié (ligne pointillée rouge=détour) a) fermeture P1, b) fermeture P2, c) fermeture P3, d) fermetures P2 et P3, e) fermetures P1 et P3, f) fermetures P1 et P2

Par exemple, en supposant une fermeture totale ou partielle du pont P1, le temps de parcours associé aux détours peut être déterminé à partir de l'équation 1, qui fournit le pourcentage du trafic initial du pont P1 qui reste sur le pont 1 ($0 \leq a \leq 1$, pour une fermeture partielle), et qui fait un détour par le pont P2 (b) et par le pont P3 (c). Le volume de trafic sur chaque pont est obtenu à partir de l'équation 2. Le détour équivalent final D^* du trafic du pont pendant la fermeture est donné par l'équation 3.

$$\begin{cases} Q_{1,tot} = Q_1 \cdot a \\ Q_{2,tot} = Q_2 + Q_1 \cdot b \\ Q_{3,tot} = Q_3 + Q_1 \cdot c \\ a + b + c = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$D^* = \frac{D_0 \cdot a + D_1 \cdot b + D_2 \cdot c}{a + b + c} \quad (3)$$

L'indice de réseau (NI) évalue les niveaux de service et de sécurité du réseau routier pour un scénario donné de fermeture de pont en fonction de la longueur de la déviation D , du débit Q , de la capacité C et de l'état des ponts CS (soit pour le service, soit pour la sécurité). L'indice du réseau est défini comme le rapport entre l'état du réseau dans l'état idéal et l'état du réseau avec un scénario de fermetures ou d'interventions f pour chaque pont i du réseau.

$$NI = \frac{\sum_{i=1}^n D_{0,i} \cdot Q_{0,i} / (CS_{0,i} \cdot C_{0,i})}{\sum_{i=1}^n D_{f,i} \cdot Q_{f,i} / (CS_{f,i} \cdot C_{f,i})} \quad (4)$$

Le numérateur et le dénominateur de cette équation représentent le rapport entre la distance totale parcourue par les usagers du pont i (la demande) divisé par la capacité du pont multipliée par l'état du pont (l'offre), ce qui fournit une mesure du niveau de performance de chaque pont.

Trois types de fermeture sont étudiés pour ce réseau: (1) une fermeture totale, (2) une fermeture partielle à 75% et (3) une fermeture partielle à 50% de chaque pont, un par un. Les conséquences économiques des détours sont évaluées uniquement pour les coûts des usagers (Liu et Frangopol, 2006). Les coûts considérés comprennent la consommation de carburant CC (équation 5), l'usure des pneus et la dépréciation des véhicules VD (équation 6) (Pedneault et al., 2019) et le temps perdu (équation 1).

$$CC = \left(D_{\text{détours moy}} \cdot \beta(v_{\text{détours moy}}) - D_{\text{nœuds}} \cdot \beta(v_{\text{normal}}) \right) * k * Q * N \quad (5)$$

$$VD = \left(D_{\text{détours moy}} - D_{\text{nœuds}} \right) * k * Q * N * \gamma \quad (6)$$

où N est la durée de la fermeture (h), D est le détour (km), v est la vitesse du trafic (km/h), $\beta(v)$ représente les coûts du carburant en fonction de la vitesse en \$/km, γ indique les coûts en fonction de la distance pour l'amortissement, l'entretien et les pneus en \$/h et k est le nombre de voies de circulation (prix en dollars canadiens). Les coûts β valent 0.19/0.76, 0.177/0.433, 0.171/0.412 et 0.167/0.365 \$/h pour les vitesses respectives 30, 40, 50, 70 km/h et pour respectivement les véhicules usagers/camions. Les coûts β valent 23.63, 23.02 et 48.58 \$/h pour respectivement des voyages d'affaire, autres et camions. Tous les coûts sont donnés en dollars canadiens.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Cotation du réseau routier

Les cotations du réseau (service et sécurité) sont comparées pour les scénarios de fermeture totale (100%) et partielle de 75 à 50% des ponts P1 à P3 dans la Fig. 3.

La fermeture totale d'un seul pont produit le même indice de réseau et une diminution de 40% par rapport à l'état actuel sans fermeture. Étant donné que le pont P1 est situé sur une autoroute, on s'attendait à ce qu'il ait plus d'influence sur l'indice de réseau ; cependant, les résultats peuvent être attribués à la capacité des ponts P2 et P3 à accueillir le trafic détourné de l'autoroute. Pour les fermetures partielles, l'impact sur l'indice de réseau est légèrement plus élevé pour le pont P1 que

pour les fermetures partielles des ponts P2 ou P3. Comme prévu, les fermetures partielles ont des impacts moindres d'environ 43% et 48% pour les fermetures à 75% et 50%. Des impacts plus importants sont observés dans le cas de la fermeture de plusieurs ponts et surtout lorsque P1 est fermé avec un autre pont, quel que soit le niveau de fermeture. L'impact le plus sévère se produit lorsque P1 et P2 sont fermés. Dans les cas où les structures présentent approximativement le même degré de détérioration, le choix de la structure à réhabiliter doit être basé sur la minimisation de l'impact du trafic sur les usagers.

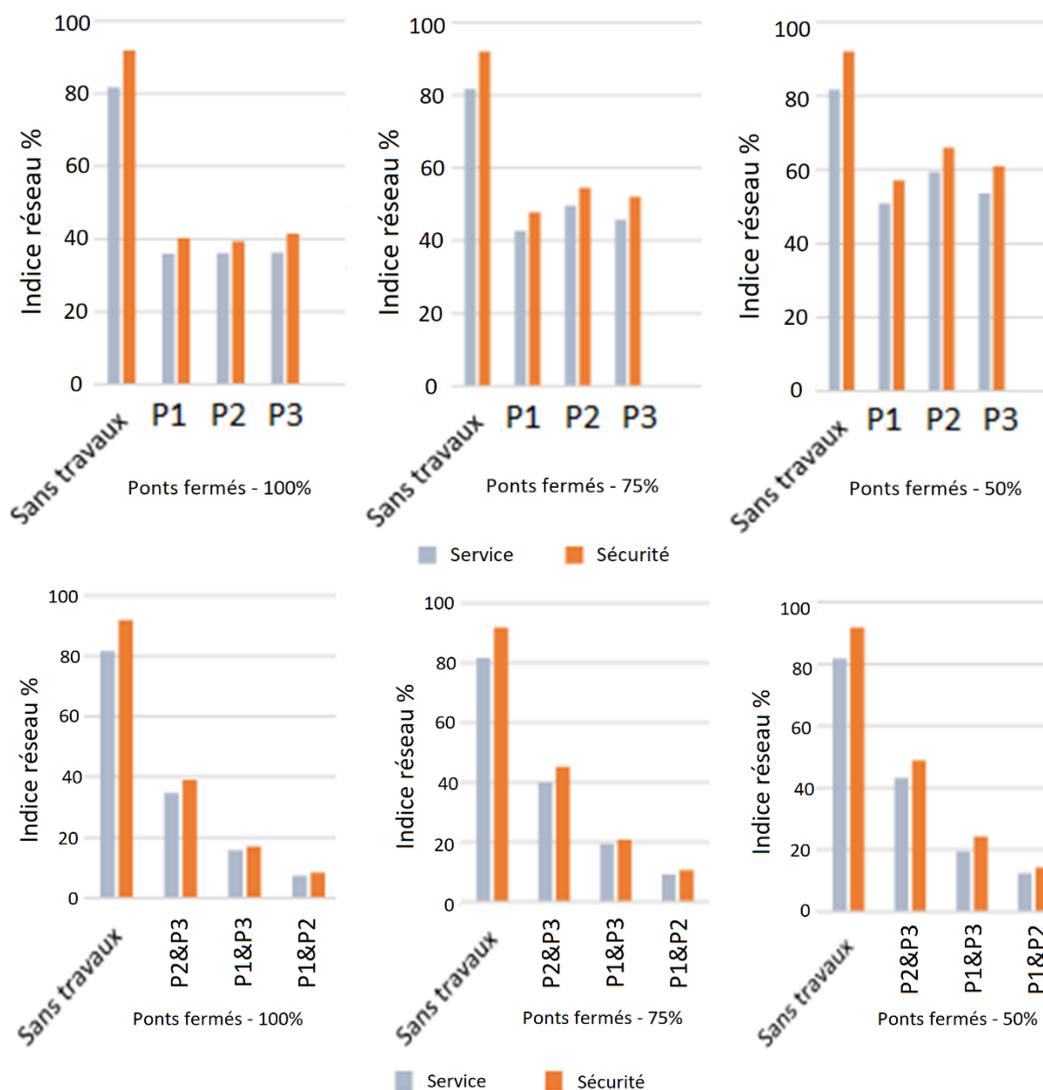


FIGURE 3. Cotation du réseau pour l'année 2018

4.2 Retards pour les usagers

La fermeture d'un pont entraîne des retards de trafic également dans le cas d'une fermeture avec des travaux mineurs comme l'exemple du pont P1. En revanche, la fermeture de P3 ayant le trafic le plus faible, la capacité d'écoulement dans le réseau est modérée avec un petit retard dans le cas de travaux majeurs ou de remplacement (Fig. 4). La fermeture partielle de 50% réduit l'impact du

retard dû à la déviation de P1. P2 et P3 ont approximativement les mêmes paramètres de trafic du débit et de la vitesse. C'est pourquoi il n'y a pas de changement visuel dans les graphiques de retard des usagers pour la fermeture de l'un ou l'autre de ces deux ponts.

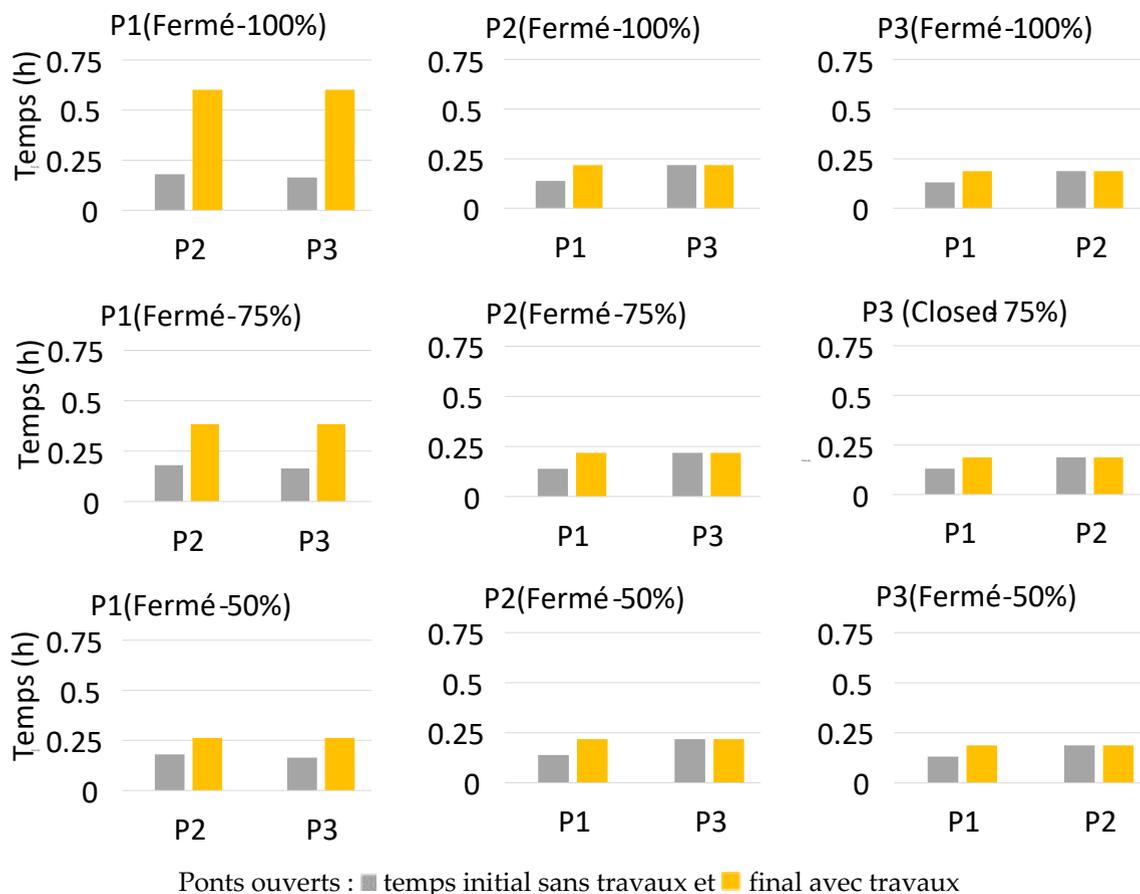


FIGURE 4. Retards pour les usagers dû aux fermetures partielles totales d'un pont

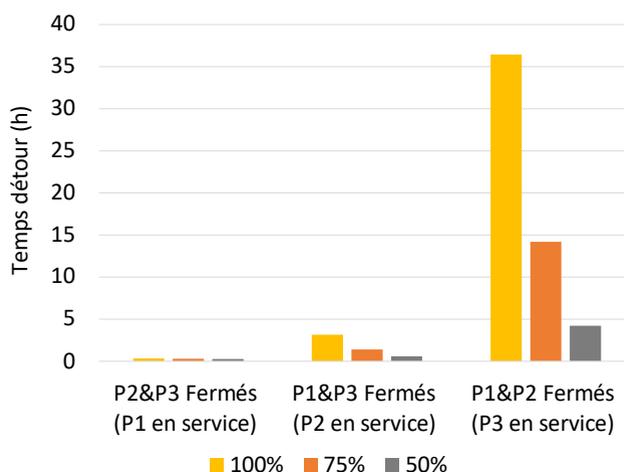


FIGURE 5. Retards pour les usagers dû aux fermetures partielles totales de plusieurs ponts

Le retard des usagers pour des fermetures multiples est illustré à la Fig. 5. La fermeture du pont autoroutier P1 avec P2 provoque un retard important du trafic pour les usagers. Le pont P3, dans ce cas, fournit un service insuffisant pour la demande de trafic. À l'inverse, la fermeture concomitante des ponts P2&P3, de faible capacité, entraîne peu de gêne pour les usagers. Les temps de parcours sont légèrement réduits avec une baisse temporaire de la vitesse et des retards mineurs. La fermeture totale de P1&P3 entraîne des retards importants de 2 à 3 heures. Les fermetures partielles améliorent les conditions de circulation, sauf pour les fermetures partielles des ponts P1&P2, où les retards sont encore de 4-5 heures. Ce résultat montre que le gestionnaire ne devrait jamais fermer les ponts P1&P2 ou P1&P3 en même temps.

4.3 Impacts financiers

Les coûts imputés aux usagers sont étroitement liés à la qualité de service du réseau routier. La qualité de service est un critère stratégique dans la planification du transport routier. Ce critère quantifie par un facteur économique le degré de gêne occasionné lors des travaux d'entretien ou de réhabilitation résultant de la fermeture partielle ou totale des ponts. L'évaluation de ces coûts permet d'apprécier les conséquences financières pour les usagers. (Arif et Bayraktar, 2018). Les coûts sont affectés par la longueur de la déviation et la vitesse de déviation pour chaque catégorie de fermeture présentée dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Paramètres du trafic du réseau de référence

Ponts fermés	Ponts ouverts	Longueur du détour moyen (km)	Vitesse moy./pourcentage de fermeture		
			100%	75%	50%
			(km/h)		
P2&P3	P1	13.5	40.4	46.0	51.4
P1&P3	P2	13.95	4.43	9.93	24.0
P1&P2	P3	15.8	0.43	1.11	3.74
P1	P2&P3	8.39	15.5	24.4	35.8
P2	P1&P3	10.85	22.3	34.9	61.5
P3	P1&P2	10.35	21.1	31.7	67.8

Lorsque le détour est le plus long, il augmente les coûts de carburant pour les usagers du réseau. C'est le cas de la fermeture des ponts P1 et P2, qui fait basculer le trafic sur le pont P3, dont la capacité est la plus faible et le détour le plus long (Tableau 2). L'augmentation de la congestion du réseau se traduit également par une hausse des coûts de carburant et de la pollution urbaine, et la longueur du détour influe sur les coûts des usagers des véhicules, comme l'illustre le cas de la fermeture des ponts P1&P2 (Fig. 6). Un niveau élevé de trafic avec une augmentation de la longueur de la déviation entraîne des coûts plus élevés.

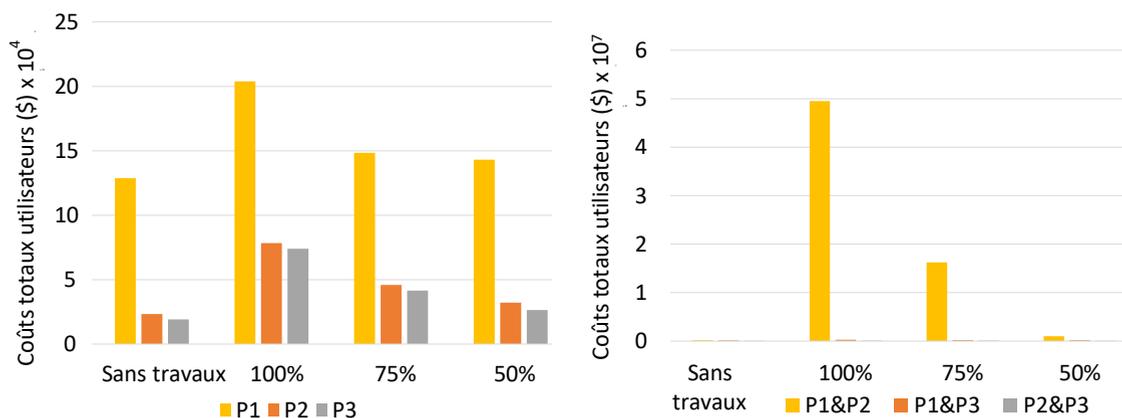


FIGURE 6. Coûts des utilisateurs

V. CONCLUSIONS

Cette étude présente une analyse de la performance du réseau routier à travers la définition d'un réseau. Cette approche de gestion des ponts a permis, à travers une connaissance de l'état des structures, d'obtenir une cotation qui évalue les impacts des fermetures de ponts lors de leur entretien ou de leur réhabilitation. L'étude montre que les structures de grande capacité ont le plus grand impact sur la performance du réseau pendant leur entretien ou leur réhabilitation. Pour les réparations ou les remplacements majeurs, la fermeture complète des ponts de faible capacité est la meilleure option. Cette stratégie permet de réduire l'impact de l'entretien sur les usagers, tandis que l'entretien régulier avec fermeture partielle des structures à forte capacité permettrait de réduire considérablement la saturation (congestion) du réseau routier aux heures de pointe. En plus de la connaissance de l'état de détérioration des structures, la prise en compte des caractéristiques des liaisons (longueur des détours, vitesse de déplacement, débit et capacité) dans les décisions d'entretien permet une meilleure planification stratégique de la gestion des infrastructures routières. L'optimisation des décisions d'entretien et l'analyse du modèle de gestion sur un réseau étendu avec plus de ponts sont la prochaine étape de ce projet pour évaluer sa robustesse et ses limites. Diverses méthodes d'optimisation peuvent être envisagées pour cela (Zufferey, 2002).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la "Banque islamique de développement", le "Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies" pour leur soutien financier. Les auteurs tiennent également à remercier le Service des infrastructures, de la voirie et des transports de la ville de Montréal et le Ministère des Transports du Québec pour leur collaboration.

REFERENCES

Adey B., Hajdin, R., and Brühwiler, E. (2003). Supply and Demand System Approach to Development of Bridge Management Strategies. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(3), 117-131. <https://doi.org/10/cz8kvz>.

Arif, F., and Bayraktar, M. E. (2018). Current Practices of Transportation Infrastructure Maintenance Investment Decision Making in the United States. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(6), 04018021. <https://doi.org/10/gmqkxt>.

ASCE. (2021). https://infrastructurereportcard.org/wpcontent/uploads/2020/12/Bridges_2021.pdf, American Infrastructure Report Card.

Abdoul S. Bah, Thomas Sanchez, Yan Zhang, Kotaro Sasai, David Conciatori, Luc Chouinard, Gabriel J. Power and Nicolas Zufferey, (2022) Assessing the condition state of a concrete bridge combining visual inspection and nonlinear deterioration model. *Structure and Infrastructure Engineering*, <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2081987>.

Banerjee, S., Vishwanath, B. S., and Devendiran, D. K. (2019). Multihazard resilience of highway bridges and bridge networks: A review. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(12), 1694-1714. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1648526>.

Cavalline, T. L., Whelan, M. J., Tempest, B. Q., Goyal, R., and Ramsey, J. D. (2015). Determination of Bridge Deterioration Models and Bridge User Costs for the NCDOT Bridge Management System (FHWA/NC/2014-07). <https://trid.trb.org/view/1405296> Article FHWA / NC / 2014-07.

Conciatori, D. (2006). Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé, *Thèse de doctorat*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. <http://infoscience.epfl.ch/record/56049>.

Conciatori, D., Brühwiler, E., and Gysler, R. (2010). Brine absorption in concrete at low temperature: Experimental investigation and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 846-851. <https://doi.org/10/fwgg7p>.

Conciatori, D., Sadouki, H., and Brühwiler, E. (2008). Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(12), 1401-1408. <https://doi.org/10/b3gvv4>.

Denarié, Emmanuel, Maître Michael, Conciatori, David, and Brühwiler, Eugen. (2005). Air permeability measurements for the assessment of the in situ permeability of cover concrete, Rehabilitation and Retrofitting. *International Conference on Concrete Repair*, 6 p.

Dong, Y., Frangopol, D. M., and Saydam, D. (2014). Sustainability of Highway Bridge Networks Under Seismic Hazard. <https://doi.org/10.1080/13632469.2013.841600>. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(1),41-66.

Frangopol, D. M., and Bocchini, P. (2012). Bridge network performance, maintenance and optimisation under uncertainty: Accomplishments and challenges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(4), 341-356. <https://doi.org/10/dbwp2r>.

Gowers, K. R., and Millard, S. G. (1999). Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique. *ACI Materials Journal*, 96(5). <https://doi.org/10/ggr6zp>.

Guo, A., Liu, Z., Li, S., and Li, H. (2017). Seismic performance assessment of highway bridge networks considering post-disaster traffic demand of a transportation system in emergency conditions. *Structure and Infrastructure Engineering*, <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1299770>. 13(12), 1523-1537.

Keserle, G. C., Sanchez, T., Conciatori, D., & Chouinard, L. (2021). Monitoring Environmental and Climatic Exposure Conditions for Structures in Cold Regions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 35(2), 04021007. <https://doi.org/10/gh37hg>.

LAPRESSE (2018, septembre 13). Site web: <https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/201809/13/01-5196357-les-couts-de-la-congestion-evalues-a-42-milliards-pour-2018.php>.

Liu, M., and Frangopol, D. M. (2006). Optimizing Bridge Network Maintenance Management under Uncertainty with Conflicting Criteria: Life-Cycle Maintenance, Failure, and User Costs. *Journal of Structural Engineering*, 132(11), 1835-1845. <https://doi.org/10/P2d657>.

Matsoukis, E. C., and Michalopoulos, P. C. (1986). Road traffic assignment—a review: Part II: equilibrium methods. *Transportation Planning and Technology*, 11(2), 117-135. <https://doi.org/10.1080/03081068608717335>.

Moore, M. E., Phares, B. M., Graybeal, B. A., Rolander, D. D., and Washer, G. A. (2001) Reliability of visual inspection of highway bridges, *FHWA, ed., USDOT*, Washington, DC.

MTQ. (2017). Manuel d'inspection des structures. [www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca > guides > guide24.fr.html](http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/guides/guide24.fr.html).

Nili, M. H., Taghaddos, H., and Zahraie, B. (2021). Integrating discrete event simulation and genetic algorithm optimization for bridge maintenance planning. *Automation in Construction*, 122, 103513. <https://doi.org/10/gmf4cp>.

Orcesi, A. D., and Cremona, C. F. (2010). A bridge network maintenance framework for Pareto optimization of stakeholders/users costs. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11), 1230-1243. <https://doi.org/10/dt4695>.

Pedneault, J., Bayan, C., Sorelli, L., Margni, M., Conciatori, D., Desjardins, V., & Fafard, M. (2019). Analyse du coût total de possession sur le cycle de vie d'un pont routier à platelage en aluminium. *Projet*, 787,1.

Torrent. (1997). Proceq, TORRENT Permeability Tester—*Mode d'emploi*, Proceq SA, Zürich.

Zufferey, N. (2002). Heuristiques pour les problèmes de coloration des sommets d'un graphe et d'affectation de fréquences avec polarités. Thèse EPFL. 10.5075/epfl-thesis-2668.