

VERS UNE GESTION DURABLE DE L'ENTRETIEN DES RÉSEAUX ROUTIERS NON REVÊTUS RURAUX

L. Beaulieu, P. Pierre & P. Poulin
Université Laval, Canada
luc.beaulieu.2@ulaval.ca

RÉSUMÉ

La longueur du réseau routier public canadien est de plus d'un million de kilomètres dont près de la moitié (routes locales et chemins ruraux) est non revêtue, ce qui entraîne annuellement d'importantes dépenses d'entretien. Malgré un budget souvent limité, les gestionnaires de réseaux routiers non revêtus doivent maintenir des routes efficaces et sécuritaires. Dans ce contexte, le développement d'un système d'aide à la décision pour la gestion de l'entretien de ce type de routes est devenu nécessaire.

Premièrement, un programme expérimental exhaustif à la fois en laboratoire et sur le terrain a été réalisé pour déterminer des solutions pratiques de stabilisation et de traitement par abat-poussière. Deuxièmement, une analyse complète du cycle de vie de l'entretien du réseau routier rural est réalisée afin de quantifier l'impact environnemental des solutions pratiques proposées. Finalement, une analyse multicritère permet d'intégrer les dimensions environnementale, sociale, logistique et technique et est incorporée au système d'aide à la décision.

La gestion durable de l'entretien des réseaux routiers non revêtus ruraux telle qu'elle est présentée dans cet article ouvre la voie à une façon novatrice de penser et de gérer ce type de réseaux routiers.

1. INTRODUCTION

Les routes locales, les chemins principaux et les routes d'accès aux ressources constituent une proportion importante du réseau routier canadien. Au Québec, cela représente environ 170 000 kilomètres de routes soit environ 90% de tous les réseaux provincial, municipaux et privés. À cause, entre autres, du peu de circulation et de l'éloignement de la majorité de ces routes, le pavage de ces dernières est une tâche ardue, dispendieuse et très certainement peu réaliste. Les routes dont la surface de roulement est constituée de matériaux granulaires, appelées chaussées non revêtues, apparaissent comme la meilleure solution. Toutefois, devant la place sans cesse grandissante qu'occupe la sécurité dans les transports, le contrôle de la stabilisation des routes non revêtues et de la poussière engendrée par la circulation des véhicules est devenu nécessaire. En effet, la poussière engendre de nombreux problèmes comme une réduction de la visibilité, l'inhalation de particules de toutes sortes et la perte de matériaux granulaires entraînant inévitablement des coûts supplémentaires. De plus, face à la rigueur du climat nordique le défi n'est pas seulement de contrôler la poussière, mais aussi de stabiliser les routes non revêtues en trouvant des produits efficaces dans un contexte de gel et de dégel afin d'augmenter la période où les routes sont praticables. Il est également primordial que les produits utilisés soient sans risque pour l'environnement. Dans ce contexte, le développement d'un système d'aide à la décision pour la gestion de l'entretien de ce type de routes est devenu nécessaire; ce système doit proposer des solutions pratiques tout en tenant compte de dimensions environnementale, sociale, logistique et technique.

2. REVUE DES CONNAISSANCES

Les routes non revêtues sont souvent utilisées plus longtemps que la durée d'utilisation prévue lors de leur construction [1]. Ces routes ou chemins qui prennent de l'âge entraînent des frais d'entretien importants et nécessitent de coûteux travaux de réfection. Souvent, différents utilisateurs comme les compagnies forestières, les villégiateurs, les chasseurs et pêcheurs, les adeptes de la récréation plein air et les employés du gouvernement se partagent l'utilisation des routes non revêtues. Devant cette réalité, l'entretien des réseaux routiers non revêtus est d'autant plus complexe et nécessite une planification stratégique en fonction d'objectifs précis et déterminés.

Sachant que la stabilisation des routes non revêtues permet d'en améliorer la qualité [2], un entretien rigoureux et stratégique d'un réseau routier non revêtu permettrait éventuellement aux gestionnaires de réseaux routiers d'obtenir des bénéfices et de rendre les routes praticables pendant une plus longue période de l'année.

Plusieurs études ont été réalisées au cours des dernières années concernant la stabilisation d'une route non revêtu ou son traitement à l'aide d'abat-poussière [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10]. Les traitements à l'aide d'abat-poussière et de produits stabilisants proposés permettent respectivement de réduire la poussière et d'améliorer les caractéristiques mécaniques d'une route non revêtu. Certains produits stabilisants peuvent également jouer ces deux rôles.

Le projet de recherche CARRLo [11] (Chemins d'Accès aux Ressources et Routes Locales), qui est à la base du système d'aide à la décision, avait pour but de trouver des solutions durables et économiques afin de concevoir, réhabiliter et entretenir des surfaces de roulement constituées de matériaux granulaires performantes et durables. Le système d'aide à la décision pour la gestion de l'entretien des routes non revêtues se sert de l'ensemble des résultats du projet CARRLo comme base de données.

Des études ont montré qu'il y a des avantages économiques au traitement des routes non revêtues [12] [13]. Toutefois, l'efficacité des traitements (stabilisation ou à l'aide d'abat-poussière) dépend d'un certain nombre de paramètres dont le climat, le trafic, l'emplacement de la route, la minéralogie et la granulométrie du matériau granulaire et donc leur performance varie beaucoup selon le contexte. Très peu d'études prennent en compte le contexte d'une route non revêtu dans le but de proposer un traitement efficace pour son entretien. En effet, la majorité des études concernant le traitement d'une route non revêtu sont réalisées pour un contexte spécifique. Le système d'aide à la décision présenté dans cet article doit permettre de proposer des solutions pratiques (stabilisation ou abat-poussière) efficaces pour l'entretien d'un réseau routier non revêtu rural en fonction du contexte de la route et des objectifs et des préférences du gestionnaire de ce réseau.

3. OBJECTIF

L'objectif des travaux de recherche présentés est d'élaborer un système d'aide à la décision pour l'entretien d'un réseau routier non revêtu permettant aux gestionnaires de réhabiliter et d'entretenir leur réseau routier non revêtu rural en fonction de leurs préférences et d'objectifs précis et déterminés.

4. DESCRIPTION DU SYSTÈME D'AIDE À LA DÉCISION

Le système d'aide à la décision sera composé d'un système expert, d'un filtre économique, d'une analyse multicritère et sera suivi d'une validation des résultats. C'est un système complet, mais flexible. La figure 1 présente un schéma du système d'aide à la décision.

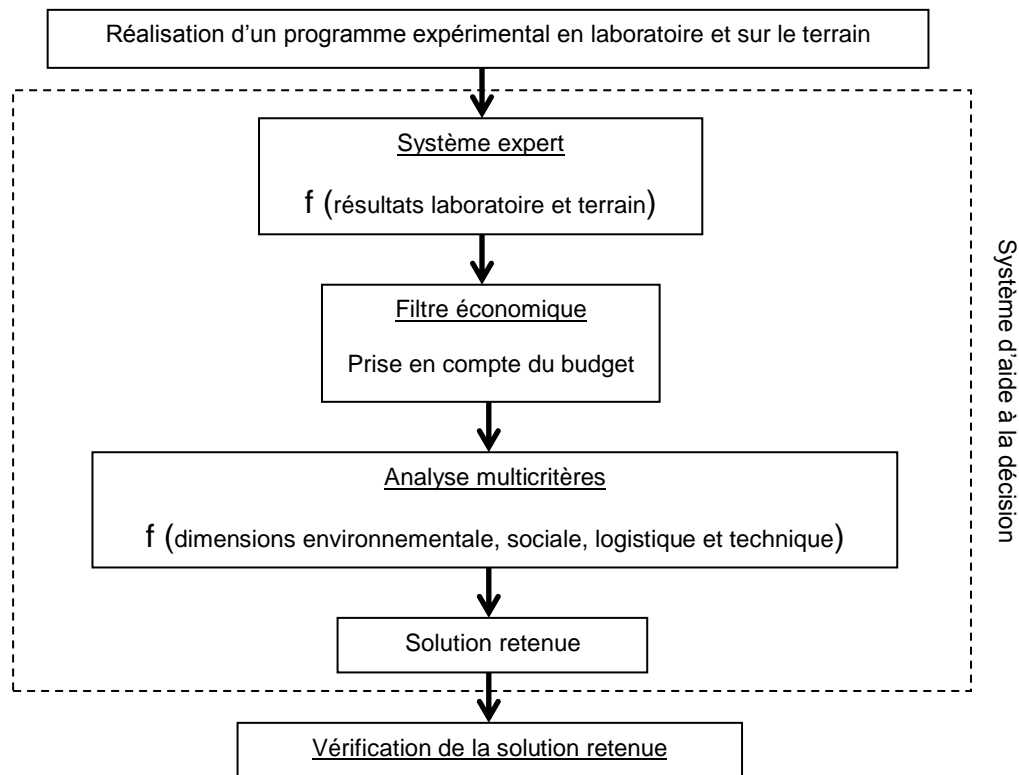


Figure 1 – Schéma du système d'aide à la décision

Dans un premier temps, une analyse complète du programme expérimental comprenant des travaux de laboratoire et de terrain du projet CARRLo a été réalisée. En particulier, l'influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière a été déterminée dans le but de fournir des combinaisons de produits et de taux de pose qui favoriseront une qualité maximale de la route dans un contexte précis. Ces variables expérimentales seront les intrants d'un système expert qui proposera une liste de solutions pour un contexte précis. Une analyse du cycle de vie de l'entretien du réseau routier rural a bien sûr été réalisée afin de quantifier l'impact environnemental des solutions techniques proposées.

Cette liste de solutions techniques est ensuite soumise à un filtre économique. Ce filtre a pour but de prendre en compte le budget du gestionnaire du réseau routier et de s'assurer que la solution finale proposée est réalisable économiquement. Le but de ce filtre est donc d'éliminer les solutions trop coûteuses.

Une analyse multicritères permet d'intégrer les dimensions environnementale, sociale, logistique et technique. Cette analyse multicritère permettra de déterminer la solution pour l'entretien d'un réseau routier non revêtu qui correspond le mieux aux préférences et besoins du gestionnaire. Même si les différentes dimensions (environnementale, sociale, logistique et technique) ne sont pas tous directement liés aux coûts d'une route non revêtue, ils sont, dans un contexte de gestion durable, des dimensions très importantes à considérer pour la gestion de l'entretien d'un réseau routier non revêtu.

Finalement, une vérification de la solution proposée sera également effectuée sous la forme d'une étude de cas. Cette vérification est basée sur des essais de terrain réalisés dans le cadre du projet CARRLo en collaboration avec des partenaires industriels.

Le système d'aide à la décision pour la gestion de l'entretien d'un réseau routier non revêtu proposera donc une ou des solutions adaptées à un contexte précis et répondant à des objectifs précis. Ces solutions seront ensuite vérifiées par une étude de cas à l'aide d'essais de terrain et de données fournies par un partenaire industriel.

5. MÉTHODOLOGIE

Dans un premier temps, les résultats de l'étude portant sur l'influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière sont présentés. Ces résultats servent à bâtir une base de données pour le système d'aide à la décision. Les impacts environnementaux de la pose des produits stabilisants ou abat-poussière sur un réseau routier non revêtu sont également présentés. Ensuite, l'analyse multicritère dans son ensemble est expliquée. Finalement, les résultats des essais réalisés sur le terrain suite à la mise en place d'un traitement sur une route non revêtue permettant de vérifier le système d'aide à la décision sont présentés.

5.1 Considérations minéralogiques et granulométriques

Dans le cadre du projet CARRLo, un programme expérimental d'envergure en laboratoire comprenant des essais de module réversible modifié, de capacité portante, de compression non confinée et de cisaillement direct a été réalisé afin de comprendre et ensuite de pouvoir prendre en compte l'influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière [14] [15]. Le but de ces travaux consiste à être en mesure de proposer des familles de produits stabilisants et d'abat-poussière dans un contexte minéralogique et granulométrique précis et en fonction d'objectifs déterminés.

Les résultats de ces travaux de laboratoire ont déjà été longuement étudiés [16]. Ces derniers montrent une réelle influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière. De plus, grâce à l'analyse complète des travaux expérimentaux réalisés, des familles de produits et différents taux de pose peuvent être suggéré en fonction de la granulométrie et de la minéralogie dans le but de maximiser le comportement du matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière.

Les analyses complètes des travaux expérimentaux réalisés [16] ne seront pas discutées dans le cadre de cet article. Pour chacune des minéralogies étudiées, des abaques présentant le taux de pose optimal de différents produits en fonction de la granulométrie ont été réalisés. La figure 2 montre un exemple pour le gneiss granitique. Les conclusions de ces travaux seront incorporées au système expert (voir figure 1) qui permettra de proposer une liste de solutions pour l'entretien d'une route non revêtue rurale dans un contexte minéralogique et granulométrique précis.

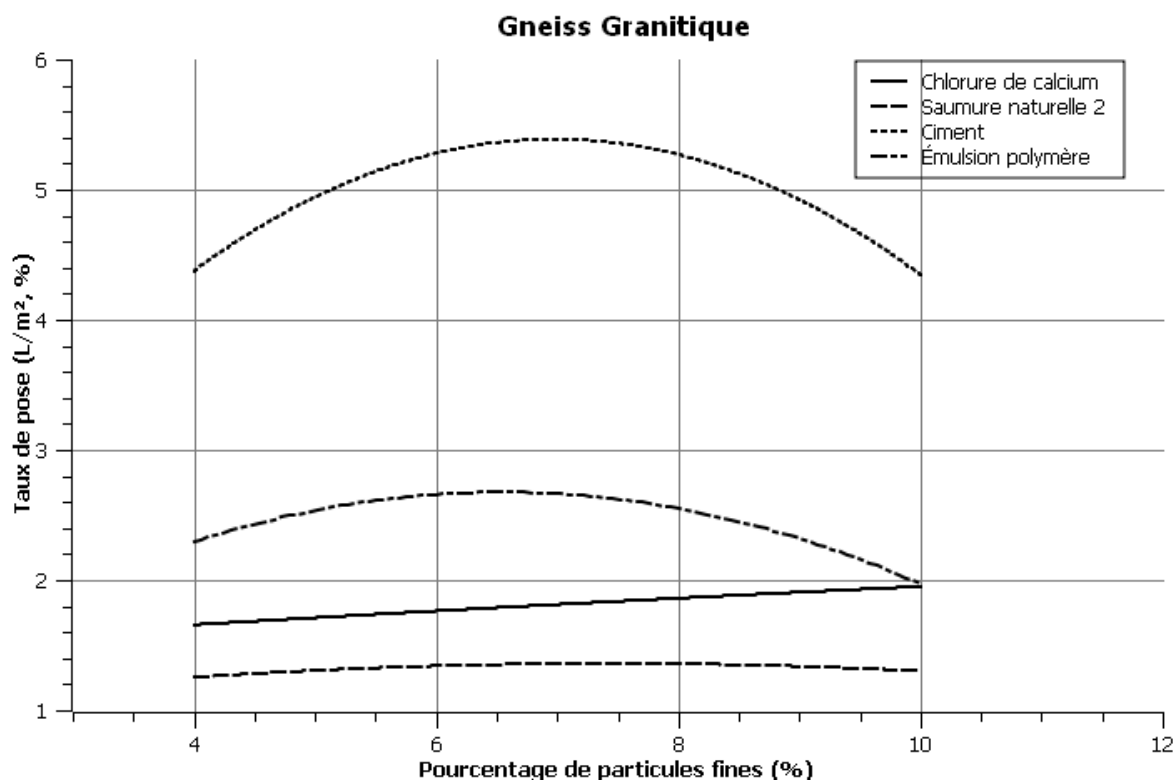


Figure 2 : Abaque du taux de pose optimal en fonction de la granulométrie de différents produits pour le gneiss granitique

5.2 Considérations environnementales

L'application de produits abat-poussière et stabilisants sur les routes non revêtues présente certains avantages pour l'environnement [17]. La réduction des quantités de particules fines soulevées dans l'air dû à la circulation de véhicules ou la réduction des sédiments qui sont lavés et déplacés de la route vers les ruisseaux et lacs [18] en sont des exemples. L'application de ces produits comporte aussi des risques pour l'environnement qui doivent être pris en considération avant de procéder à une application. Des impacts négatifs sont envisageables sur la faune et la flore ainsi que sur la nappe phréatique, les cours d'eau et les plans d'eau [19]. En effet, une fois les produits appliqués, ils sont soumis aux conditions climatiques et peuvent se répandre dans la nature.

La qualité de l'eau provenant des sections traitées à l'aide d'abat poussière a fait l'objet d'observations sur deux sites d'essais dans le cadre du projet CARRLo. L'un des sites d'essais était la forêt Montmorency dans la région de Québec, forêt expérimentale gérée par l'Université Laval. L'autre site d'essais était directement sur le campus de l'Université Laval. Les résultats obtenus pour ces deux sites d'essais étant très semblables, seuls les travaux réalisés à l'université Laval à l'été 2009 sont présentés dans cet article puisqu'ils confirment les résultats obtenus à l'été 2008 à la forêt Montmorency [17].

5.2.1 Présentation des essais

Le tableau 1 présente les produits qui ont été mis à l'essai dans le cadre des travaux réalisés à l'Université Laval à l'été 2009, ainsi que leur concentration.

Tableau 1 – Familles et produits mis à l'essai dans le cadre des travaux réalisés à l'Université Laval à l'été 2009

Famille	Produits	Concentration (l/m ²)
Hygroscopique	Saumure naturelle 1	2
	Saumure naturelle 2	1,5
	Chlorure de calcium	1,8
Organique	Émulsion naturelle	3,4
Synthétique	Émulsion polymère	3,4
	Polymère végétal	3,6

L'eau de ruissellement et l'eau de percolation recueillies ont fait l'objet de différents tests afin d'évaluer l'impact des produits abat-poussière sur l'environnement. Des cuves construites à l'Université Laval ont permis de recueillir l'eau de ruissellement et l'eau de percolation provenant de ces mêmes cuves. La figure 3 montre le montage expérimental qui a permis de récolter les différentes eaux. À chaque événement de pluie, il y a eu un échantillonnage de tous les bacs du site. Ils étaient ensuite vidés puis remis en place. L'eau de ruissellement et l'eau de percolation recueillies de façon indépendante ont fait l'objet de différents tests afin d'évaluer l'impact des produits abat-poussière sur l'environnement.



Figure 3 – Système de récupération de l'eau de percolation et de ruissellement à l'Université Laval

Dans un premier temps, le test du pH représente le cologarithme de la concentration d'ions H⁺ dans un liquide. L'échelle de pH se situe entre 0 et 14 et elle permet de déterminer si l'eau analysée est acide (pH<7), neutre (pH=7) ou basique (pH>7). C'est l'un des paramètres les plus importants à mesurer puisque plusieurs processus biologiques en dépendent directement. De plus, le pH joue un rôle majeur dans le système sanguin des organismes aquatiques et de fortes fluctuations peuvent les toucher gravement.

Deuxièmement, le test de la dureté carbonatée, aussi appelée alcalinité, mesure la capacité d'une eau à neutraliser les acides. Il s'agit de mesurer la présence des ions bicarbonate et carbonate qui sont les éléments qui contribuent le plus à l'alcalinité. Des valeurs en-deçà de 60 mg/l de CaCO₃ sont habituellement associé à un pH bas ce qui est bon pour les poissons. La dureté carbonatée stabilise le pH de l'eau et constitue une source d'énergie importante pour les batteries nitrifiantes qui participent à la dégradation de l'ammoniaque et des nitrites. Les carbonates sont également utilisés par les plantes dans la photosynthèse en remplacement du gaz carbonique.

Troisièmement, le test de la dureté totale représente pour sa part l'ensemble des sels dissous dans l'eau. Ceux-ci sont principalement composés de calcium, de magnésium et de sodium, éléments que l'on retrouve dans les produits hygroscopiques. Des valeurs en-deçà de 60 mg/l de CaCO_3 indique une eau douce, des valeurs entre 60 et 100 mg/l indique une eau légèrement dure, des valeurs entre 100 et 200 mg/l indique une eau modérément dure alors que des valeurs au-delà de 200 mg/l indique une eau très dure. Il est nécessaire d'analyser ce paramètre puisque la concentration de sels dissous affecte le système d'osmorégulation chez les poissons ainsi que la régulation du taux de calcium dans le sang.

Finalement, le test de la présence d'ammoniac est réalisé car cette présence dans l'eau peut être la source de nombreux problèmes et une trop forte concentration peut être toxique pour les organismes aquatiques. La quantité d'ammoniac (NH_3) ne devrait pas dépasser 1,2 mg/l. Une concentration au-delà de 1,2 mg/l dans une eau très alcaline (eau avec un pH de 8 ou plus) est toxique pour les organismes aquatiques. L'ammoniac peut se présenter aussi sous la forme de NH_4^+ . La quantité de NH_3 comparativement au NH_4^+ dépend du pH. Une flore bactérienne transforme normalement l'ammoniac en nitrate afin de conserver un équilibre.

5.2.2 Présentation des résultats

Les nombreux tests réalisés ont permis d'évaluer l'eau de ruissellement et l'eau de percolation provenant d'échantillons de routes traitées avec des abat-poussière. Il est à noter que les précipitations enregistrées durant l'été 2009 ont été comparables aux moyennes mensuelles comme en témoigne la figure 4. Elles ont permis de recueillir 19 échantillons durant l'été. Les résultats pour chacun des tests sont présentés dans le tableau 2. Pour chacun des tests, une moyenne des 19 échantillons a été effectuée.

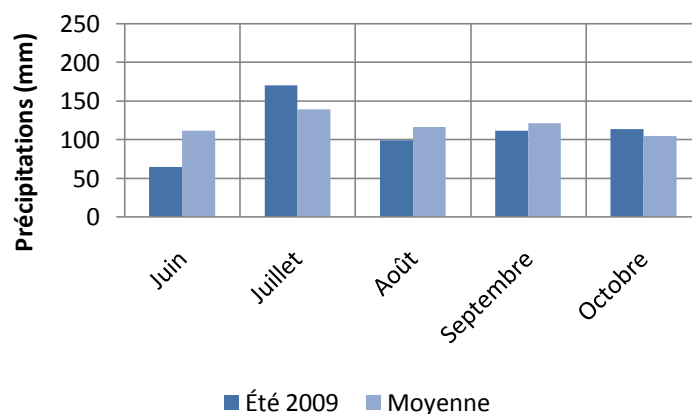


Figure 4 – Précipitations à l'Université Laval durant l'été 2009

Tableau 2 – Résultat des tests réalisés à l'Université Laval à l'été 2009 pour chacun des produits

	Type d'eau testée	pH (-)	Dureté carbonatée (mg/l CaCO ₃)	Dureté totale (mg/l sels dissouts)	Ammoniac (mg/l NH ₃)
<i>Témoin</i>	Ruissellement	6,1	21,3	35,0	0,2
	Percolation	7,2	53,3	88,3	0,0
<i>Saumure naturelle 1</i>	Ruissellement	5,3	16,7	26,7	0,3
	Percolation	7,1	40,6	1669,4	0,2
<i>Saumure naturelle 2</i>	Ruissellement	5,5	17,5	26,7	0,1
	Percolation	7,2	41,1	1702,2	0,3
<i>Chlorure de calcium</i>	Ruissellement	6,0	18,9	193,3	0,2
	Percolation	6,5	34,4	4296,4	0,4
<i>Émulsion naturelle</i>	Ruissellement	5,5	18,3	20,0	0,3
	Percolation	7,2	57,8	82,2	0,1
<i>Émulsion polymère</i>	Ruissellement	6,0	52,5	90,0	2,1
	Percolation	7,1	47,8	87,8	0,0
<i>Polymère végétal</i>	Ruissellement	5,3	16,7	13,3	0,1
	Percolation	7,3	87,2	227,8	0,4

Le tableau 2 présente la moyenne du pH des eaux récupérées pour chaque échantillon de route. Il existe une différence importante entre les résultats de l'eau de percolation et de ruissellement de tous les produits. En effet, les eaux de percolation ont toutes gardé un pH neutre près de 7 alors que les eaux de ruissellement étaient acides, y compris l'échantillon témoin. Le phénomène des pluies acides pourrait avoir joué un rôle dans ces résultats qui ne semblent pas dépendre directement de la nature des produits. Le polymère végétal et la saumure naturelle 1 ont généré les eaux de ruissellement les plus acides alors qu'aucun produit ne semble avoir eu d'impacts sur le pH des eaux de percolation.

Pour sa part, la dureté carbonatée devrait normalement se situer au-dessus de 20 mg/l afin de pouvoir stabiliser efficacement le pH de l'eau. Ceci est particulièrement important dans le cas présent où les eaux de ruissellement sont toutes acides. C'est pourquoi les valeurs moyennes de dureté carbonatée des eaux de ruissellement des matériaux traitées avec le polymère végétal et la saumure naturelle 1 sont les plus basses et correspondent aussi au plus bas pH dans le tableau 2. À l'inverse, l'eau de percolation de la cuve du polymère végétal qui affichait le pH le plus élevé a obtenu la dureté carbonatée la plus élevée. L'échantillon de route témoin et celui traité avec l'émulsion polymère sont les seuls à avoir obtenu une moyenne satisfaisante pour leurs eaux de ruissellement.

Pour la dureté totale, les produits hygroscopiques qui sont riches en sels dissous ont présenté les taux les plus élevés. Le chlorure de calcium obtient une dureté moyenne de percolation très élevée même si un bris dans le système de récupération a empêché d'échantillonner au moment où les taux étaient les plus élevés. La saumure naturelle 1 et la saumure naturelle 2 ont également gardé des moyennes importantes qui sont supérieures à la limite de 200 mg/l qui correspond à une eau très dure. Encore une fois, l'eau de ruissellement et l'eau de percolation ont obtenu des résultats distincts.

Finalement, pour ce qui est de la quantité d'ammoniac, seule l'eau de ruissellement de l'émulsion polymère a conservé une moyenne supérieure à la limite recommandée qui est de 1,2 mg/l d'ammoniac.

5.3 Analyse multicritère

La solution retenue pour l'entretien d'un réseau routier non revêtu dépendra essentiellement des préférences du gestionnaire du réseau routier qui sont liées à des dimensions environnementale, sociale, logistique et technique. Le tableau 3 présente ces différentes dimensions.

Tableau 3 – Dimensions environnementale, sociale, logistique et technique

Dimensions			
<u>Environnementale</u>	<u>Sociale</u>	<u>Logistique</u>	<u>Technique</u>
Qualité de l'air	Influence sur les populations environnantes	Influence sur les transports de la route	Durée de vie de la route
Qualité de l'eau	Influence sur les accidents	Influence sur les biens et services de la route	Capacité portante
		Praticabilité de la route	Qualité de roulement
			Fréquence d'entretien

Les dimensions logistique et technique représentent les deux niveaux de la gestion d'un réseau routier: le niveau logistique et le niveau technique. Le niveau logistique fait référence à la planification et à l'implantation des biens et services du réseau routier non revêtu, tandis que le niveau technique fait quant à lui appel aux différentes opérations sur le terrain et aux caractéristiques techniques de la route.

Par ailleurs, certaines dimensions ne se traduisent pas par des bénéfices monétaires, mais participent à une gestion plus durable des réseaux routiers. Par exemple, le fait qu'un produit n'affecte aucunement la qualité de l'eau de ruissellement d'une route non revêtue peut s'avérer être, dans certains contextes, un argument suffisant pour choisir ce produit, car cela permet de conserver intactes la faune et la flore avoisinantes. Donc, en plus des dimensions logistique et technique, le système d'aide à la décision comprend également des dimensions environnementale et sociale.

À partir des différentes dimensions présentées dans le tableau 3, une analyse multicritère sera effectuée. La méthode d'analyse multicritère choisie est une comparaison paire par paire. Cette méthode représente le problème de décision à l'aide d'une structure qui reflète les interactions entre les différents éléments du système. Elle comporte quatre étapes [20] : structurer le problème hiérarchiquement, effectuer la comparaison paire par paire des dimensions, attribuer un poids relatif à chacune des dimensions et classer les dimensions selon les préférences de l'utilisateur. La structure hiérarchique du problème décisionnel est montrée à la figure 5.

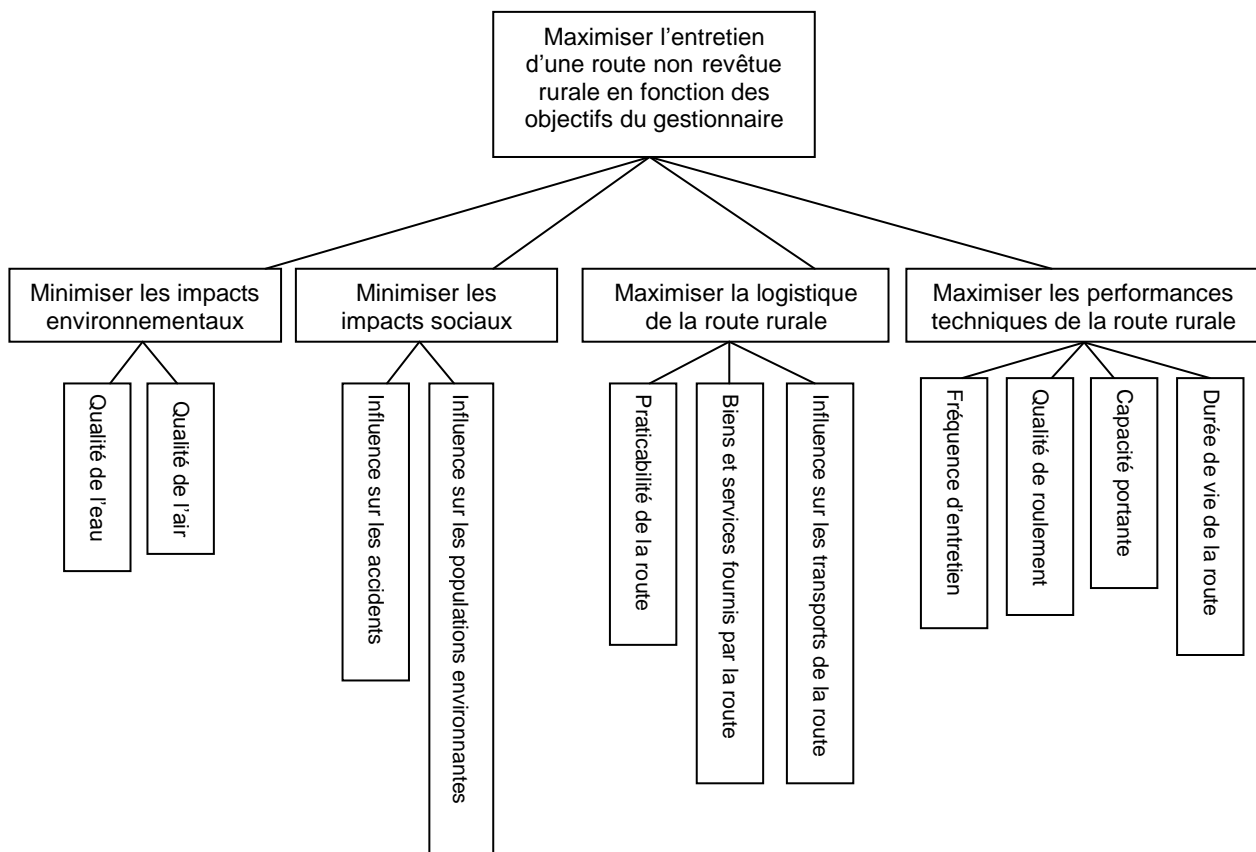


Figure 5 – Structure hiérarchique utilisée afin de maximiser l'entretien d'une route non revêtue rurale en fonction des objectifs du gestionnaire

Le problème décisionnel comportant quatre dimensions, il y aura six comparaisons paire par paire différentes :

1. Quelle est l'importance relative de minimiser les impacts environnementaux comparativement à minimiser les impacts sociaux afin de maximiser l'entretien d'une route non revêtue rurale en fonction des objectifs du gestionnaire?
2. Quelle est l'importance relative de minimiser les impacts environnementaux comparativement à maximiser la logistique de la route afin de maximiser l'entretien d'une route non revêtue rurale en fonction des objectifs du gestionnaire?
3. Quelle est l'importance relative de minimiser les impacts environnementaux comparativement à maximiser les performances techniques de la route afin de maximiser l'entretien d'une route non revêtue rurale en fonction des objectifs du gestionnaire?
4. Quelle est l'importance relative de minimiser les impacts sociaux comparativement à maximiser la logistique de la route afin de maximiser l'entretien d'une route non revêtue rurale en fonction des objectifs du gestionnaire?
5. Quelle est l'importance relative de minimiser les impacts sociaux comparativement à maximiser les performances techniques de la route afin de maximiser l'entretien d'une route non revêtue rurale en fonction des objectifs du gestionnaire?
6. Quelle est l'importance relative de maximiser la logistique de la route comparativement à maximiser les performances techniques de la route afin de

maximiser l'entretien d'une route non revêtue rurale en fonction des objectifs du gestionnaire?

Pour ces six comparaisons, un poids relatif sera attribué à chacune des deux dimensions comparées. La sommation des poids relatifs permettra de classer les dimensions selon les préférences du gestionnaire de la route non revêtue rurale. En connaissant les préférences du gestionnaire, une solution sera retenue parmi la liste de solutions fournie par le système d'aide à la décision.

5.4 Vérification du système d'aide à la décision par une étude de cas sur le terrain

En se référant à la figure 1, le système d'aide à la décision est composé d'un système expert d'un filtre économique et d'une analyse multicritère qui dépendent de plusieurs variables expérimentales et de dimensions environnementale, sociale, logistique et technique. Ce système d'aide à la décision fournit une solution pour l'entretien d'une route rurale non revêtue qui sera par la suite vérifiée à l'aide d'essais en conditions réelles sur le terrain.

La vérification de la solution retenue parmi la liste de solutions proposée par ce système d'aide à la décision sera faite sous la forme d'une étude de cas. À l'aide d'une base de données complète fournie par un partenaire industriel et de réels travaux de terrain réalisés en conditions contrôlées, il sera possible de mettre en évidence les bénéfices associés à l'entretien d'un réseau routier non revêtu. Les travaux de terrain ont déjà été effectués dans le cadre du projet CARRLo et consistent en la réalisation de sections de route traitées. Le suivi des sections a été fait à l'aide d'un déflectomètre à masse tombante portatif (LWD), un appareil d'essai non destructif qui reproduit, sous l'impact d'une masse tombante sur la surface de la route, une charge correspondant à un véhicule qui circule.

5.4.1 Réalisation des travaux de terrain

Dans le cadre du projet CARRLo, des travaux de terrain en conditions réelles ont été faits à l'été 2008 et à l'été 2009. Par exemple, à l'été 2008, une courbe prononcée qui se détériorait toujours très rapidement a été stabilisée à l'aide d'émulsion polymère. Deux sections d'environ 250 mètres ont donc été réalisées. Une traitée à l'aide de l'émulsion polymère couvrait la courbe prononcée alors que l'autre n'était pas traitée et servait de référence.

Il est à noter que ces deux sections étaient séparées par une zone tampon de 500 m afin d'éviter toutes contaminations. Il est également important de mentionner qu'avant la réalisation des planches d'essais, la route non revêtue a été rechargée à l'aide de gneiss granitique ayant une granulométrie respectant le fuseau granulométrique du MG-20 du Ministère des Transports du Québec (MTQ) [21].

La planche stabilisée à l'aide de l'émulsion polymère a été réalisée en enlevant une couche de matériau granulaire d'environ 5 cm, en appliquant ensuite le produit à un taux de pose de 3,4 l/m², en remettant la couche précédemment enlevée et finalement en réappliquant de l'émulsion polymère sur la surface de la route, toujours à un taux de pose de 3,4 l/m². Les résultats de laboratoire [22] [23] justifient le taux de pose d'émulsion polymère choisi. En effet, un taux de pose de 3,4 l/m² contribue à améliorer davantage les propriétés mécaniques d'un gneiss granitique que les taux de pose inférieurs. Habituellement, l'agent stabilisant doit être mélangé de manière homogène avec le matériau granulaire et stabilise jusqu'à une profondeur de 10 cm. Or, dans ce cas-ci, un taux de pose de 3,4 l/m² est appliqué à 5 cm de profondeur et à la surface ce qui représente quatre fois la concentration normalement recommandée. Cette quantité

importante d'agent stabilisant est appliquée à cause des conditions routières (trafic composé majoritairement de poids lourds et section située dans une dénivellation avec un virage prononcé) et climatiques (produit stabilisant épandu durant une période pluvieuse) difficiles et afin de compenser le fait que le matériau granulaire ne soit pas parfaitement mélangé; un mélange homogène entre le matériau granulaire et l'agent stabilisant en conditions réelles étant très difficile, laborieux, coûteux et donc peu réaliste. La figure 6 montre l'épandage de l'agent stabilisant après avoir enlevé environ 5 cm de hauteur de matériau granulaire de la partie gauche de la route. Le matériau retiré se retrouve sous la forme d'un andain au milieu du chemin. Après l'application de l'émulsion polymère à une profondeur de 5 cm, le remblai est remplacé et ensuite la couche de surface d'agent stabilisant est appliquée. L'application de l'émulsion polymère sur le côté gauche de la route est alors terminée et les mêmes étapes sont effectuées pour la stabilisation de la partie droite de la route. La figure 7 montre le rouleau compresseur utilisé pour la compaction qui est recommandée lors de travaux de rechargement.



Figure 6 - Épandage de la couche inférieure (profondeur de 5 cm) de l'agent stabilisant sur la partie gauche de la route



Figure 7 - Rouleau compresseur servant à la compaction de la section référence et de celle stabilisée

5.4.2 Présentation des résultats des travaux de terrain

Le déflectomètre à masse tombante portatif est composé d'un système d'application de la charge et de trois géophones. La charge est appliquée à l'aide d'une masse qui tombe sur une plaque circulaire. La contrainte appliquée dépend de la masse elle-même, de sa hauteur de chute et du rayon de la plaque circulaire. L'application de la charge a une durée d'environ 20 ms. Les géophones servent à mesurer les déflexions et permettent ainsi de mesurer un bassin de déflexions. Les trois géophones sont espacés de 30 cm. L'un de ceux-ci est placé directement sous la plaque circulaire. La figure 8 montre la ligne

d'influence sous laquelle a lieu 95% de la déflexion [24]. En effet, la distribution des contraintes sous la plaque circulaire peut être estimée par une droite ayant un angle de 34° , soit une pente d'environ 2:3. Il s'agit d'une approximation acceptable de la courbe sous laquelle a lieu 95% de la déflexion. À cause de cette distribution des contraintes, les géophones éloignés du point d'application de la charge donnent de l'information sur les couches en profondeurs alors que le géophone situé sous la plaque circulaire donne la déflexion maximale. Ceci permet donc d'obtenir une bonne évaluation du comportement structural de la chaussée étudiée.

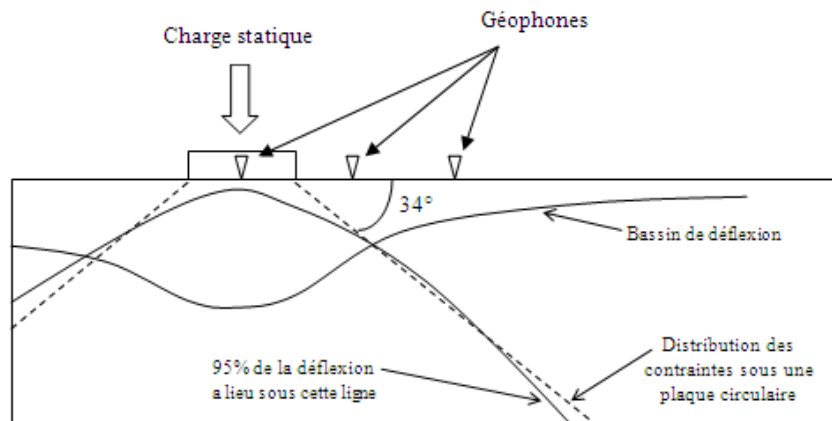


Figure 8 – Schéma de la ligne d'influence sous laquelle 95% de la déflexion a lieu

La figure 9 présente le rapport entre les déflexions à différentes profondeurs de la section référence et de celle stabilisée en fonction du temps. Des essais de LWD ont été effectués à plusieurs reprises durant l'été 2008. Les essais s'étendent environ de juin 2008 à août 2008, soit une centaine de jours. Les résultats à 0 cm de profondeur sont fournis par le géophone directement sous la charge qui donne la déflexion maximale de la route. Les résultats à 10 cm et 30 cm de profondeur sont fournis respectivement par le géophone à 30 cm et à 60 cm de l'application de la charge. Ces résultats permettent d'évaluer la déflexion de la route en profondeur. Il est à noter que plus la déflexion est faible, plus la rigidité de la route est grande. Des valeurs de déflexion plus faible pour la section stabilisée comparativement à la section référence sont donc attendues. Les droites en pointillé sur la figure 9 correspondent aux moyennes des résultats relatifs dans le temps pour les différentes profondeurs.

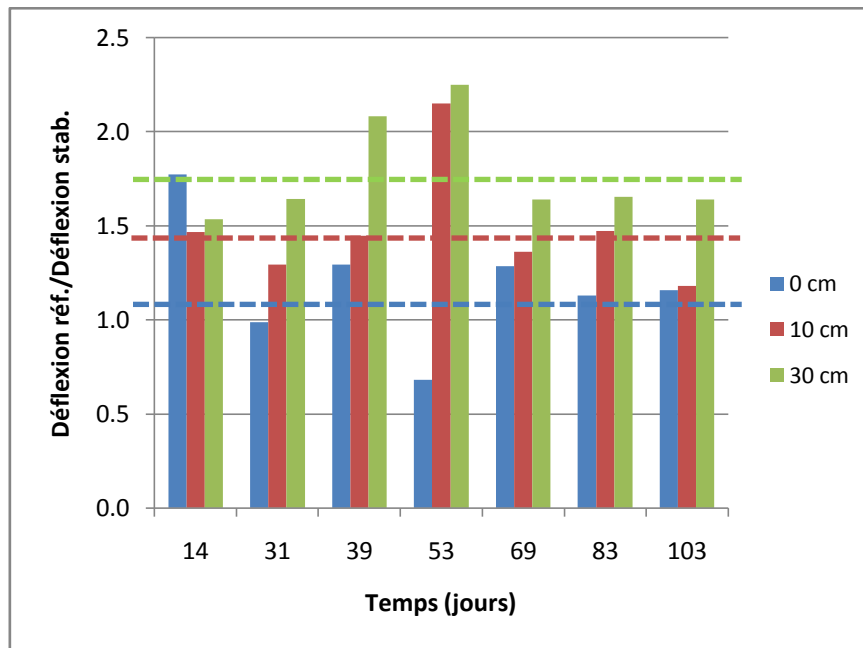


Figure 9 – Résultats relatifs des déflexions en fonction du temps à différentes profondeurs

Il est possible de déduire, en analysant la figure 9, que la stabilisation à l'aide de l'émulsion polymère permet de réduire les déformations de la chaussée en profondeur. En effet, la section stabilisée présente des déflexions 1,8 fois inférieure à celle de la section référence à une profondeur de 30 cm et elle présente tout de même une diminution des déformations de 1,5 fois par rapport à la section référence à 10 cm de profondeur. De plus, comme le montre l'histogramme de la figure 9, les résultats sont relativement constants dans le temps ce qui permet d'affirmer que le produit stabilisant demeure efficace durant au moins les 100 premiers jours suivant son application.

Il sera donc possible, à partir des résultats du suivi de la section stabilisée présentés précédemment et à l'aide d'une base de données complète fournie par le partenaire industriel, de valider la solution technique fournie par le système d'aide à la décision et d'évaluer si les objectifs du gestionnaire ont été atteints.

6. CONCLUSION

Les travaux de recherche présentés faciliteront le travail des gestionnaires de réseaux routiers non revêtus ruraux en les aidant à gérer de façon rigoureuse l'entretien de leur réseau routier tout en respectant leurs préférences. Le caractère novateur de ce projet réside dans la personnalisation des solutions en fonction des différents types d'utilisateurs de réseaux routiers et des préférences et objectifs des gestionnaires de ces réseaux.

Les principales caractéristiques du réseau routier ainsi que différentes variables expérimentales (type de matériau granulaire sur la route, type de produit pour la stabilisation ou le traitement par abat-poussière) seront intégrées au système d'aide à la décision qui fournira plusieurs solutions. Une étude approfondie des travaux expérimentaux antérieurs [14] [15] [17] [22] [23] [25] permettra de proposer des produits pour la stabilisation ou le traitement par abat-poussière et des taux de pose adaptés en fonction des caractéristiques de la route et des variables expérimentales.

Les particularités du réseau routier devront aussi être prises en compte. Certains réseaux ruraux peuvent par exemple servir principalement pour l'accès à des propriétés privées alors que d'autres sont utilisés principalement pour dévier le transport lourd d'une municipalité. La prise en compte des besoins du gestionnaire du réseau permettra de cibler les solutions les plus intéressantes en fonction de ses objectifs.

Deuxièmement, la liste de solutions proposée par le système expert sera soumise à un filtre économique afin de s'assurer que celles-ci respectent les contraintes budgétaires du gestionnaire du réseau routier rural. Pour ce faire, les paramètres ayant le plus d'influence sur les coûts de l'entretien d'un réseau routier non revêtu ont été ciblés. Ainsi, certaines solutions pour l'entretien s'avérant trop onéreuses pourront être éliminées dès le début à l'aide de ce filtre économique.

Ensuite, différentes dimensions environnementale, sociale, logistique et technique seront introduits. Par exemple, les impacts de l'épandage de produits abat-poussière ou stabilisants sur la qualité de l'eau (dimension environnementale) ou sur la réduction d'accident (dimension sociale) seront évalués. Selon les préférences du gestionnaire, un poids sera attribué à chacune des dimensions ce qui permettra d'en arriver, à l'aide de la méthode d'analyse multicritères, à une liste de solutions retenues.

Finalement, par l'entremise d'une étude de cas, une validation de la liste de solutions sera effectuée. À l'aide d'une base de données complète collectée lors d'essais de terrain, il sera possible de mettre en évidence les bénéfices associés à l'entretien d'un réseau routier non revêtu. La gestion durable de l'entretien des réseaux routiers non revêtus ruraux telle qu'elle est présentée dans cet article ouvre donc la voie à une façon novatrice et rigoureuse de penser et de gérer ce type de réseaux routiers en fonction des préférences et objectifs de chacun de ses gestionnaires.

RÉFÉRENCES

1. Problématique et pistes de solution du régime forestier québécois. (2004). Mémoire de l'Association régionale ZECO inc., Québec
2. Beaulieu, L., Pierre, P. and Juneau, S. (2008). Field Test Program of Stabilization on a Principal Forest Road, 2008 Road Dust Management Practices and Future Needs Conference, San Antonio, Texas, USA
3. Chakrabarti, S. and Kodikara, J. (2003). Basaltic Crushed Rock Stabilized with Cementitious Additives: Compressive Strength and Stiffness, Drying Shrinkage, and Capillary Flow Characteristics, Transportation Research Record, vol. 2, n° 1819, LVR8-1120, pp. 18-26
4. Johnson, G. (2003). Minnesota's Experience with Thin Bituminous Treatments for Low-Volume Roads, Transportation Research Record, vol. 2, n°1819, LVR8-1059, pp. 333-337
5. Monlux, S. (2003) Stabilizing Unpaved Roads with Calcium Chloride, Transportation Research Record, vol. 2, n° 1819, LVR8-1110, pp. 52-56
6. Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K. and Al-Zubeidi, M. (2002) Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 14, n°3, pp. 239-245
7. Asi, I. M. (2001) Stabilization of Sebkhia Soil Using Foamed Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 13, n°5, pp. 325-331
8. Miller, G.A. and Zaman, M. (2000) Field and Laboratory Evaluation of Cement Kiln Dust as a Soil Stabilizer, Transportation Research Record, n°1714, pp. 25-32
9. Bushman, W. H., Freeman, T.E. and Hoppe, E.J. (2004) Stabilization Techniques for Unpaved Roads, Virginia Transportation Research Council
10. Hicks, R.G. (2002) Alaska Soil Stabilization Design Guide, Alaska Department of Transportation and Public Facilities
11. Pierre, P. (2005). Amélioration de la qualité des chemins d'accès aux ressources et routes locales dans le contexte canadien, Subvention de recherche et développement coopérative, CRSNG

12. Monlux, S., R. Mitchell, M. (2006). Surface Aggregate Stabilization with Chloride Materials, U.S. Department of Agriculture, Forest service, National Technology and Development Program, 0677 1805-STDTC, 7700-Transportation Management, Washington
13. Sanders, T. G., Addo, J. Q., Ariniello, A. and Heiden, W. F. (1997). Relative effectiveness of road dust suppressants, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 123, no. 6, pp. 393–397
14. Beaulieu, L. (2010). Influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière, mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec
15. Pierre, P., Bilodeau, J.P., Légère, G. (2008) Laboratory characterization and influence of mineralogy on the performance of treated and untreated granular materials used as surface pavements in unpaved roads, 7th International Symposium of Unbound Aggregates and Roads, Nottingham, UK, accepté
16. Beaulieu, L., Pierre, P. and Bilodeau, J-P. (2010). Laboratory Characterization and Influence of Mineralogy and Grading on the Performance of Treated and Untreated Granular Materials Used as Surface Pavements in Unpaved Road, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2010, Article ID 876852, 10 pages. doi:10.1155/2010/876852
17. Poulin, P. (2010). Étude de la performance de chaussée non revêtue traitées par abat-poussière en contexte nordique canadien, mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec
18. Rackley, J. and Chung, W. (2008). Incorporating forest road erosion into forest resource transportation planning, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. I, pp. 115-127
19. Gucinski, H. and al. (2001). *Forest Roads: A Synthesis of Scientific Information*. Portland, Oregon : U.S. Department of Agriculture, General Technical Report PNW-GTR-509
20. Coulter, E.D., Sessions, J. and Wing, M.G. (2006). Scheduling forest road maintenance using the analytic hierarchy process and heuristics. *Silva Fennica* 40(1): 143–160
21. Géolab inc. (2002). Résumé des exigences granulométriques et qualitatives des granulats pour foundation, béton de ciment, béton bitumineux et abrasives, Géolab inc.
22. Pierre, P., Bilodeau, J.P., Légère, G., and Doré, D. (2007) A Laboratory Study on the Relative Performance of Treated Granular Materials Used for Unpaved Road, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Ottawa, Canada
23. Pierre, P., Pelletier, L., Légère, G., Juneau, S., and Doré, D. (2007) Comparative laboratory study of shear behaviour of granular materials stabilized with dust reducing products, CSCE 2007 Annual General Meeting & Conference, Yellowknife, Northwest Territories, Canada
24. Grenier, S. (2007). Analyse dynamique du déflectomètre à masse tombante, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec
25. Pelletier, L. (2007). Étude comparative de la performance en laboratoire des matériaux granulaires stabilisés utilisés comme surfaces de roulement pour les chaussées non revêtues, mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec