

Ministère des Transports du Québec

**Projet de recherche sur l'utilisation des bandes
d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec**

Rapport final

Date : Décembre 2011
N/Réf. : 072-P015838-0120-CH-0004-01

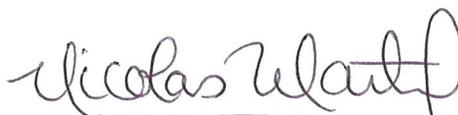
LVM

Ministère des Transports du Québec

Projet de recherche sur l'utilisation des bandes d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec

Rapport final

Préparé par :



Nicolas Martel, ing., M.Sc.
Chargé de projet – Chercheur principal – Gestion de chaussées
N° OIQ : 120974

Avec la collaboration, pour
la section 4, de :



Suzanne St-Laurent, ing. jr
Chargée de discipline – Gestion de chaussées
N° OIQ : 5007084

Révisé par :



Michel Parent, ing.
Chargé de discipline – Gestion de chaussées
N° OIQ : 99322

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	CHRONOLOGIE DU PROJET DE RECHERCHE.....	1
3	LIEN ENTRE L'ÉTAPE 2 ET L'ÉTAPE FINALE.....	2
4	CHOIX DES CAS À INCLURE DANS LES ABAQUES.....	3
4.1	Recherche de cas (première phase).....	3
4.2	Problèmes rencontrés lors du traitement (première phase).....	3
4.3	Recherche de cas (deuxième phase).....	3
4.4	Cas d'exclusions.....	5
5	ABAQUE DE CORRECTION SUIVI D'UNE COUCHE D'USURE AVEC VTM [CORR BB+CU]6	6
5.1	Utilisation de l'abaque.....	8
5.1.1	<i>Méthodologie.....</i>	<i>8</i>
5.1.2	<i>Résultats graphiques.....</i>	<i>8</i>
5.1.3	<i>Résultats des bilans monétaires.....</i>	<i>9</i>
6	AUTRES ABAQUES.....	10
6.1	Abaque de planage / renforcement / couche d'usure avec VTM [Plan + Renf + CU].....	10
6.2	Abaque de Planage / Couche d'usure avec VTM [Plan + CU].....	11
7	COMPARAISON ENTRE LES DEUX ABAQUES LES PLUS AVANCÉS.....	12
8	AMÉLIORATION DE LA PROCÉDURE D'UTILISATION DES ABAQUES.....	13
8.1	Relation universelle reliant l'IRI global aux IRI des bandes d'ondes.....	13
8.2	Inutilité d'estimation des paramètres d'une loi weibull de degré 3.....	14
9	CONCLUSION.....	15
10	AVENUES DE RECHERCHE.....	15

TABLE DES MATIÈRES

Figures

Figure 1 :	Superposition parfaite entre le relevé réseau (avant-travaux) et le relevé projet (après-travaux) (Autoroute 30, direction est à Sainte-Julie) après application d'un filtre passe-haut de 60 m	4
Figure 2 :	Exemple de bilan monétaire nécessitant le rejet d'un projet pour confection d'abaque (site de Notre-Dame-du-Bonsecours de l'abaque Planage – Renforcement – Couche d'usure (voir section 6.1)) ..	6
Figure 3 :	Abaque de l'intervention Correction / Couche d'usure avec VTM [Corr + CU].....	7
Figure 4 :	Résultats des prédictions d'IRI après-travaux avec la procédure détaillée du rapport d'étape 2	8
Figure 5 :	Bilans monétaires calculés (prédiction versus réel)	9
Figure 6 :	Résultats moyens	9
Figure 7 :	Abaque de Planage / Renforcement / Couche d'usure avec VTM [Plan + Renf + CU].....	10
Figure 8 :	Abaque de Planage / Couche d'usure avec VTM [Plan + CU].....	11
Figure 9 :	Comparaison entre les deux abaques les plus avancés.....	12
Figure 10 :	IRI prédit versus IRI réel (relation universelle de recombinaison de l'IRI global)	14

Annexes

Annexe 1	Tableau regroupant les projets évalués au cours de l'étape de choix des cas
Annexe 2	Abaques de Correction / Couche d'usure avec VTM [Corr + CU]
Annexe 3	Comparaison de la prédiction et de l'obtenu (Correction / Couche d'usure (avec VTM))
Annexe 4	Abaques de Planage / Renforcement / Couche d'usure avec VTM [Plan + Renf + CU]
Annexe 5	Abaques inachevés de Planage / Couche d'usure avec VTM [Plan + CU]
Annexe 6	Comparaison entre les valeurs moyennes des deux abaques les plus avancés
Annexe 7	Méthodologie de prédiction de l'IRI après-travaux au moyen des abaques
Annexe 8	Rapport d'étape 1 (n° LVM : 072-P015838-0120-CH-0001-00)
Annexe 9	Rapport d'étape 2 (n° LVM : 072-P015838-0120-CH-0002-00)
Annexe 10	Présentation Powerpoint des principaux résultats du rapport final (n° LVM : 072-P015838-0120-CH-0003-00)

Propriété et confidentialité

« Ce document d'ingénierie est l'œuvre de LVM et est protégé par la loi. Ce rapport est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute reproduction ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite de LVM et de son Client.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS		
N° de révision	Date	Description de la modification et/ou de l'émission
00	2010-09-24	Émission finale
01	2011-12-12	Révision n° 1

1 INTRODUCTION

L'analyse des profils longitudinaux par bandes d'ondes est une méthode qui comporte plusieurs utilisations variées. Utilisée par les Français pour l'acceptation des nouveaux revêtements, elle n'est présentement utilisée au Québec et en Amérique du Nord que pour des fins d'expertise et ce, par quelques ressources spécialisées.

Le présent document décrit les différents résultats du projet de recherche du MTQ n° R588.1 qui a été octroyé à LVM en 2007. La chronologie du projet de recherche, les différentes méthodologies utilisées et les avenues futures de réalisation sont aussi présentées. Enfin, tous les documents livrables d'étape qui ont déjà été présentés au MTQ sont inclus en annexe au présent rapport.

2 CHRONOLOGIE DU PROJET DE RECHERCHE

Le projet de recherche a initialement été débuté dans une optique d'évaluation de la faisabilité de remplacement de l'IRI comme indicateur de l'uni dans les clauses d'uni du MTQ. Il était alors proposé que la notation en bandes d'ondes, tirée des méthodes françaises, puisse remplacer l'IRI comme indicateur de l'uni dans ces clauses.

L'étape 1 du projet a donc consisté en une revue de littérature des concepts reliés aux bandes d'ondes, à la clause d'uni française et aux méthodes de mise en œuvre et équipements disponibles au Québec. L'analyse de la faisabilité d'adaptation de la clause d'uni française au Québec fit aussi partie du rapport d'étape 1 n° 072-P015838-0120-CH-0001-00 qui a été livré au MTQ au mois de mars 2008. Ce rapport est inclus à l'annexe 8 du présent document.

Suite à ce rapport, les responsables du projet au MTQ ont décidé d'orienter l'étape 2 vers la conception d'outils modélisant l'effet sur l'uni de diverses interventions. Pour le MTQ, il était important que ces outils puissent pouvoir, dans un premier temps, être utilisés dans un contexte d'expertise avant de penser les utiliser contractuellement. C'est dans cette optique que l'étape 2 a été amorcée.

Cette étape s'est terminée en mars 2010 par la livraison du rapport d'étape 2 (livrable n° 072-P015838-0120-CH-0002-00). Ce rapport, inclus à l'annexe 9 du présent rapport, incluait une méthode utilisant l'IRI avant-travaux pour prédire l'IRI attendu après-travaux. Pour ce faire, il était nécessaire de décortiquer l'IRI global selon les bandes d'ondes de la méthode française. Le cas de la réfection de l'autoroute 20 à Cap St-Ignace a permis d'établir cette méthode qui a donné de bons résultats d'estimation pour ce projet.

L'étape finale, qui constitue le corps de ce rapport, a consisté à vérifier l'applicabilité à plus grande échelle de la méthode proposée dans l'étape 2. Pour ce faire, plusieurs projets ont fait l'objet d'analyses selon la méthodologie proposée dans l'étape 2 afin de confectionner des abaques d'aide à la prédiction des IRI après-travaux. Ces abaques, propres aux méthodes de réfection utilisées, sont les principaux résultats livrables de ce rapport. Évidemment, compte-tenu des limitations budgétaires et d'échéanciers, il ne fut pas possible de produire des abaques pour tous les types de réfections. Certains abaques, pour être plus précis, devraient aussi être bonifiés par d'autres projets. Ces aspects sont proposés dans les avenues futures de recherche.

Enfin, les principaux résultats qui sont inclus dans le présent rapport ont fait l'objet d'une présentation au MTQ le 14 mai 2010. Cette présentation (livrable n° 072-P015838-0120-CH-0003-00) est incluse à l'annexe 10.

3 LIEN ENTRE L'ÉTAPE 2 ET L'ÉTAPE FINALE

Dans le rapport d'étape 2, une méthode détaillée a été proposée pour la prédiction de l'IRI après-travaux. Cette méthode faisait intervenir un abaque d'estimation des IRI après-travaux à partir des IRI PO, IRI MO et IRI GO avant-travaux. La méthode a été utilisée avec succès dans le cadre du projet de Cap St-Ignace (correction de 20 mm suivie d'une couche d'usure de 40 mm).

Le projet de Cap St-Ignace étant bien documenté mais singulier, il était maintenant nécessaire de trouver des projets pour compléter l'abaque de prédiction relié à ce type d'intervention (couche de correction suivie d'une couche d'usure (avec VTM)) : le but étant de produire un abaque unique de prédiction avec des projets du même type d'intervention.

La majeure partie du travail de l'étape finale a consisté en la recherche de cas potentiels à l'élaboration des abaques. Suite à la réunion de présentation du rapport d'étape 2, trois types d'abaques devaient être construits pour les trois types d'interventions suivantes :

- ▶ Couche de correction + couche d'usure;
- ▶ Planage + couche d'usure;
- ▶ Planage + renforcement + couche d'usure.

Ces interventions devaient avoir été réalisées avec le véhicule de transfert de matériaux (VTM).

4 CHOIX DES CAS À INCLURE DANS LES ABAQUES

4.1 RECHERCHE DE CAS (PREMIÈRE PHASE)

La recherche de cas a débuté par l'analyse des relevés effectués dans un contexte de projet avant et après-travaux. Parmi tous les relevés réalisés par LVM, il s'est avéré qu'aucun relevé avant-travaux ne correspondait à un relevé après-travaux. En fait, les relevés projet sont principalement réalisés dans un contexte d'après-travaux. La décision d'utiliser des relevés avant-travaux effectués lors de la campagne annuelle de niveau réseau a donc été prise.

Ainsi, vingt (20) cas potentiels ont été soumis à LVM par le MTQ, toutes interventions confondues. En raison d'un manque important d'information, ces cas ont été mis temporairement à l'écart.

La recherche de cas s'est donc poursuivie parmi la banque de relevés effectués par LVM. Ces cas ont tout d'abord été classés selon leurs types d'interventions. Pour connaître l'intervention réalisée, tous les formulaires de demande de relevé d'uni émis par le MTQ ont été consultés. Un total de seize (16) cas, pour les trois types d'intervention préalablement retenues, ont été répertoriés. De ces 16 cas, 9 avaient été réalisés avec le VTM.

4.2 PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DU TRAITEMENT (PREMIÈRE PHASE)

Après avoir traité quelques cas, le cas de la route 307 à Cantley a suscité beaucoup d'intérêt. En fait, sur le formulaire de demande de relevé d'uni, on pouvait lire « Type d'intervention : Plan(50) + CU(50) ». De par le formulaire ayant pour titre « Formulaire de rapport de relevé », il s'est avéré que l'intervention réelle n'était pas du tout celle qui était inscrite sur le formulaire de demande de relevé. Cette intervention consistait plutôt en une excavation, suivie d'un rechargement granulaire, suivi de deux couches de base et d'une couche d'usure.

À ce moment, les 16 cas déjà triés ont fait l'objet d'une remise en question. Il a donc fallu pousser les investigations plus loin. La recherche de cas a donc fait l'objet d'une deuxième phase.

4.3 RECHERCHE DE CAS (DEUXIÈME PHASE)

La deuxième phase de traitement a consisté en une recherche de cas parmi tous les relevés après-travaux effectués par LVM depuis 2008. Le document interne intitulé « note de relevé » ainsi que le document « rapport de relevé » ont alors été consultés afin de déterminer le type d'intervention réel. Au besoin, le personnel ayant fait les relevés pouvait être consulté. Cette recherche a permis de cibler trente neuf (39) cas potentiels.

Pour chacun de ces cas, les chargés de dossier du MTQ ont été mis à contribution. Il leur s'agissait de confirmer le type d'intervention inscrit sur les deux formulaires de relevés cités plus haut.

Le traitement a ainsi débuté et seuls les projets dont les profils avant-travaux et après-travaux étaient parfaitement alignés ont été retenus. Pour faire correspondre les profils, un schéma manuscrit a été élaboré à l'aide des informations disponibles. Le chaînage RTS des relevés réseau était alors utile pour procéder au positionnement. Une fois la correspondance faite, l'outil « cross-correlation » de ProVAL (version 2.73.0033) a été utilisé.

L'hypothèse que l'intervention sur la route n'a pas affecté les grandes longueurs d'ondes a alors été posée. Un filtre a donc été appliqué pour ne retenir que les longueurs d'ondes plus grandes que 60 m pour les profils avant et après-travaux.

Dans ProVAL, lorsque le pourcentage de corrélation était élevé et que le déplacement final d'un des deux profils était inférieur à 0,5 m, le projet était retenu. Cependant, lorsque le pourcentage de corrélation était bas et qu'il fallait déplacer un des deux profils d'une grande distance comparativement à la correspondance manuscrite, le projet était exclu.

La figure 1 montre un exemple de parfaite superposition de profil. La courbe bleue représente le relevé de niveau réseau avant-travaux alors que la courbe rouge représente le relevé de niveau projet après-travaux.

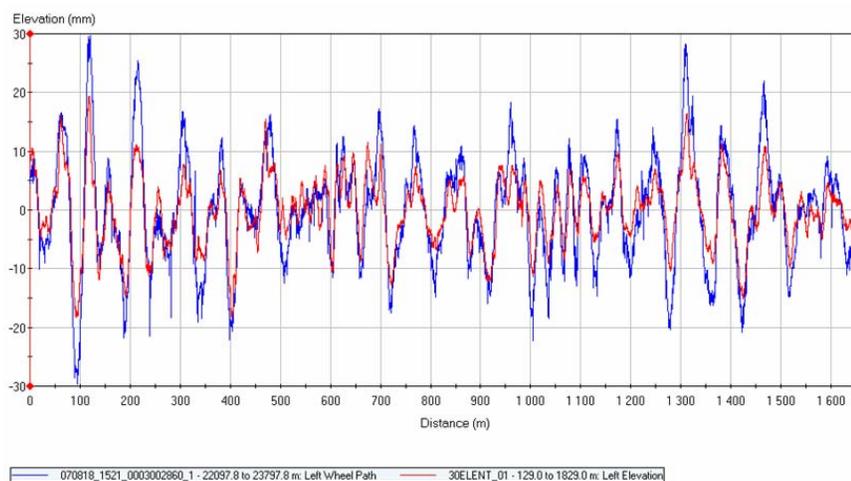


Figure 1 : Superposition parfaite entre le relevé réseau (avant-travaux) et le relevé projet (après-travaux) (Autoroute 30, direction est à Sainte-Julie) après application d'un filtre passe-haut de 60 m

La section 4.4 présente plus en détail les principales raisons des exclusions de cas.

4.4 CAS D'EXCLUSIONS

Puisque les données devaient être utilisées pour la construction d'abaques, le niveau de confiance sur l'alignement devait être parfait. C'est pourquoi il fallait accepter les cas où il n'y avait pas de doute, notamment relativement au départ de sections. Les points suivants présentent certains aspects précis qui ont occasionné l'exclusion de cas.

- ▶ Les fichiers ERD et RSP ne sont pas filtrés de façon homogène.

Lors de la comparaison entre un profil déjà filtré à 100 m et un profil non-filtré, mais qui est par la suite filtré à 100 m dans ProVAL, les résultats sont questionnables. Ceci est fréquent lorsque plusieurs filtres sont appliqués les uns par-dessus les autres. Si on compare les IRI obtenus de cette manière avec les IRI obtenus sans superposition de filtres, les résultats diffèrent. Il est donc préférable de comparer ensemble des fichiers déjà filtrés ou bien de comparer ensemble des fichiers non filtrés mais non un mélange des deux. Ceci est aussi vrai pour les fichiers filtrés mais à des longueurs d'ondes différentes.

- ▶ Alignement difficile entre le niveau réseau et le niveau projet

Les fichiers de profils recueillis lors des relevés de niveau réseau peuvent s'échelonner sur plusieurs kilomètres. Lorsque l'emplacement d'un projet à investiguer est situé à plusieurs kilomètres du début du profil de niveau réseau avant-projet, il peut y avoir des écarts significatifs entre le chaînage théorique et le chaînage réel de départ du projet sur ce profil. Il en résulte une difficulté de superposition avec le profil de niveau projet qui a été recueilli et cet aspect occasionne un pourcentage de corrélation faible dans ProVAL. Il n'est alors pas possible de conclure hors de tout doute de l'alignement parfait des profils.

- ▶ Il y a un problème au niveau des résultats d'IRI.

Il est impossible de confectionner des abaques avec des cas dont les IRI après-travaux sont supérieurs aux IRI avant travaux.

- ▶ Le début de relevé projet correspond à un chaînage RTS qui est erroné ou n'existe pas.
- ▶ Le pourcentage de cross-corrélation est relativement faible et le déplacement que doit subir un des deux profils est élevé.

Par exemple, un cas de déplacement de 75 m avec un pourcentage de corrélation de 24 % a été calculé et ce site a été rejeté.

- ▶ La non-correspondance du profil sur toute une passe.

Il y a parfois un écart relié aux pas de mesure. C'est pourquoi, une cote est établie selon le niveau de confiance de l'alignement global des profils.

- Finalement, lorsque les profils sont parfaitement alignés et que les abaques sont prêts à être construits, une vérification du bilan monétaire est faite. La figure 2 présente un exemple de bilan monétaire qui a nécessité le rejet du projet pour la confection des abaques et ce, en raison du nombre élevé de lots rejetés et pénalisés.

RÉSUMÉ						
Description	Lots					Total Clauses
	Exclu	Rejet	Pénalité	Acceptable	Bonus	
Bilan monétaire	N/A	N/A	-2 450.00 \$	0.00 \$	220.00 \$	-2 230.00 \$
Nombre de lots	0	4	11	6	7	28
% des lots avec clauses	N/A	14.00%	39.00%	21.00%	25.00%	100.00%
Clause d'uni type	IRI moyen (m/km) =					1.425

Figure 2 : Exemple de bilan monétaire nécessitant le rejet d'un projet pour confection d'abaque (site de Notre-Dame-du-Bonsecours de l'abaque Planage – Renforcement – Couche d'usure (voir section 6.1))

Parmi tous les projets évalués (cas LVM et ajout de cas du MTQ), douze (12) puis dix (10) ont finalement été retenus pour la confection des trois abaques.

Enfin, un tableau regroupant tous les projets évalués se trouve à l'annexe 1 pour témoigner de l'ampleur du travail effectué lors de l'étape de choix des projets.

5 ABAQUE DE CORRECTION SUIVI D'UNE COUCHE D'USURE AVEC VTM [CORR BB + CU]

Les projets suivants ont été retenus pour la confection de l'abaque de Correction / Couche d'usure avec VTM. Il s'agit tous de projets autoroutiers; ce qui n'était aucunement prévu au départ.

- 6408-07-0902 A-20 à St-Eugène [Corr(30 mm) + CU(60 mm)]
- 6603-07-0631 A-20 à Lévis [Corr(20 mm) + CU(45 mm)]
- 8603-08-0601 A-20 à Sainte-Hélène-de-Bagot [Corr(20 mm) + CU(40 mm)]
- 8603-08-0614 A-30 à Sainte-Julie [Corr(25 mm) + CU(40 mm)]
- 6603-08-0617 A-20 à Cap Saint-Ignace [Corr(20 mm) + CU(40 mm)]

L'abaque de Correction / Couche d'usure qui résulte de l'intégration de ces cinq projets est présenté à la figure 3 et reproduit à l'annexe 2.

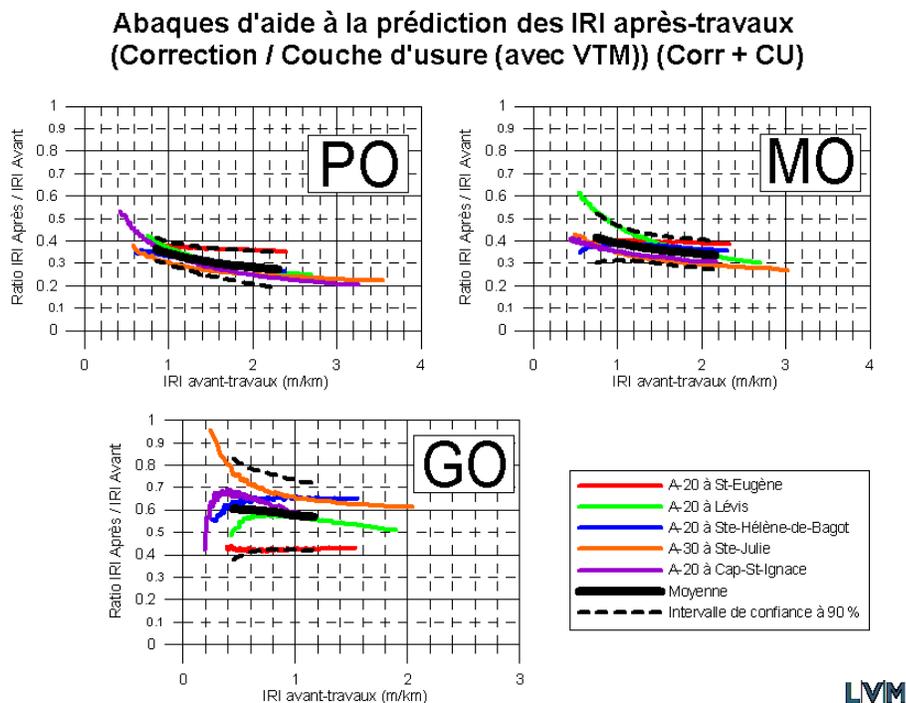


Figure 3 : Abaque de l'intervention Correction / Couche d'usure avec VTM [Corr + CU]

Cet abaque, comme les deux autres de la section 6.0, illustre, pour chaque gamme d'ondes, le ratio de l'IRI après-travaux sur l'IRI avant-travaux et ce, en fonction de l'IRI avant-travaux. Par une décortication du profil en bandes d'ondes, il permet de tenir compte de la portée de chaque intervention. Ainsi, plus le ratio est faible, plus l'intervention a une incidence sur cette gamme de longueurs d'ondes. Dans le cas de l'intervention Correction / Couche d'usure de l'abaque de la figure 3, les bandes d'ondes les plus améliorées sont, en ordre décroissant : PO, MO et GO. Cela est logique compte-tenu qu'il s'agit d'une intervention en surface. Les petites ondes sont alors plus affectées que les grandes.

Rappelons que les petites ondes (PO) correspondent aux longueurs d'ondes de 0,707 m à 2,828 m, que les moyennes ondes (MO) correspondent aux longueurs d'ondes de 2,828 m à 11,312 m et que les grandes ondes (GO) correspondent aux longueurs d'ondes de 11,312 m à 45,248 m. Pour plus de renseignements sur le choix de ces longueurs d'ondes, le lecteur peut se référer au rapport d'étape 2 à l'annexe 9.

5.1 UTILISATION DE L'ABAQUE

5.1.1 Méthodologie

La méthode détaillée de prédiction des IRI après-travaux qui a été utilisée dans la présente section a été présentée dans le rapport de l'étape 2 qui est présenté à l'annexe 9. Cette méthode a par la suite été bonifiée par rapport à la version de la procédure du rapport d'étape 2. Cet aspect est traité plus spécifiquement à la section 8.0.

La méthode, qui fait intervenir des abaques tels que celui de la figure 3, nécessite d'abord de décortiquer l'IRI en IRI PO, IRI MO et IRI GO au moyen du logiciel ProVAL et ce, pour chaque 100 mètres. En classant ces IRI, il est alors possible de déterminer un graphique de densité cumulative de l'IRI pour un projet donné. En utilisant les abaques avec des valeurs sécuritaires de ratios, on peut alors estimer l'IRI après-travaux pour chacune des gammes d'ondes et recomposer l'IRI global après-travaux. Il en ressort un graphique de densité cumulative pour le projet dont l'IRI est prédit.

5.1.2 Résultats graphiques

Afin de déterminer la justesse de la procédure, la méthode a été utilisée avec la valeur moyenne de l'abaque de l'intervention Correction / Couche d'usure. Rappelons que cette valeur moyenne est la résultante des cinq projets inclus dans l'abaque. Les résultats de la prédiction et de l'obtenu sont présentés dans la figure 4 et reproduits à l'annexe 3. Pour renforcer la comparaison, un sixième projet (Charny) a aussi fait l'objet d'une simulation. Le but était de vérifier la validité de l'abaque en utilisant un projet qui n'a pas été utilisé pour le produire.

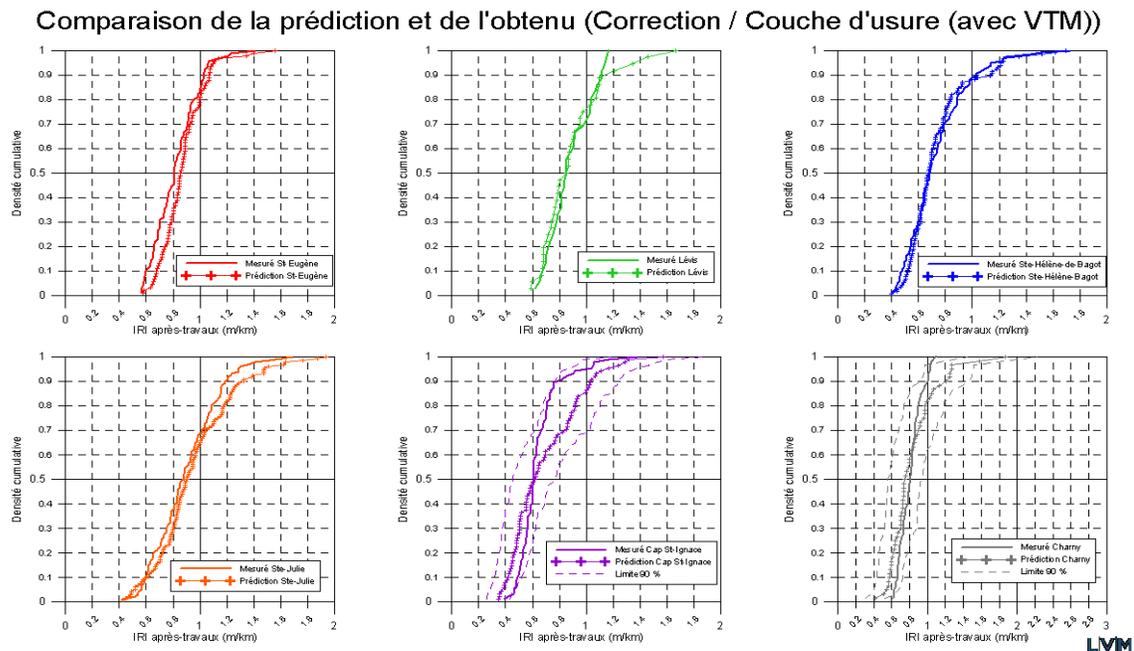


Figure 4 : Résultats des prédictions d'IRI après-travaux avec la procédure détaillée du rapport d'étape 2

Les résultats graphiques de cette simulation montrent bien la validité de la procédure. D'abord, toutes les distributions d'IRI prédites sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 90 %. Ensuite, toutes les distributions prédites sont sécuritaires sur les événements extrêmes que sont les lots de 100 mètres avec IRI élevés. Cet aspect est important car les lots d'IRI élevés peuvent faire l'objet de rejets. Les simulations sont donc sécuritaires à ce point de vue car elles en prédisent plus qu'il ne s'en produit. Enfin, les allures générales de courbes sont semblables pour la plupart des projets.

5.1.3 Résultats des bilans monétaires

Afin de conforter ces observations et de déterminer clairement les avantages d'une telle procédure pour prédire les IRI après-travaux, les bilans monétaires des distributions prédites ont été calculés selon la clause d'uni standard en vigueur au Québec pour fin de comparaison avec les bilans réellement obtenus. Le tableau résultant est présenté à la figure 5.

	St-Eugène		Lévis		Ste-Hélène-de-Bagot		Ste-Julie		Cap St-Ignace		Charny	
	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel
IRI moyen [m/km]	0.877	0.823	0.897	0.883	0.739	0.737	0.954	0.897	0.691	0.642	0.831	0.811
Nombre de 100 m	90	90	36	36	116	116	132	132	88	88	60	60
Rejet [nb]	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0
Pénalité [nb]	3	1	3	0	4	3	12	6	2	1	3	0
Acceptable [nb]	0	2	1	0	4	3	10	7	2	0	2	0
Bonus [nb]	87	87	32	36	108	110	108	119	84	87	54	60
Bilan [\$]	6700	6930	2020	2470	8930	8810	5610	7410	7230	8260	3480	5090
Diff. IRI [%]	-6.6		-1.6		-0.3		-6.4		-7.6		-2.5	
Diff. Bilan [%]	3.3		18.2		-1.4		24.3		12.5		31.6	

Figure 5 : Bilans monétaires calculés (prédiction versus réel)

Certaines observations peuvent être tirées de la consultation de ce tableau.

D'abord, les IRI prédits sont en moyenne toujours plus élevés que les IRI réels obtenus. Ensuite, le nombre de rejets et de lots pénalisés prédits est toujours plus élevé que le nombre de rejets et de lots pénalisés réels. Les lots bonifiés prédits sont aussi moindres que les lots bonifiés réels. Finalement, à l'exception d'un site, les bilans monétaires sont toujours moindres. L'objectif d'être sécuritaire dans les prédictions est donc atteint. Tous les sites ont fait mieux que prédit. La moyenne des chiffres obtenus est donnée dans la figure 6.

	Prédit	Réel
IRI moyen [m/km]	0.831	0.795
Nombre de 100 m	522	522
Rejet [nb]	3	0
Pénalité [nb]	27	11
Acceptable [nb]	19	12
Bonus [nb]	473	499
Bilan [\$]	33970	38970
Diff. IRI [%]	-4.5%	
Diff. Bilan [%]	12.8%	

Figure 6 : Résultats moyens

En moyenne, la différence d'IRI est donc de 4,5 % et la différence du bilan monétaire est de 12,8 %. Ces données confortent les observations réalisées sur les graphiques à savoir que la prédiction selon la procédure proposée est efficace et sécuritaire du point de vue du gestionnaire du réseau routier, soit le MTQ.

6 AUTRES ABAQUES

Deux autres abaques ont fait l'objet de travaux, soit l'abaque de Planage, Renforcement et Couche d'usure [Plan + Renf + CU] et l'abaque de Planage et Couche d'usure [Plan + CU].

6.1 ABAQUE DE PLANAGE / RENFORCEMENT / COUCHE D'USURE AVEC VTM [PLAN + RENF + CU]

Les projets suivants ont été retenus pour la confection de l'abaque de Planage, Renforcement et Couche d'usure avec VTM.

- 8701-09-0605 A-10 à Marieville [Plan(100 mm) + Renf(75 mm) + CU(50 mm)]
- 8908-08-0605 Route 301 à Alleyn [Plan(50 mm) + Renf(40 mm) + CU(60 mm)]
- 8908-09-0605 Route 148 à Iles-aux-Alumettes [Plan(50 mm) + Renf(40 mm) + CU(60 mm)]
- 8907-09-0602 Route 148 à Pontiac [Plan(50 mm) + Renf(40 mm) + CU(60 mm)] *
- 8906-09-0602 Route 323 à Notre-Dame-du-Bonsecours [Plan(70 mm)+ Renf(50 mm) + CU(60 mm)] *

L'abaque résultant est présenté dans la figure 7, laquelle est reprise à l'annexe 4.

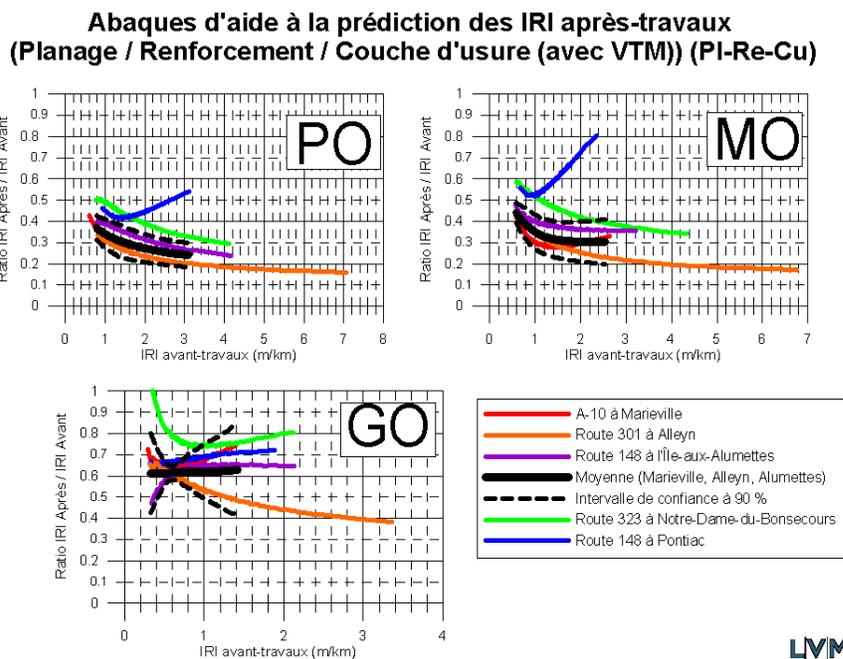


Figure 7 : Abaque de Planage / Renforcement / Couche d'usure avec VTM [Plan + Renf + CU]

L'abaque de la figure 7 montre des résultats beaucoup plus éparpillés que dans l'abaque précédent. En effet, les sites de Notre-Dame-du-Bonsecours et Pontiac ont des comportements différents des trois autres. C'est en fouillant pour en découvrir la raison que les bilans monétaires ont été consultés. Ceux-ci ont montré des quantités élevées de rejets et de lots pénalisés :

- ▶ Notre-Dame-du-Bonsecours : 4 rejets et 11 pénalités sur 28 lots de 100 m;
- ▶ Pontiac : 7 rejets et 6 pénalités sur 37 lots de 100 m.

Le bien-fondé du positionnement de ces deux projets dans l'abaque a donc fait l'objet d'une réflexion et il a été décidé de ne pas les inclure dans la courbe moyenne. En effet, il n'est pas logique d'inclure des projets s'étant mal comportés dans un abaque de détermination des IRI atteignables après-travaux. Leur inclusion aurait eu pour effet de réduire les attentes en terme d'IRI prédit. Seuls les sites de Marieville, Aléyn et l'Île-aux-Alumettes ont donc été conservés.

Compte tenu des échéanciers, des budgets et du manque de projets intégrables, il n'a pas été possible d'inclure d'autres projets à l'abaque avant la fin du projet de recherche. Néanmoins, pour être utilisable avec plus de précision, il serait important que d'autres projets soient éventuellement inclus dans cet abaque.

6.2 ABAQUE DE PLANAGE / COUCHE D'USURE AVEC VTM [PLAN + CU]

Les projets suivants ont été retenus pour la confection de l'abaque Planage / Couche d'usure avec VTM [Plan + CU].

- 7107-08-0604 A-40 à Saint-Augustin-de-Desmaures [Plan (30 mm) + CU(60 mm)]
- 8908-09-0603 Route 148 à Mansfield [Plan(60 mm) + CU(60 mm)]

L'abaque résultant est présenté dans la figure 8, laquelle est reprise à l'annexe 5.

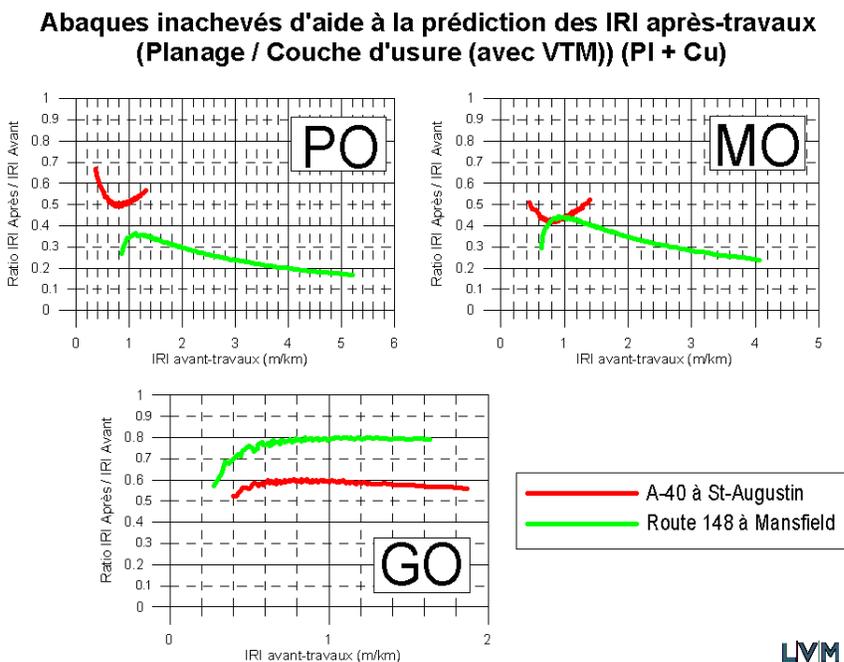


Figure 8 : Abaque de Planage / Couche d'usure avec VTM [Plan + CU]

Comme cet abaque ne comporte que deux projets, il devrait être bonifié avant toute utilisation. Malheureusement, il n'y avait plus de projets disponibles remplissant toutes les conditions de qualité requises pour en bonifier l'abaque. Cela devra donc être poursuivi ultérieurement au présent projet de recherche.

7 COMPARAISON ENTRE LES DEUX ABAQUES LES PLUS AVANCÉS

Les deux abaques les plus avancés ont fait l'objet de comparaison afin de déterminer s'il existait une différence entre les deux interventions. La figure 9 présente le résultat de ces comparaisons. En fait, les valeurs moyennes des abaques ont été mises en graphique les unes par-dessus les autres pour chaque cas. Cette figure est aussi disponible à l'annexe 6.

Comparaison entre les valeurs moyennes des abaques

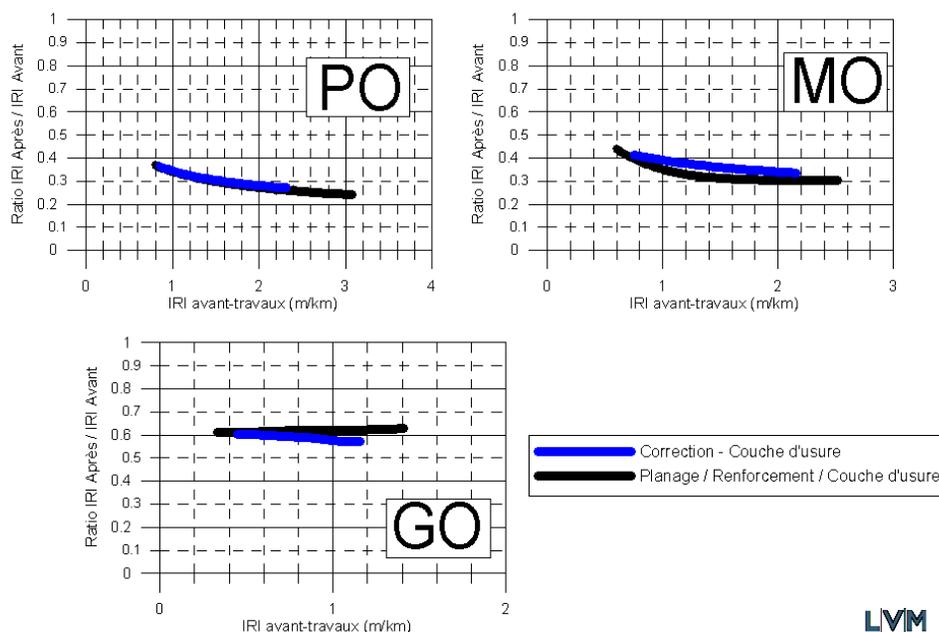


Figure 9 : Comparaison entre les deux abaques les plus avancés

Les conclusions suivantes peuvent en être tirées.

D'abord, la courbe des petites ondes est en tout point semblable pour les deux types d'interventions. Cela est logique car les deux interventions devraient avoir le même effet sur les défauts de petites ondes car ce sont des interventions de surface.

Quant à elle, la courbe des moyennes ondes est un peu plus élevée pour l'intervention de Correction / Couche d'usure que pour l'intervention de Planage / Renforcement / Couche d'usure. La première intervention est donc plus efficace sur ces longueurs d'ondes que la deuxième. Cela est aussi logique car la première intervention est de nature moins profonde que la deuxième. Cela peut aisément être perçu en consultant les épaisseurs représentatives des projets dans les sections précédentes.

Enfin, la courbe des grandes ondes présente des valeurs un peu plus faibles pour l'intervention de Correction / Couche d'usure que pour l'intervention de Planage / Renforcement / Couche d'usure. Cela n'est pas logique mais témoigne du fait, souvent observé en cours de mandat, qu'il existe une large possibilité de comportement des grandes ondes suite à des interventions de surface destinées à régler les problèmes de petites et moyennes ondes. Les grandes ondes font toujours l'objet d'une amélioration mais celle-ci est toujours moindre que pour les moyennes et petites ondes.

En cours de mandat, seul le type d'intervention de micro-resurfaçage n'a pas occasionné d'amélioration des grandes ondes. Cela était logique car il s'agit d'une intervention destinée à corriger des défauts de très petite longueur d'onde. Les résultats ne sont pas présentés ici parce que ces projets n'étaient pas assez précis pour être inclus dans des abaques.

8 AMÉLIORATION DE LA PROCÉDURE D'UTILISATION DES ABAQUES

Après avoir confectionné les abaques et utilisé la procédure du rapport d'étape 2 à de multiples reprises, il est apparu que cette dernière pouvait être bonifiée et simplifiée. Ainsi, deux points importants ont fait l'objet de retouches dans la procédure et sont présentés ci-après. La procédure adaptée simplifiée est présentée à l'annexe 7.

8.1 RELATION UNIVERSELLE RELIANT L'IRI GLOBAL AUX IRI DES BANDES D'ONDES

D'abord, il est devenu évident que l'étape consistant à décortiquer l'IRI par régression linéaire, projet par projet, était inutile dans la première version de la procédure. En effet, à plusieurs reprises, les paramètres de la régression qui ont été calculés ont été semblables d'un projet à l'autre. Il est donc devenu évident qu'une relation universelle pouvait être trouvée. En procédant à une régression linéaire des 2408 lots de 100 mètres utilisés dans les trois abaques (1204 avant-travaux et 1204 après-travaux), il est apparu que la relation universelle suivante était valide avec un R^2 de 0,998 :

$$IRI_{GLOBAL} = -0,00162 + 0,67129 * IRI_{PO} + 0,59821 * IRI_{MO} + 0,51960 * IRI_{GO}$$

La figure 10 montre les IRI prédits en fonction des IRI réels et la relation universelle de recombinaison de l'IRI trouvée.

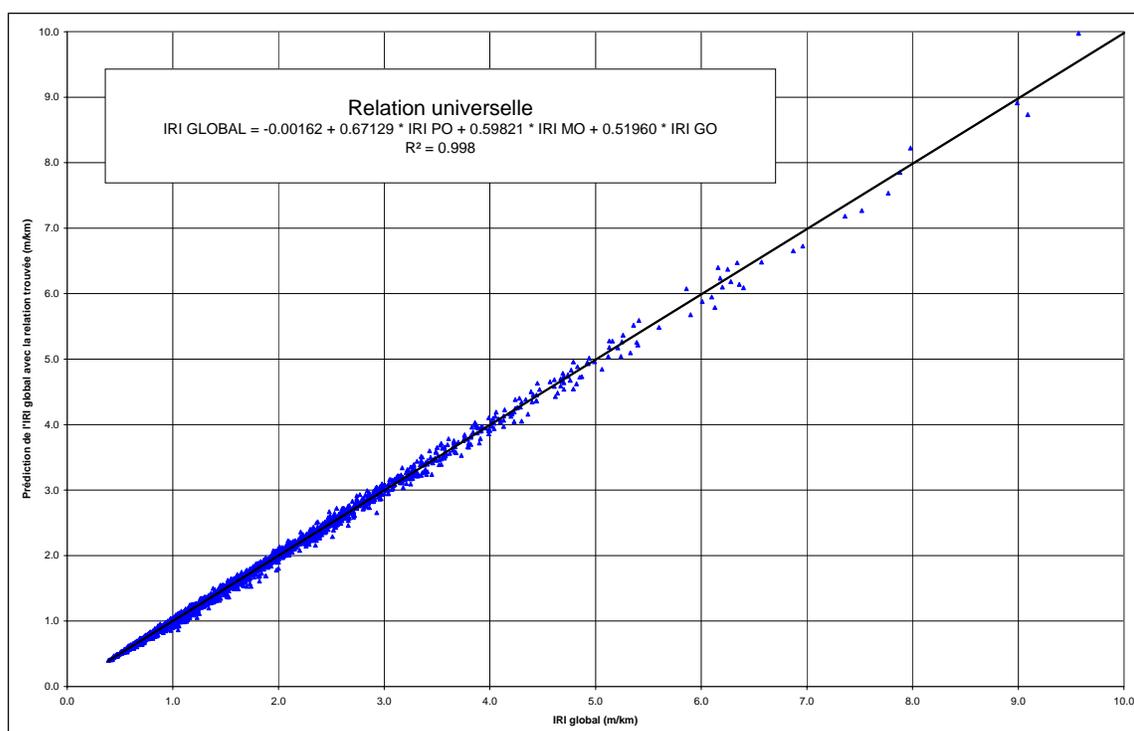


Figure 10 : IRI prédit versus IRI réel (relation universelle de recombinaison de l'IRI global)

Cette relation montre, de façon évidente, le lien entre l'IRI global (calculé pour les longueurs d'ondes de 0,707 m à 45,248 m) et les IRI PO, IRI MO et IRI GO. Elle permet de reconstruire l'IRI global après-travaux à partir des IRI après-travaux des différentes longueurs d'ondes issus des abaques et ce, pour tous les projets et les types d'interventions des trois abaques. Il est à noter que cette relation est aussi valide pour les valeurs calculées avant-travaux; c'est-à-dire qu'elle permet de reconstruire l'IRI global avant-travaux à partir des IRI PO, IRI MO et IRI GO avant-travaux.

8.2 INUTILITÉ D'ESTIMATION DES PARAMÈTRES D'UNE LOI WEIBULL DE DEGRÉ 3

L'étape de l'ancienne procédure consistant à estimer les paramètres d'une loi de Weibull de degré 3 pour un projet donné requérait l'utilisation d'un logiciel statistique spécialisé. Cela pouvait être un inconvénient à l'utilisation rapide de la procédure du rapport d'étape 2. Or, cette étape a maintenant été occultée car non-essentielle pour utilisation des abaques. Cela a donc fait l'objet d'un ajustement dans la nouvelle procédure de l'annexe 7.

9 CONCLUSION

Le projet de recherche a permis de développer une expertise dans la compréhension et l'utilisation des longueurs d'ondes pour l'analyse des profils de chaussée. D'abord entamée par l'exploration des concepts français, la recherche a finalement débouché sur l'utilisation de l'IRI comme indicateur; lequel est calculé pour différentes gammes d'ondes. Le logiciel ProVAL a d'ailleurs été mis à contribution pour ce faire.

La principale conclusion du projet de recherche est qu'il est possible de prédire de façon assez sécuritaire la répartition des IRI Globaux après-travaux à partir des IRI PO, des IRI MO et des IRI GO avant-travaux. Cela est d'une grande utilité pour prédire un bilan monétaire et déterminer si une clause d'uni est atteignable.

Cette prédiction est plus précise dans le cas de l'intervention de Correction / Couche d'usure car l'abaque de ce type d'intervention est le plus complet. On peut s'attendre à ce que la précision soit moins grande dans le cas de l'intervention de Planage / Renforcement / Couche d'usure parce que seuls trois projets ont été inclus dans l'abaque. Il y aurait d'ailleurs nécessité d'inclure d'autres projets à ce dernier avant de l'utiliser de façon régulière.

Aussi, selon les données disponibles, l'influence sur les différentes gammes d'ondes est assez semblable entre l'intervention de Planage / Renforcement / Couche d'usure et l'intervention de Correction / Couche d'usure.

Enfin, la procédure d'utilisation des abaques a été bonifiée dans le présent document par rapport à l'ancienne procédure. Ainsi, une relation universelle de recombinaison de l'IRI à partir de l'IRI PO, l'IRI MO et l'IRI GO a été déterminée. Cette relation semble valide pour tous les types d'interventions analysés dans le présent document. D'autres ajustements ont aussi été faits pour simplifier les procédures.

10 AVENUES DE RECHERCHE

Certaines avenues peuvent être envisagées pour bonifier les présents résultats de recherche.

D'abord, il est nécessaire de travailler le plus possible avec l'abaque de Correction / Couche d'usure de façon à avoir une expérience des prédictions de répartition des unis avec celui-ci. Pour ce faire, certains projets devraient être ciblés pour la réalisation de relevés avant-travaux. La comparaison des IRI prédits avec les IRI obtenus devrait apporter une meilleure compréhension des limitations de ce type d'abaque. En effet, certains projets semblent moins compatibles avec certaines interventions. Cela devrait être fouillé un peu plus.

Il serait aussi important de compléter les abaques de Planage / Renforcement / Couche d'usure et de Planage / Couche d'usure par l'ajout de projets qui remplissent tous les critères de qualité requis pour la confection des abaques.

Ensuite, il serait intéressant de développer des abaques additionnels pour de nouveaux types d'interventions. Des projets sont déjà traités et disponibles pour ce faire. Ils ont fait l'objet de traitement lors des phases de recherche de projets de qualité.

Pour utiliser le plus possible ces types d'abaques, l'habitude devrait être prise de réaliser des relevés avant-travaux de niveau projet le plus souvent possible et ce, pour documenter les projets avant réalisation.

Enfin, il serait très simple de développer d'un utilitaire EXCEL de prédiction des IRI après-travaux à partir des IRI avant-travaux calculés dans ProVAL. Cet aspect serait d'autant plus facile que la procédure d'utilisation des abaques a maintenant été simplifiée de beaucoup.

Annexe 1 **Tableau regroupant les projets évalués au cours
de l'étape de choix des cas**

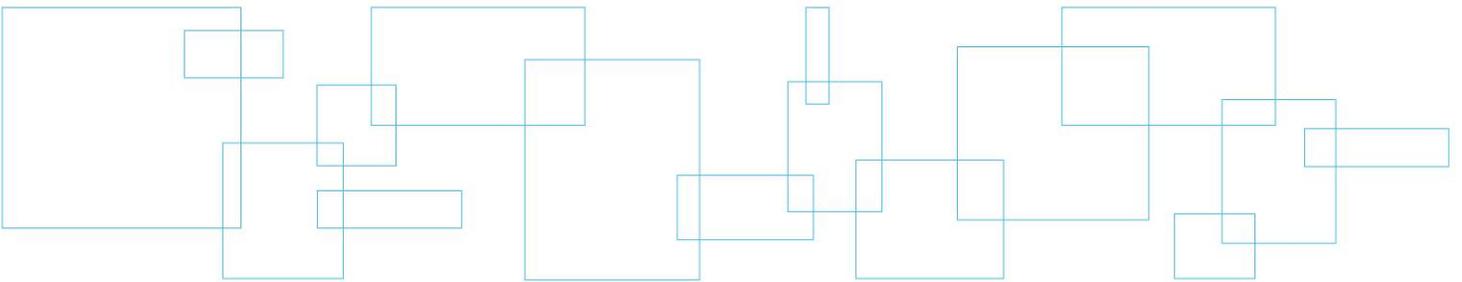


Tableau regroupant les projets évalués au cours de l'étape de choix des cas

Projet LVM	Demande	No Contrat	Endroit	Route	Selon rapport de relevé		Réal		Statut
					Intervention	VTM	Confirmation d'intervention	VTM	
P022896	29	3671-05-0906	Lac Minustuk	Route 175	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	30	3671-05-0907	Lac Minustuk	Route 176	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P019470		3972-03-0905	Lac Jacques Cartier	Blvd Talbot	Reconst. (DJMA 5-15)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		3972-04-0903	Lac Jacques Cartier	Blvd Talbot	Reconst. (DJMA 5-15)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P022896	43	3972-05-0902	Lac Jacques Cartier	Route 175	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P019470		8401-08-0607	Laval	A-25	Plan(50) + CU(50)		Plan(25) + CU(62)	non	Sans VTM
P019470		5671-06-0901	Lochaber	A-50	Reconst (DJMA 5-15)				Type d'intervention non retenu
P022896	1	5671-06-0904	Lochaber	A-50	Reconst. (DJMA 5-15)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		5671-06-0904	Lochaber Partie Ouest	A-50	Const Maj Route Gravier				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P028076	27	5672-06-0911	La Pêche	Route 105	Plan (60) + CU(60)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		6301-08-0622	St-Maxime-du-Mont-Louis	Route 132	Retraitement (DJMA <2)			non	Sans VTM
P019470		6301-08-0625	Mont-Albert	Route 299	Plan(50) + CU_HP(50)			non	Sans VTM
P019470		6301-08-0630	St-Maurice-de-l'échourie	Route 132	Plan(40) + CU(40)			non	Sans VTM
P019470		6301-08-0636	Rivière-à-Claude	Route 132	Plan(60) + CU(60)			non	Sans VTM
P019470		6301-08-0654	Pointe-à-la-croix	Route 132	Plan(50) + CU(50)		Plan (35) + Corr (10) + CU (50)	oui	Type d'intervention non retenu
P028076	14	6301-09-0618	Port-Daniel-Gascon	Route 132	Plan(50) + CU_HP(50)	oui	Plan(40) + Corr(12) + CU(42)	oui	Type d'intervention non retenu
P028076	15	6301-09-0646	New-Rochmond	Route 132	Const Maj Route Gravier	oui			Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		6408-08-0605	L'Avenir	A-55	Cor.BB(20) + CU_HP(60)		Corr(30) + CU(60)	non	Sans VTM
P022896	18	6408-08-0901	Saint-Germain-de-Grantham	A-20	Reconst. (DJMA <2)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P022896	24	6501-07-0724	Mont-Joli	Bretelle F	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	25	6501-07-0725	Mont-Joli	Route 132	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P028076	13	6501-08-0102	Saint-Simon et Saint-Fabien	Route 132	Reconst (DJMA 15-50)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		6501-08-0609			Plan (50) Corr. (20) Cu (40)		Plan (50) Corr. (20) Cu (40)	non	Sans VTM
P019470		6501-08-0615	Les Méchins	Route 132	Plan(60) + CU_HP(60)		Plan (40) + Corr (20) + CU(40)	non	Sans VTM
P019470		6501-08-0622	Ste-Félicité	Route 132	Plan(60) + CU_HP(60)		Plan (35) + Corr(20) + CU(40)	non	Sans VTM
P022896	26	6501-08-0623	Routhierville	Route 132	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P019470		6501-08-0624	Lac-au-Saumon	Route 132	Plan(50) + CU_HP(50)				Non confirmé
P019470		6501-08-0641	Rimouski	A-20	Plan(50) + CU_HP(50)		Plan (50) + Corr (25) + CU (50)		Non confirmé
P019470		6603-08-0625	Lévis	A-73	Cor.BB(20) + CU(40)		Corr (25) + Cu (40)	oui	Abaque Corr BB + CU
P022896	20	6603-08-0641	St-Henri	Route 173	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	31	6806-05-0701	Lac Minustuk	Route 177	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	32	6806-05-0709	Lac Minustuk	Route 178	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	27	6902-08-0101	Chambord	Route 155	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	28	6902-08-0606	La Doré	Route 167	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	34	7006-08-0604	Trois-Rivières	Route 155	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	33	7107-07-0701	Lac Jacques Cartier	Blvd Talbot	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	22	7107-08-0602	Val Cartier	Route 371	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	19	7107-08-0604	St-Augustin / Neuville	A-40	Renf_BB(80) + CU_HP(40)	oui	Plan(30) + CU(60)	oui	Abaque Plan + CU
P022896	21	7107-08-0903	Vanier	A-Robert Bourassa	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	15	8401-08-0613	Laval	A-19	Cor. BB(20) + CU(40)	non			Sans VTM
P022896	52	8401-09-0603	Laval	A-15	Cor.BB(20) + CU(50)	oui		non	Sans VTM
P028076	9	8401-09-0604	Laval	A-25	Plan(50) + CU(50)	non			Sans VTM
P022896	35	8500-09-0405	La Tuque	Route 155	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P019470		8503-06-0605			Meulage				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P022896	53	8503-07-0602	Pointe-Claire	A-20	Inconnue	oui			Inconnue
P022896	16	8503-08-0007	Montréal	A-15	Cor.BB(35) + CU(50)	non			Sans VTM
P028076	10	8503-08-0019	Montréal	A-40	Plan (40) + CU(40)	oui	Plan (40) + CU(40)	non	Sans VTM
P019470		8603-08-0601	Sainte-Hélène-de-Bagot	A-20	Renf_BB(40) + CU_HP(40)	oui	Corr (20) + CU(40)	oui	Abaque Cor. BB + CU
P019470		8603-08-0605	Verchères	A-30	Micro-revêtement (<15)				traité, type d'intervention non retenu
P019470		8603-08-0607	Bromont	A-10	Micro-revêtement (<15)	non			traité, type d'intervention non retenu
P019470		8603-08-0611	Contrecoeur	A-30	Inconnue				Intervention inconnue
P022896	17	8603-08-0612	Saint-Simon	A-20	Plan(50) + CU(50)				Traité mais exclus: IRI après travaux > Iri avant travaux

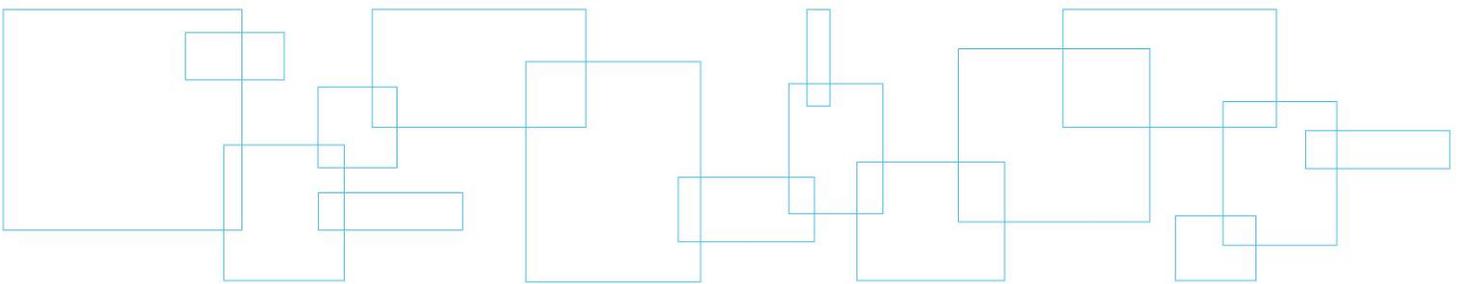
Tableau regroupant les projets évalués au cours de l'étape de choix des cas

Projet LVM	Demande	No Contrat	Endroit	Route	Selon rapport de relevé		Réal		Statut
					Intervention	VTM	Confirmation d'intervention	VTM	
P022896	56	8603-08-0612	Saint-Simon	A-20	Plan(50) + CU(50)	oui			Reprise des travaux, non utilisable
P019470		8603-08-0614	Sainte-Julie	A-30	Cor. BB(20) + CU_HP(40)		Corr. (20) + CU (40)	oui	Abaque Cor. BB + CU
P022896	7	8701-08-0630	Ange-Gardien	A-10	Recyclage_BB + CU ch. Mixte		Recyclage à froid	non	Sans VTM
P022896	36	8701-08-0631	St-Jean-sur-Richelieu	A-35	Pas de relevé de fait	non			Pas de relevé de fait
P028076	11	8701-09-0605	Marieville et Richelieu	A-10 Phase 3	Renf_BB(80) + CU_HP(40)	oui	Plan(100) + Renf(75) + CU(50)	oui	Abaque Plan + Renf + CU
P028076	23	8701-09-0605	Marieville et Richelieu	A-10 Phase 2	Renf_BB(80) + CU_HP(40)	oui	Plan(100) + Renf(75) + CU(50)	oui	Écart entre les profils, non utilisable
P028076	25	8701-09-0605	Marieville et Richelieu	A-10 Phase 4	Renf_BB(80) + CU_HP(40)		Plan(100) + Renf(75) + CU(50)	oui	Abaque Plan + Renf + CU
P028076	12	8701-09-0609	Saint-Jacques-le-Mineur	A-15	RechGran(300)+BB(200)	oui			Type d'intervention non retenu et non confirmé
P028076	24	8801-07-0907	Grenville-sur-la-Rouge	A-50	Reconst (DJMA >50)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P022896	13	8906-08-0902	Notre-Dame-de-la-Salette	Route 309	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P028076	16	8906-09-0602	Notre-Dame-de-Bonsecours	Route 323	Plan(50) + CU(50)	oui	Plan(70) + Renf(50) + CU(60)	oui	Abaque Plan + Renf + CU
P028076	26	8906-09-0602	Notre-Dame-de-Bonsecours	Route 148	Plan(60) + CU(60)				Ce n'est pas une clause d'uni
P028076	17	8907-07-0902	Chelsea	A-5	Reconst (DJMA 15-50)				nouvelle construction
P022896	14	8907-08-0601	Gatineau	Route 148	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait
P022896	2	8907-08-0902	Chelsea et La Pêche	Route 105	Plan(50) + CU(50)	oui	Plan(40) + Corr(20) + CU(50)	oui	Traité,type d'intervention non retenu
P028076	1	8907-08-0904	Gatineau	A-5	Cor. BB(20) + CU_HP(60)	oui			Non localisable
P022896	3	8907-08-0904	Gatineau	A-5	Cor. BB(20) + CU_HP(50)				Non localisable
P022896	54	8907-08-0904	Gatineau	A-5	Rempl_BB_HP sur dalle BC				Non localisable
P028076	21	8907-09-0602	Pontiac	Route 148	Plan(60) + CU_HP(60)	oui	Plan(50) + Renf(40) + CU(60)	oui	Abaque Plan + Renf + CU
P028076	18	8907-09-0902	Cantley	Route 307	Plan (50) + CU(50)	oui	Excavation, rechargement, pavage		Traité,type d'intervention non retenu
P028076	2	8908-08-0605	Alleyn et cawood	Route 301	Plan(50) + CU(50)	oui	Plan(50) + Renf(40) + CU(60)	oui	Abaque Plan + Renf + CU
P028076	19	8908-09-0603	Mansfield et Pontefract	Route 148	Plan(60) + CU_HP(60)		Plan(60) + CU(60)	oui	Abaque Plan + CU
P028076	20	8908-09-0605	Iles-aux-Allumettes	Route 148	Plan(60) + CU_HP(60)		Plan(50) + Renf(40) + CU(60)	oui	Abaque Plan + Renf + CU
P022896	4	8909-08-0601	Low et Kazabazua	Route 105	Plan(50) + CU(50)	oui	Plan(60) + Renf(40) + CU(50)	non	Traité, mais sans VTM
P028076	22	8909-09-0602	Low	Route 105	Plan(60) + CU_HP(60)	oui	Plan(65) + CU(66)	oui	RTS 00105-01-010 C'est une route inactive. Elle a été en opération de 1985 à 1996, puis a changé de nom pour la 25913-01-000-000C. Cette dernière a également changé de nom en 2005 pour 25913-01-010-000C et 25913-01-030-000C. De plus, c'est une route qui relève du municipal. Le MTQ ne procède pas à des relevés réseaux pour de RTS.
P019470		9001-07-0609	Mont Saint-Hilaire	Route 133	Vérification non contractuelle				Vérification non contractuelle
P019470		9001-07-0629	Magog et Sherbrooke	A-10	Recyclage_BB+CU				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		9001-07-0904	Stanstead	A-55	Reconst. (DJMA 5-15)				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		9001-08-0606	Dudswell	Route 112	Recyclage BB + Cu		Plan (100) + Corr (30) + CU (50)	oui	Type d'intervention non retenu
P022896	23	9001-08-0609	Ascot Corner et Westbury	Route 112	Recyclage BB + Cu				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		9001-08-0613	Stanstead Est	Route 141	Recyclage BB + Cu				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		9001-08-0615	Magog et Sherbrooke	A-10	Recyclage BB + Cu				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		9001-08-0620	Cookshire-Eaton	Route 108	Recyclage BB + Cu		Plan (100) + Corr + CU	non	Sans VTM
P022896	57	9001-09-0604	Cookshire-Eaton	Route 253	Recyclage BB + Cu				Type d'intervention non retenu et non confirmé
P028076	8	9001-09-0605	Cookshire-Eaton	Route 253	Recyclage_BB+CU	oui			Type d'intervention non retenu
P022896	6	9107-08-0602	Rouyn-Noranda	Route 117	Plan(60) + Cu(60)				Non confirmé
P022896	51	9107-08-0602	Rouyn-Noranda	Route 117	Plan (60) + Cu (60)				Non confirmé
P022896	5	9107-08-0603	Rouyn-Noranda	Route 101	traitement de surface simple				Type d'intervention non retenu
P022896	50	9107-08-0603	Rouyn-Noranda	Route 101	traitement de surface simple				Type d'intervention non retenu
P022896	55	9107-08-0603	Rouyn-Noranda	Route 101	traitement de surface simple				Type d'intervention non retenu
P028076	5	9109-08-0602	La Sarre	Route 393	de base, couche d'usure	oui			Type d'intervention non retenu et non confirmé
P019470		9109-08-0602	Macamic, Palmarolle, LaSarre	Route 393	Inconnue				Inconnue
P028076	7	9109-09-0901	Palmarolle	Route 390	Retraitement (DJMA <2)		Voir note		Type d'intervention non retenu
P019470		9110-08-0603	Duhamel-Ouest Ville-Marie	Route 101	RechGran(300)+BB(150)	oui	Décohesionnement + Reconstruction partielle		Type d'intervention non retenu
P028076	6	9110-09-0607	Témiscaming	Route 101	Plan(50) + CU(50)	non			Sans VTM
P028076	4	9107-09-0701	Rollet	Route 391	Pas de relevé de fait				Pas de relevé de fait

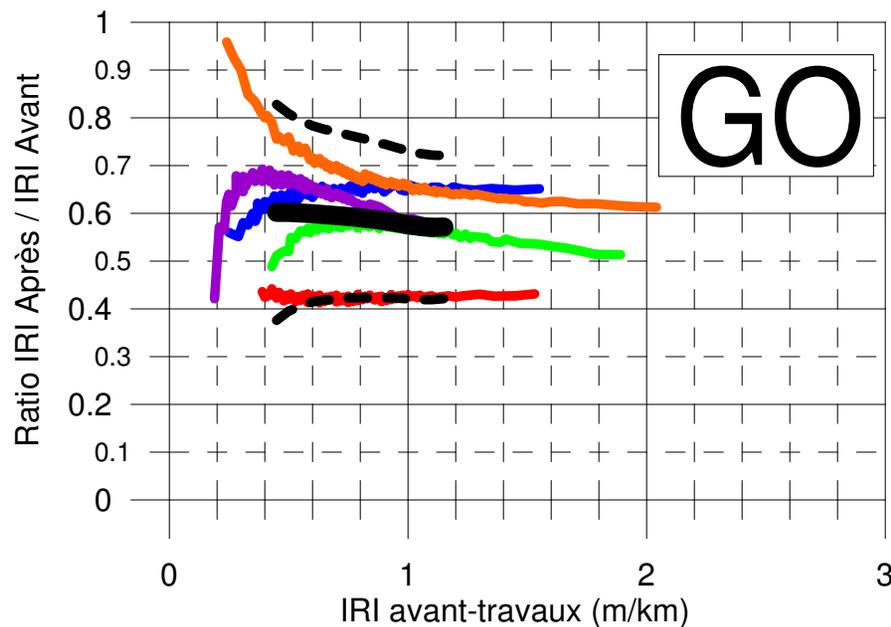
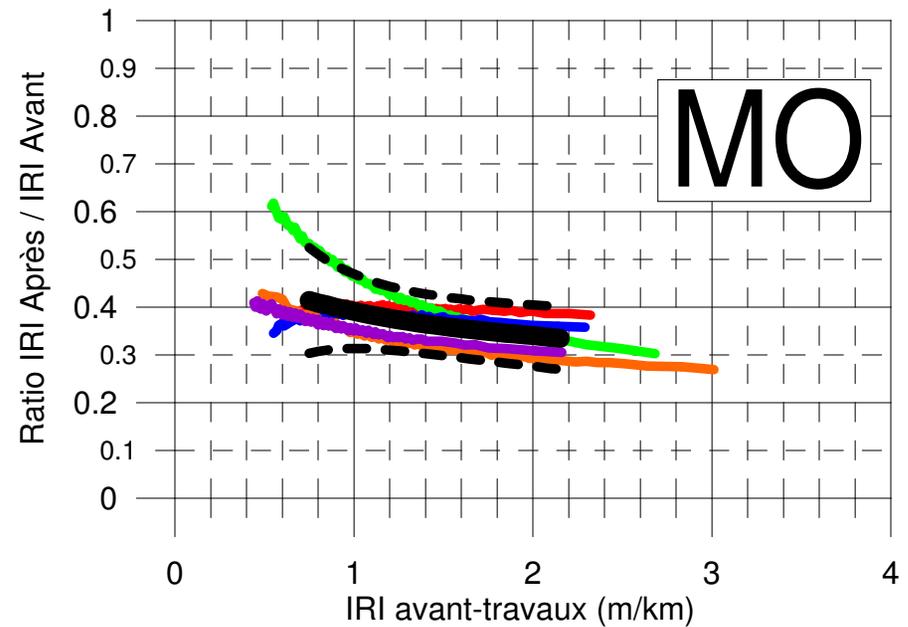
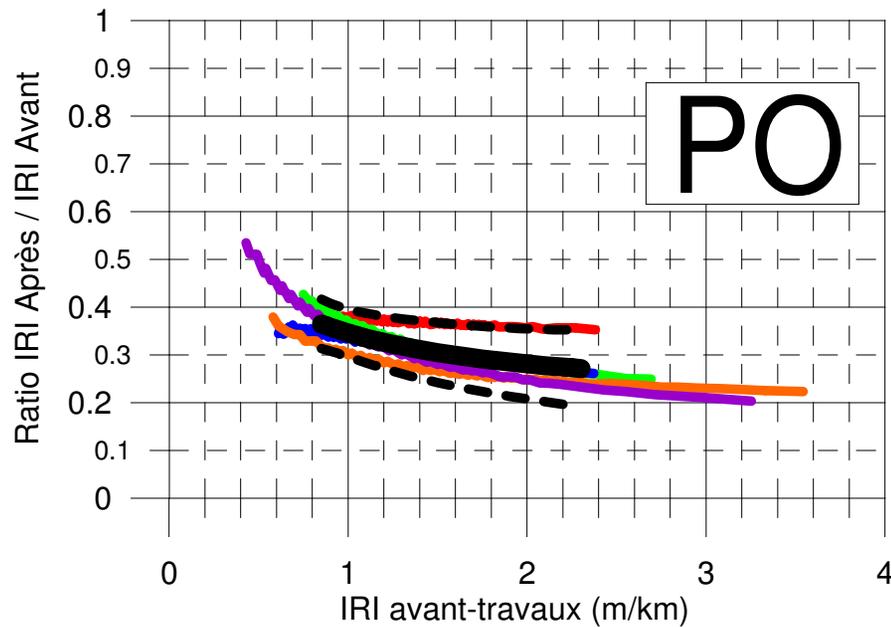
Tableau regroupant les projets évalués au cours de l'étape de choix des cas

Projet LVM	Demande	No Contrat	Endroit	Route	Selon rapport de relevé		Réel		Statut
					Intervention	VTM	Confirmation d'intervention	VTM	
P028076	3	Black lake	Black Lake	Route 112	Contexte de glissement de terrain				Contexte de glissement de terrain
P028076	28	dossier	Montréal	A-40	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P028076	29	dossier	Vaudreuil-Dorion	A-40	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P028076	30	dossier	Montréal	A-40	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P028076	31	dossier	Candiac	A-15	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P028076	32	dossier	Montréal	A-40	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P028076	33	dossier	Montréal	A-13	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	8	dossier	St-Jean-sur-Richelieu	A-35	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	9	dossier	Gatineau	A-50	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	10	dossier	Chelsea	Route 105	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	11	dossier	Gatineau et Cantley	Route 307	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	12	dossier	Val-des-Monts	Route 366	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	37	dossier	Brossard	A-10	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	38	dossier	Boisbriand	A-10	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	39	dossier	Candiac et La Prairie	A-15	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	40	dossier	Montréal	Souigny	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	41	dossier	Montréal	A-13	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	42	dossier	St-Jérôme	A-15	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	44	dossier	Saint-Jean sur Richelieu	A-35	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	45	dossier	Batiscan	A-35	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	46	dossier	Saint-Nicéphore	A-55	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	47	dossier	Thetford Mines	Route 112	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	48	dossier	Boisbriand	A-13	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
P022896	49	dossier	Saint-Janvier	A-15	Clause non contractuelle				Clause non contractuelle
MTQ		3475-06-0605	St-Janvier-de-Joly	00020-05-140	Cor. BB(25) + CU(55)	oui	Cor. BB(25) + CU(55)	oui	Non localisable
MTQ		5100-06-0605		00640-04-012	CC et CU	non			Sans VTM
MTQ		5230-06-0603		040-030-101	PLANAGE ET CU				Informations manquantes
MTQ		5410-06-0601		00040-01-024	CC PLUS GRAND QUE 70				Informations manquantes
MTQ		5410-06-0604		00020-01-011	CC et CU	non			Sans VTM
MTQ		5410-06-0607		00015-01-020	CC PLUS GRAND QUE 70				Informations manquantes
MTQ		5510-06-0607		040-04-095	PLANAGE ET CU				Informations manquantes
MTQ		6301-08-0653		99440-01-000	CC et CU	non			Sans VTM
MTQ		6408-07-0902	St-Eugène	00020-04-170	Cor. BB(30) + CU(60)	oui	Cor. BB(30) + CU(60)	oui	Abaque Cor. BB + CU
MTQ		6603-07-0602	St-Apolinaire	00020-05-192	Cor. BB(20) + CU(50)	oui	Cor. BB(20) + CU(50)	oui	Non localisable
MTQ		6603-07-0631	Lévis	00020-06-20	Cor. BB(20) + CU(45)	oui	Cor. BB(20) + CU(45)	oui	Abaque Cor. BB + CU
MTQ		6603-07-0658	St-Janvier de Joly		Cor. BB(20) + CU(40)	oui	Cor. BB(20) + CU(40)	oui	Non localisable
MTQ		6703-07-0601		138-92-251	RENFORCEMENT				Informations manquantes
MTQ		7107-07-0605	Québec	573-01-011	PLANAGE ET CU		Plan(60) + CU(120)	oui	Non localisable
MTQ		7107-08-0602		00371-01-100	CC et CU	non			Sans VTM
MTQ		7108-07-0602		040-08-010	RENFORCEMENT				Informations manquantes
MTQ		7108-08-0601		040-07-090	RENFORCEMENT				Informations manquantes
MTQ		8401-08-0603	Mascouche	00025-01-114	CC et CU	oui	Cor. BB (20) + CU (40)	oui	Non localisable
MTQ		8907-08-0904	Gatineau	00005-01-023/024	CC et CU	oui			Reprise de relevé, non utilisable
MTQ				00020-04-170	CC PLUS GRAND QUE 70				Informations manquantes
MTQ				00040-01-250	CC PLUS GRAND QUE 70				Informations manquantes
MTQ				031-01-015	PLANAGE ET CU				Informations manquantes
MTQ				040-07-110	RENFORCEMENT				Informations manquantes
MTQ				040-07-100	RENFORCEMENT				Informations manquantes

**Annexe 2 Abaques de Correction / Couche d'usure avec VTM
[Corr + CU]**

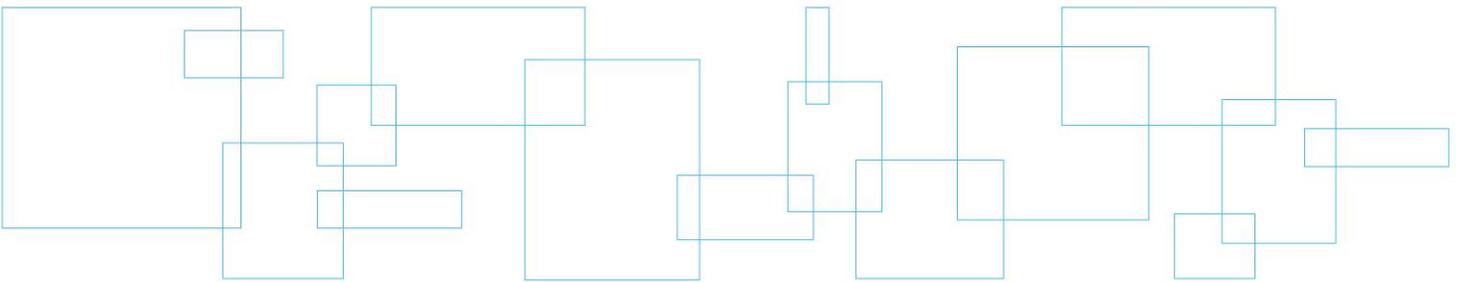


Abaques d'aide à la prédiction des IRI après-travaux (Correction / Couche d'usure (avec VTM)) (Corr + CU)

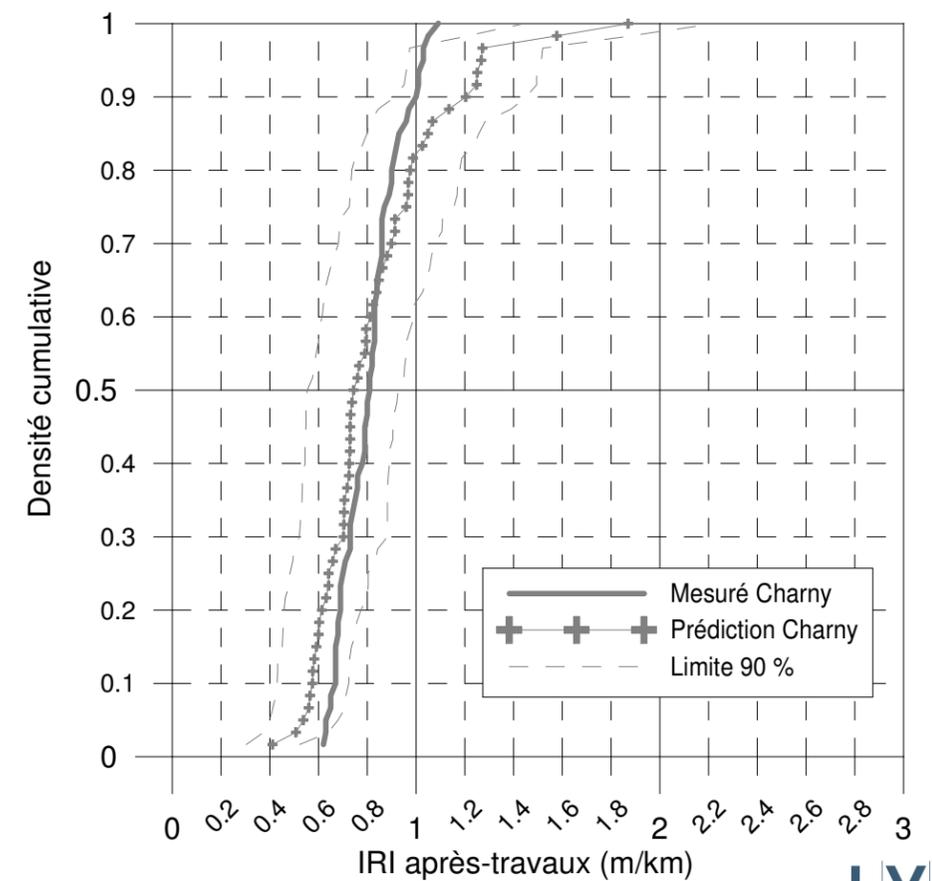
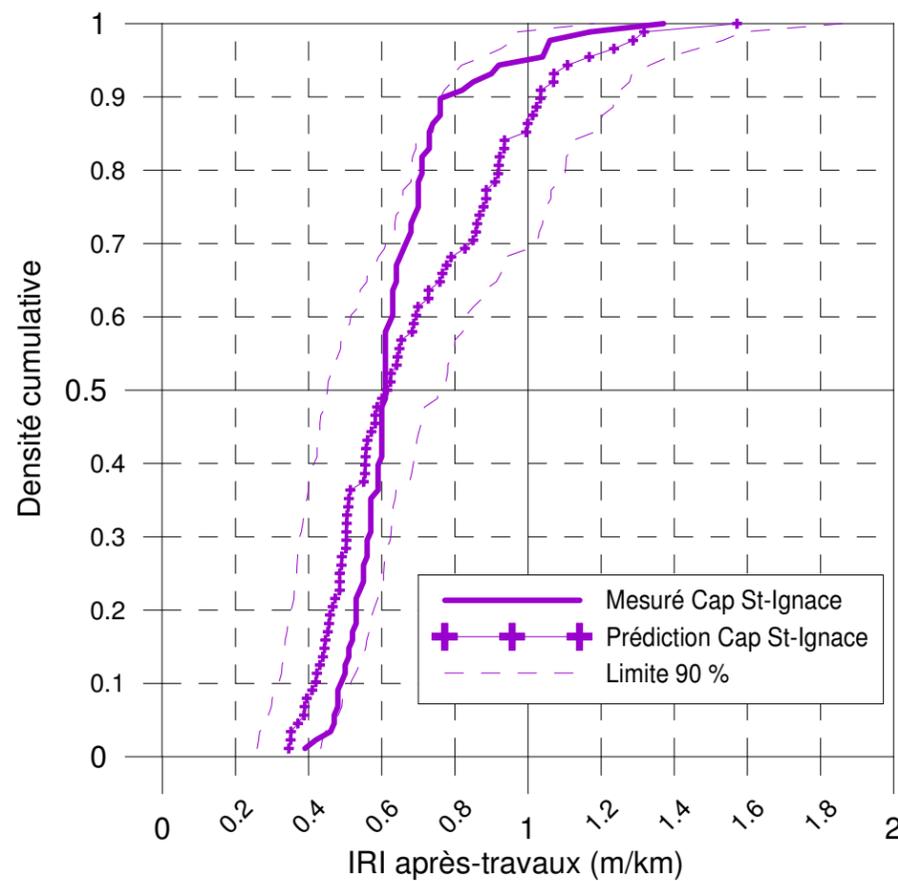
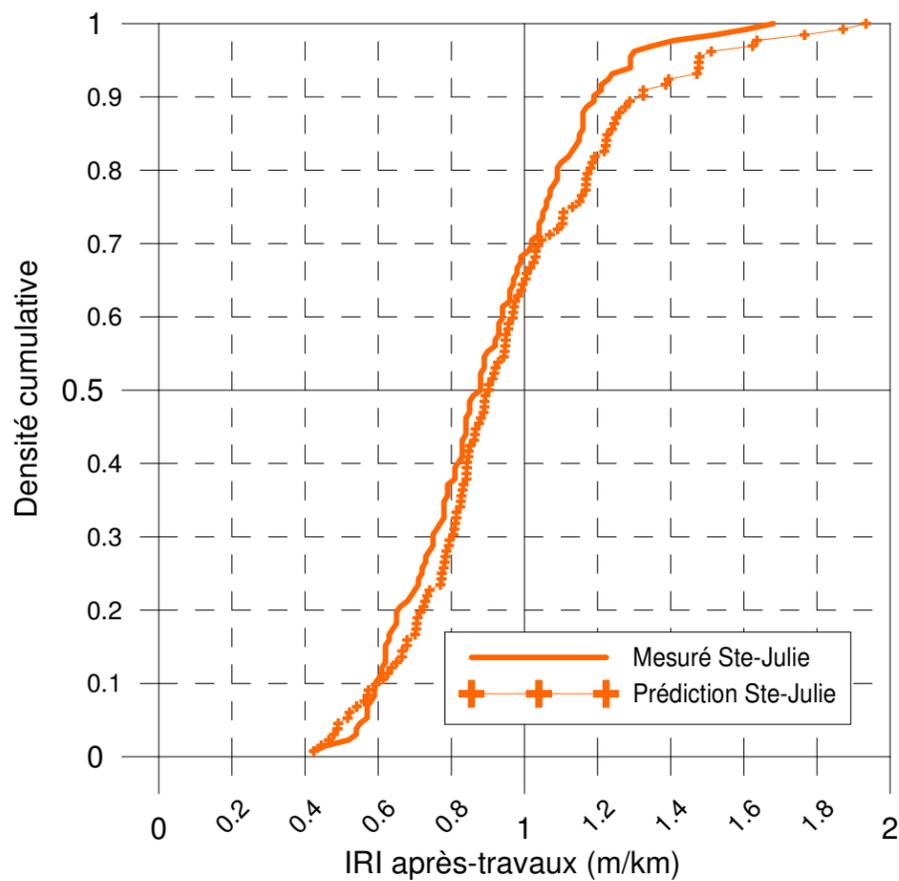
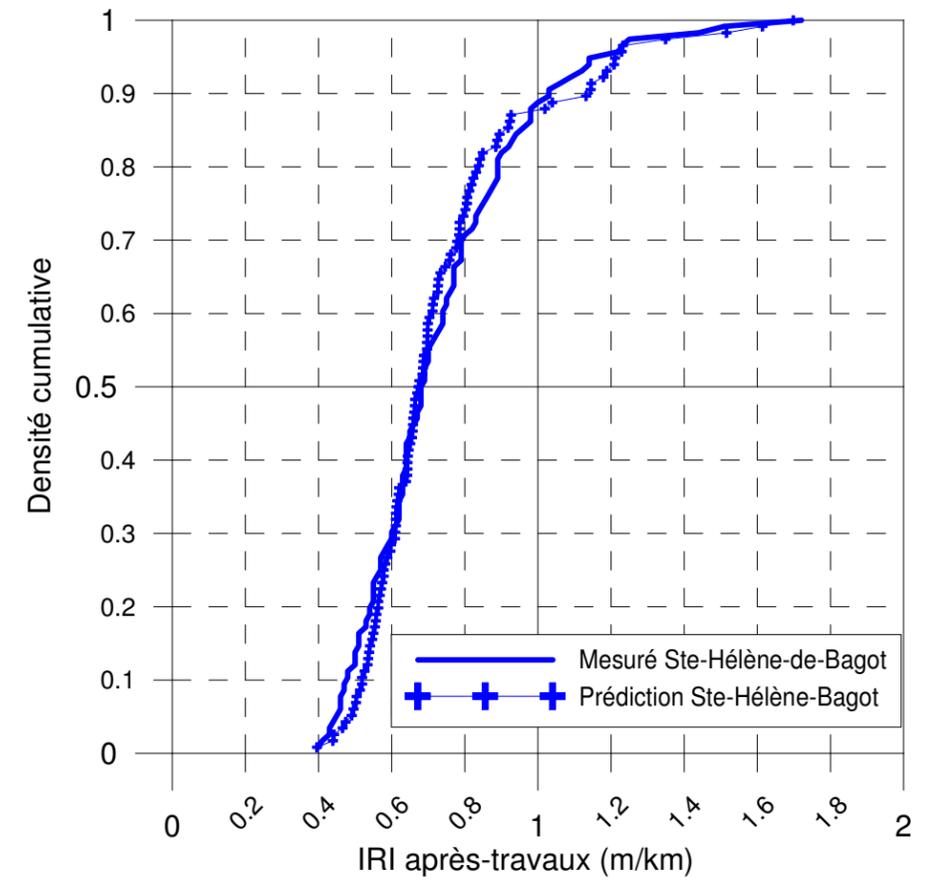
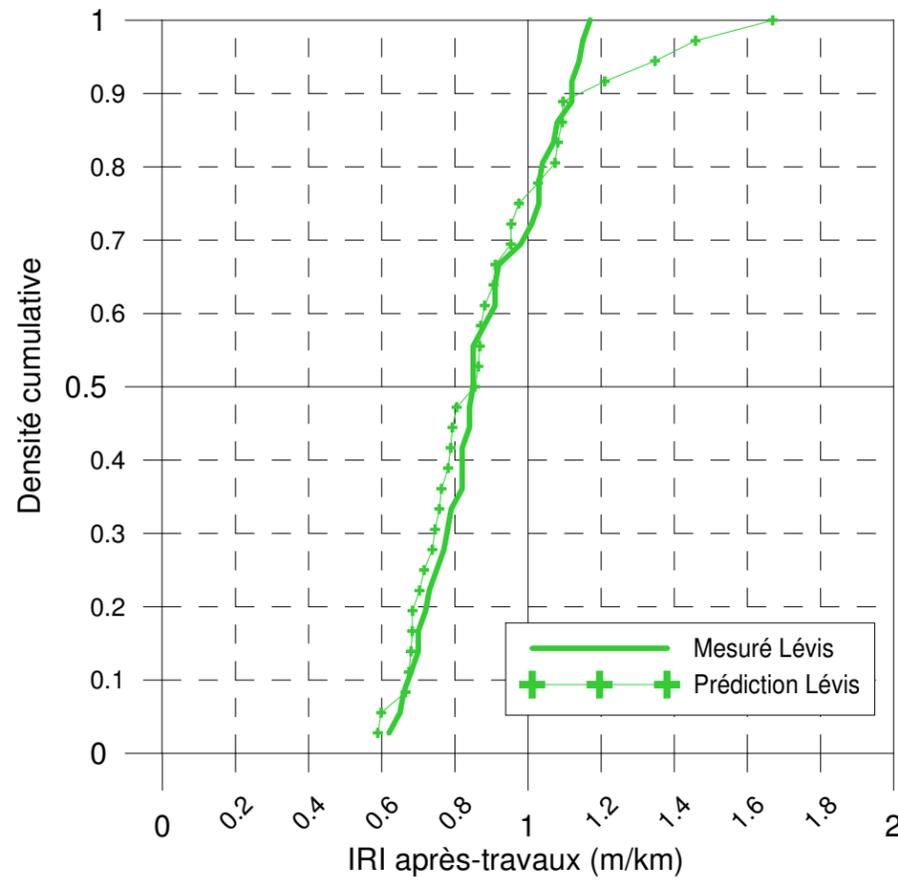
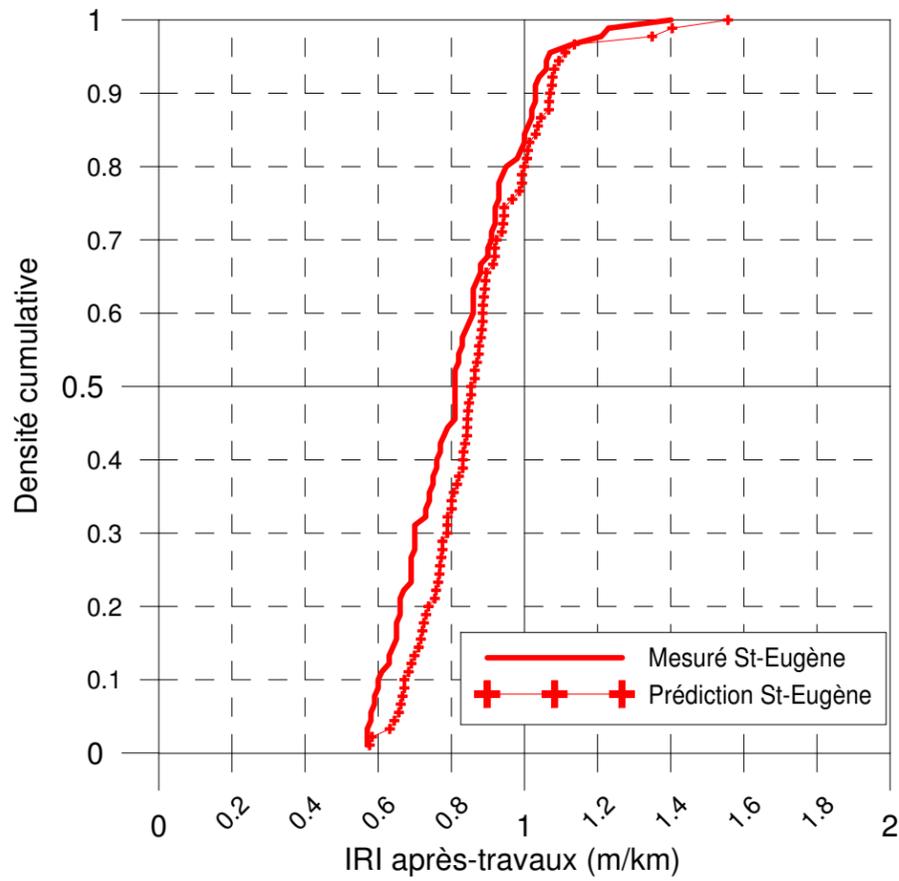


- A-20 à St-Eugène
- A-20 à Lévis
- A-20 à Ste-Hélène-de-Bagot
- A-30 à Ste-Julie
- A-20 à Cap-St-Ignace
- Moyenne
- - - Intervalle de confiance à 90 %

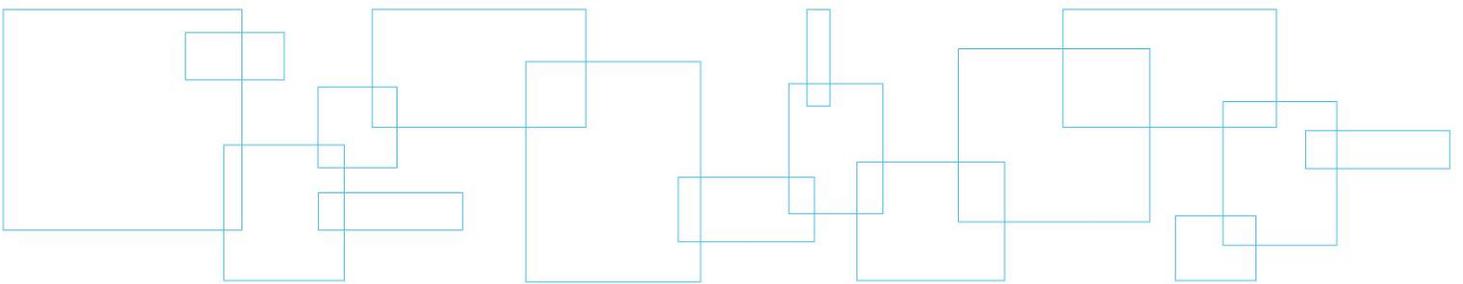
Annexe 3 Comparaison de la prédiction et de l'obtenu (Correction / Couche d'usure (avec VTM))



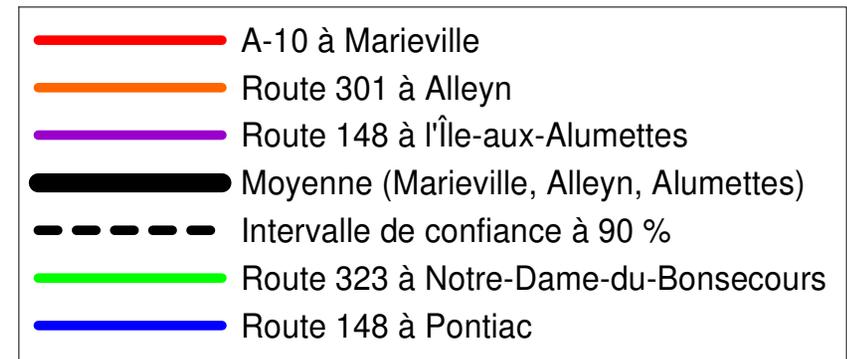
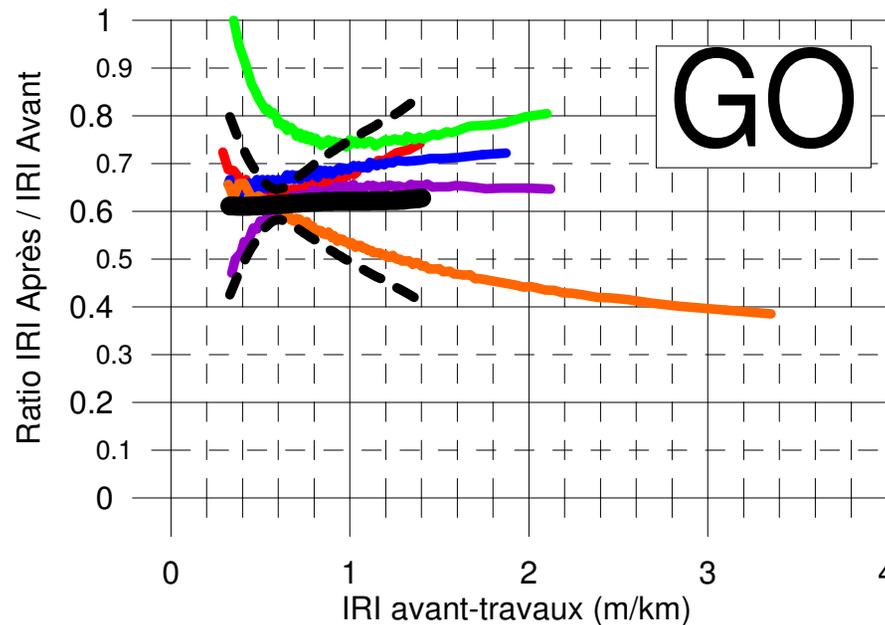
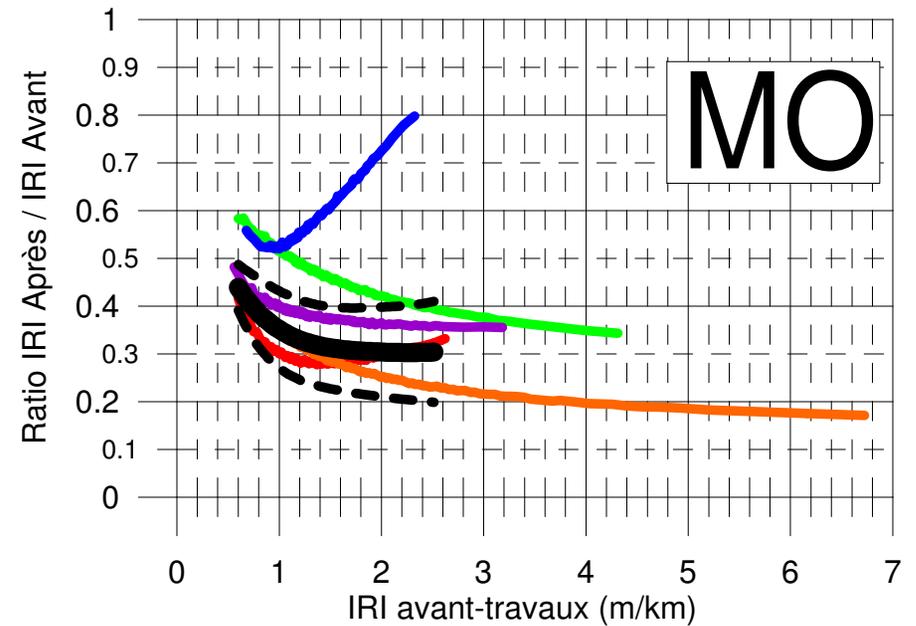
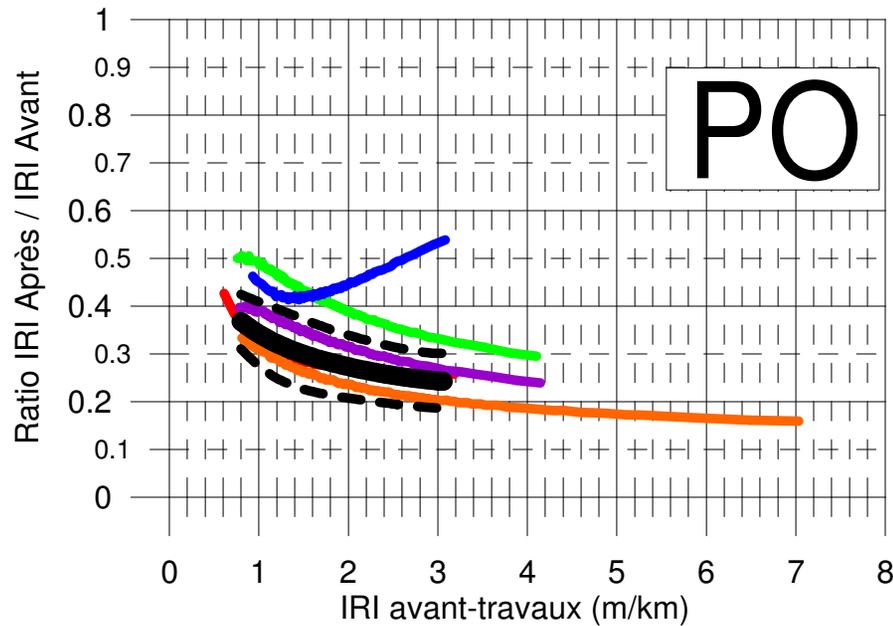
Comparaison de la prédiction et de l'obtenu (Correction / Couche d'usure (avec VTM))



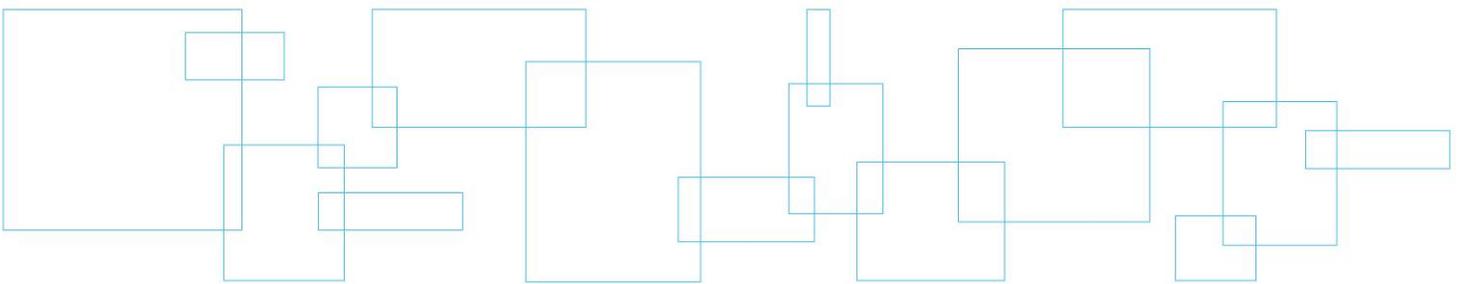
**Annexe 4 Abaques de Planage / Renforcement / Couche
d'usure avec VTM [Plan + Renf + CU]**



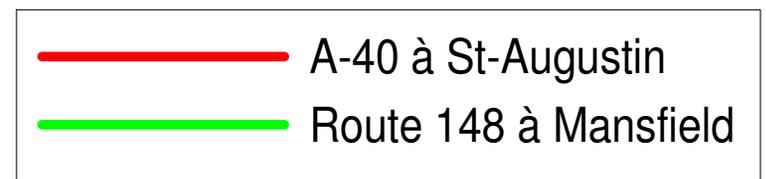
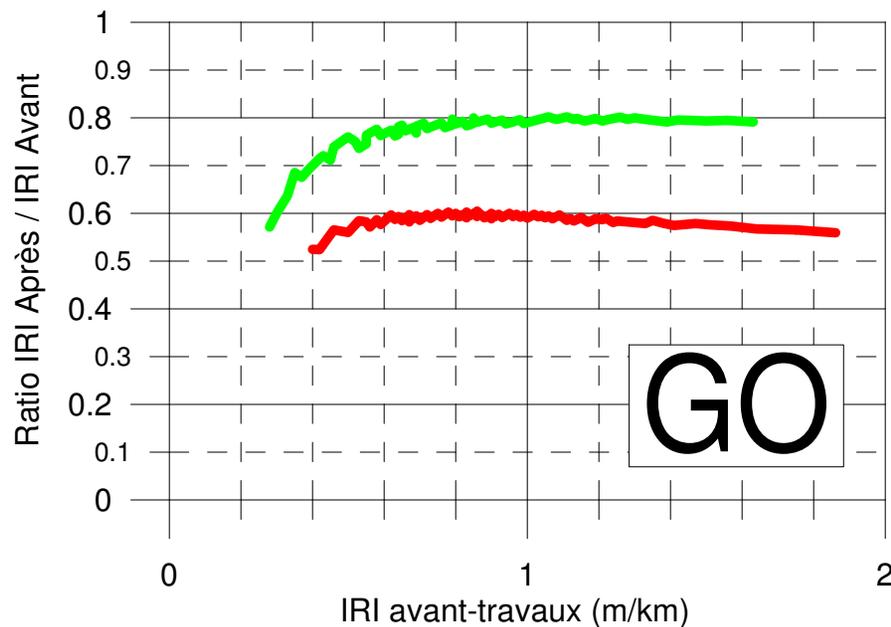
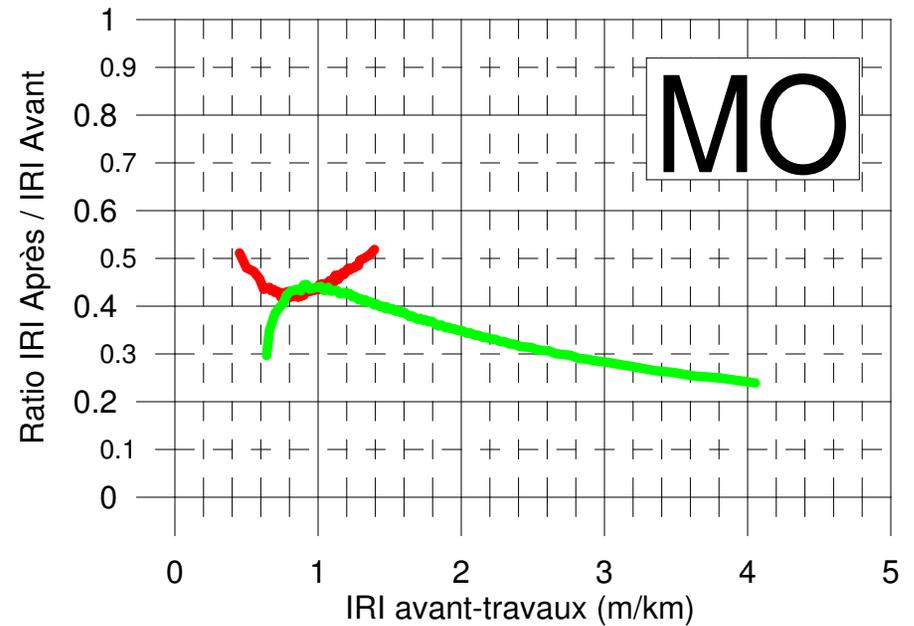
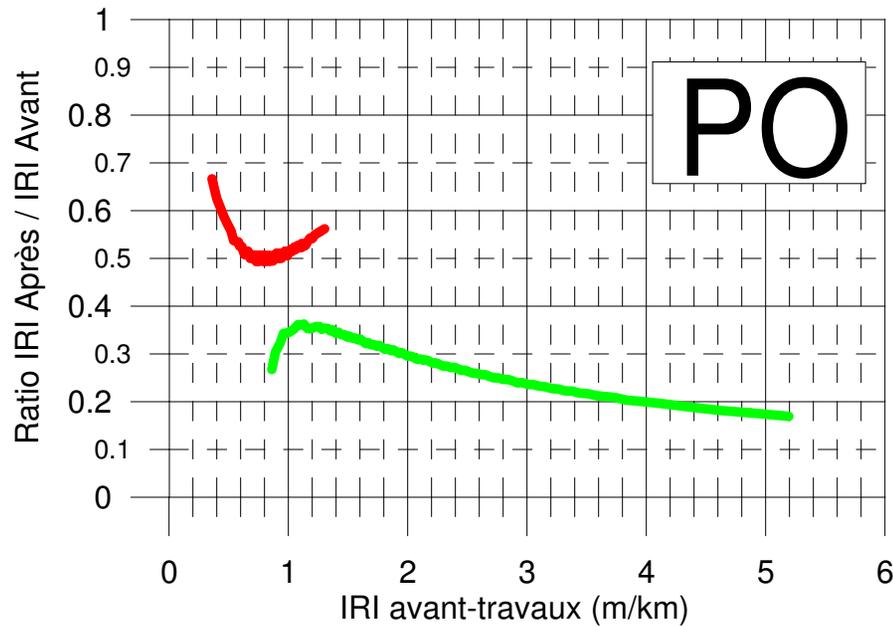
Abaques d'aide à la prédiction des IRI après-travaux (Planage / Renforcement / Couche d'usure (avec VTM)) (PI-Re-Cu)



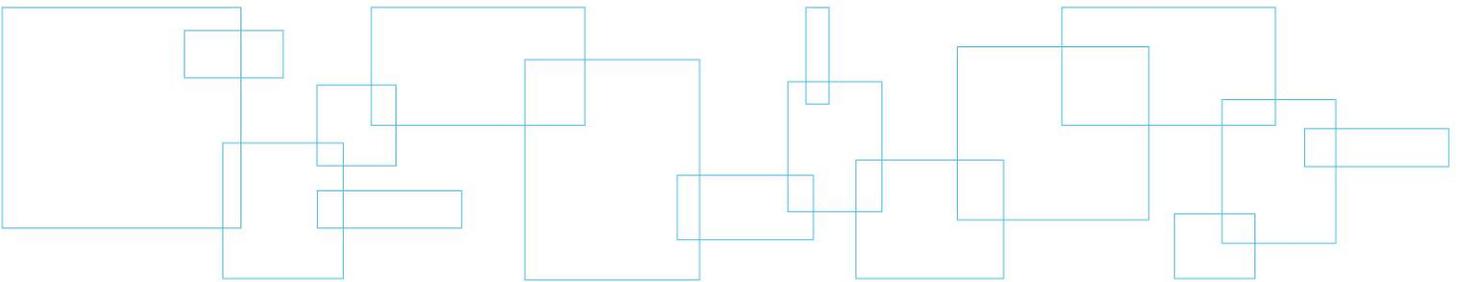
**Annexe 5 Abaques inachevés de Planage / Couche d'usure
avec VTM [Plan + CU]**



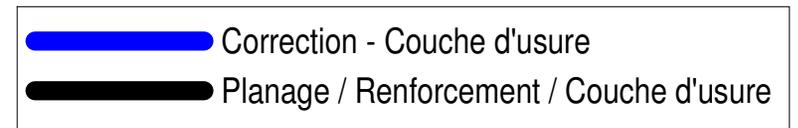
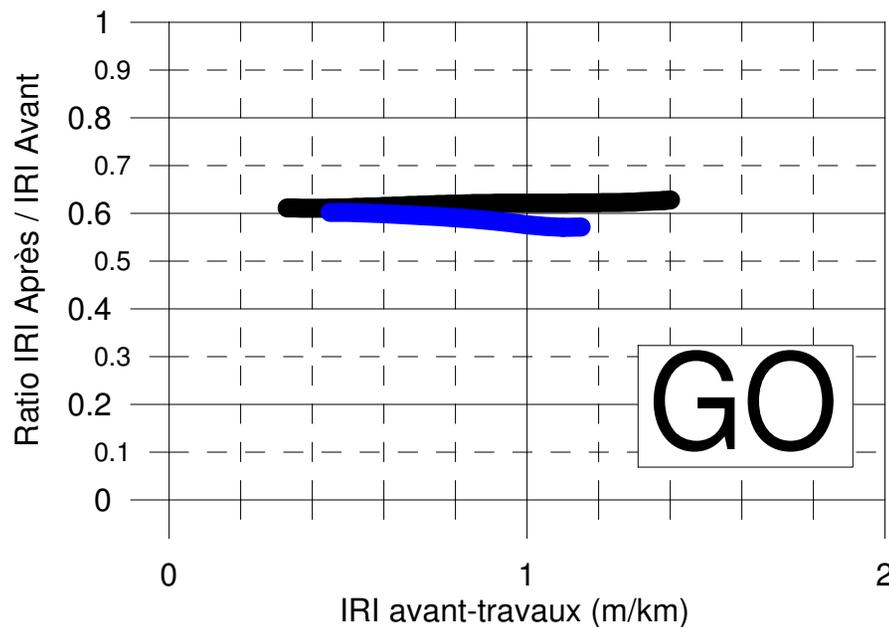
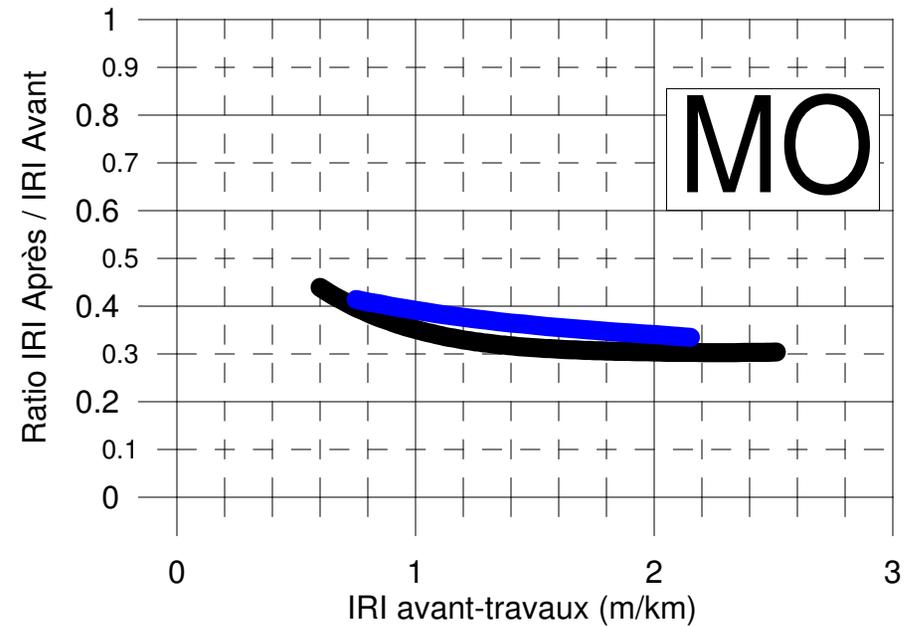
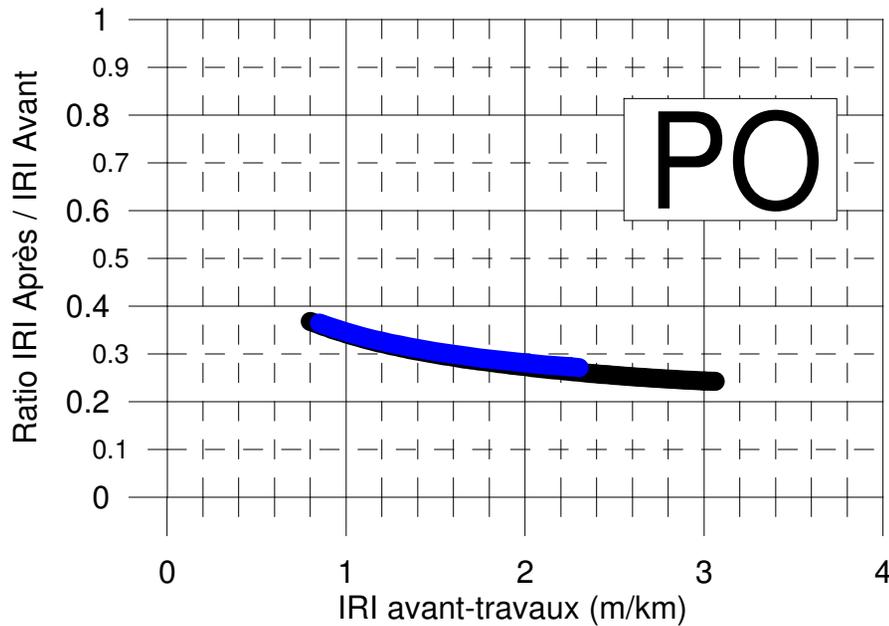
Abaques inachevés d'aide à la prédiction des IRI après-travaux (Planage / Couche d'usure (avec VTM)) (PI + Cu)



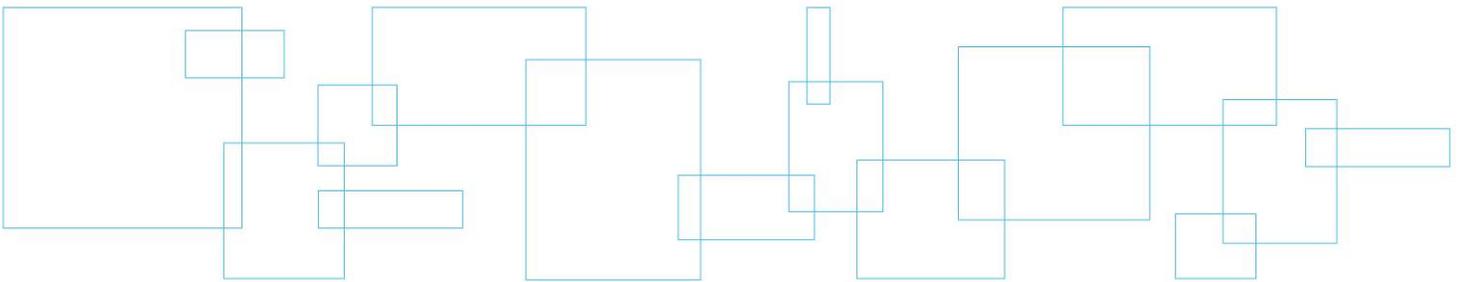
Annexe 6 Comparaison entre les valeurs moyennes des deux abaques les plus avancés



Comparaison entre les valeurs moyennes des abaques



Annexe 7 Méthodologie de prédiction de l'IRI après-travaux au moyen des abaques



Méthodologie de prédiction de l'IRI après-travaux au moyen des abaques

1.0 Avec les profils avant-travaux, dans ProVAL 2.73.0033 :

- a. S'assurer de l'exactitude de l'emplacement des débuts et fins
- b. Filtrer les profils avec un filtre Butterworth Bandpass
 - a. PO : 0.707 à 2.828 m
 - b. MO : 2.828 à 11.312 m
 - c. GO : 11.312 à 45.248 m
- c. Calculer des IRI aux 100 mètres avec chacun de ces profils
 - a. IRI_{PO} : 0.707 à 2.828 m
 - b. IRI_{MO} : 2.828 à 11.312 m
 - c. IRI_{GO} : 11.312 à 45.248 m

2.0 Pour chaque catégorie d'IRI (PO, MO et GO):

- d. Classer les données aux 100 mètres en ordre croissant
- e. Tracer des graphiques de densité cumulative (CDF) des données classées pour chaque catégorie d'IRI (PO, MO et GO)
- f. Déterminer l'IRI avant-travaux relié à des densités cumulatives de 0 et 0.5

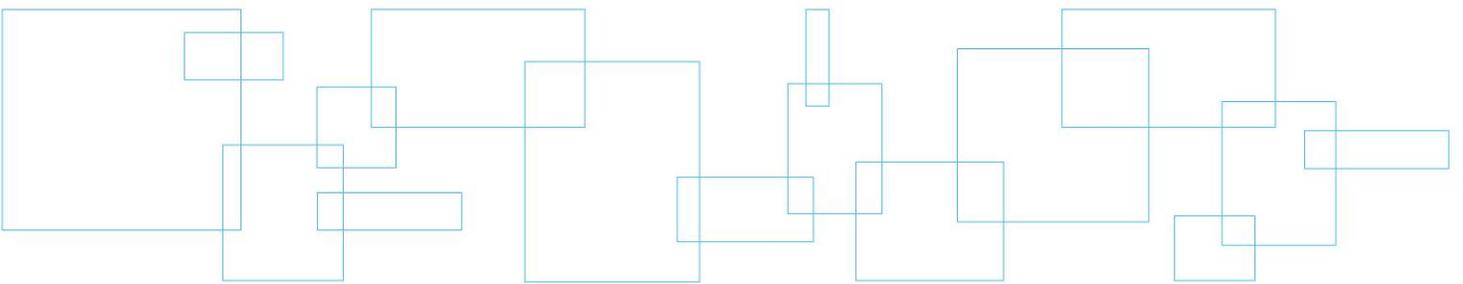
3.0 Utiliser l'abaque de l'intervention prévue sur le segment pour estimer l'amélioration de l'IRI PO , IRI MO et IRI GO

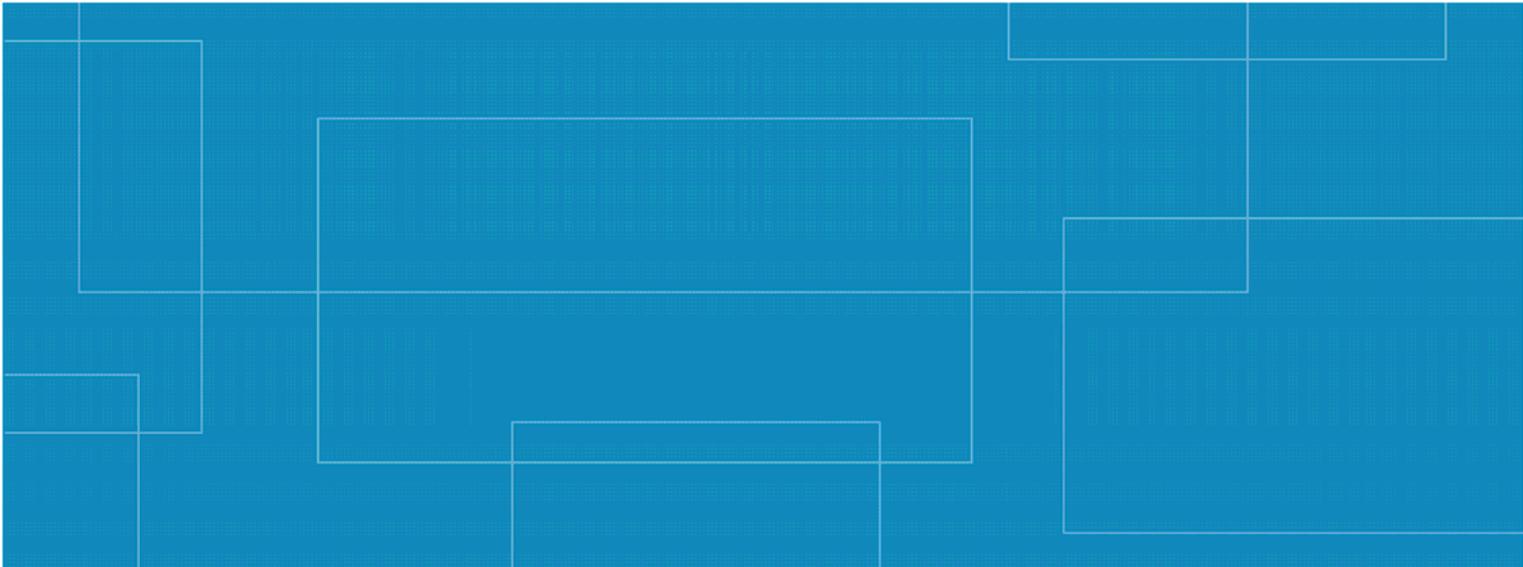
- g. Appliquer les ratios trouvés aux IRI avant-travaux de chaque bande d'onde pour trouver les IRI après-travaux.
 - a. Ratio pour $IRI_{CDF>0.5} = \text{Ratio } IRI_{CDF = 0.5}$
 - b. Ratio pour $IRI_{CDF<0.5} = \text{Ratio } IRI_{CDF = 0}$
- h. Pour chaque 100 mètres, avec les IRI PO , MO et GO après-travaux calculés avec les ratios (étape g), calculer l'IRI global résultant après travaux avec la relation suivante :

$$IRI_{GLOBAL}^* = -0.00162 + 0.67129 * IRI_{PO} + 0.59821 * IRI_{MO} + 0.51960 * IRI_{GO}$$

* L'IRI global obtenu tient compte des longueurs d'ondes de 0.707 m à 45.248 m.

Annexe 8 Rapport d'étape 1
(n° LVM : 072-P015838-0120-CH-0001-00)





MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

Utilisation des bandes d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec

Projet de recherche R588.1
Contrat n° 4502-07-RD01

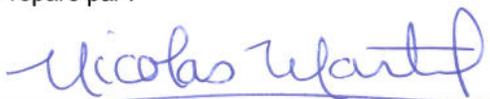
Rapport d'étape 1

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

Utilisation des bandes d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec

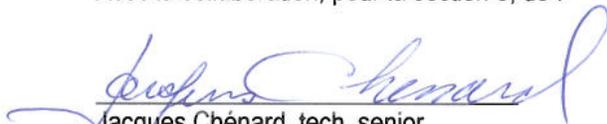
Rapport d'étape 1

Préparé par :



Nicolas Martel, ing., M.Sc.
Chargé de projet

Avec la collaboration, pour la section 3, de :



Jacques Chénard, tech. senior
Membre de l'équipe du projet à titre
de spécialiste au niveau de la mise en œuvre du pavage

Révisé par :



Guy Doré, ing., Ph. D.
Membre de l'équipe du projet à titre
de spécialiste scientifique en uni des chaussées

LVM-Technisol
325, rue de l'Espinay
Québec (Québec) Canada G1L 2J2
Téléphone : 418.647.1402
Télécopieur : 418.648.9288
Courriel : quebec@lvmtechnisol.com
Site Web : www.lvmtechnisol.com

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1.0 Considérations générales relatives à l'uni des chaussées	3
1.1 Le profil longitudinal	3
1.2 La relation entre le profil et le confort au roulement	3
1.3 Les défauts des chaussées et les longueurs d'ondes	5
1.4 L'IRI	7
1.5 La clause d'uni québécoise	9
1.6 Les limitations de la clause d'uni québécoise	10
2.0 La clause d'uni française	11
2.1 L'APL	11
2.2 La notation en bandes d'ondes (NBO)	12
2.3 L'architecture de la clause d'uni française	13
2.3.1 Lots de contrôle	14
2.3.2 Spécifications pour travaux de construction	14
2.3.3 Travaux de réhabilitation	15
2.3.4 Travaux d'entretien	17
2.3.5 Exemptions	18
2.4 Les clauses contractuelles	18
2.5 Guide technique pour l'application de la circulaire	20
2.6 Discussion sur la clause d'uni française	22
2.6.1 L'APL	22
2.6.2 Les notes en bandes d'ondes	22
2.6.3 Les spécifications, les clauses contractuelles et l'aide technique aux entrepreneurs	23
3.0 Équipement et mise en œuvre	24
3.1 Le finisseur	24
3.2 Le fonctionnement de la table lisseuse	26
3.3 Le guidage du finisseur	28
3.4 Le transport de l'enrobé et l'alimentation du finisseur	30
3.5 Compactage	30
3.6 L'obtention d'un bon uni	30
3.6.1 Les conditions de chantier	31
3.6.2 Le choix des équipements	31
3.6.3 Le mode de guidage	32
4.0 Faisabilité de l'implantation au Québec d'une telle clause d'uni	32
4.1 Abandon de l'IRI et formation par rapport à la notation en bandes d'ondes	32
4.2 Sensibilisation des entrepreneurs à l'obtention du meilleur uni possible	33
4.3 Instauration d'un guide technique	33
4.4 Ajustements au C.C.D.G.	34
4.5 Instauration de relevés d'uni avant-travaux	34
4.6 Besoin d'encadrement des profilomètres inertiels	34
4.7 Statut sur les clauses contractuelles	34
4.8 Amélioration du parc d'équipements québécois	35
5.0 Conclusion et avenues de recherche futures	35
RÉFÉRENCES	38

Tableaux

Tableau 1 :	Corrélation entre l'énergie et la notation subjective d'uni d'un groupe (MPR)	5
Tableau 2 :	Liste non-exhaustive de causes possibles occasionnant chaque gamme de longueur d'onde	6
Tableau 3 :	Bonifications et pénalités reliées à l'uni pour chaque lot de 100 mètres.....	9
Tableau 4 :	Intervalles de longueurs d'ondes reliées aux PO, MO, GO et longueur des segments de calculs pour chaque domaine dans la clause d'uni française	13
Tableau 5 :	Description des lots de contrôle possibles selon la circulaire 2000-36	14
Tableau 6 :	Résumé des spécifications pour travaux de construction	14
Tableau 7 :	Résumé des spécifications pour travaux de réhabilitation avec mise en œuvre d'une couche d'épaisseur supérieure à 50 mm.....	15
Tableau 8 :	Résumé des spécifications pour travaux de réhabilitation avec mise en œuvre de deux couches dont une pouvant être un reprofilage général de la voie.....	16
Tableau 9 :	Résumé des spécifications pour travaux d'entretien consistant en une épaisseur inférieure ou égale à 30 mm	17
Tableau 10 :	Résumé des spécifications pour travaux d'entretien consistant en une épaisseur supérieure à 30 mm et inférieure ou égale à 50 mm	18
Tableau 11 :	Intervalles des taux de pénalité proposés aux maîtres d'œuvres à titre indicatif.....	19
Tableau 12 :	Exemple de valeurs minimales proposées (construction neuve, réseau à 90 km/h, couche de roulement mince de moins de 50 mm.....	21

Figures

Figure 1 :	Profil longitudinal pour une distance parcourue de 40 mètres	3
Figure 2 :	Décomposition du profil de la figure 1 en trois sinusoïdes distincts.....	4
Figure 3 :	Longueurs d'ondes influençant particulièrement l'IRI	8
Figure 4 :	Principales composantes de fonctionnement de l'APL	12
Figure 5 :	Photo d'un finisseur.....	25
Figure 6 :	Aperçu de la trémie du finisseur.....	25
Figure 7 :	Action de la vis de répartition.....	27

Annexes

- Annexe 1 : Définitions des termes couramment utilisés dans la circulaire 2000-36 (1 page)
- Annexe 2 : Proposition du contenu des étapes futures au projet de recherche sur l'utilisation des bandes d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec (3 pages)
- Annexe 3 : Discussion et suggestions pour le développement d'une approche québécoise alternative d'évaluation de l'uni des chaussées sur le principe des bandes d'ondes (4 pages)

Ce rapport contient 40 pages et 3 annexes. Ce document d'ingénierie est l'oeuvre de LVM-Technisol inc. et est protégé par la loi. Il est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute reproduction ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite de LVM-Technisol inc. et du client.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

Les sous-traitants de LVM-Technisol inc. qui auraient réalisé des travaux au chantier ou en laboratoire sont dûment qualifiés selon la procédure relative aux achats de notre manuel qualité. Pour de plus amples informations, veuillez contacter votre chargé de projet.

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS		
N° DE RÉVISION	DATE	DESCRIPTION DE LA MODIFICATION ET/OU DE L'ÉMISSION
00	2008-03-31	Émission finale

INTRODUCTION

L'uni longitudinal d'une chaussée peut être défini simplement comme sa planéité dans le sens de roulement des véhicules. Ce faisant, il est considéré comme un indicateur de la qualité du confort au roulement ressenti par les usagers de la route.

Au même titre que la fissuration, la capacité structurale et l'orniérage, l'uni est utilisé pour évaluer l'état d'une chaussée. Comme dans le cas des autres indicateurs, l'uni évolue donc au cours de la durée de vie de la chaussée et ce, à partir du moment de la livraison de la nouvelle surface de chaussée.

Cependant, contrairement aux autres aspects qui sont habituellement présumés en bon état suite à des travaux de réhabilitation ou de construction de chaussée neuve, l'uni livré suite à des interventions est fonction de plusieurs aspects relatifs à l'état initial de la chaussée, à son utilisation, aux méthodes de construction et aux disparités des matériaux. Comme plusieurs de ces aspects peuvent être contrôlés lors de la construction, les administrations routières, et en particulier le Ministère des transports du Québec, utilisent l'uni dans leurs exigences de qualité des travaux qui se terminent par la pose d'une couche de surface. Ces clauses d'uni imposent une pénalité monétaire à l'entrepreneur pour des travaux qui occasionnent de mauvais unis ou encore, introduisent des bonis pour des travaux qui occasionnent de bons unis.

L'objectif général de la présente recherche est de procéder, si cela est possible, à l'adaptation de la clause d'uni française au contexte québécois. Pour ce faire, une première phase de l'étude consiste à vérifier la faisabilité de cette adaptation. C'est ce qui est traité dans le présent rapport qui est divisé en quatre portions distinctes.

La première section introduit des considérations générales relatives à l'uni des chaussées. En détail, elle traite donc du profil longitudinal d'une chaussée et de la décomposition des défauts d'uni qui y sont présents en longueurs d'ondes. Les défauts à l'origine de ces longueurs d'ondes et leur correction par les diverses techniques de réfection sont alors présentés. Par la suite, l'IRI, l'indicateur utilisé pour les clauses d'uni québécoises, est présenté et l'influence des diverses longueurs d'ondes sur son calcul à partir d'un profil longitudinal est décortiqué. La présente clause d'uni québécoise est finalement présentée avec une discussion sur ses limitations.

La deuxième section présente la clause d'uni française. Ainsi, l'outil de mesure du profil longitudinal utilisé en France est d'abord présenté. Par la suite, le concept des notes en bandes d'ondes qui supporte la clause d'uni française est exposé. L'architecture proprement dite de la clause d'uni française est ensuite présentée. Les lots de contrôle, les spécifications, les exemptions et les clauses contractuelles sont exposées dans cette section du rapport. Finalement, une discussion sur les avantages d'une clause d'uni d'une telle forme sont présentés.

La troisième section traite de la mise en œuvre des matériaux de chaussée en général et, plus particulièrement des enrobés. Ainsi, une brève description des équipements, de leur fonctionnement et des méthodes de mise en œuvre est d'abord incluse dans cette section. Par la suite, les facteurs qui concourent à l'obtention d'un bon uni après-travaux sont présentés.

La quatrième et dernière section traite de la faisabilité d'implantation d'une clause d'uni de type française au contexte québécois. Dans cette section, une liste est donnée qui inclut les principales adaptations et modes d'encadrement nécessaires à l'implantation d'une telle clause.

Finalement, la conclusion du rapport propose quelques avenues pour les étapes futures du projet de recherche. Ces avenues de recherche sont reprises en détail dans deux annexes au présent document.

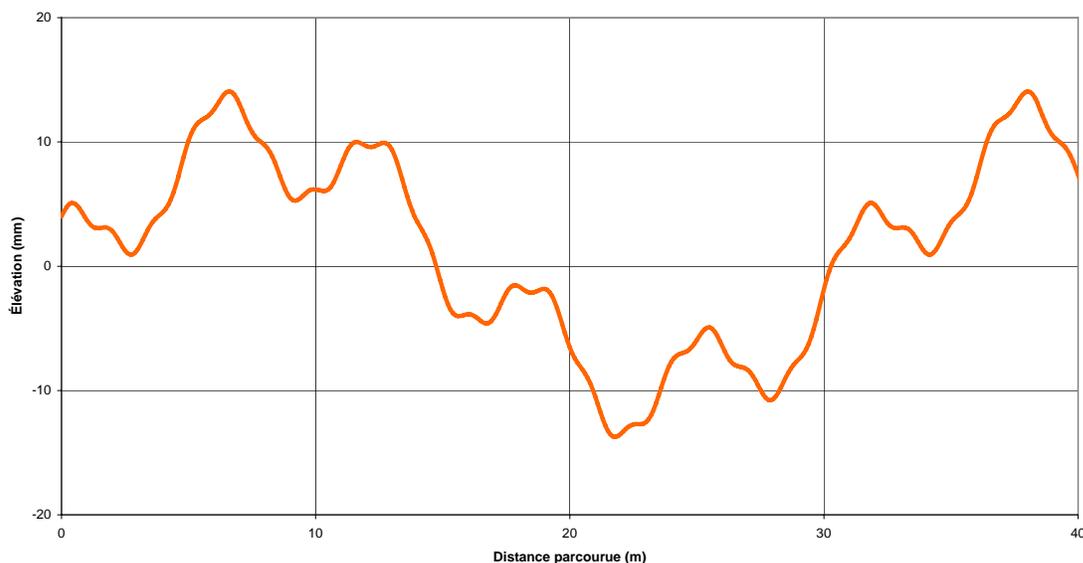
1.0 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES RELATIVES À L'UNI DES CHAUSSÉES

1.1 Le profil longitudinal

Le profil longitudinal d'une chaussée est une coupe en deux dimensions de sa surface recueillie dans le sens de roulement. Cette coupe est reliée à la trajectoire de roulement de l'appareil de mesure. En général, les deux traces de roues font l'objet d'un relevé.

Le profil longitudinal est exprimé en mesures d'élévations en fonction de la distance parcourue. La figure 1 présente un profil de chaussée sur une distance parcourue de 40 mètres dans un sentier de roue donné.

Figure 1 : Profil longitudinal pour une distance parcourue de 40 mètres



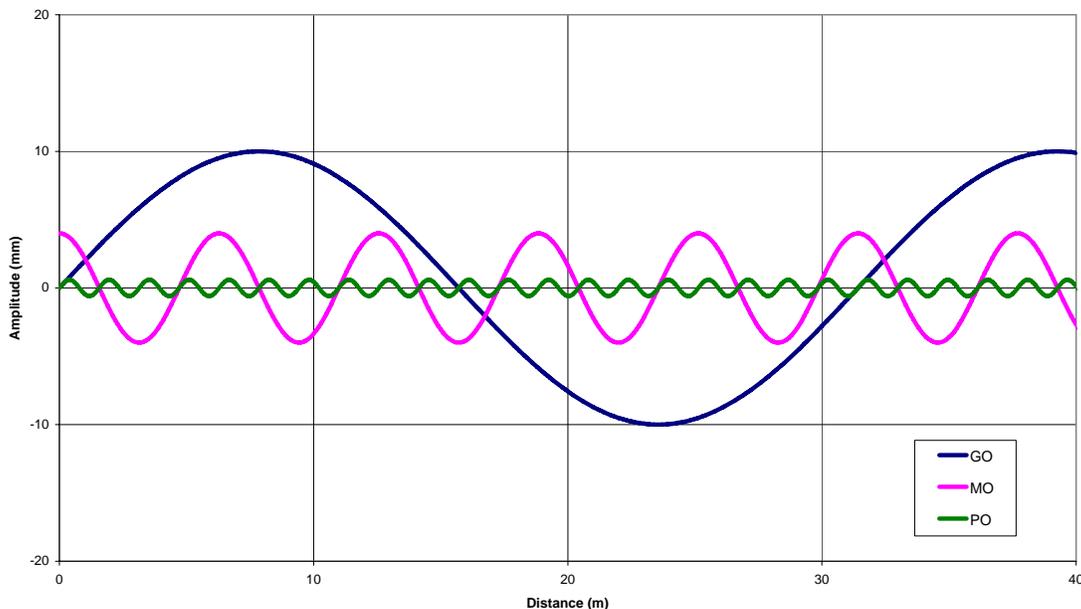
1.2 La relation entre le profil et le confort au roulement

La perception du confort au roulement par les usagers de la route est reliée à plusieurs facteurs tels que le profil, les caractéristiques mécaniques du véhicule et la vitesse de roulement. Cette perception est reliée à l'accélération verticale ressentie par l'utilisateur lorsqu'il est assis dans le véhicule (Sayers et Karamihas, 1998).

En circulant avec le même véhicule à la même vitesse constante sur trois chaussées présentant des profils différents, un même conducteur donnera donc trois notes d'uni différentes.

Le profil, et en particulier chacune de ses composantes, a donc une grande influence sur l'uni. La figure 2 présente les trois sinusoïdes distincts qui, par superposition, ont servi à produire le profil de la figure 1.

Figure 2 : Décomposition du profil de la figure 1 en trois sinusoïdes distincts



L'onde de couleur bleue fait partie du domaine des grandes ondes (GO) avec une longueur d'onde de 31.4 mètres. L'onde de couleur rose fait partie du domaine des moyennes ondes (MO) avec une longueur d'onde de 6.3 mètres. Enfin, l'onde de couleur verte fait partie du domaine des petites ondes (PO) avec une longueur d'onde de 1.6 mètres.

Janoff *et al.* (1982, 1983 et 1986) et Hayhoe (1992) (cités par Delanne et Pereira, 2000) ont effectué des analyses sur l'impact des grandes, moyennes et petites ondes sur la note subjective d'uni estimée par un groupe d'individus (Mean Panel Rating (MPR)) sur des chaussées diverses. Leur travail a permis de déterminer quelles longueurs d'ondes affectent le plus la perception du confort au roulement. Le tableau 1 présente les coefficients de corrélation entre les énergies de chaque domaine d'onde et la note subjective moyenne du groupe d'individus (MPR).

Tableau 1 : Corrélation entre l'énergie et la notation subjective d'uni d'un groupe (MPR)
(Source : Delanne et Pereira, 2000)

Domaine	Longueurs d'ondes (en mètres)	Coefficient de corrélation entre l'énergie reliée à chaque longueur d'onde et le MPR
Grandes ondes (GO)	17.4 à 110.3	r = 0.301
Moyennes ondes (MO)	2.74 à 17.4	r = 0.795
Petites ondes et début de la macro-texture (PO)	0.43 à 2.74	r = 0.936

Le tableau 1 montre clairement que la perception de l'uni par les usagers de la route varie en fonction des longueurs d'ondes des défauts de profil observés. Ainsi, la perception des usagers est affectée, en ordre décroissant, par les petites, les moyennes et, enfin, par les grandes longueurs d'ondes.

Ces résultats montrent l'influence des diverses longueurs d'ondes sur la perception du confort au roulement par les usagers. L'apport de chaque composante d'un profil contribue donc à cette perception. Cet aspect est très important car chaque type de défaut porte une signature en longueurs d'ondes. De plus, il y a une relation directe entre la longueur d'onde occasionnée par un défaut et la profondeur d'intervention pour corriger ce défaut. Ce point est traité dans la sous-section suivante.

1.3 Les défauts des chaussées et les longueurs d'ondes

Comme mentionné précédemment, chaque type de défaut perçu sur une chaussée porte une signature en longueur d'onde. Évidemment, un type de défaut donné peut se traduire sur une vaste gamme de longueurs d'ondes. Dans le but de simplifier la description des principaux défauts de chaussées et leurs longueur d'ondes respectives, les gammes de petites (PO), moyennes (MO) et grandes longueurs d'ondes (GO) sont utilisées. Les longueurs d'ondes relatives à ces gammes sont incluses dans le tableau 1. Ci-après, le tableau 2 présente des exemples des causes possibles de l'apparition de ces défauts en longueurs d'ondes.

Tableau 2 : Liste non-exhaustive de causes possibles occasionnant chaque gamme de longueur d'onde

Gamme	Causes possibles de l'apparition des défauts en longueurs d'ondes		
	Sur une chaussée existante	Suite à une intervention	
PO	<ul style="list-style-type: none"> - Fissures moyennes ou majeures - Déformations localisées - Nids-de-poules - Pelades - Puisards - Tôle ondulée - Soulèvements aux fissures en condition de gel - Dépressions localisées 	<ul style="list-style-type: none"> - Disparité de température dans le mélange d'enrobé lorsque celui-ci est mis en place - Arrêt de la table du finisseur - Utilisation d'un système de guidage lors de la mise en œuvre de la couche de roulement - Présence de morceaux d'enrobé sur la couche de support préalablement au passage du finisseur 	Surface
MO	<ul style="list-style-type: none"> - Dénivellations en bordure de puisards - Dénivellations associées au mouvement des tranchées - Mouvements aux abords de ponceaux - Tassement ou soulèvement localisé 	<ul style="list-style-type: none"> - Dénivellations en bordure de puisards pour favoriser le drainage - Effets de couronne lors de passages d'intersections - Absence de guidage lors de la mise en œuvre de la couche de base de l'enrobé - Mauvaise compaction de la fondation de chaussée - Transitions inappropriées ou inexistantes 	
GO	<ul style="list-style-type: none"> - Déformations différentielles associées aux effets du gel et du dégel - Tassement non-uniforme du sol d'infrastructure - Mauvais drainage des couches inférieures de la chaussée 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise implantation du profil longitudinal de l'infrastructure, sous-fondation ou fondation (ex. : utilisation d'une niveleuse sans système de guidage lors de la mise en œuvre) - Mauvais compactage des couches plus profondes 	Profondeur

Le tableau 2 présente donc une liste non-exhaustive de défauts occasionnant chaque gamme de longueur d'onde. Or, la tendance observée est que plus la cause d'un défaut est profonde, plus la longueur d'onde qui y est associée est grande. Cette observation est très importante pour la suite du présent document.

Pour une construction neuve, elle indique d'abord que toutes les étapes de construction concourent à l'obtention d'un uni final de bonne qualité. Par exemple, un défaut de grande longueur d'onde occasionné par une mauvaise implantation du profil longitudinal de la couche de sous-fondation ne pourra pas être corrigé par une mise en œuvre parfaite des couches supérieures. La longueur d'onde occasionnée à cette profondeur sera ainsi visible sur le profil de surface à moins de procéder à une correction lors de l'implantation de ces couches; ce qui serait de toute façon trop coûteux étant donné le coût plus élevé des matériaux des couches de surface.

Pour une réhabilitation de chaussée existante, l'observation issue du tableau 2 indique que lorsque l'intervention est faite jusqu'à une profondeur suffisante, la vaste majorité des défauts occasionnant des longueurs d'ondes affectant l'uni peuvent être corrigés. Par contre, l'inverse est aussi vrai. Un resurfaçage sans planage, par exemple, ne pourra jamais corriger les défauts de moyennes et grandes longueurs d'ondes. Tout au plus, les petites ondes seront réglées par cette intervention.

Enfin, il est important de noter que certains défauts ne pourront jamais être résolus puisqu'ils sont intrinsèques aux caractéristiques géométriques de la chaussée. Par exemple, les ajustements de couronnes aux intersections et les dénivellations en bordures de puisards seront toujours présentes sur des chaussées neuves ou réhabilitées. Dans une certaine mesure, les moyennes ondes qu'elles occasionnent seront donc toujours présentes. L'incidence de ces défauts sur la qualité de l'uni peut cependant être limitée si les petites et grandes ondes y sont bien contrôlées.

En bref, une chaussée existante possède une empreinte en défauts de toutes longueurs d'ondes dans son profil longitudinal. Le type de réfection choisi pour cette chaussée, selon la profondeur d'intervention, déterminera la possibilité de correction des défauts qui se traduiront par une amélioration de l'uni. Il serait donc intéressant d'avoir une clause d'uni propre à chaque type d'intervention réalisé. Cette clause devrait faire intervenir un indicateur d'uni permettant la caractérisation des diverses gammes d'ondes, elles-mêmes fonction de la profondeur des défauts.

1.4 L'IRI

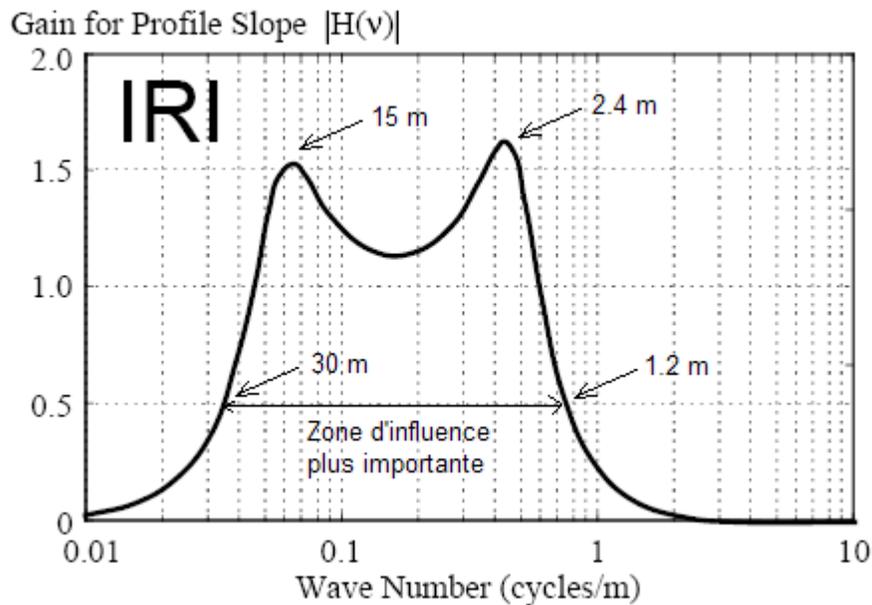
L'IRI est l'Indice de Rugosité International. Cet indicateur est un produit de l'étude de l'International Road Roughness Experiment (IRRE) qui a été réalisée en 1982 et qui visait, entre autres, à introduire une note reconnue mondialement pour la caractérisation de l'uni. Cette note devait pouvoir être utilisée dans la pratique et mesurée avec la plupart des appareils utilisés à l'époque, soit les profilomètres et les roulemètres (Gillespie *et al.*, 1986).

L'IRI est un indicateur d'uni incrémental qui résulte de la simulation mathématique du passage, sur un profil longitudinal, d'un modèle de quart de véhicule aux caractéristiques connues de masse, de suspension et d'amortissement. Il correspond au mouvement cumulatif de la suspension de ce quart de véhicule modélisé, divisé par la distance parcourue sur le profil de chaussée (Shahin, 1993). C'est pourquoi l'unité de mesure la plus communément utilisée au Québec est le mètre par kilomètre.

Enfin, la valeur minimale de 0 m/km représente une chaussée absolument parfaite en terme d'uni, soit un profil sur lequel la suspension ne bouge pas sur la distance parcourue par le modèle de quart de véhicule.

Il est reconnu dans la littérature (Sayers et Karamihas, 1998) que l'IRI est influencé par une large gamme de longueurs d'ondes. La figure 3 présente le gain d'IRI en fonction du nombre d'onde, lui-même relié à la longueur d'onde, de même que la zone d'influence la plus importante.

Figure 3 : Longueurs d'ondes influençant particulièrement l'IRI
(figure bonifiée de Sayers et Karamihas (1998))



La figure 3 montre d'abord que l'IRI est influencé par une large gamme de longueurs d'ondes dont particulièrement celles qui sont incluses entre 1.2 et 30 mètres. À l'intérieur de cette large gamme de longueurs d'ondes, deux pics d'influence à 2.4 et 15 mètres sont observés.

L'IRI est donc influencé à la fois par le domaine des grandes ondes (GO), moyennes ondes (MO) et petites ondes (PO). En incluant toutes les longueurs d'ondes, il tient donc compte de tous les types de défauts et ne permet pas de caractériser l'influence de chaque domaine d'onde sur l'uni.

1.5 La clause d'uni québécoise

Le Ministère des transports du Québec fait présentement intervenir l'IRI comme indicateur d'uni à des fins d'exigences après-travaux.

Ces exigences sont reconnues dans la pratique sous le terme de « clauses d'uni » et sont incorporées aux devis des contrats qui interviennent entre les entrepreneurs et le MTQ. La valeur de l'IRI calculée après les travaux permet donc au MTQ de bonifier, de pénaliser ou de demander des correctifs à l'entrepreneur, pour chaque lot de 100 mètres. Le but de ces clauses est d'assurer la meilleure qualité d'uni après les travaux. Le tableau 3 présente les montants d'ajustement relatif à l'uni de surface par secteur, tel que spécifié dans le devis type des clauses d'uni du MTQ (MTQ, 2003).

Tableau 3 : Bonifications et pénalités reliées à l'uni pour chaque lot de 100 mètres
(Source : MTQ, 2003)

IRI du lot de 100 mètres (m/km)	Type	Montant
≤ 0.8	Bonification	100 \$
0.9	Bonification	50 \$
1.0	Bonification	20 \$
1.1	Bonification	10 \$
1.2	-	-
1.3	Pénalité	10 \$
1.4	Pénalité	20 \$
1.5	Pénalité	100 \$
1.6	Pénalité	500 \$
1.7	Pénalité	1000 \$

Le tableau 3 montre que des pénalités sont appliquées sur les lots de 100 mètres dont l'IRI calculé est supérieur à 1.3 m/km. À l'inverse, une bonification est appliquée à chaque lot dont l'IRI calculé est inférieur ou égal à 1.2 m/km. Dans les deux cas, les montants augmentent en s'éloignant de cette valeur.

Ainsi, plus les valeurs d'IRI sont faibles, plus les entrepreneurs sont bonifiés monétairement pour leurs travaux. Plus les valeurs d'IRI sont élevées, plus les entrepreneurs sont pénalisés monétairement pour leurs travaux. À ce titre, il est à noter que les montants des pénalités lorsque l'uni est moins bon sont beaucoup plus élevés que les montants des bonis versés lorsque l'uni est bon.

De plus, un lot est rejeté lorsque la valeur de son IRI est plus grande que 1.7 m/km. L'entrepreneur doit alors apporter des mesures correctives à ses frais. L'uni est ensuite ré-évalué dans les secteurs corrigés et les exigences du tableau 3 sont appliquées de nouveau.

Enfin, les critères des clauses d'uni du MTQ, tels que ceux décrits au tableau 3, sont applicables à tous les types de travaux, du resurfaçage sans planage aux constructions neuves.

1.6 Les limitations de la clause d'uni québécoise

À notre sens, la clause d'uni québécoise comporte plusieurs limitations.

D'abord, il s'agit d'une clause unique applicable pour tous les types de travaux. Or, il n'est pas logique de penser avoir une aussi bonne qualité d'uni, toutes longueurs d'ondes incluses, après un resurfaçage sur une chaussée existante qu'après la construction d'une chaussée neuve.

En effet, la chaussée existante possède une signature de défauts de toutes longueurs d'ondes qui ne pourront pas être totalement corrigés par la seule pose d'une nouvelle couche de roulement. Ainsi, les défauts de plus grandes longueurs d'ondes (MO et GO) ne seront pas corrigés par cette intervention. Comme l'IRI tient compte en grande partie de ces longueurs d'ondes, seule la composante issue des petites ondes améliorera la valeur d'IRI après travaux. Dans le cas d'une construction neuve, l'entrepreneur peut s'assurer d'un meilleur IRI en raison du fait qu'il intervient sur toutes les couches de la structure de chaussée; ce qui devrait se traduire par de bons comportements sur toutes les gammes de longueurs d'ondes.

Il en résulte donc que, pour des travaux effectués correctement, les valeurs d'IRI après travaux devraient logiquement être plus faibles pour une construction neuve que pour un resurfaçage de chaussée existante. Une clause d'uni unique pour tous les types d'intervention ne tient pas compte de cet aspect.

Intimement relié à cet aspect, l'usage de l'IRI comme indicateur d'uni constitue une autre limitation de la clause d'uni québécoise. En effet, comme l'IRI tient compte d'une large gamme de longueurs d'ondes, il est influencé par tous les défauts, y compris ceux pour lesquels l'entrepreneur n'a aucun contrôle lors d'un type d'intervention donné. Ainsi, pour un simple resurfaçage qui n'intervient que sur les défauts de petite longueur d'onde, un critère basé sur cette seule gamme de longueur d'onde serait beaucoup plus adéquat.

Ces deux aspects montrent l'importance d'utiliser un indicateur relié aux longueurs d'ondes de même que l'importance d'utiliser des seuils de bonification et de pénalité qui varient en fonction du type d'intervention effectué. Dans le cas des travaux de réhabilitation de chaussée existante, les seuils pourraient d'ailleurs être déterminés afin d'obtenir une certaine amélioration par rapport à un état de l'uni avant-travaux. Pour ce faire, des relevés avant-travaux devraient être réalisés systématiquement pour tous ces types de projets.

Enfin, en examinant les montants du tableau 3, on observe que l'accent est mis sur les pénalités plutôt que sur les bonifications. En effet, les montants de pénalités sont beaucoup plus élevés que les montants de bonifications. Par cet aspect, le MTQ cherche plus à éviter les mauvais unis qu'à encourager le meilleur uni possible après travaux. Bien que cet aspect soit justifiable pour toutes sortes de raisons, il ne pousse pas les entrepreneurs à viser les meilleurs unis possibles après-travaux.

2.0 LA CLAUSE D'UNI FRANÇAISE

La clause d'uni québécoise est donc limitée de plusieurs façons. Afin de remédier à ces limitations, le MTQ explore maintenant la possibilité d'adaptation de la clause d'uni française au contexte québécois. La section suivante présente en détail cette clause en commençant par l'appareil de mesure du profil utilisé en France : l'APL.

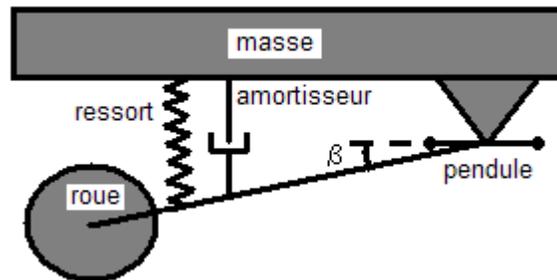
2.1 L'APL

L'Analyseur de Profil en Long (APL) est un instrument de mesure du profil longitudinal de la chaussée qui a été mis au point par les Français en 1968 (Bonnot et Boulet, 1987).

Son mécanisme de mesure est différent de celui des profilomètres inertiels au laser connus en Amérique du Nord. Ainsi, l'APL est monté sur une remorque de masse connue équipée d'une roue, d'un amortisseur, d'un ressort et d'un pendule inertiel. La figure 4 illustre les principales composantes de fonctionnement de l'APL.

Le profil mesuré est obtenu à partir du déplacement vertical de la roue par rapport à la référence horizontale donnée par le pendule inertiel à basse fréquence et ce, en fonction de la distance.

Figure 4 : Principales composantes de fonctionnement de l'APL



Dans le cadre des clauses d'uni françaises, deux remorques indépendantes sont utilisées pour caractériser chaque sentier de roue.

La vitesse du relevé doit être maintenue constante à $72 \text{ km/h} \pm 10 \text{ km/h}$, soit $20 \text{ m/s} \pm 2.8 \text{ m/s}$. À cette vitesse, chaque APL doit permettre minimalement (LCPC, 2000) :

- La restitution sans atténuation de toutes les longueurs d'ondes comprises entre 0.7 m et 45.4 m.
- Un pas de mesure plus petit ou égal à $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
- Une mesure d'amplitude verticale au moins égale à $\pm 80 \text{ mm}$ avec une résolution plus petite ou égale à 0.1 mm.
- Une résolution sur la distance parcourue plus petite ou égale à 50 mm avec une précision plus petite ou égale à 0.1 %.

2.2 La notation en bandes d'ondes (NBO)

Dans le cadre des clauses d'uni françaises, les profils mesurés par l'APL sont analysés en fonction de trois domaines d'ondes, soit les petites ondes, les moyennes ondes et les grandes ondes. Les intervalles de longueurs d'ondes relatifs à chaque domaine sont donnés dans le tableau 4. Il est à noter que ces intervalles sont normalisés dans le calcul français des notes en bandes d'ondes.

Tableau 4 : Intervalles de longueurs d'ondes reliées aux PO, MO, GO et longueur des segments de calculs pour chaque domaine dans la clause d'uni française (LCPC, 2000)

Domaine	Intervalle de longueurs d'ondes (m)	Longueur des segments de calcul (m)
Petites ondes (PO)	$0.707 < \lambda < 2.828$	20
Moyennes ondes (MO)	$2.828 < \lambda < 11.312$	100
Grandes ondes (GO)	$11.312 < \lambda < 45.248$	200

Pour un profil donné, une énergie est calculée pour chaque domaine de longueur d'onde sur les segments de longueurs prédéterminées. Cette énergie, propre à chaque domaine d'onde, est calculée à partir des amplitudes des ondes comprises dans le segment de profil. Pour les petites ondes, les segments sont de 20 mètres alors qu'ils sont de 100 m pour les moyennes ondes et de 200 m pour les grandes ondes. Pour chacun des segments, l'énergie est enfin convertie en une note en bande d'onde (NBO) à partir d'une table de conversion.

L'échelle des notes en bandes d'ondes contient 20 niveaux de gradation qui vont de 0 (pire) à 10 (meilleur) en incrémentant de 0.5 à chaque niveau. Cela permet une appréciation rapide de l'uni relatif à chaque domaine d'onde.

Typiquement, les lots de contrôle de la clause d'uni française font 1000 mètres. Sur chacun de ces lots, 50 notes de petites ondes (PO), 10 notes de moyennes ondes (MO) et 5 notes de grandes ondes (GO) sont donc calculées.

2.3 L'architecture de la clause d'uni française

La mécanique de la clause d'uni est décrite dans la circulaire N° 2000-36 de la Direction des routes du Ministère de l'équipement, des transports et du logement de France (METLF). Cette circulaire est datée du 22 mai 2000 et s'intitule: «Contrôle de l'uni longitudinal des couches de roulement neuves». (METLF, 2000a)

En plus de la notation en bandes d'ondes, la circulaire introduit deux autres aspects importants. En effet, la clause d'uni applicable pour une chaussée donnée est fonction de la vitesse réglementaire et du type de travaux effectué sur cette chaussée.

Ainsi, les critères d'acceptation seront différents selon les vitesses de 130 km/h, 110 km/h ou 90 km/h en vigueur sur le réseau routier et autoroutier national français.

De plus, et cet aspect diffère particulièrement de ce qui est en présentement en vigueur au Québec, la clause d'uni française introduit des critères différents selon qu'il s'agisse de travaux de construction, de réhabilitation ou d'entretien de la chaussée.

Les sous-sections suivantes présentent en détail les spécifications d'uni pour chaque type d'intervention. Auparavant, la mécanique des lots de contrôle est présentée.

2.3.1 Lots de contrôle

Les spécifications d'uni de la circulaire 2000-36 sont données en fonction de cinq types de lots de contrôle. Les lots de contrôle possibles sont présentés dans le tableau 5. Le lot le plus fréquemment utilisé est d'une longueur de 1000 mètres.

Tableau 5 : Description des lots de contrôle possibles selon la circulaire 2000-36

Longueur (m)	Description
L = 1 000	Lot de longueur normalisée
L = 4 000	Lot possible pour chantiers autoroutiers
L > 1 000	Lot incluant l'extrémité du chantier
200 < L < 1000	Lot pour chantier de longueur inférieure à 1000 m et supérieure à 200 m
Variable	Lot pour cas particuliers (vitesse de moins de 90 km/h, route à sinuosité marquée, point singulier impliquant l'arrêt de mise en œuvre, chantier fractionné, couche de roulement suivant une référence existante)

2.3.2 Spécifications pour travaux de construction

Les spécifications d'uni pour les couches de roulement finales après travaux de construction sont résumées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Résumé des spécifications pour travaux de construction

Lot de contrôle	Critères d'acceptation	Type de seuil		
		PO	MO	GO
L = 1 000	PO, MO, GO	Absolu	Absolu	Absolu
L = 4 000	PO, MO, GO	Absolu	Absolu	Absolu
L > 1 000	PO, MO, GO	Absolu	Absolu	Absolu
200 < L < 1000	PO, MO	Absolu	Absolu	X
Variable	PO	Absolu	X	X

Le tableau 6 montre que, de façon générale, les spécifications d'acceptation d'uni font intervenir les petites, moyennes et grandes longueurs d'ondes. De plus, comme il s'agit de constructions neuves, les seuils établis sont absolus; c'est-à-dire que leurs valeurs ne sont pas reliées à des valeurs avant-travaux. Cet aspect est logique puisqu'il s'agit de nouvelles constructions et qu'aucune empreinte en longueur d'onde n'est issue d'une structure de chaussée existante.

2.3.3 Travaux de réhabilitation

La circulaire 2000-36 fait la distinction entre deux types de réhabilitations. Il y a d'abord les travaux de réhabilitation avec mise en œuvre d'une couche d'épaisseur supérieure à 50 mm. Il y a aussi les travaux de réhabilitation avec mise en œuvre de deux couches dont une pouvant être un reprofilage général de la voie. Les deux cas commandent des critères d'acceptation différents.

Le tableau 7 présente le premier cas.

Tableau 7 : Résumé des spécifications pour travaux de réhabilitation avec mise en œuvre d'une couche d'épaisseur supérieure à 50 mm

Lot de contrôle	Critères d'acceptation *	Type de seuil		
		PO	MO	GO
L = 1 000	PO, MO	Absolu	Relatif	X
L = 4 000	PO, MO	Absolu	Relatif	X
L > 1 000	PO, MO	Absolu	Relatif	X
200 < L < 1000	PO, MO	Absolu	Relatif	X
Variable	PO	Absolu	X	X

* *Le seuil des petites ondes est absolu. Cependant, une valeur limite en petites ondes sur la chaussée existante est donnée préalablement aux travaux. Si cette valeur n'est pas respectée avant-travaux, des travaux préparatoires sont nécessaires avant de procéder à la réhabilitation.*

Ce tableau montre d'abord que les critères d'acceptation sont uniquement fonction des petites et des moyennes ondes. Cet aspect concorde avec ce qui a été présenté auparavant à savoir qu'une intervention en surface ne permet pas d'intervenir sur les grandes longueurs d'ondes. Il n'y a donc pas de critère sur celles-ci.

Le tableau 7 montre également que l'uni de la chaussée avant-travaux est important pour l'applicabilité et la détermination des critères d'acceptation. Cet aspect implique d'ailleurs la réalisation de relevés avant- travaux.

Ainsi, les spécifications sont d'abord applicables si et seulement si les notes PO du support ont une certaine valeur de départ. Sinon, des travaux préparatoires sont nécessaires. Cet aspect est dû au fait qu'une intervention de type resurfaçage avec une seule couche ne permet pas de corriger efficacement une chaussée en très mauvais état au niveau des petites ondes. Pour cette raison, la valeur de départ doit être assez élevée pour qu'une clause d'uni soit applicable. Sinon, il faut procéder à des travaux correctifs.

Ensuite, le seuil sur les moyennes ondes est relatif à l'état avant travaux. En détail, les prescriptions sont les suivantes :

- Moyenne des notes MO après travaux au moins égale à celle avant travaux
- Aucune note MO inférieure à la note la plus basse avant-travaux

Ces clauses sont dues au fait qu'une intervention de type resurfaçage avec une seule couche ne permet pas de corriger efficacement les moyennes ondes étant donné le fait que l'intervention se limite à la couche de roulement. Le critère donné vise donc à s'assurer que l'entrepreneur n'empire pas la situation en ce qui a trait au contenu en moyennes ondes (MO).

Le deuxième cas de réhabilitation est présenté au tableau 8 :

Tableau 8 : Résumé des spécifications pour travaux de réhabilitation avec mise en œuvre de deux couches dont une pouvant être un reprofilage général de la voie

Lot de contrôle	Critères d'acceptation	Type de seuil		
		PO	MO	GO
L = 1 000	PO, MO	Absolu	Absolu	X
L = 4 000	PO, MO	Absolu	Absolu	X
L > 1 000	PO, MO	Absolu	Absolu	X
200 < L < 1000	PO, MO	Absolu	Absolu	X
Variable	PO	Absolu	X	X

Comme au tableau 7, le tableau 8 présente des critères d'acceptation qui sont uniquement fonction des petites et des moyennes ondes car l'intervention est faite en surface.

Par contre, tous les seuils sont en valeurs absolues de notes par bandes d'ondes parce que le fait d'intervenir sur deux couches (dont une peut être un reprofilage général de la voie) permet une amélioration des petites et moyennes ondes et ce, indépendamment de l'état de la surface de roulement originale.

2.3.4 Travaux d'entretien

La circulaire 2000-36 inclut les travaux d'entretien qui consistent en la mise en place de couches de roulement minces inférieures ou égales à 50 mm. Cependant, pour éviter un alourdissement des contrôles sur ces travaux, la circulaire ne donne aucun caractère obligatoire au contrôle de l'uni longitudinal sur ceux-ci.

Deux cas de revêtement minces sont présentés. Il s'agit d'abord des revêtements mis en place sur une couche d'épaisseur inférieure ou égale à 30 mm. Les revêtements mis en place sur une couche d'épaisseur supérieure à 30 mm et inférieure ou égale à 50 mm sont aussi traités. Les deux cas commandent des critères d'acceptation différents.

Le premier cas est présenté au tableau 9 :

Tableau 9 : Résumé des spécifications pour travaux d'entretien consistant en une épaisseur inférieure ou égale à 30 mm

Lot de contrôle	Critères d'acceptation *	Type de seuil		
		PO	MO	GO
Tous	PO	Absolu	X	X

* *Le seuil des petites ondes est absolu. Cependant, une valeur limite en petites ondes sur la chaussée existante est donnée préalablement aux travaux. Si cette valeur n'est pas respectée avant-travaux, des travaux préparatoires sont nécessaires avant de procéder à la mise en place du revêtement mince.*

Comme il s'agit d'une intervention sur une couche mince située en surface, seul un critère de petites ondes est inclus. Le seuil qui y est rattaché est en valeur absolue moyennant une note minimale PO de sol support avant travaux. Cela signifie que pour améliorer le contenu en petites ondes, la couche de surface existante doit être dans un état minimal dans ce domaine de longueurs d'ondes. Sinon, des travaux préparatoires sont nécessaires.

Le deuxième cas est présenté au tableau 10 :

Tableau 10 : Résumé des spécifications pour travaux d'entretien consistant en une épaisseur supérieure à 30 mm et inférieure ou égale à 50 mm

Lot de contrôle	Critères d'acceptation *	Type de seuil		
		PO	MO	GO
Tous	PO, MO	Absolu	Relatif	X

* *Le seuil des petites ondes est absolu. Cependant, une valeur limite en petites ondes sur la chaussée existante est donnée préalablement aux travaux. Si cette valeur n'est pas respectée avant-travaux, des travaux préparatoires sont nécessaires avant de procéder à la mise en place du revêtement mince.*

Pour un revêtement mince un peu plus épais, le critère d'acceptation est relié aux petites ondes et aux moyennes ondes. La clause est valide uniquement si les notes PO du sol support sont plus grandes qu'une valeur minimale. Sinon, des travaux préparatoires sont requis. Le seuil est absolu dans le cas des petites ondes alors qu'il est relatif aux valeurs avant-travaux dans le cas des moyennes ondes. Dans ce cas, les prescriptions sont les suivantes :

- Moyenne des notes MO après travaux au moins égale à celle avant travaux
- Aucune note MO inférieure à la note la plus basse avant-travaux

Encore là, une intervention en resurfaçage avec une seule couche mince ne permet pas de corriger efficacement les moyennes ondes. Le critère donné vise donc à s'assurer que l'entrepreneur n'empire pas la situation en ce qui a trait au contenu en moyennes ondes (MO).

2.3.5 Exemptions

Les prescriptions de la circulaire 2000-36 ne s'appliquent pas aux travaux en traverse d'agglomération ni aux couches de roulement sur ouvrages d'art. De plus, des types d'intervention tels que le retraitement en place ne sont pas traités.

2.4 Les clauses contractuelles

Outre les seuils d'acceptation des travaux, les clauses contractuelles de la circulaire 2000-36 (METLF, 2000b) incluent des seuils d'application de pénalités et des seuils de réfection. Les seuils de pénalités sont donnés pour tous les domaines d'ondes applicables alors que les seuils de réfection sont donnés pour les petites ondes uniquement.

Pour un domaine d'onde, s'il n'y a pas de critère d'acceptation, il n'y a pas de critère de pénalité associé. C'est le cas notamment du domaine des grandes ondes pour des travaux de réhabilitation ou d'entretien. Aucune pénalité n'y est rattachée parce que ce domaine ne fait pas partie des spécifications pour ces types de travaux.

Ainsi, pour chaque type d'intervention et chaque vitesse prescrite précédemment, un tableau de seuils contractuels est donné. Celui-ci doit être inclus dans les documents contractuels du projet.

Advenant le cas que les seuils de pénalités sont atteints, l'entrepreneur peut proposer des travaux de reprise de manière à éviter d'être pénalisé. Une nouvelle réception s'impose alors. Advenant le cas que le seuil de réfection sur les petites ondes est atteint, l'entrepreneur doit faire une proposition de remise en conformité des lots concernés, adaptée aux défauts relevés.

La réception des lots se fait au niveau de la couche de roulement dans le cas des travaux de réhabilitation et d'entretien. Dans le cas des travaux de construction, la réception se fait au niveau de la couche inférieure (liaison) pour les moyennes et grandes ondes. Cet aspect permet plus facilement la correction d'éventuels défauts de plus grandes longueurs d'ondes puisque la mise en œuvre de la couche de roulement ne permet pas la correction de celles-ci.

Les taux de pénalités sont appliqués en pourcentage du prix de mise en œuvre et sont cumulables pour les trois domaines d'ondes. Les pourcentages proposés sont assez élevés tel que présenté dans le tableau 11. Il est à noter qu'aucune bonification n'est accordée pour de très bons unis.

Tableau 11 : Intervalles des taux de pénalité proposés aux maîtres d'œuvres à titre indicatif (METLF, 2000b)

Type de travaux	Domaine d'ondes		
	PO	MO	GO
Travaux de construction	15 à 20 %	5 à 15 %	5 à 10 %
Travaux de réhabilitation	15 à 20 %	5 à 15 %	X
Travaux d'entretien	15 à 20 %	5 à 10 %	X

Le tableau 11 montre des intervalles de taux de pénalités qui sont proposés aux maîtres d'œuvre à titre indicatif. Pour de longs chantiers, des réseaux à grande vitesse et des travaux sans contrainte particulière, il leur est conseillé d'être plus pénalisants. À l'inverse, pour de petits chantiers, des travaux de nuit sous circulation intense ou des travaux par phasage, il leur est conseillé d'être moins pénalisants.

Les taux de pénalités présentés au tableau 11 sont décroissants avec les longueurs d'ondes. En effet, les non-conformités relatives aux petites ondes sont plus pénalisantes que les non-conformités relatives aux moyennes ondes qui elles-mêmes sont plus pénalisantes que les non-conformités relatives aux grandes ondes.

La gradation des pénalités est tout à fait conséquente avec les données du tableau 1 selon lesquelles les usagers perçoivent en ordre décroissant les défauts de petites, moyennes et grandes longueurs d'ondes. L'emphase est donc mise sur les pénalités relatives aux petites longueurs d'ondes. C'est d'ailleurs le seul domaine d'onde pour lequel un critère de refus impliquant une remise en conformité est donné. Le but est donc d'assurer le meilleur confort au roulement possible pour les usagers.

2.5 Guide technique pour l'application de la circulaire

Avec la circulaire 2000-36, un document présente, « de façon indicative et non pas réglementaire », les moyens pratiques à utiliser pour faciliter l'obtention des spécifications d'uni.

Ce document, intitulé : « Guide technique pour l'application de la circulaire » (METLF, 2000c) énonce d'abord des règles de l'art pour la mise en œuvre. Il donne également des notes minimales intermédiaires d'uni pour chaque domaine d'onde qui, si elles sont atteintes, concourent à l'atteinte des spécifications pour la couche de roulement. Enfin, des propositions de méthodes de mise en œuvre sont données pour chaque couche de façon à obtenir des gains d'unis annoncés ou encore pour récupérer un déficit d'uni.

Les aspects relatifs à la mise en œuvre seront exposés plus en détail à la section 3. Dans la présente section, il est intéressant de noter que la clause d'uni française est complétée par un tel document. Celui-ci est destiné aux entrepreneurs de façon à faciliter l'atteinte des spécifications d'uni.

Un des aspects particulièrement intéressant de ce document est la fourniture de valeurs intermédiaires de notes pour les diverses bandes d'ondes à chaque couche mise en œuvre. Ainsi, pour chaque type d'intervention, chaque vitesse et selon le nombre de couches disposées, un tableau est donné qui inclut des valeurs minimales requises pour chaque couche. L'exemple suivant est donné pour une construction neuve sur une chaussée à 90 km/h avec couche de roulement mince de moins de 50 mm :

Tableau 12 : Exemple de valeurs minimales proposées (construction neuve, réseau à 90 km/h, couche de roulement mince de moins de 50 mm)

Domaine	Note minimale d'uni pour la couche de *				Spécifications pour la couche de roulement
	Forme	Fondation	Base	Liaison	
PO	X	X	≥ 3	≥ 5	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
MO	X	≥ 3	≥ 4	≥ 6	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
GO	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 5	100 % des notes ≥ 5 80 % des notes ≥ 6

* La note minimale équivaut à ce que 100 % des notes soient supérieures à la valeur proposée.

Ce type de tableau dénote l'importance de l'atteinte de spécifications d'uni à toutes les étapes d'une construction neuve afin d'atteindre les spécifications finales à la livraison de la couche de roulement. De plus, il ne fait pas que sensibiliser l'entrepreneur à se préoccuper de l'uni mais il lui donne les moyens de le contrôler dans le but d'atteindre des spécifications finales. Cet aspect est très important.

Le document inclut finalement des ateliers de mise en œuvre usuels et optimisés pour chaque type de couche peu importe sa position relative dans la structure de chaussée. Un atelier se compose d'un matériel d'alimentation, d'un répandeur et de son mode de guidage, et de compacteurs (selon le type de matériau mis en œuvre). En fonction des spécifications intermédiaires, l'atelier usuel permet, si les conditions d'utilisation respectent les règles de l'art, d'obtenir les gains d'uni annoncés entre les couches tandis que l'atelier optimisé rend possible la récupération du déficit d'uni entre deux couches. Par ce dernier aspect, l'entrepreneur peut choisir les méthodes de mise en œuvre pour l'atteinte des spécifications d'uni.

Les deux aspects présentés ci-haut permettent aux entrepreneurs d'intervenir très tôt dans les travaux pour assurer le meilleur uni final après-travaux. Cela implique des contrôles réguliers de l'uni pendant les travaux et ce, sur toutes les couches.

2.6 Discussion sur la clause d'uni française

2.6.1 L'APL

Pour fin de vérification, les spécifications techniques normalisées pour l'APL ont été comparées aux caractéristiques techniques du profilomètre inertiel de LVM-Technisol.

Ainsi, par consultation des manuels de l'utilisateur de ce profilomètre de marque ICC, modèle MDR 4084-L2 (ICC, 2002, 2003 et 2004), il appert que les spécifications requises à la section 2.1 sont remplies.

Quoique non-exhaustive, cette vérification renseigne sur la faisabilité d'utilisation d'un profilomètre inertiel disponible au Québec dans le cadre du calcul des notes en bandes d'ondes. Cet aspect ne semble donc pas problématique à ce stade-ci.

2.6.2 Les notes en bandes d'ondes

La notation en bandes d'ondes a été développée pour caractériser chacun des trois domaines de longueurs d'ondes (PO, MO et GO). Comme chaque domaine d'onde est caractéristique de types de défauts particuliers qui originent de profondeurs spécifiques, ces indicateurs de l'uni sont beaucoup mieux adaptés à l'acceptation de nouveaux pavages. En effet, leur utilisation permet non seulement l'acceptation de couches de roulement neuves mais elle permet également d'instaurer des critères d'acceptation qui sont fonction des types d'interventions. De plus, ces indicateurs d'uni renseignent sur la profondeur des défauts advenant des non-conformités. Ils peuvent enfin être utilisés pour fin de contrôle sur chacune des couches mises en œuvre.

Ces caractéristiques font des notes en bandes d'ondes des indicateurs d'uni plus complets que l'IRI qui, lui, ne permet que la quantification de l'uni affecté par toutes les longueurs d'ondes. Il y a donc tout avantage à utiliser les notes en bandes d'ondes dans une future clause d'uni québécoise inspirée de la clause française.

2.6.3 Les spécifications, les clauses contractuelles et l'aide technique aux entrepreneurs

Les spécifications de la circulaire 2000-36 sont adaptées à chaque type d'intervention. De plus, dans les clauses contractuelles, il y a des seuils d'acceptation, de pénalités et de refus. Aucune bonification n'est donnée pour d'excellents unis.

Ces critères sont sévères mais le fait qu'il soient adaptés à chaque type d'intervention aide sûrement à leur acceptation par les entrepreneurs. En effet, les clauses contractuelles sont faites de telle sorte que les entrepreneurs ne seront pénalisés que pour la présence de défauts qui auraient dû être réglés par leurs travaux.

De plus, comme la circulaire propose à titre indicatif des valeurs intermédiaires sur les couches inférieures nécessaires pour le respect des critères sur la couche de roulement, les entrepreneurs peuvent avoir, en tout temps, des indicateurs de l'état de l'uni final. Cet aspect les implique dans tous le processus de mise en oeuvre et non pas seulement en toute fin des travaux.

Finalement, la circulaire propose, à titre indicatif, des ateliers de mise en oeuvre adaptés aux principaux types de couches et à leur emplacement dans la structure de chaussée. Les entrepreneurs peuvent donc ajuster leurs méthodes en fonction des objectifs d'uni et les façons d'y parvenir sont documentées par les autorités françaises.

Ces deux derniers aspects impliquent une certaine responsabilité des autorités françaises auprès des entrepreneurs. En effet, les entrepreneurs ne sont pas uniquement jugés sur la qualité de leurs résultats mais ils sont aidés par des suggestions d'ateliers et des valeurs intérimaires. Cela est différent de l'approche québécoise où le MTQ se dégage de toute suggestion au niveau de la mise en oeuvre. Ainsi, la transposition de la clause française au Québec devra tenir compte de l'obligation du MTQ d'épauler les entrepreneurs en cours de réalisation des travaux. Cela pourra, dans certains cas, engager la responsabilité du MTQ si des travaux sont jugés non-conformes.

3.0 ÉQUIPEMENT ET MISE EN ŒUVRE

Dans le contexte de l'optimisation de la qualité de l'uni des chaussées, une partie de l'étude a été axée sur une revue de l'équipement et des méthodes de mise en œuvre des matériaux de chaussées.

Il est principalement question de la capacité des équipements de mise en œuvre des enrobés bitumineux, tel que le finisseur, et des pratiques traditionnelles pour le transport de l'enrobé et le guidage.

Les interrogations pouvant être posées pour l'optimisation de la qualité d'un uni sont surtout :

- Sur la capacité du finisseur dans la fonction de lissage des défauts du support et/ou du lissage de la couche de roulement;
- Sur les modes de guidage du finisseur;
- Sur l'alimentation du finisseur;
- Sur les travaux de compactage.

Pour traiter de quelques-uns de ces aspects, des parties de texte issues du Guide technique sur la mise en place des enrobés bitumineux (MTQ, 2007b) ont été insérées dans les sous-sections 3.1 et 3.2.

3.1 Le finisseur (parties de texte tirées de MTQ, 2007b)

La mise en place d'un revêtement bitumineux s'effectue à l'aide d'un finisseur. La connaissance des principes de conception et de fonctionnement de tels équipements est indispensable pour en comprendre les possibilités et les limites lors de la mise en place d'un revêtement.

La partie centrale de l'équipement constitue la partie « tracteur » du véhicule, elle comporte une source d'énergie mécanique, hydraulique et électrique.

Figure 5 : Photo d'un finisseur (Source : Froissard, 2001)



Le système de traction monté sur roues ou chenilles permet le déplacement de l'équipement et le guidage de la direction.

La trémie permettant le déchargement des camions est située à l'avant tandis qu'un système de convoyeur permet le transfert de l'enrobé à l'arrière vers la vis de répartition et la table du finisseur; lesquelles répartissent et lissent le matériau.

Figure 6 : Aperçu de la trémie du finisseur (Source : MTQ, 2007b)



La partie arrière, soit la table lisseuse, est flottante ; c'est-à-dire qu'elle repose sur le matériau mis en place et est reliée au tracteur par l'intermédiaire de deux points d'attache.

La table lisseuse se compose d'un lisseur, de commandes d'épaisseur, d'un dispositif de réglage des pentes transversales et d'unités de chauffage. De plus, elle est équipée d'une plaque de damage vibrante.

Plutôt que d'être dotés d'une plaque de damage vibrante, certains modèles de finisseurs sont équipés de ce qu'on appelle communément une barre dameuse qui coulisse de haut en bas et se situe au bord de la face avant du lisseur.

Le lisseur sert à lisser le mélange et doit être fixé d'une façon très précise en conformité avec les normes du fabricant. Cette plaque est chauffée par un système de brûleur, la largeur du lisseur est ajustable.

3.2 Le fonctionnement de la table lisseuse (parties de texte tirées de MTQ, 2007b)

La table lisseuse est l'une des pièces maîtresses du fonctionnement du finisseur. Elle comprend des vis sans fin qui servent à répartir le matériau uniformément de façon à maintenir constante la quantité d'enrobé qui se retrouve devant la table lisseuse.

Tous les finisseurs fonctionnent sur le même principe quant au nivellement et au réglage de l'épaisseur. Quand la poutre lisseuse pénètre dans le mélange, elle s'ajuste automatiquement au niveau auquel s'équilibrent les forces qui agissent sur elle.

L'angle d'incidence de la table et la vitesse du finisseur ont une influence directe sur l'uniformité de l'épaisseur du revêtement. Si l'angle d'incidence s'ouvre ou que la vitesse diminue, l'épaisseur tend à augmenter. Si l'angle d'incidence ferme ou si la vitesse augmente, l'épaisseur tend à diminuer.

Le lisseur en contact avec l'enrobé doit toujours être lisse, bien ajusté et en bon état pour assurer une mise en place adéquate. Pour le bon fonctionnement de la table lisseuse, il faut s'assurer que la pente transversale soit correcte. La table lisseuse doit également être dotée d'un système à air chaud forcé. En chauffant le lisseur, on empêche l'enrobé d'y adhérer. Il faut éviter toute surchauffe (air chaud) ; ce qui augmente les risques de déformation du lisseur ou cause une usure prématurée.

Tout en arasant l'enrobé à la hauteur voulue et en maintenant la bonne épaisseur d'enrobé, la table lisseuse consolide le mélange et en amorce la densification à l'aide de la plaque de damage vibrante. Le degré de compactage obtenu varie selon les caractéristiques du mélange. En général, la table lisseuse amène l'enrobé à une compacité voisine de 80 % de la densité maximale. La compacité peut être plus élevée lorsque la table lisseuse est équipée d'une barre dameuse au lieu d'une plaque de damage vibrante. Cette barre densifie l'enrobé pour que la plaque de nivellement glisse doucement sur le mélange. Ce pré-compactage est insuffisant pour permettre la circulation des véhicules et ce, même pour une utilisation temporaire.

La plupart des finisseurs sont munis d'une table lisseuse dont la largeur est ajustable, permettant la mise en place du mélange sur une largeur supérieure à 7,0 m. La rallonge peut consister en un système hydraulique ou à en un dispositif boulonné aux extrémités de la table standard. Dans chaque cas, une attention particulière doit être portée à la quantité de mélange se rendant jusqu'aux extrémités de la table. En effet, lorsque les vis de distribution n'assurent pas une alimentation en enrobé suffisante aux extrémités, le mélange refroidit à ces endroits et deux bandes parallèles de mélange déchiré peuvent apparaître derrière le finisseur.

Figure 7 : Action de la vis de répartition (Source : MTQ, 2007b)



L'enrobé à chaud doit être maintenu à un niveau constant au centre de la vis de répartition ou à mi-hauteur. La quantité et l'état de l'enrobé acheminé aux vis de répartition a également un impact sur l'uniformité du mélange posé pouvant causer des ondulations et des variations de la texture en surface.

3.3 Le guidage du finisseur (Gallenne, 2002)

Généralement, l'épandage des enrobés à l'aide d'un finisseur améliore le niveau de l'uni initial parce qu'il a, par sa conception et son mode de fonctionnement, une capacité de lissage des défauts du support sur lequel il circule. Pour ce faire, le mode de guidage doit être le mieux adapté possible aux conditions de chantier. Par exemple, le mode de guidage doit être différent selon qu'on réalise la couche de base, une couche de liaison ou la couche de roulement.

Du point de vue français, la technique d'épandage et les équipements complémentaires de guidage et d'asservissement sont déterminés en fonction de la nature et de l'épaisseur de la couche, du profil et des déformations du sol support, ainsi que du résultat à obtenir. Dès lors, il est compréhensible que le guidage automatique d'un finisseur n'est pas une technique simple, quelle que soit la fonction envisagée.

Le niveau du finisseur est guidé lors de l'épandage des couches de fondation granulaire ou de revêtement bitumineux. Les défauts de la couche sur laquelle il s'appuie sont alors éliminés par l'épandage d'un matériau d'épaisseur variable. Les différentes techniques de guidage qui peuvent être utilisées sont listées ci-après :

- **Sur fil :** Dans le cas de la méthode des fils qui est occasionnellement utilisée par les entreprises de construction de chaussées, le géomètre doit préalablement planter l'ensemble des piquets de part et d'autre de la future chaussée, en fonction du projet à réaliser. Ensuite, un tube qui sert de support au fil, est positionné sur les piquets. Le nivellement consciencieux de ces derniers et la mise en place des fils (un fil de chaque côté de la voie), parallèlement à l'axe, avec une tension convenable, sont alors les dernières précautions à prendre pour l'élaboration de cette méthode qui demande un travail considérable de la part des géomètres. Cette technique est aussi employée pour la niveleuse.

- **Laser** : Couramment utilisé pour la mise en œuvre des surfaces granulaires, le guidage peut être donné par l'utilisation d'un faisceau laser généré par un émetteur tournant placé sur une tourelle à quelques mètres de hauteur, sur un point statique connu. Les capteurs laser, placés de part et d'autre de la lame de la niveleuse, sont des plaques photosensibles dont la résolution permet de mesurer avec certitude des écarts de l'ordre du demi centimètre. Ce dispositif est aussi adaptable au finisseur.
- **Sur poutres** : C'est un mode de fonctionnement fréquemment utilisé. Deux poutres de grande longueur (entre 9 et 18 mètres) glissent ou roulent, l'une sur le support d'évolution (c'est à dire la couche déjà en place), en avant de l'épandeuse, et l'autre sur le matériau fraîchement répandu, en arrière de la table. Elles sont reliées entre elles par un bras à balancier solidaire du finisseur. Un capteur permet de mesurer l'amplitude des déplacements du bras à balancier, ceux-ci étant liés aux déplacements verticaux des deux poutres. L'écart observé est ensuite directement utilisé pour commander les vérins hydrauliques. L'utilisation de poutres plutôt longues tend à lisser le matériau du fait du déplacement du finisseur, et à améliorer le profil en long en atténuant sensiblement les défauts localisés. En effet, ce type de guidage permet de réaliser un filtrage de certains défauts du support, dans une gamme de longueur d'ondes correspondant approximativement aux dimensions des poutres (grande onde pour la poutre de 18 mètres).
- **Vis calées** : Cette technique ne consiste pas en un guidage proprement dit car il n'y a pas de niveau de référence. En fait, il s'agit du terme usuel pour définir le fonctionnement du finisseur sans guidage. Les vérins de commande sont bloqués et la machine répand une épaisseur de matériau quasi-constante. Ce dispositif permet le filtrage de défauts en petites ondes (jusqu'à 3 mètres) mais n'est pas efficace pour les défauts de grandes ondes (supérieurs à 10 mètres) car il les reproduit de façon pratiquement identique. Toutefois, au moment où le finisseur est utilisé en vis calées (couche de roulement), les défauts de grandes ondes sont censés avoir déjà été éliminés.

3.4 Le transport de l'enrobé et l'alimentation du finisseur

Le transport des enrobés est effectué par camion. Au Québec la pratique courante est de déverser directement le chargement dans la benne réceptrice du finisseur. Toutefois, il est reconnu que cette pratique entraîne des difficultés de mise en œuvre particulièrement dans le domaine de la compacité et également sur la qualité de l'uni.

Afin de palier à ces problèmes, l'utilisation d'un véhicule de transfert mobile (VTM) est recommandé. Un tel véhicule favorise l'uniformité des caractéristiques de maniabilité de l'enrobé et élimine le contact avec les camions de livraison ; ce qui assure un meilleur uni final.

3.5 Compactage

Les travaux de compactage derrière le finisseur peuvent détériorer l'uni principalement lorsque le tassement de la couche, sous l'action des compacteurs, est importante ou lorsque la maniabilité de l'enrobé est élevée. Toutefois, la détérioration de l'uni peut être limitée si le choix des engins et leurs conditions d'emploi sont respectés.

3.6 L'obtention d'un bon uni

Du point de vue pratique, l'obtention d'un bon uni peut être relié à plusieurs aspects lors de l'exécution des travaux. Ainsi, les conditions de chantier, le choix des équipements et le type de guidage, entre autres, peuvent jouer un rôle dans l'obtention d'un bon uni final.

De plus, pour atteindre un bon uni final, il est nécessaire de connaître l'état initial de l'uni et son évolution à travers les couches installées de façon à corriger rapidement des défauts qui ne pourront plus être corrigés sur les couches supérieures. C'est le cas des constructions neuves. Ainsi, sur celles-ci, le Guide technique pour l'obtention d'un bon uni de la circulaire française recommande d'obtenir les caractéristiques suivantes :

- en grandes ondes (GO) lors de la réalisation des couches de forme et d'assise;
- en moyennes ondes (MO) lors de la réalisation des couches de base et de liaison;
- en petites ondes (PO) lors de la réalisation des couches de liaison et de roulement.

Pour ce faire, il est important de penser en fonction de l'uni à la mise en œuvre de chaque couche. Cela implique l'utilisation des bons équipements, avec les systèmes de guidages appropriés. De plus, cela implique le contrôle de l'uni à toutes les couches installées et l'ajustement aux méthodes mise en œuvre si des défauts sont présents.

Pour encadrer tous les travaux de construction neuve, réhabilitation ou entretien, la circulaire française inclut des notes intermédiaires à atteindre sur chaque couche afin d'obtenir les seuils d'acceptation à la couche finale. Elle présente aussi des ateliers destinés à obtenir les gains normaux d'uni entre les couches et d'autres ateliers destinés à récupérer le déficit d'uni entre les couches. Dans la vaste majorité des cas, ces ateliers sont disponibles au Québec mais, dans certains cas, leurs quantités sont limitées dans le parc d'équipement québécois. C'est le cas du véhicule de transfert mobile (VTM).

De façon générale, les aspects suivants concourent à l'obtention d'un bon uni et doivent donc être favorisés pour utilisation au Québec.

3.6.1 Les conditions de chantier

Les conditions de chantier influencent la qualité de l'uni. Ainsi, pour assurer le meilleur uni possible, certaines conditions doivent être remplies. À ce titre, le guide français présente quatre conditions de chantier défavorables à l'obtention d'un bon uni :

- la réalisation des travaux sous circulation ou de nuit;
- le nombre important de points singuliers comme les raccordements à des altimétries existantes;
- les mauvaises conditions météorologiques (température < 10 °C et présence de vent);
- la taille ou le fractionnement du chantier (le seuil est fixé à 3000 m).

3.6.2 Le choix des équipements

La composition de l'atelier à utiliser pour la réalisation des travaux est évidemment très importante. Le meilleur exemple est l'utilisation du véhicule de transfert mobile pour l'alimentation du finisseur. En effet, ce type d'alimentation permet des gains d'uni appréciables par rapport à la simple alimentation par camions. Il est d'ailleurs spécifié dans les ateliers optimisés du Guide et ce, alors que les camions sont spécifiés dans les ateliers usuels, donc une coche en-dessous.

3.6.3 Le mode de guidage

Le mode de guidage choisi pour chaque couche est très important pour l'atteinte d'un bon niveau d'uni pour cette couche. Ainsi, un mode de guidage donné n'est pas universellement bon pour toutes les applications et toutes les couches.

Par exemple, l'utilisation du finisseur en vis calée est parfaitement adapté et efficace pour la réalisation de la couche de roulement de faible épaisseur en enrobé bitumineux car il a pour effet de diminuer la présence de petites ondes. Par contre, ce mode de guidage n'est pas efficace pour corriger les moyennes ondes. Il ne doit donc pas être utilisé pour la couche de liaison ou la couche de base. Pour celles-ci, les modes de guidages par poutres plus longues que 12 mètres, sur fil ou au laser seront plus efficaces. Enfin, pour la correction des grandes ondes sur les couches d'infrastructure, sous-fondation ou fondation, la niveleuse guidée au laser ou sur fils sera plus efficace par opposition à l'absence de guidage.

Il y a donc un mode de guidage relié à chaque équipement et adapté à la réalisation de chaque couche qui permettra, chaque couche à sa manière, de concourir à l'obtention du meilleur uni possible par intervention sur des domaines d'ondes différents. Le Guide technique de la circulaire française est d'ailleurs très exhaustif sur les ateliers à utiliser pour chaque cas.

4.0 FAISABILITÉ DE L'IMPLANTATION AU QUÉBEC D'UNE TELLE CLAUSE D'UNI

Selon les éléments mis à jour dans le texte, l'implantation au Québec d'une clause d'uni du même type que celle qui est présentement en vigueur en France nécessitera plusieurs ajustements et adaptations des façons de faire et des outils d'encadrement. La présente section établit une liste de ces principaux aspects.

4.1 Abandon de l'IRI et formation par rapport à la notation en bandes d'ondes

Étant données ses limitations, l'IRI ne pourra plus être utilisé pour fin d'acceptation des nouveaux pavages. Comme cet indicateur est très répandu en Amérique du Nord et bien connu au Québec, le passage à la notation par bandes d'ondes devra faire l'objet d'un encadrement spécial et de formations auprès du MTQ, des concepteurs, entrepreneurs et laboratoires d'expertises. Cela sera nécessaire pour que tous les intervenants aux projets soient performants dans l'application de la clause d'uni.

Cet aspect n'empêche pas l'utilisation de l'IRI à des fins de gestion des chaussées de niveau réseau car cet indicateur est tout à fait adéquat pour renseigner sur le confort au roulement ressenti par les usagers de la route, tous domaines d'ondes confondus.

4.2 Sensibilisation des entrepreneurs à l'obtention du meilleur uni possible

Pour s'assurer des meilleurs résultats possibles, il est important de sensibiliser les entrepreneurs aux conséquences de tous leurs travaux, toutes couches confondues, sur l'état de l'uni final. Cette sensibilisation pourrait être faite via de la formation sur les modes de transports, les équipements et les modes de guidage à utiliser sur chaque couche pour avoir de meilleurs résultats sur l'uni final.

Présentement, il y a plusieurs disparités entre les entrepreneurs québécois quant aux méthodes de mise en oeuvre. Cette sensibilisation permettra d'uniformiser les pratiques qui concourent à l'obtention des meilleurs unis. On évitera, par exemple, l'utilisation de systèmes de guidage pour la mise en oeuvre de la couche de roulement; façon de faire qui est présentement utilisée au Québec par certains entrepreneurs et qui est contre-indiquée.

4.3 Instauration d'un guide technique

Un guide technique s'inspirant de celui de la circulaire française pourrait être instauré au Québec. Ce guide technique proposerait des ateliers de mise en oeuvre de chaque type de couche et ce, dans le but d'outiller les entrepreneurs pour effectuer les travaux de façon à obtenir les meilleurs unis.

Le MTQ devra cependant être prudent dans l'instauration d'un tel guide. En effet, la production de celui-ci implique qu'il y a suggestion à propos des méthodes de mise en oeuvre; ce qui peut impliquer une certaine responsabilité du donneur d'ouvrage quant aux travaux de l'entrepreneur. Il faudrait en effet éviter qu'un entrepreneur qui ne satisfait pas aux exigences d'uni et qui a fait exactement ce qui est proposé par le guide en rejette le blâme sur le MTQ en disant : « J'ai fait tout ce qui était proposé par le MTQ et je n'atteint pas les spécifications. Cela est la responsabilité du MTQ ».

Une façon de contourner ce problème serait qu'un organisme indépendant soit chargé du développement d'un tel guide.

4.4 Ajustements au C.C.D.G.

Le C.C.D.G. actuel renferme plusieurs exigences reliées à l'uni qui, bien que justifiables, ne vont pas assez loin pour l'améliorer dans tous les domaines d'ondes. Par exemple, la clause 13.1.4 du C.C.D.G. exige que le profil final de la fondation avant recouvrement ne doit pas varier de plus de 10 mm par rapport au profil exigé (vérifié par piquetage) et qu'aucune irrégularité ou dépression ne doit excéder 10 mm dans 3 mètres (vérifié avec la règle de 3 m). Ces exigences ne permettent pas de faire ressortir les plus grandes ondes qui peuvent être présentes et corrigées lors de la mise en œuvre de cette couche.

Pour être efficace dans le contrôle de l'uni, le C.C.D.G. serait un ouvrage de référence intéressant pour inclure des valeurs intermédiaires d'uni à atteindre. En effet, tout comme les paramètres de compaction, l'uni devrait être vérifié à chaque couche et des seuils à atteindre pour chacune de celles-ci devraient être exigés. Cela impliquera des relevés de profilométrie à toutes les couches.

4.5 Instauration de relevés d'uni avant-travaux

Des relevés d'uni avant-travaux seront nécessaires dans le cas des projets de réhabilitation et d'entretien. En effet, comme la nouvelle clause d'uni fera intervenir les valeurs avant-travaux dans la détermination des seuils, toutes les chaussées pour lesquelles elles sont prévues devront faire l'objet de relevés de profilométrie et d'analyses par bandes d'ondes.

4.6 Besoin d'encadrement des profilomètres inertiels

Les points 4.4 et 4.5 font état d'une utilisation accrue des profilomètres inertiels. Il en résultera un besoin d'encadrement par des procédures d'étalonnage et de classification pour satisfaire aux exigences de la notation en bandes d'ondes. Cela devra inévitablement être effectué par le MTQ.

4.7 Statut sur les clauses contractuelles

Le MTQ devra statuer sur les clauses contractuelles associées à la nouvelle clause d'uni. Ainsi, les clauses en vigueur en France font intervenir des pénalités et des obligations de réfections alors qu'aucune bonification n'est prévue en aucun cas. Au Québec, la présente clause d'uni fait intervenir des bonis pour bons unis, des pénalités pour mauvais unis et l'obligation de réfection pour de très mauvais unis. Selon ce principe, il y a donc une différence en ce qui a trait à la possibilité de bonification.

Il est évident que les entrepreneurs doivent avoir un intérêt financier à réaliser des chaussées avec un bon uni. Les clauses contractuelles devront donc les inciter en ce sens; que ce soit par une bonification intéressante au bon résultat, une pénalité importante ou une obligation de reprise au mauvais résultat ou encore le paiement de certains équipements suivant un tarif au tonnage.

4.8 Amélioration du parc d'équipements québécois

Tel que mentionné dans la section 3.6, certains équipements sont plus difficiles à trouver dans le parc d'équipement des entrepreneurs québécois. Pour assurer une applicabilité de la nouvelle clause dans toutes les régions du Québec, ces équipements devront être disponibles en plus grand nombre afin que l'offre de services soit meilleure.

Le cas du véhicule de transfert mobile est un bon exemple. Si aucun entrepreneur ne peut offrir le service dans une région donnée, l'atelier optimisé qui l'implique n'y sera pas possible.

5.0 CONCLUSION ET AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

En raison des indicateurs utilisés, des exigences spécifiées et des moyens de mise en œuvre proposés, la clause d'uni française est plus efficace que la clause québécoise pour l'obtention d'unis de qualité sur les nouvelles couches de roulement.

Selon la première phase de l'étude, la clause d'uni française peut donc être adaptée aux conditions québécoises. Cette adaptation à notre contexte nécessitera cependant plusieurs travaux d'ajustement et le changement de plusieurs façons de faire bien implantées dans le domaine de la construction, la réhabilitation et l'entretien des chaussées au Québec. Tant le MTQ, les entrepreneurs, les concepteurs et les laboratoires de contrôle seront donc touchés par les changements occasionnés par cette nouvelle approche.

Dans le contexte d'une possible migration vers les exigences d'une clause par bandes d'ondes, les aspects généraux suivants sont proposés pour la poursuite du projet de recherche. L'annexe 2 est d'ailleurs consacrée à notre proposition détaillée du contenu des étapes futures au présent projet de recherche.

Ainsi, avant de procéder à la migration vers une clause par bandes d'ondes, il est nécessaire d'expérimenter l'utilisation de la notation en bandes d'ondes dans le cadre de projets pilotes. En effet, l'utilisation de celle-ci, à petite échelle, dans le cadre d'études avant-projet, de la réalisation des projets et du suivi de leurs performances permettrait, dans un premier temps, de cumuler une grande expérience d'utilisation prioritairement au passage vers des clauses contractuelles d'acceptation de nouveaux pavages. Le but principal de cette première étape serait donc l'amélioration de la compréhension de la notation en bandes d'ondes par la cueillette et l'analyse de données dans des projets précis et documentés.

En détail, il serait profitable d'introduire la notation en bandes d'ondes dès le choix du type d'intervention à réaliser dans le cadre de projets. Sur ces mêmes projets, il serait aussi important d'utiliser la notation en bandes d'ondes lors de la mise en œuvre, soit dans le cadre de l'utilisation de valeurs intermédiaires et d'acceptation. Enfin, la notation en bandes d'ondes serait utilisée lors du suivi de performance des travaux dans le temps.

À toutes les phases de ces projets, la notation en bandes d'ondes serait utilisée en parallèle avec l'IRI pour établir les correspondances nécessaires à leur compréhension et leur acceptation par tous. Bref, il s'agirait d'utiliser suffisamment la notation en bandes d'ondes dans le cadre de projets pour que tous se familiarisent avec la note et les valeurs qu'elle peut prendre.

Cette étape préliminaire pourrait s'échelonner sur quelques années. Elle faciliterait grandement la réalisation de l'étape suivante, soit la migration vers une clause contractuelle d'uni faisant intervenir la notation en bandes d'ondes pour l'acceptation de nouveaux pavages. Lors de cette deuxième étape, les résultats de la première étape permettraient de caler plus facilement les exigences françaises au contexte québécois et ce, en faisant intervenir des expériences réelles et non pas des considérations théoriques.

De plus, suite à la première étape plus technique, le MTQ pourra se concentrer sur les clauses contractuelles lors de la deuxième étape. Il sera alors important de valider le mode de bonification et/ou de pénalité et/ou de réfection à utiliser dans la nouvelle clause d'uni. Il s'agit principalement de s'assurer qu'il y ait des incitatifs monétaires importants à l'obtention du meilleur uni possible.

L'éventuelle migration vers une clause d'uni de type française au Québec passe donc par deux étapes distinctes. La première, plus technique qu'administrative, consiste en l'application de la notation en bandes d'ondes dans le cadre de projets précis et documentés afin que tous puissent se familiariser avec celle-ci. La deuxième, plus administrative que technique, consiste à élaborer les caractéristiques contractuelles de la nouvelle clause d'uni basée sur les aspects techniques mis à jour dans la première étape.

Cette clause d'uni ferait intervenir les notes en bandes d'ondes au lieu de l'IRI. Par contre, si le milieu est rébarbatif à l'abandon de l'IRI, il serait aussi possible de développer une approche québécoise d'analyse de l'IRI par bandes d'ondes. Un texte à ce sujet est d'ailleurs présenté à l'annexe 3. Cet aspect n'a pas été inclus dans le présent rapport car il ne s'agissait pas d'un projet de recherche destiné au développement d'indicateurs mais bien d'un projet d'adaptation d'indicateurs déjà existants. Au besoin, si telle est la volonté du MTQ, cet aspect pourra cependant faire l'objet de recherches futures.

RÉFÉRENCES

Références bibliographiques

AASHTO, 2002. *Standard practice for operating inertial profilers and evaluating pavement profiles*, PP 52-02.

ASTM, 2004. *Standard test method for measuring the longitudinal profile of traveled surfaces with an accelerometer established inertial profiling reference*, E950-98.

Bonnot, J., Boulet, M., 1987. *Le point de vue du LCPC sur les résultats de l'IRRE concernant l'analyseur de profil en long*, Bulletin de liaison du LCPC n° 147, Janvier-Février, Réf. 3138, pp 83-96.

Comité français pour les techniques routières, 2001a. *La nouvelle circulaire «uni» de la direction des routes*, CFTR – info n° 2, Janvier, 4 pages.

Comité français pour les techniques routières, 2001b. *Identification des défauts d'uni des chaussées lors de leur mise en œuvre*, CFTR – info n° 3, Février, 8 pages.

Comité français pour les techniques routières, 2004. *Premier bilan de l'application des nouvelles circulaires de la direction des routes sur l'uni longitudinal et l'adhérence des chaussées*, CFTR – info n° 8, Septembre, 4 pages.

Delanne, Y., Pereira, P. 2000. *Analyse de la relation entre l'uni et la qualité d'usage des routes – Application à la fixation de spécifications pour les travaux neufs et à la définition de classes d'uni pour la gestion et l'entretien*, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 228, Septembre – Octobre, Réf. 4290, pp 3-20.

Delanne, Y., 2001. *La circulaire DR 2000-36 – Pourquoi une nouvelle circulaire, quel est son fondement ?* Revue générale des routes (RGRA), Paris, n° 792, Février, pp 38-40.

Dorchies, P.T. 2000. *Les enrobés bitumineux - GCI-718 - Chapitre IX - Mise en oeuvre*, Notes de cours, Université de Sherbrooke.

Froissard, C., 2001. *Guidage d'une niveleuse et d'un finisseur – Évolution d'un système par station robotisée vers un procédé par GPS*, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur E.S.G.T., École supérieure des géomètres et topographes et COLAS, France, 64 pages.

Gallenne, M.L., Peybernard, J. 1995. *Qualité d'uni des couches de roulement – Résultats d'enquête de 1991 à 1993*, Bulletin de liaison du LCPC n° 199, Septembre-Octobre, Réf. 3996, pp 3-18.

Gallenne, M.L., 2002. *Mise en œuvre au finisseur*. Laboratoire central des ponts et chaussées, France, 133 pages.

Gillespie, T.D., Sayers, M.W., Queiroz, C.A.V., 1986. *The international road roughness experiment : a basis for establishing a standard scale for road roughness measurements*, Transportation Research Record 1084, pp 76-85.

Hayhoe, G.F., 1992. *Spectral characteristics of longitudinal highway profiles as related to ride quality*, Vehicle tire pavement interface, ASTM 1164, Editor Henry/Wambold, pp 32-53.

International Cybernetics Corporation, 2002. *MDR 4080/4097 mobile data recorder - operation manual*.

International Cybernetics Corporation, 2003. *MDR accelerometer static and bounce test*.

International Cybernetics Corporation, 2003. *Specification for mobile data recording system for collecting road profile data and rut depth data for determining road roughness using the international roughness index*.

International Cybernetics Corporation, 2003. *Dessau-Soprin dual 32 KHz laser profiler – part list, drawing and schematics*.

International Cybernetics Corporation, 2004. *Calibration procedure for ICC's profiler*.

Janoff, M.S., 1982. *Pavement Roughness and Rideability*, ZA State of the art review, Transportation engineering journal of ASCE, vol. 108, n° TE6, November, pp 662-675.

Janoff, M.S., 1986. *Methodology for computing pavement ride quality from pavement roughness measurements*, Transportation research record, 1084, pp 9-17.

Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000. *Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques – Exécution et exploitation des relevés profilométriques*, Méthode d'essai n° 46, 27 pages.

Ministère des transports du Québec, Avril 2003. *Devis type des clauses d'uni de surface*. Service des chaussées, 3 pages.

Ministère des transports du Québec, 2007a. *Cahier des charges et devis généraux – Infrastructures routières – Construction et réparation*. 256 pages.

Ministère des transports du Québec, 2007b. *Guide technique sur la mise en place des enrobés bitumineux*. Version préliminaire, 55 pages.

Ministère de l'équipement, des transports et du logement de France, 2000a, *Circulaire no 2000-36 du 22 mai 2000 relative au contrôle de l'uni longitudinal des couches de roulement neuves*, Direction des routes, NOR : EQUR0010080C, 12 pages.

Ministère de l'équipement, des transports et du logement de France, 2000b, *Contrôle de l'uni longitudinal des couches de roulement neuves – Clauses contractuelles pour l'application de la circulaire no 2000-36 du 22 mai 2000*, Direction des routes, 45 pages.

Ministère de l'équipement, des transports et du logement de France, 2000c, *Contrôle de l'uni longitudinal des couches de roulement neuves – Guide technique pour l'application de la circulaire n° 2000-36 du 22 mai 2000*, Direction des routes, 17 pages.

Nick, J.B., Janoff, M.S., 1983. *Evaluation of panel rating methods for assessing pavement ride quality*, Transportation research record, 946, pp 5-13.

Sayers, M.W., Gillespie, T.D., Queiroz, C.A.V., 1986. *The international road roughness experiment – Establishing correlation and a calibration standard for measurements*, World Bank Technical Paper Number 45.

Sayers, M.W., Karamihas, S.M., 1997. *The little book of profiling - Basic information about measuring and interpreting road profiles*, University of Michigan, Transportation research institute, USA, 100 pages.

Shahin, M.Y., 1994. *Pavement management for airports, roads and parking lots*. Éditions Chapman and Hall, USA, 450 pages.

Références internet

Robert, B. 2007. *Uni longitudinal et comportement des chaussées ... à fort trafic*, http://www.lcpc.fr/ext/pdf/sem/2007_cilpc_apl.pdf, CÉTÉ de l'ouest, LCPC, France.

Office québécois de la langue française, Grand dictionnaire terminologique, http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index1024_1.asp

Annexe 1

**Définitions des termes couramment
utilisés dans la circulaire 2000-36
(1 page)**

DÉFINITIONS DES TERMES UTILISÉS COURAMMENT DANS LA CIRCULAIRE 2000-36

d'après l'Office Québécois de la Langue Française, 2008

- Couche de forme :** Couche ne faisant pas partie de la chaussée, mais située à la partie supérieure du terrassement et constituée de matériaux sélectionnés ou traités destinés à jouer le rôle du sol naturel (notamment lorsque celui-ci est impropre à supporter la chaussée).
- Couche d'assise :** Couche de fondation ou de base constituée, soit à l'aide d'un granulat sélectionné, amélioré ou traité, soit à l'aide d'un tout-venant de concassage. Ces matériaux, qui doivent satisfaire à des règles géotechniques précises, sont répandus mécaniquement, puis fortement compactés.
- Couche de base :** Couche du corps d'une chaussée souple ou semi-rigide, qui est située entre la couche de fondation et la couche de surface, et qui est destinée à résister aux contraintes engendrées par la circulation.
- Couche de liaison :** Couche de béton bitumineux assurant le lien entre la couche de base et la couche de roulement.
- Couche de roulement :** Couche superficielle de la chaussée, servant à absorber les efforts tangentiels et le cisaillement importants provoqués par la circulation dans la partie haute de la chaussée. Elle doit aussi résister à l'usure.

**Annexe 2 Proposition du contenu des étapes futures au projet
de recherche sur l'utilisation des bandes d'ondes
pour l'évaluation de l'uni au Québec
(3 pages)**

Proposition du contenu des étapes futures au projet de recherche sur l'utilisation des bandes d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec

Document produit par Nicolas Martel, ing., M.Sc. suite à la réunion MTQ / LVM-Technisol de présentation du rapport de l'étape 1 du 18 mars 2008

Tel que convenu lors de la réunion du 18 mars, il est maintenant nécessaire d'expérimenter l'utilisation de la notation en bandes d'ondes dans le cadre de projets pilotes. Ainsi, l'utilisation de celle-ci, à petite échelle, dans le cadre d'études avant-projet, de la réalisation des projets et du suivi de leurs performances permettrait, dans un premier temps, de cumuler une grande expérience d'utilisation prioritairement au passage vers des clauses contractuelles d'acceptation de pavages. Le but principal de cette étape serait donc l'amélioration de la compréhension de la notation en bandes d'ondes par la cueillette et l'analyse de données dans des projets précis et documentés.

Ainsi, il serait d'abord profitable d'introduire la notation en bandes d'ondes dès le choix du type d'intervention à réaliser dans le cadre de projets. Sur ces mêmes projets, il serait aussi important d'utiliser la notation en bandes d'ondes lors de la mise en œuvre, soit dans le cadre de l'utilisation de valeurs intermédiaires et d'acceptation. Enfin, à plus long terme, la notation en bandes d'ondes serait utilisée lors du suivi de performance des travaux dans le temps. À toutes ces phases, la notation en bandes d'ondes devrait être utilisée en parallèle avec l'IRI pour établir les correspondances nécessaires à sa compréhension et son acceptation par tous.

En détail, avec une banque de projets réels et bien documentés comprenant des relevés avant-travaux, des relevés après-travaux, des historiques de construction, des informations sur les sols supports et les matériaux, nous pourrions utiliser la notation en bandes d'ondes, toujours en parallèle avec l'IRI, pour:

1. La détermination du type d'intervention à réaliser (phase avant-projet):
 - Exemple: Chaussée avec problème de gel (profils d'hiver et d'été).
 - o La notation en bandes d'ondes pourrait d'abord permettre de conforter le choix d'une intervention en profondeur. Dans certains cas, la notation en bandes d'ondes pourrait aussi permettre d'isoler un type de problème de gel et donc, d'établir la profondeur d'intervention. Par exemple, le soulèvement au gel des fissures pourrait alors être distingué des problèmes de soulèvements différentiels du sol d'infrastructure. Le premier nécessite une intervention à faible profondeur tandis que le deuxième nécessite une intervention à plus grande profondeur.

2. La détermination des objectifs de réussite d'une intervention (phase avant-projet):
 - Exemple: Un planage-pavage occasionnera, au mieux, des notes de X et ce, en fonction de la valeur de départ pour un projet donné
 - o Ce point a été mentionné à la réunion. En effet, il faut voir que certaines notes pourraient être impossibles à atteindre avec un type d'intervention donnée. Ce faisant, il serait extrêmement intéressant de sortir un tableau des valeurs atteignables en fonction des valeurs de départ et de leur contenu en bandes ondes. Ce tableau serait destiné aux responsables de la détermination des types d'intervention et des clauses contractuelles. Il pourrait contenir le type d'information suivante:
 - Un projet avec un IRI avant-travaux de 3.5 m/km et un PO = 5/10, un MO = 5/10 et un GO = 4/10 (valeurs fictives) ne pourra jamais atteindre un IRI inférieur à 1.4 m/km avec un seul planage-pavage.

Ce tableau permettrait l'instauration de clauses contractuelles plus réalistes en plus d'améliorer le processus de choix des interventions car les interventions occasionnant de mauvais résultats ne seraient pas choisies.
3. L'utilisation de critères intermédiaires à des étapes de construction (phase de réalisation du projet)
 - Valeurs prises avec un SurPRO sur toutes les surfaces de couches d'un chantier (Infrastructure, S-F, Fondation, Couche de base, Couche de roulement,...). Ce point pourra être difficile à réaliser en raison du fait qu'il demandera le concours de l'entrepreneur en charge des travaux. Cependant, il serait très utile d'effectuer quelques études exhaustives en ce sens car cet aspect est important dans la clause française.
4. L'acceptation de nouveaux pavages (phase après-projet)
 - Il s'agit de vérifier le contenu en bandes d'ondes de plusieurs pavages acceptés dans le cadre de la clause d'uni actuelle. Il faut alors faire le parallèle entre l'IRI obtenu et le contenu en PO, MO et GO pour acquérir une expérience de la notation française.
5. Le suivi de performance de certains projets dans le temps (phase après-projet)
 - Il s'agit là de mieux connaître l'évolution des notes en bandes d'ondes dans le temps en les mettant en relation avec d'autres défauts. Par exemple, l'incidence de l'augmentation de la fissuration sur l'IRI est relativement connue. Il s'agit maintenant de vérifier l'incidence de l'augmentation de la fissuration sur les PO et les MO. Le parallèle existant avec l'IRI permettra

de mieux connaître les nouveaux indicateurs et probablement de raffiner notre connaissance de l'incidence de la fissuration sur le confort au roulement.

Toutes ces idées pour la suite de l'étude pourraient être entreprises en même temps ou séparément selon le besoin du MTQ. LVM-Technisol est déjà impliquée dans la réalisation de relevés vidéo et de profilométrie, le contrôle qualitatif des matériaux, la géotechnique routière, la conception routière (via Dessau) et plusieurs autres aspects des projets routiers. La cueillette de données sur les différents projets pour réaliser cette phase en sera donc facilitée.

Enfin, la notation en bandes d'ondes pourrait être utilisée, en parallèle avec l'IRI, pour des expertises sur plusieurs autres points. En vrac, les points suivants pourraient ainsi faire l'objet d'études particulières dans le cadre de la prochaine étape au projet de R&D :

6. Le confort au roulement en zones urbaines
7. L'état du confort au roulement au droit des ponceaux
8. Le profil des chaussées de béton
9. Le profil des chaussées sur structures.

Ces aspects nous permettraient aussi de se forger une expérience accrue d'utilisation de la notation en bandes d'ondes.

**Annexe 3 Discussion et suggestions pour le développement
d'une approche québécoise alternative
d'évaluation de l'uni des chaussées sur
le principe des bandes d'ondes
(4 pages)**

Discussion et suggestions pour le développement d'une approche québécoise alternative d'évaluation de l'uni des chaussées sur le principe des bandes d'ondes

Document produit par Guy Doré, ing. Ph. D. le 30 mars 2008

Tel que décrit dans le rapport, l'IRI est un indicateur d'uni qui traduit très bien le confort au roulement perçu par l'utilisateur de la route. Il est très bien adapté et très facile d'utilisation pour la gestion des chaussées et pour l'évaluation de chaussées existantes. L'uni, quantifié par l'IRI selon les procédures reconnues, a cependant d'importantes limitations pour des applications telles que l'acceptation des travaux de pavage et l'analyse approfondie d'une chaussée en vue de sa réhabilitation.

Tel que décrit dans le rapport, l'approche française d'évaluation des chaussées sur la base de la note par bande d'onde offre de très nombreux avantages pour ce type d'analyse approfondie de l'uni des chaussées. Elle comporte toutefois également certaines limitations. La principale limitation est reliée au fait que la « note de bandes d'ondes » est obtenue à partir d'une mesure de l'énergie associée aux déformations appartenant à un domaine de longueur d'onde déterminé. Or, le fait qu'un profil soit fortement affecté par des ondes d'une longueur d'onde donnée ne signifie pas nécessairement que l'utilisateur sera affecté par ces ondes. Ainsi, par exemple, une chaussée affectée par des déformations ayant une longueur d'ondes de 4 m pourrait recevoir une mauvaise note pour les moyennes ondes alors que ces ondes n'affectent que très peu le confort à l'utilisateur. Les véhicules automobile sont, en effet, construits pour atténuer les ondes dans le voisinage des fréquences de 5 Hz (ce qui correspond à des longueurs d'onde de 4 m pour un véhicule se déplaçant à 80km/h) en raison de la forte incidence de ces fréquences sur le corps humain. Conçues pour atténuer les fréquences de 5 Hz, les suspensions tendent par ailleurs à amplifier les fréquences de 2 et de 12 Hz. Il est à noter que les fréquences de 5 Hz (atténuées) et celles de 2 Hz (amplifiée) se retrouvent toutes deux dans la catégorie des moyennes ondes. Une approche basée sur la puissance ou l'énergie du signal (profil) ne peut faire ressortir l'effet des fréquences sur le comportement des véhicules et sur la perception des usagers.

Approche proposée

L'approche préconisée consisterait à adapter la méthode française à la technologie et à l'expérience nord-américaine en développant une note de bande d'onde sur la base de la mesure de l'IRI. Cette approche comporterait les étapes suivantes :

1. Le profil de la chaussée est filtré par bandes passantes de façon à obtenir les bandes d'ondes correspondant à celles prescrites dans la norme française. On obtiendrait ainsi le profil total ainsi que les profils filtrés par bandes d'ondes : P_{TOT} , P_{PO} , P_{MO} , et P_{GO} .
2. L'IRI serait ensuite calculé sur le profil original ainsi que sur chacun de ces profils filtrés pour la longueur des segments proposés dans la norme française. On obtiendrait ainsi les valeurs suivantes : IRI_{TOT} (100 m), IRI_{PO} (20 m), IRI_{MO} (100 m) et IRI_{GO} (200 m).
3. L'analyse de l'IRI total combiné à l'analyse des IRI par bandes d'ondes permettrait ainsi le diagnostic des chaussées existantes, le suivi détaillé lors de l'exécution des travaux et l'acceptation des travaux selon des lignes directrices adaptées aux pratiques et conditions qui prévalent au Québec.

Le modèle du quart de véhicule, qui est bâti selon les caractéristiques d'une suspension de véhicule, agit de la même façon en atténuant certaines longueurs d'ondes et en en amplifiant d'autres (figure 3). Le développement de notes de bandes d'ondes exprimées en IRI aurait donc l'avantage de prendre en considération l'effet de différentes longueurs d'ondes sur le comportement des véhicules et sur la perception des usagers. Une telle approche aurait également comme avantage d'être compatible avec l'analyse de l'uni faite dans le cadre des activités de gestion des chaussées qui continueront vraisemblablement à utiliser l'IRI comme indicateur principal de qualité de roulement. Les développements réalisés pour l'implantation d'une analyse de l'IRI par bandes d'ondes au niveau du projet pourront ainsi éventuellement aider à l'analyse de l'information à l'échelle du réseau en permettant, par exemple, la réalisation d'un diagnostic sommaire des causes de dégradations.

Développement d'une approche québécoise d'analyse de l'IRI par bandes d'ondes

Plusieurs travaux de recherche ont déjà permis de développer une certaine expérience sur l'utilisation de l'IRI par bandes d'ondes au Québec. Ainsi, Flamand (Doré et coll., 2001a) a utilisé cette approche pour analyser les profils des chaussées du programme C-LTPP et associer les IRI par bandes d'ondes aux modes de dégradation des chaussées. Flamand (Doré et coll., 2001b) et Fradette (Fradette et coll., 2005) ont également utilisé cette approche pour l'étude de la dégradation hivernale de l'uni des chaussées au Québec. Finalement, Vaillancourt (Vaillancourt et coll., 2003) a étudié l'incidence des caractéristiques et de la variabilité du sol d'infrastructure sur l'IRI calculé sur différentes bandes d'ondes. Ces travaux pourraient servir de point de départ pour le développement de la nouvelle approche du calcul de l'IRI par bandes d'ondes.

Les travaux requis pour le développement de cette nouvelle approche devraient s'échelonner sur une période approximative de trois ans et comporter les activités suivantes :

1. Élaborer une version préliminaire de modèle d'analyse fortement inspirée de l'approche par bande d'onde de la méthode française et des travaux réalisés au Québec sur l'utilisation de l'IRI calculé par bandes d'ondes.
2. Appliquer le modèle d'analyse à une douzaine de sites bien documentés ayant fait l'objet d'études de réfection (analyse impliquant des données probablement disponibles sur des sites étudiés par le MTQ).
3. Appliquer le modèle d'analyse à une douzaine de chantiers de construction et de réfection (analyse impliquant la réalisation de relevés d'uni à toutes les étapes de construction ou de réfection d'une route).
4. Analyse de la relation entre les valeurs d'IRI par bandes d'ondes et les causes dominantes de dégradation des chaussées à refaire.
5. Analyse de la relation entre la réduction des valeurs d'IRI entre deux étapes de réalisation des chantiers et les méthodes et équipements de construction utilisés.
6. Développement d'un guide et/ou un logiciel d'analyse des IRI par bandes d'ondes pour le diagnostic des causes de dégradation d'une chaussée ainsi que pour la gestion des activités de construction avec clauses d'uni.
7. Application du guide à un nombre limité de projets pilotes au cours de la dernière année de la période de développement.

Références de l'annexe 3

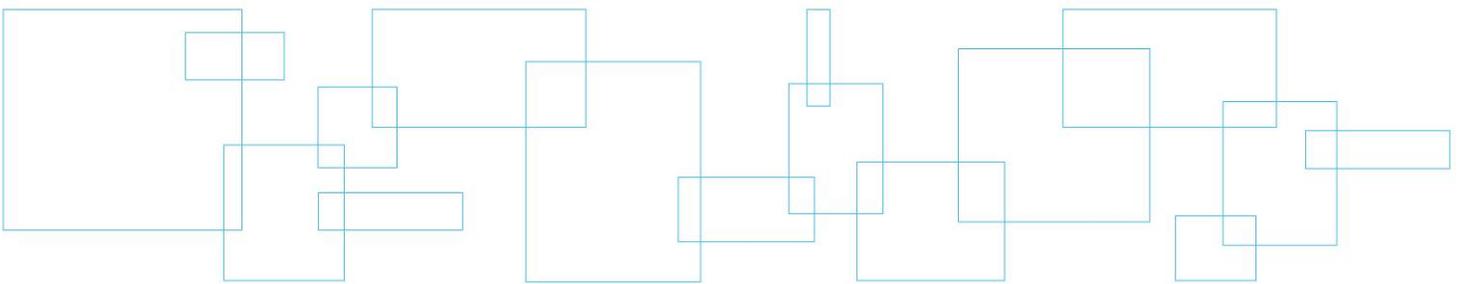
Fradette N., Doré G., Pierre P., et Hébert S., 2005 *Evolution of the pavement winter roughness*, Transportation Research Record 1913 :137-147

Vaillancourt, M., Perraton, P., Dorchies, D. et Doré, G., 2003, *Décomposition du pseudo-profil et analyse de l'Indice de Rugosité International (IRI)*, Can. J. Civ. Eng. 30: 923-933

Doré G., Flamand M., et Pierre P., 2001a, *Analysis of wavelength content of the longitudinal profiles for C-LTPP test sections*, Can. J. Civ. Eng., vol.29, no. 1 : 50-57

Doré G., Flamand M. et Tighe S., 2001b, *Prediction of winter roughness based on the analysis of subgrade soil variability*, TRR 1755 : 90-96

Annexe 9 Rapport d'étape 2
(n° LVM : 072-P015838-0120-CH-0002-00)



Ministère des Transports du Québec

Projet de recherche MTQ sur l'utilisation des bandes d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec

Rapport d'étape 2

Date : Mars 2010

V/Réf. : 4502-07-RD01 (R588.1)

N/Réf. : 072-P015838-0120-CH-0002-00

LVM
TECHNISOL

Ministère des Transports du Québec

**Projet de recherche MTQ sur l'utilisation des bandes
d'ondes pour l'évaluation de l'uni au Québec**

Rapport d'étape 2

Préparé par :



Nicolas Martel, ing., M.Sc., 120974

Chargé de projet – Gestion de chaussées

Révisé par :



Michel Parent, ing., 99322

Chargé de discipline – Gestion de chaussées

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION.....	1
2 CONTRAT PRINCIPALEMENT UTILISÉ JUSQU'À MAINTENANT.....	1
3 LES INDICATEURS.....	1
4 LA RELATION ENTRE LES INDICATEURS AVANT ET APRÈS-TRAVAUX POUR CAP SAINT-IGNACE	2
5 ESTIMATION DE L'IRI ATTENDU APRÈS-TRAVAUX.....	3
5.1 Méthode simple.....	3
5.2 Méthode détaillée.....	3
6 POURSUITE DU PROJET.....	4

Tableaux

Tableau 1 : Indicateurs utilisés	1
----------------------------------------	---

Annexes

Annexe 1	Relation entre IRI_{Global} et les IRI_{PO} , IRI_{MO} et IRI_{GO}
Annexe 2	Analyse des profils avant-travaux et après-travaux pour Cap Saint-Ignace
Annexe 3	Proposition préliminaire d'abaques d'estimation des IRI après-travaux
Annexe 4	Proposition préliminaire d'une méthodologie d'estimation de l'IRI après-travaux avec la méthode détaillée (application au cas de Cap Saint-Ignace)

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS

No de révision	Date	Description de la modification et/ou de l'émission
00	2010-03-22	Rapport d'étape 2

DISTRIBUTION

1 copie reliée + 1 pdf	Madame Isodora Hébert, ing., M.Sc.A.
------------------------	--------------------------------------

1 INTRODUCTION

Suite au rapport d'étape 1 (N/Réf. : 072-P015838-0120-CH-0001-00) contenant la revue de littérature reliée au concept de longueur d'onde, à la clause d'uni française et à la mise en œuvre des matériaux de chaussée, il a été convenu avec le MTQ que l'étape 2 serait affectée à la conception d'outils modélisant l'effet sur l'uni de diverses interventions. Pour le MTQ, il était important que ces outils puissent pouvoir, dans un premier temps, être utilisés dans un contexte d'expertise avant de penser les utiliser contractuellement. C'est dans cette optique que l'étape 2 a été amorcée.

2 CONTRAT PRINCIPALEMENT UTILISÉ JUSQU'À MAINTENANT

Les données principalement utilisées à ce jour ont été relevées avant et après l'intervention sur l'autoroute 20 à Cap Saint-Ignace dans le cadre du contrat 6603-08-0617.

Ce contrat consistait en une couche de correction de 20 mm (taux de pose de 50 kg/m²) suivi d'une couche d'usure de 40 mm (taux de pose de 100 kg/m²). Selon nos informations, le VTM (véhicule de transfert mobile) a été utilisé dans ce contrat. Enfin, le contrat total analysé fait 2,2 km en direction Est pour cette autoroute constituée de deux voies, soit 4,4 km-voies au total.

Toutes les données présentées dans ce rapport d'étape 2 sont issues de ce contrat.

3 LES INDICATEURS

Comme demandé par le MTQ, il a été décidé de conserver l'IRI comme indicateur d'uni dans le cadre de ce projet de recherche. Par contre, celui-ci a été découpé selon les diverses longueurs d'ondes et ce, tel que proposé par Guy Doré à l'annexe 3 du rapport d'étape 1 dans le texte intitulé : « Discussion et suggestions pour le développement d'une approche québécoise alternative d'évaluation de l'uni des chaussées sur le principe des bandes d'ondes ».

Tableau 1 : Indicateurs utilisés

INDICATEUR	FILTRE PROVAL UTILISÉ	LONGUEUR D'ONDE MINIMALE (m)	LONGUEUR D'ONDE MAXIMALE (m)	INTERVALLE D'ABORD PROPOSÉ	INTERVALLE RETENU
IRI _{P0}	Butterworth bandpass	0,707	2,828	20	100
IRI _{M0}		2,828	11,312	400	100
IRI _{G0}		11,312	45,248	200	100
IRI _{Global}		0,707	45,248	400	100

Le tableau 1 présente les indicateurs utilisés pour mesurer l'impact des diverses longueurs d'ondes sur l'IRI. Les longueurs d'ondes utilisées sont tirées directement des longueurs d'ondes de la clause d'uni française. L'IRI_{Global} est aussi limité à ces longueurs d'ondes (entre 0,707 m et 45,248 m). Enfin, contrairement à ce qui avait été proposé, les intervalles de calculs des différents IRI ont été limités à 100 mètres. Cet intervalle fixe a été rendu nécessaire parce qu'il était important de pouvoir recalculer l'IRI_{Global} à partir des IRI_{PO}, IRI_{MO} et IRI_{GO}.

L'utilisation d'intervalles de 100 mètres pour tous les indicateurs a donc permis de déterminer une relation entre l'IRI_{Global} et les IRI_{PO}, IRI_{MO} et IRI_{GO} par régression linéaire. Les formules de la forme suivante issues des profils avant et après-travaux à Cap Saint-Ignace sont présentées à l'annexe 1.

$$IRI_{Global} = a + b \cdot IRI_{PO} + c \cdot IRI_{MO} + d \cdot IRI_{GO}$$

Il y a donc une relation entre l'IRI_{Global} et les IRI reliés aux courtes, moyennes et longues ondes. Un profil avant-travaux comporte donc une signature propre de diverses longueurs d'ondes qui mènent à l'IRI_{Global} par calcul.

4 LA RELATION ENTRE LES INDICATEURS AVANT ET APRÈS-TRAVAUX POUR CAP SAINT-IGNACE

Pour le projet de Cap Saint-Ignace, tous les indicateurs ont été aisément calculables avec le logiciel ProVAL (version 2.73) à partir des outils de filtre et de calcul des statistiques d'IRI à intervalles. La difficulté a résidé dans l'alignement des profils avant et après-travaux sur la portion de 2,2 km analysée.

Après traitement dans ProVAL, les indicateurs d'IRI_{Global} et les IRI_{PO}, IRI_{MO} et IRI_{GO} avant et après-travaux sont disponibles. Pour chaque indicateur, avant et après-travaux, les valeurs obtenues sont alors classées en ordre du plus petit au plus grand sous la forme d'une courbe de densité cumulative. Pour chaque indicateur, avant et après-travaux, une loi de Weibull de degré 3 a ensuite été utilisée pour modéliser les données classées et surtout, pouvoir calculer l'amélioration de l'IRI en tout point de la courbe de densité cumulative suite à l'intervention. Les résultats de ces opérations sont présentés à l'annexe 2.

La consultation de l'annexe 2 permet d'observer que, pour l'intervention à Cap Saint-Ignace :

- ▶ Plus l'IRI est élevé, plus l'amélioration est grande suite à l'intervention et ce, tant pour l'IRI_{Global} que les IRI_{PO}, IRI_{MO} et IRI_{GO}.
- ▶ L'amélioration reliée à l'intervention n'est pas constante pour chaque longueur d'onde. Ainsi, l'indicateur IRI_{PO} a été davantage amélioré que l'indicateur IRI_{MO}, lui-même davantage amélioré que l'indicateur IRI_{GO}.

Ces deux observations étaient prévisibles en fonction de ce qui était ressorti de la revue de littérature reliée à la clause d'uni française, et ce, étant donné le type d'intervention en surface.

5 ESTIMATION DE L'IRI ATTENDU APRÈS-TRAVAUX

La grande difficulté est ensuite d'estimer l'IRI attendu après-travaux pour ce type d'intervention, soit une couche de correction de 20 mm et une couche d'usure de 40 mm.

À ce jour, seul le projet de Cap Saint-Ignace présentait des relevés d'uni de niveau projet avant et après-travaux suffisamment précis pour permettre l'élaboration d'une méthode d'estimation de l'IRI après-travaux. Or, pour être significative, toute méthode d'estimation de l'IRI après-travaux devra être basée sur plus d'un projet. Les méthodologies d'estimation exposées dans ce document sont donc préliminaires et devront être validées par l'ajout de données provenant d'autres projets connus.

Deux méthodes d'estimation de l'IRI après-travaux issues de l'analyse détaillée du projet de Cap Saint-Ignace sont proposées ci-après. Elles sont reliées aux abaques de l'annexe 3.

5.1 MÉTHODE SIMPLE

Une première méthode, rapide, consiste simplement à estimer l' IRI_{Global} après-travaux à partir de l' IRI_{Global} avant-travaux pour une densité cumulative donnée. Pour l'utilisation de cette méthode, un abaque a été dérivé de l'abaque global de l'annexe 2. Cet abaque, placé dans le haut de l'annexe 3, fait simplement la relation entre l' IRI_{Global} avant-travaux et l' IRI_{Global} après-travaux pour le site de Cap Saint-Ignace à partir des courbes lissées de l'annexe 2. Il permet, d'un rapide coup d'œil, de déterminer, par exemple, qu'un IRI avant-travaux de 2,0 m/km devrait normalement être ramené à un peu plus de 0,7 m/km après-travaux.

Cette méthode simple se veut seulement un indicateur rapide de la valeur attendue après-travaux. Comme il a été montré que les diverses longueurs d'ondes réagissent différemment à l'intervention, il est important de comprendre que cette méthode ne permet que d'avoir une idée de l'ordre de grandeur attendu après-travaux. Pour être plus sécuritaire dans les prévisions, une méthode faisant intervenir les différentes longueurs d'ondes est nécessaire; c'est la méthode détaillée décrite ci-après.

5.2 MÉTHODE DÉTAILLÉE

La méthode détaillée fait intervenir les IRI_{PO} , IRI_{MO} et IRI_{GO} . Elle est réalisée en utilisant les trois abaques du bas de l'annexe 3. Ces trois abaques présentent, en ordonnée, le ratio de l'IRI après-travaux sur l'IRI avant-travaux, pour chacune des trois bandes d'ondes. L'IRI avant-travaux est en abscisse.

Voici deux exemples d'interprétation de ces abaques :

Pour un IRI_{PO} avant-travaux de 2,0 m/km, le ratio est de 0,25. Cela signifie que l' IRI_{PO} après-travaux est de $0,25 \times 2,0 = 0.5$ m/km.

Pour un IRI_{MO} avant-travaux de 2,0 m/km, le ratio est de 0,3. Cela signifie que l' IRI_{MO} après-travaux est de $0,3 \times 2,0 = 0.6$ m/km.

Plus le ratio est faible, plus l'intervention a amélioré l'IRI. À l'inverse, plus le ratio est élevé, moins l'intervention a amélioré l'IRI. L'utilisation d'un ratio élevé pour évaluer l'IRI après-travaux est donc sécuritaire. C'est la base de la méthodologie détaillée. Il s'agit d'utiliser un ratio sécuritaire qui, affecté à chaque bande d'onde, occasionnera un IRI_{Global} sécuritaire une fois reconstitué.

L'annexe 4 présente une proposition de méthodologie de calcul des IRI_{Global} après-travaux avec la méthode détaillée. Cette méthodologie a permis le calcul d'une courbe de densité cumulative sécuritaire pour le site de Cap Saint-Ignace.

6 POURSUITE DU PROJET

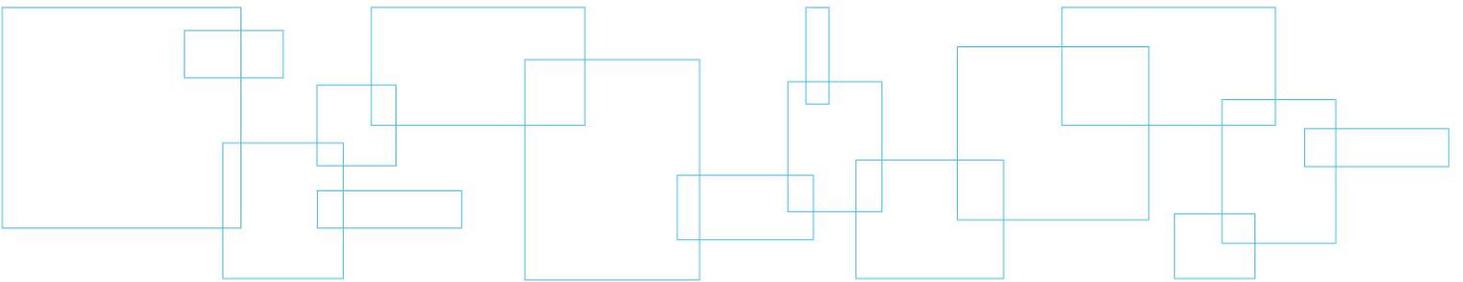
Les deux méthodes présentées plus haut doivent maintenant faire l'objet de validations avec les données provenant d'autres sites sur lesquels des interventions semblables auront été réalisées. D'autres interventions devront aussi être modélisées afin de produire des abaques différents car il est évident que chaque intervention n'influence pas de la même façon chaque bande d'onde.

Pour ces deux considérations, les méthodologies, abaques et résultats présentés dans ce document sont préliminaires et nécessiteront des validations subséquentes dans les prochains mois.

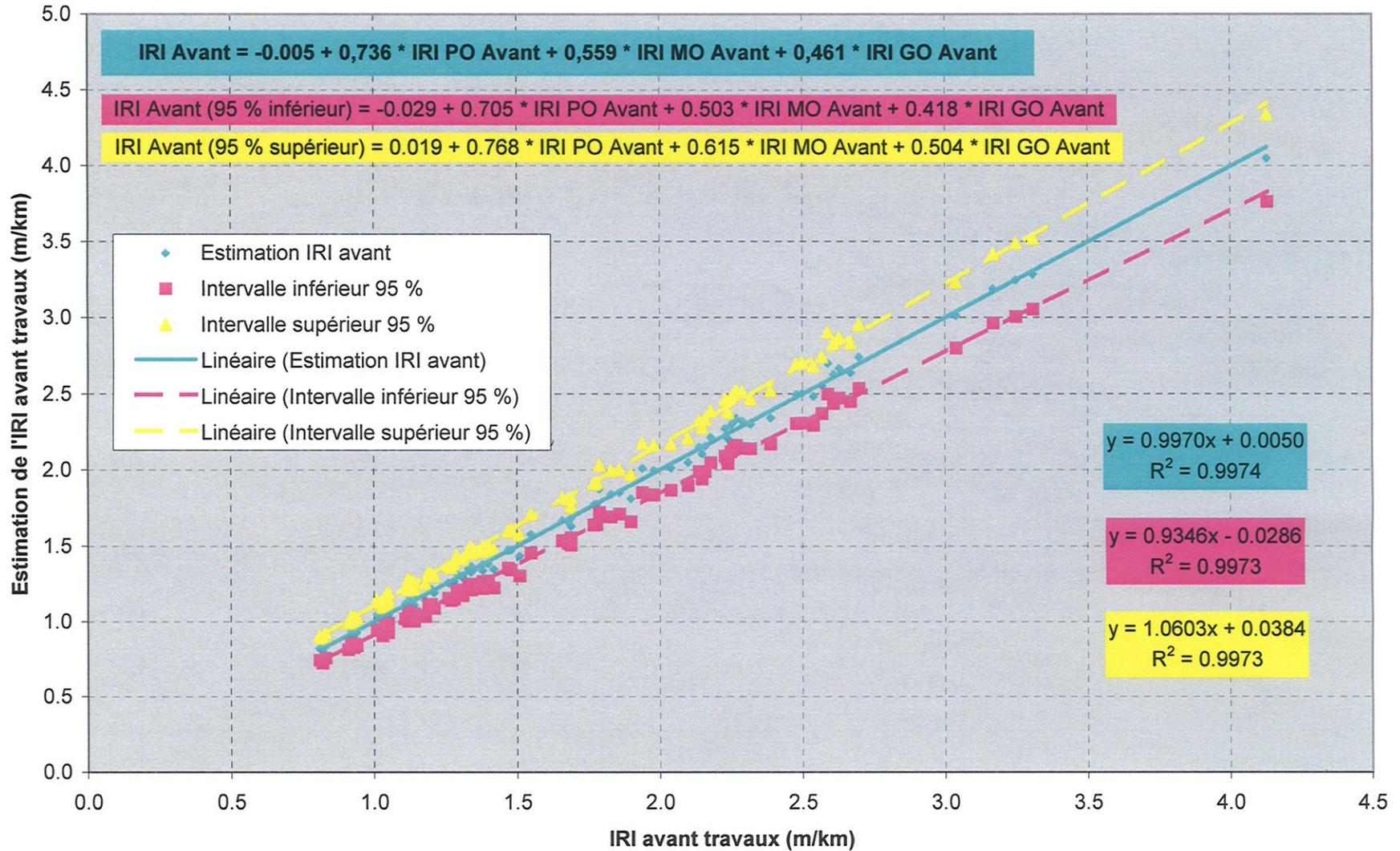
Pour poursuivre dans la confection des abaques, des relevés d'uni de niveau réseau du MTQ devront être exploités à titre de relevés avant-travaux. Le MTQ sera mis à contribution pour ce faire. Les données de clauses d'uni seront ensuite utilisées à titre de relevés après-travaux pour les projets à inclure dans les abaques. À prime abord, il est prévu qu'une quinzaine de projets contribuent de cette façon à la confection d'abaques.

Annexe 1

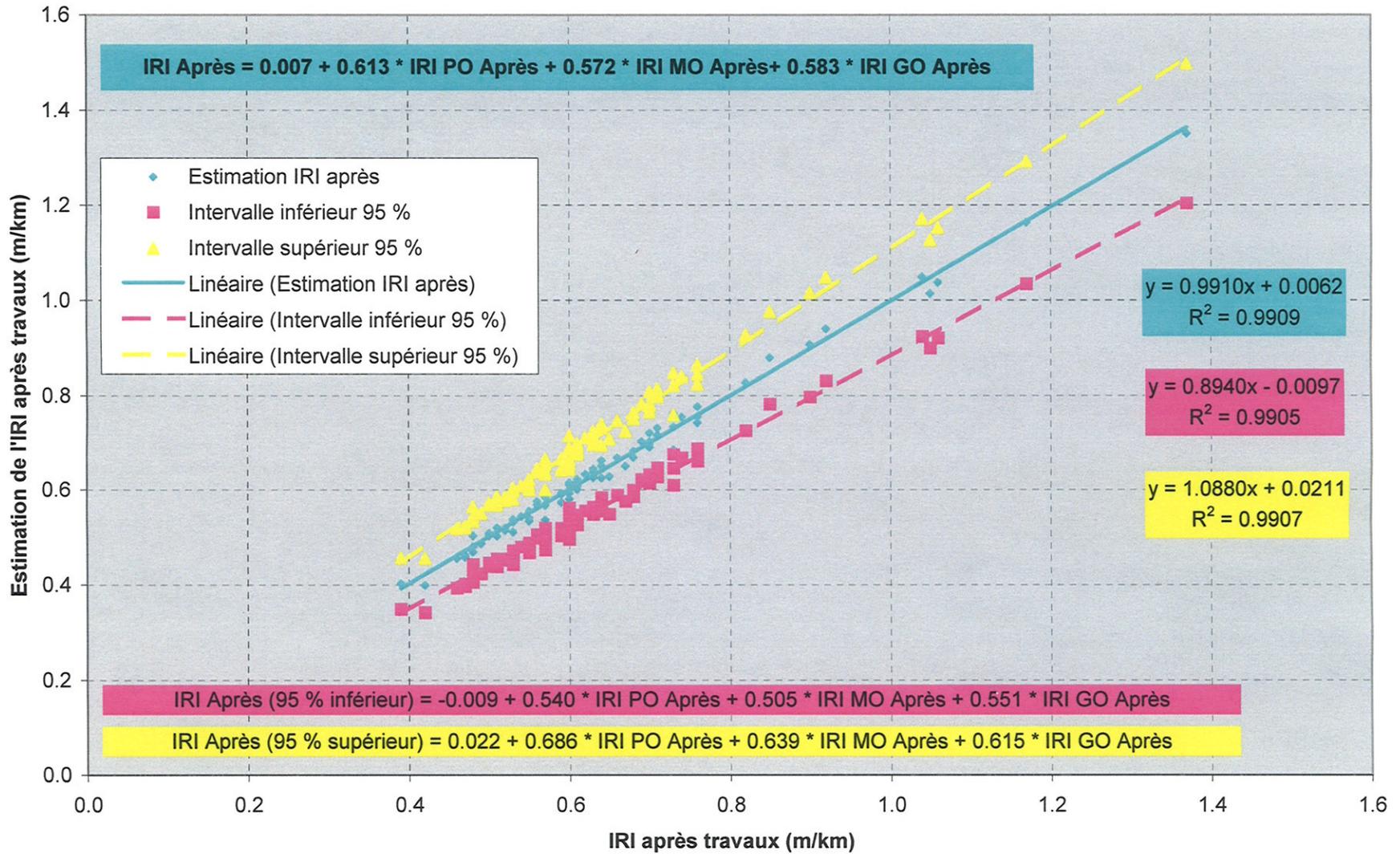
Relation entre IRI_{Global} et les IRI_{PO} , IRI_{MO} et IRI_{GO}



Estimation de l'IRI global **avant** travaux à partir de IRI PO, MO et GO

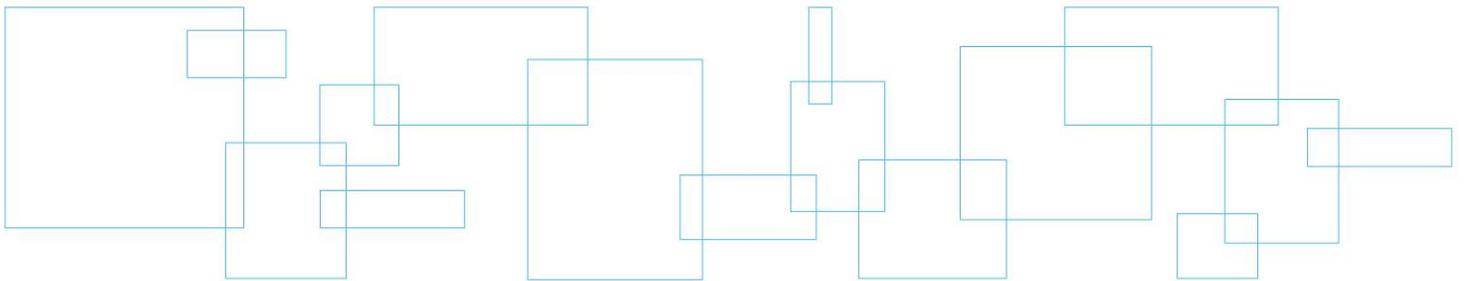


Estimation de l'IRI global après travaux à partir de IRI PO, MO et GO

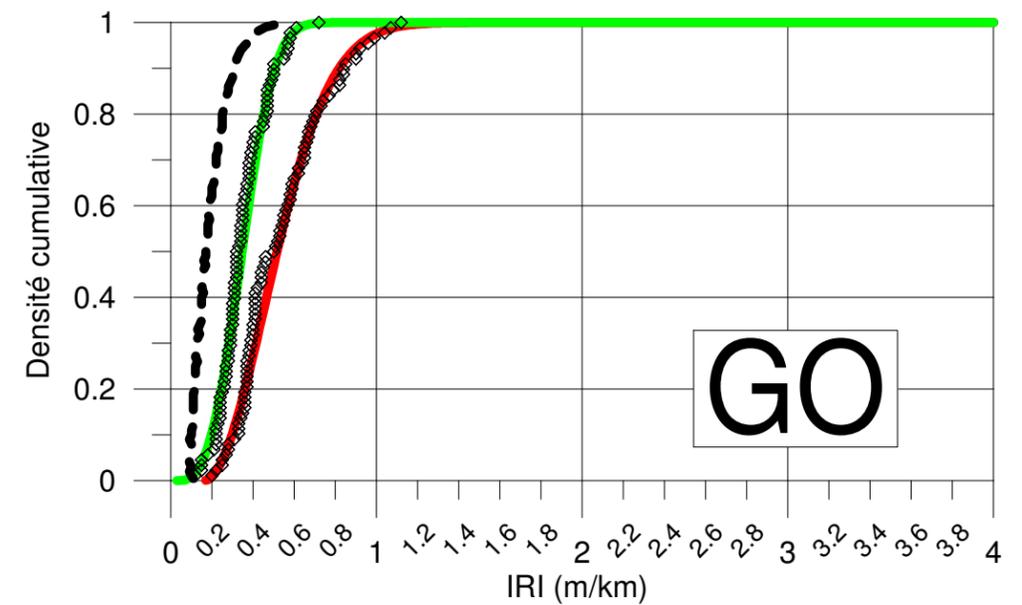
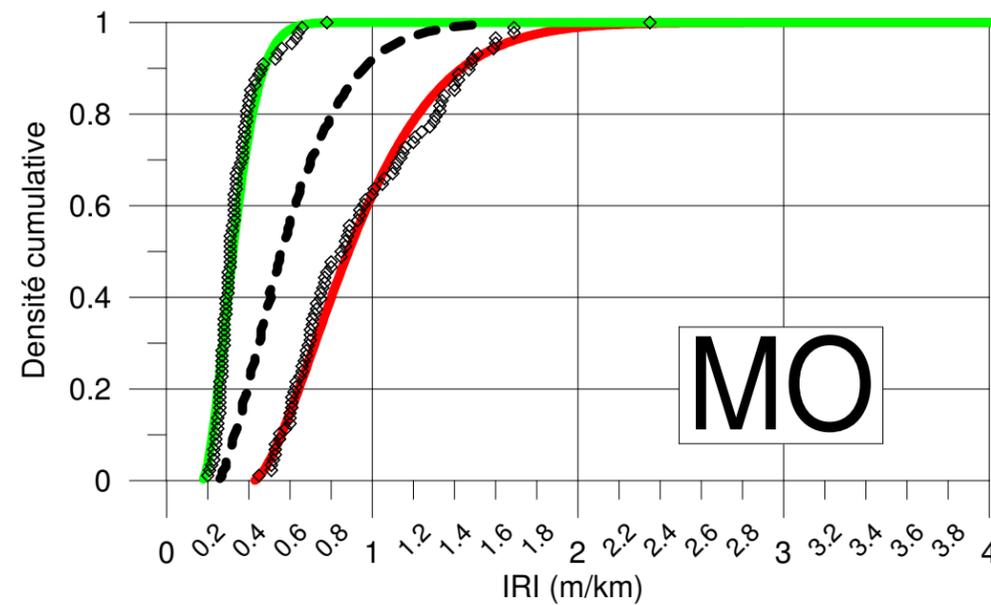
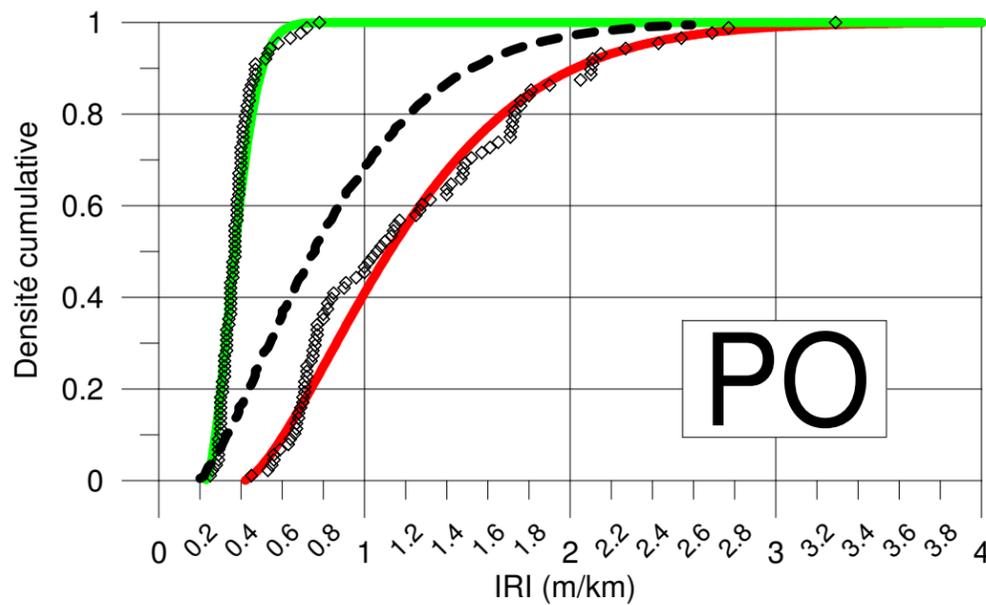
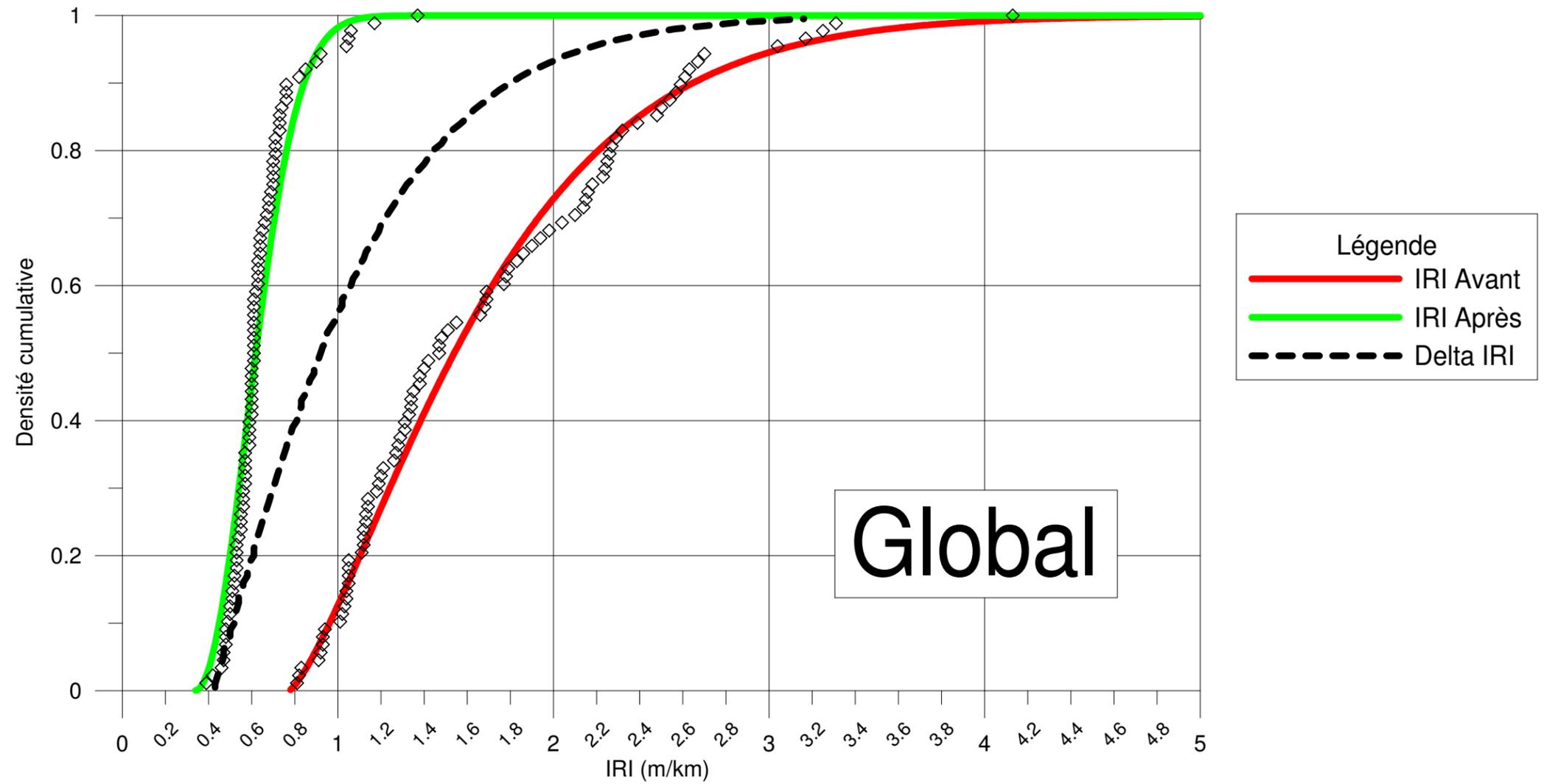


Annexe 2

Analyse des profils avant-travaux et après-travaux pour Cap Saint-Ignace

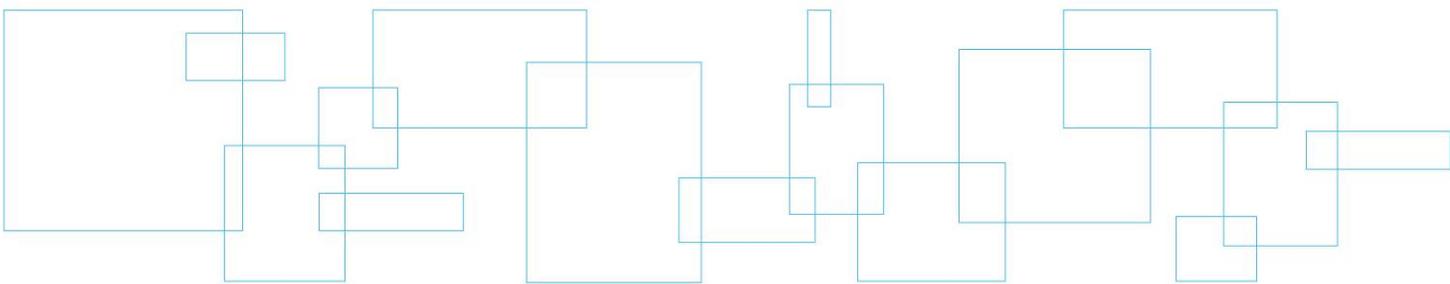


Analyse des profils avant et après-travaux (A-20 à Cap Saint-Ignace (Corr BB (20) + CU (40)))



Annexe 3

Proposition préliminaire d'abaques d'estimation des IRI après-travaux

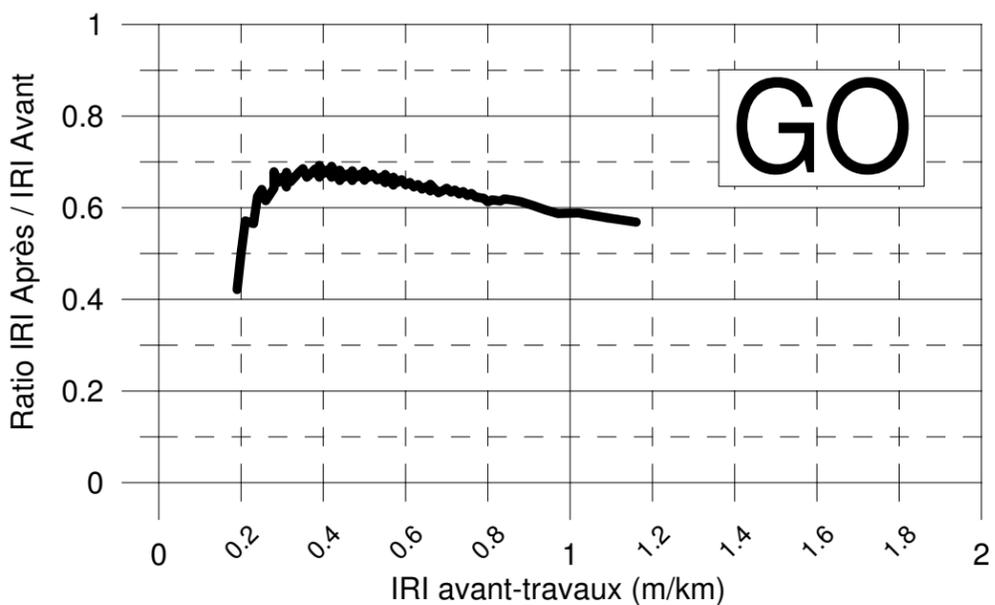
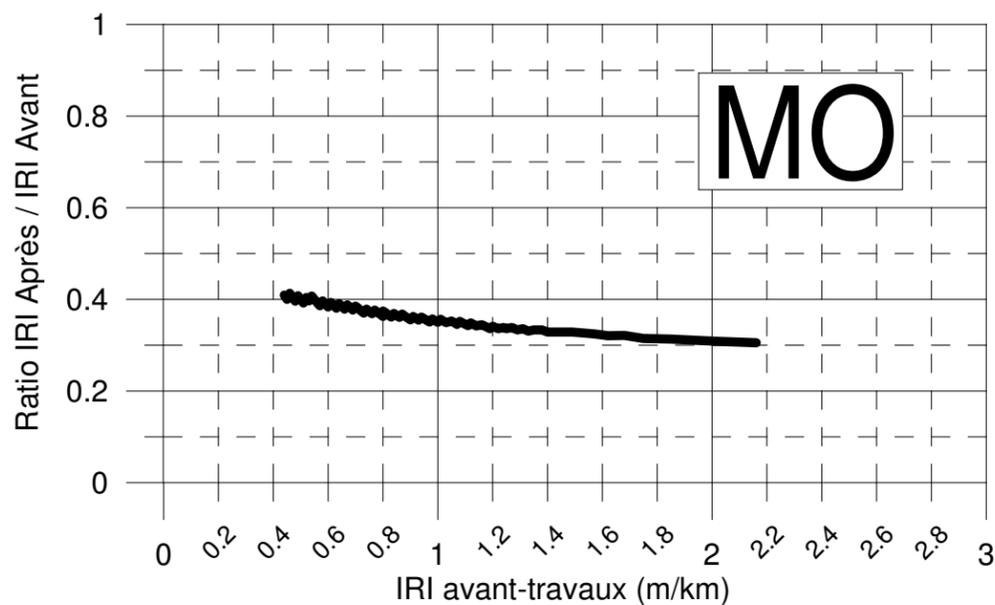
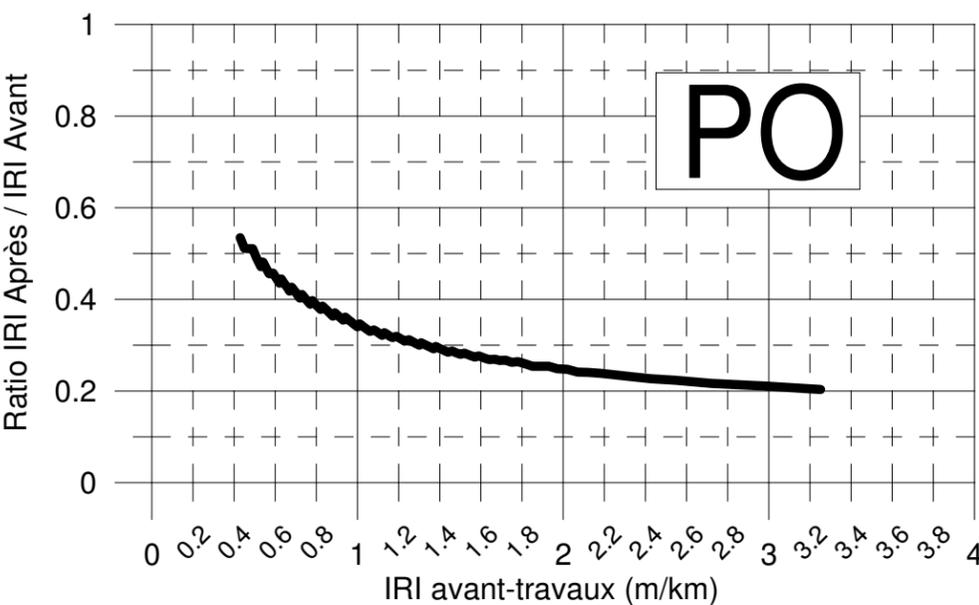
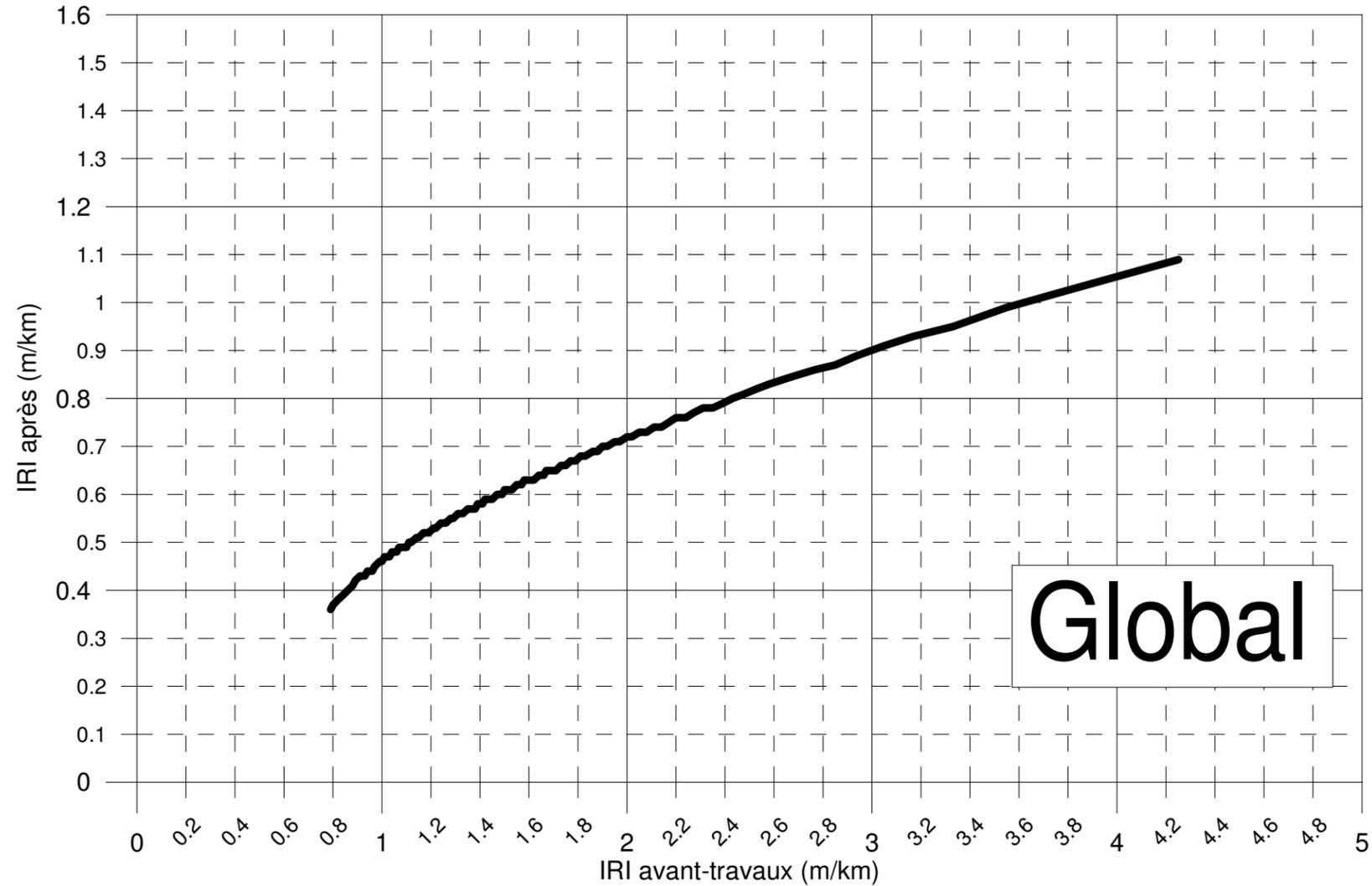


Proposition préliminaire d'abaques d'estimation des IRI après-travaux (basé sur les données de l'A-20 à Cap Saint-Ignace (Corr BB (20) + CU (40)))

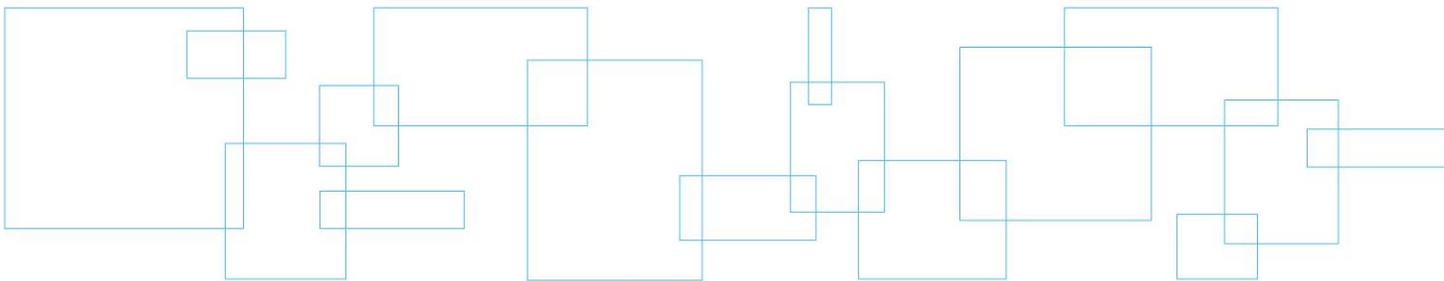
Note: Il s'agit d'une proposition de forme d'abaque.
Pour que l'abaque soit complet, plus d'un site
(donc, plus d'une courbe) devront être inclus.

Méthode simple
(abaque du haut)

Méthode détaillée
(3 abaques du bas)



**Annexe 4 Proposition préliminaire d'une méthodologie
d'estimation de l'IRI après-travaux avec
la méthode détaillée (application au
cas de Cap Saint-Ignace)**



**Proposition préliminaire d'une méthodologie d'estimation
de l'IRI après-travaux avec la méthode détaillée
(Application au cas de Cap Saint-Ignace)**

1) Avec les profils avant-travaux et après-travaux, dans ProVAL 2.73 :

- a. S'assurer de l'exactitude de l'emplacement des débuts et fins avant et après-travaux.
- b. Filtrer les profils avec un filtre Butterworth bandpass
 - a. Global : 0,707 à 45,248 m
 - b. PO : 0,707 à 2,828 m
 - c. MO : 2,828 à 11,312 m
 - d. GO : 11,312 à 45,248 m
- c. Calculer des IRI aux 100 mètres avec chacun de ces profils
 - a. IRIGlobal : 0,707 à 45,248 m
 - b. IRIPO : 0,707 à 2,828 m
 - c. IRIMO : 2,828 à 11,312 m
 - d. IRIGO : 11,312 à 45,248 m
- d. Par régression linéaire, trouver la relation entre l'IRIGlobal avant-travaux et les IRI des bandes d'ondes avant-travaux. Cette relation doit être de la forme suivante :

$$\text{IRIGlobal} = a + b \cdot \text{IRIPO} + c \cdot \text{IRIMO} + d \cdot \text{IRIGO}$$

2) Pour chaque catégorie d'IRI (Global, PO, MO, GO) :

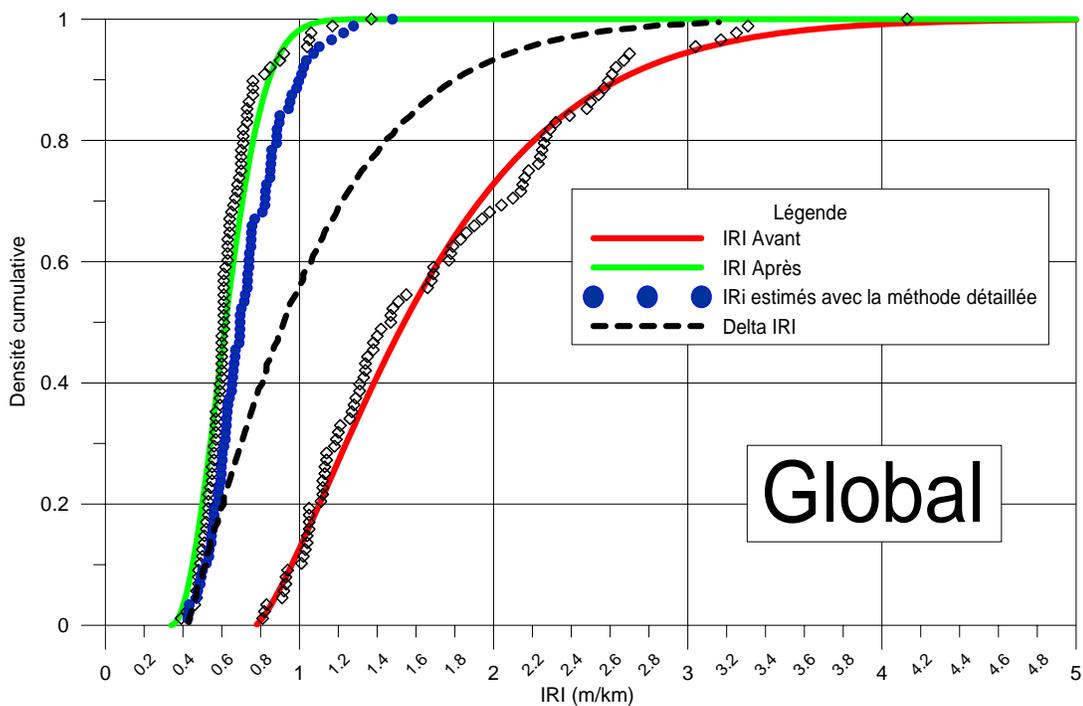
- e. Classer les données aux 100 mètres de la plus petite à la plus grande valeur
- f. Estimer les paramètres d'une loi de Weibull de degré 3
- g. Tracer des graphiques de densité cumulative (CDF) des lois de Weibull estimées
- h. Déterminer l'IRI avant-travaux relié à des densités cumulatives de 0 et 0,5 (Exemple pour Cap Saint-Ignace : $\text{IRIPO} = 1,15$ pour $\text{CDF} = 0,5$ et $\text{IRIPO} = 0,4$ pour $\text{CDF} = 0$)

3) Pour estimer l'amélioration de l'IRIPO, IRIMO et IRIGO, utiliser les abaques de l'annexe 3 :

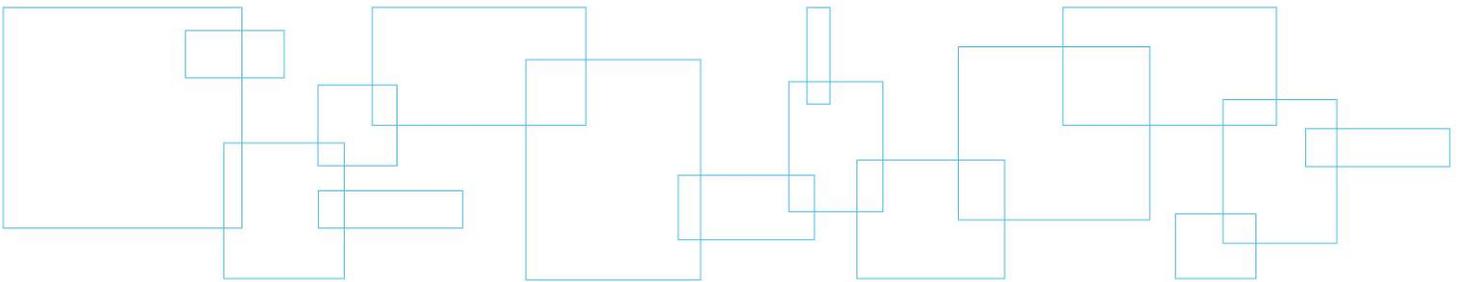
- i. Pour les PO et MO, déterminer les ratios pour les IRI avant-travaux trouvés en h
- j. Pour les GO, estimer le ratio le plus élevé (cette bande d'onde ne réagit pas de la même façon que les PO et MO)

- k. Appliquer les ratios trouvés aux IRI avant-travaux de chaque bande d'onde pour trouver les IRI après-travaux :
- Ratio pour $IRI_{CDF} > 0.5 = \text{Ratio } IRI_{CDF} = 0.5$ (Exemple pour Cap Saint-Ignace : Pour $IRIPO > 1,15$, le ratio à utiliser est de 0,32)
 - Ratio pour $IRI_{CDF} < 0.5 = \text{Ratio } IRI_{CDF} = 0$ (Exemple pour Cap Saint-Ignace : Pour $IRIPO$ entre 0,4 et 1,15, le ratio à utiliser est de 0,54)
 - Dans le cas des GO, utiliser le ratio trouvé en j pour tous les IRI.
- l. Pour chaque 100 mètres, avec les $IRIPO$, $IRIMO$ et $IRIGO$ après-travaux calculés avec les ratios (étape k), calculer l' $IRIGlobal$ résultant après travaux avec la relation calculée à l'étape d.

Note : Pour le cas de Cap Saint-Ignace, la courbe d' $IRIGlobal$ résultante après-travaux a été calculée avec cette méthode et elle est sécuritaire pratiquement en tout point (voir courbe bleue sur graphique ci-joint).



Annexe 10 Présentation Powerpoint des principaux résultats du rapport final (n° LVM : 072-P015838-0120-CH-0003-00)





Projet de recherche MTQ sur
l'utilisation des bandes d'ondes pour
l'évaluation de l'uni au Québec
(Présentation du rapport final)

Nicolas Martel, ing. M.Sc.

Suzanne St-Laurent, ing. jr



-   Lien avec le rapport d'étape 2
-   Choix des cas
-   Abaques
-   Poursuite du projet

+ Dans le rapport d'étape 2

- + Dans le rapport d'étape 2, une méthode détaillée a été proposée pour la prédiction de l'IRI après-travaux. Cette méthode faisait intervenir un abaque d'estimation des IRI après-travaux à partir des IRI PO , MO et GO avant-travaux.
- + La méthode avait été utilisée avec succès dans le cadre du projet de Cap St-Ignace (Projet de correction de 20 mm suivi d'une couche d'usure de 40 mm)
- + Il restait maintenant à ajouter des projets dans cet abaque de façon à produire des courbes de prédiction applicables à ce type d'intervention (Corr + CU (avec VTM)).
- + Deux autres abaques devaient aussi être produits et ce, pour des types d'interventions différentes.

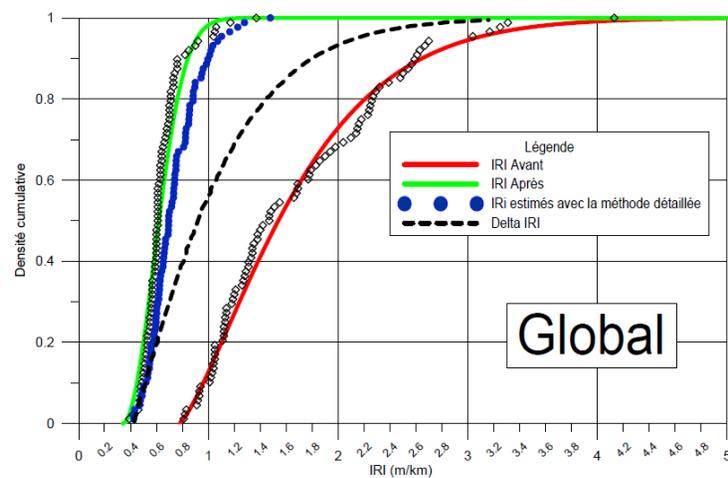
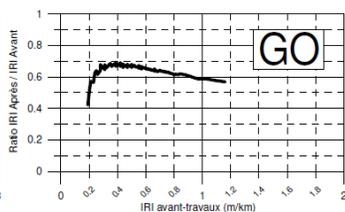
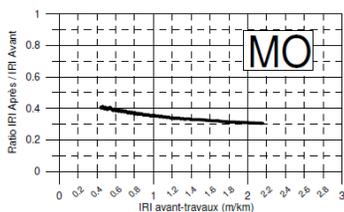
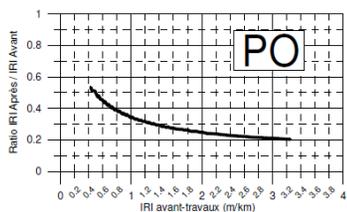
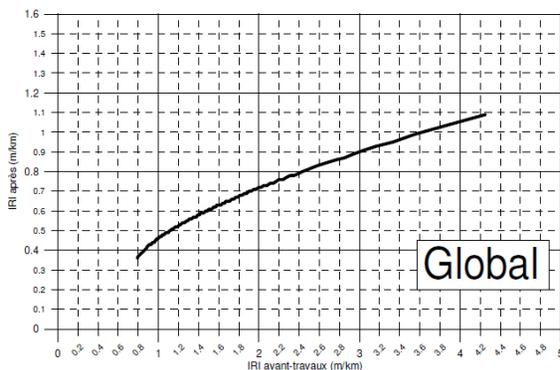
+ Dans le rapport d'étape 2

Proposition préliminaire d'abaques d'estimation des IRI après-travaux
(basé sur les données de l'A-20 à Cap Saint-Ignace (Corr BB (20) + CU (40)))

Note: Il s'agit d'une proposition de forme d'abaque.
Pour que l'abaque soit complet, plus d'un site
(donc, plus d'une courbe) devront être inclus.

Méthode simple
(abaque du haut)

Méthode détaillée
(3 abaques du bas)



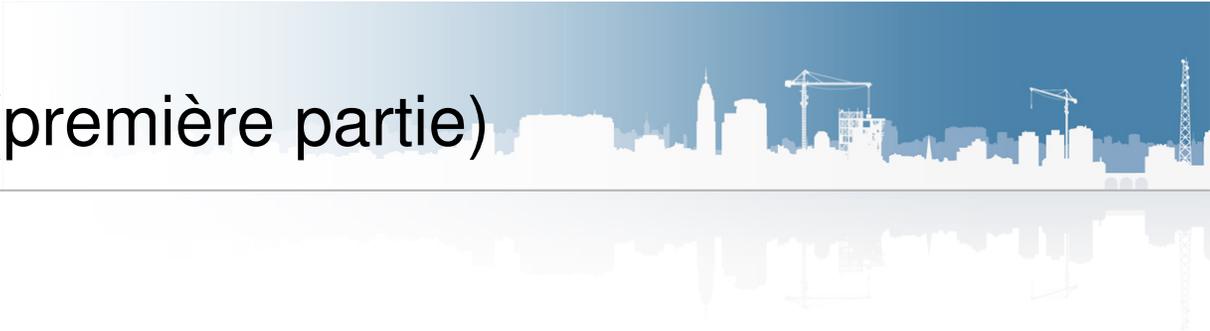
+ Étape finale: 3 abaques à produire

- + Trois abaques, destinés à la prédiction des IRI après-travaux pour trois types d'interventions différentes (mais avec VTM), étaient donc à produire:
 - Intervention par couche de correction (20 à 30 mm) et couche d'usure (40 à 60 mm)
 - Intervention par planage (50 à 100 mm) suivi d'une couche de renforcement (40 à 75 mm) et d'une couche d'usure (50 à 60 mm)
 - Intervention par planage (30 à 60 mm) suivi d'une couche d'usure (60 mm)



-  Lien avec le rapport d'étape 2
-  **Choix des cas**
-  Abaques
-  Poursuite du projet

+ Recherche de cas (première partie)



+ 20 cas fournis par le MTQ

+ 33 cas potentiels effectués par LVM

- 16/33 sont des cas relatifs aux 3 types d'interventions (d'après le formulaire de demande de relevé d'uni)
- 9/16 ont été réalisés à l'aide du VTM

+ Problèmes rencontrés



- + Lors du traitement, le type d'intervention inscrit sur la demande de relevé d'uni ne correspond pas à l'intervention réalisée.
- + À titre d'exemple, sur la demande de relevé d'uni, il est écrit: Plan (50) + Cu (50) mais dans les faits, l'entrepreneur a effectué une excavation, un rechargement, 2 couches de base et finalement une couche d'usure.
- + Manque de documentation
- + Il a donc fallu pousser les investigations plus loin...

+ Recherche de cas (deuxième partie)

- + Cas où les relevés après-travaux sont effectués par LVM (note de relevé et rapport de relevé disponibles, intervenants connus).
- + Pour 39 cas, confirmation du type d'intervention ainsi que de l'utilisation du VTM.
 - Communication avec tous les chargés de dossier au MTQ
- + Nouveaux cas fournis par le MTQ
- + Regroupement en trois catégories (pour les 3 types d'abaques)
- + Traitement
- + Retenir les projets dont les profils avant-travaux et après-travaux sont parfaitement alignés.

+ Problèmes rencontrés



- + Fichier ERD ou RSP ne sont pas filtrés de façon homogène
- + Alignements des profils avant et après-travaux
 - Puisqu'il s'agit de la construction d'abaques à la suite d'interventions particulières, le niveau de confiance sur l'alignement doit être parfait.

+ Problèmes rencontrés

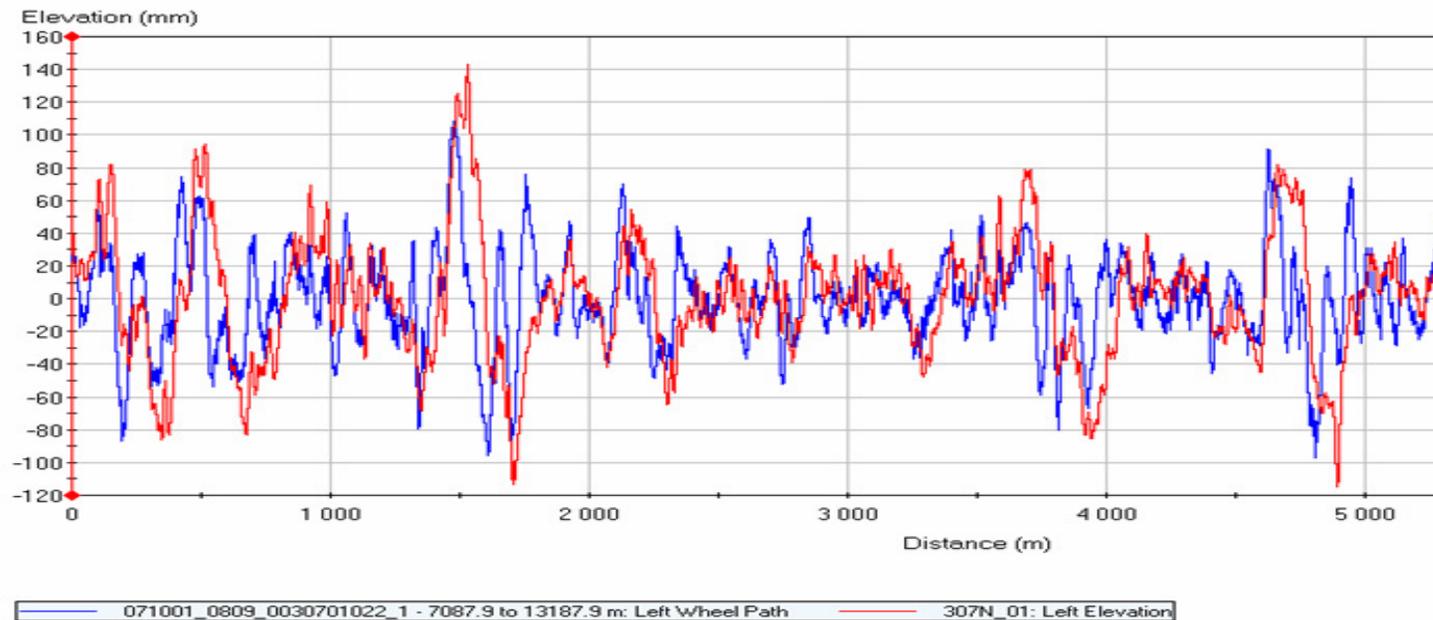
Raisons d'écart entre les profils

- + Le début du relevé après travaux correspond au chaînage 27+000 du relevé avant-travaux (niveau réseau)
- + Les chaînages RTS du MTQ du relevé après-travaux sont inexistants ou erronés.
- + Il y a un écart de plus de 100 m entre la correspondance manuscrite et la correspondance fait avec l'utilitaire de cross-correlation de ProVal.
- + Correspondance du profil tout au long des relevés.
 - Niveau de confiance (mauvais vs bon)

+ Niveau de confiance [bas]

Projet Route 307 à Cantley

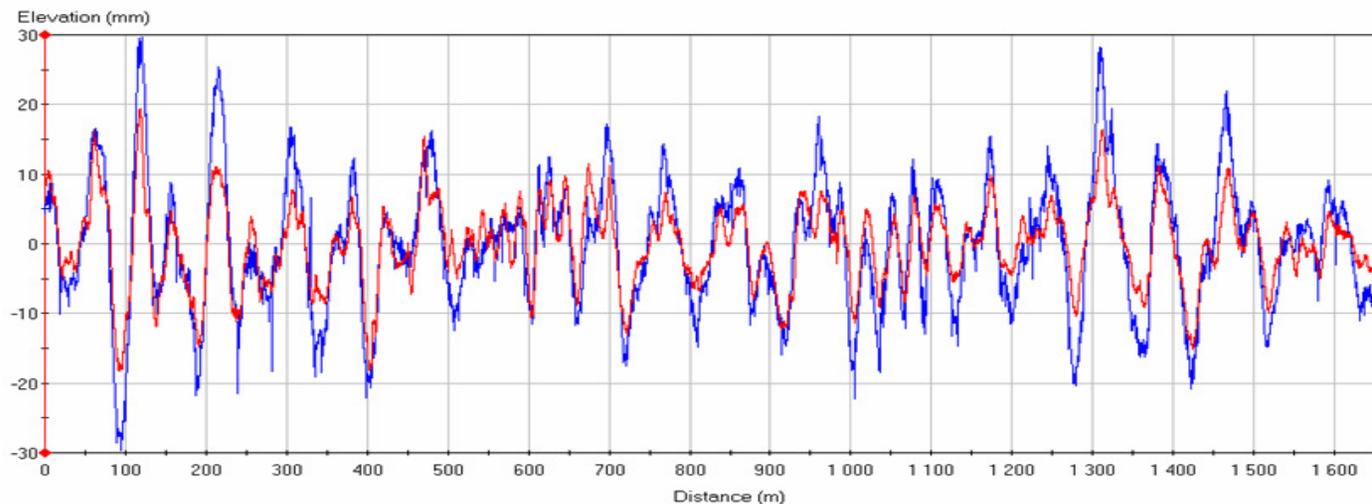
Relevé réalisé le 2009.11.12



+ Niveau de confiance [excellent]

Autoroute 30 Direction est, Ste-Julie

Relevé réalisé le 2008.07.15



070818_1521_0003002860_1 - 22097.8 to 23797.8 m: Left Wheel Path 30ELENT_01 - 129.0 to 1829.0 m: Left Elevation

+ Problèmes rencontrés

Bilan monétaire (Exemple de Notre-Dame-du-Bonsecours)

RÉSUMÉ						
Description	Lots					Total Clauses
	Exclu	Rejet	Pénalité	Acceptable	Bonus	
Bilan monétaire	N/A	N/A	-2 450.00 \$	0.00 \$	220.00 \$	-2 230.00 \$
Nombre de lots	0	4	11	6	7	28
% des lots avec clauses	N/A	14.00%	39.00%	21.00%	25.00%	100.00%
Clause d'uni type	IRI moyen (m/km) =					1.425

+ Choix final



Abaque de correction suivi d'une couche d'usure (Corr BB + CU)

- + 6408-07-0902 A-20 St-Eugène [Corr(30) + Cu (60)]
- + 6603-07-0631 A-20 Lévis [Corr(20) + Cu (45)]
- + 8603-08-0601 A-20 Ste-Hélène-de-Bagot [Corr(20) + Cu (40)]
- + 8603-08-0614 A-30 Ste-Julie [Corr(25) + Cu (40)]
- + 6603-08-0617 A-20 Cap Saint-Ignace [Corr (20) + Cu (40)]

+ Choix final



Abaque de planage, renforcement et couche d'usure (PI + Re + CU)

- + 8701-09-0605 A-10, Marieville [Plan(100) + Renf(75) + Cu (50)]
- + 8908-08-0605 Route 301, Allevyn [Plan(50) + Renf(40) + Cu (60)]
- + 8908-09-0605 Route 148, Iles-aux-Alumettes [Plan(50)+Renf(40)+Cu (60)]
- + 8907-09-0602 Route 148, Pontiac [Plan(50)+Renf(40)+Cu (60)]
- + 8906-09-0602 Route 323, Notre-Dame-du-Bonsecours
[Plan(70)+Renf(50)+Cu (60)]

+ Choix final

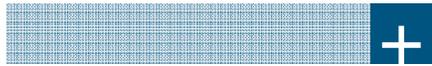


Planage et couche d'usure (PI + CU)

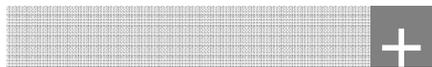
- + 7107-08-0604 A-40, Saint-Augustin-de-Desmaures [Plan(30) + Cu (60)]
- + 8908-09-0603 R-148, Mansfield [Plan(60) + Cu (60)]



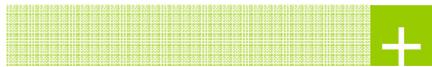
Lien avec le rapport d'étape 2



Choix des cas



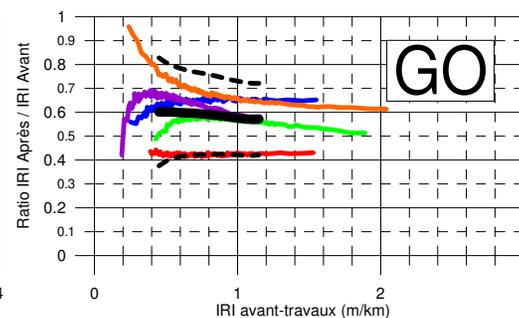
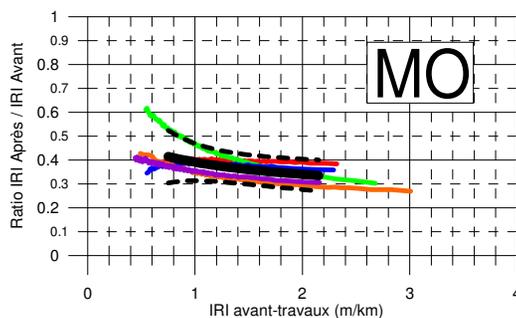
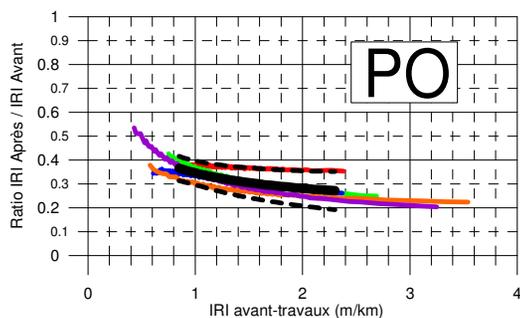
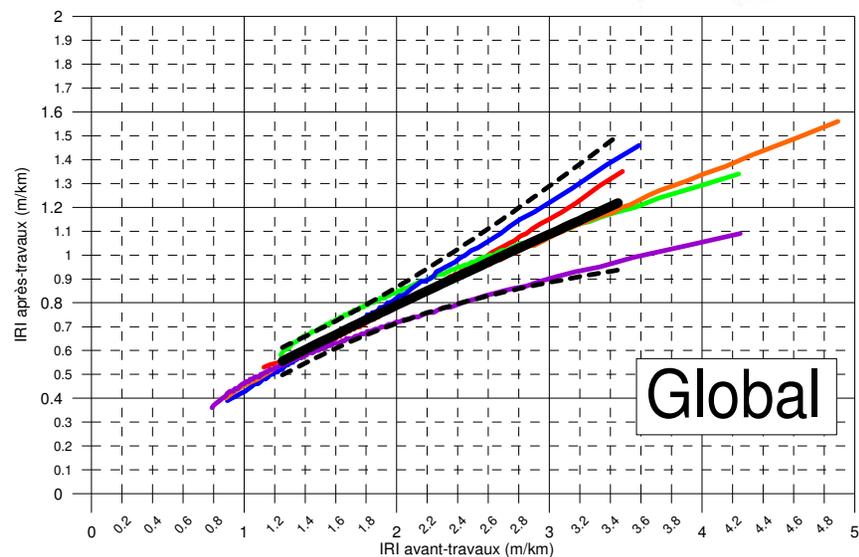
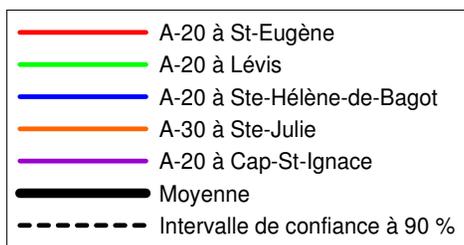
Abaques



Poursuite du projet

+ Intervention (Corr BB + CU)

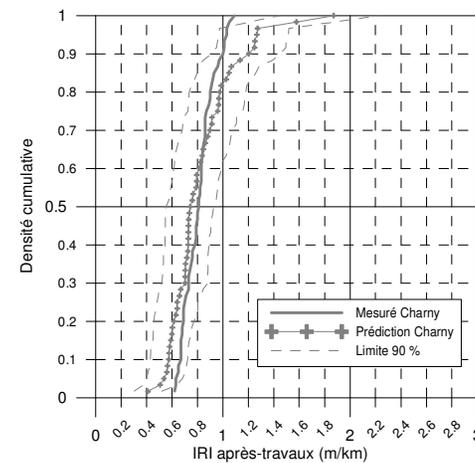
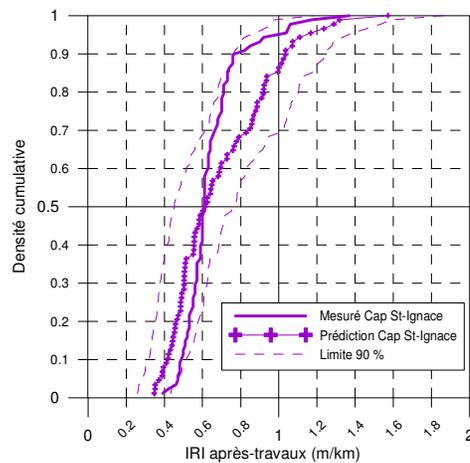
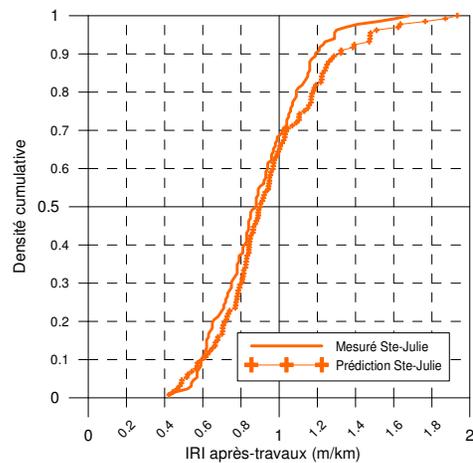
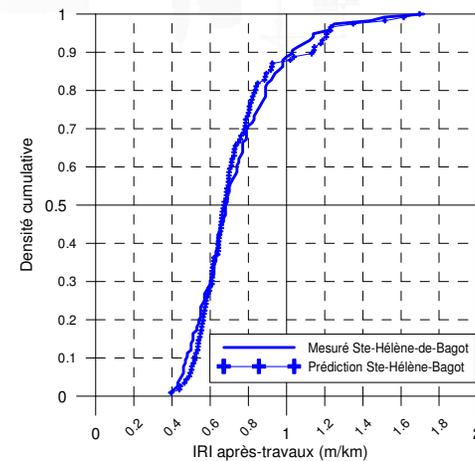
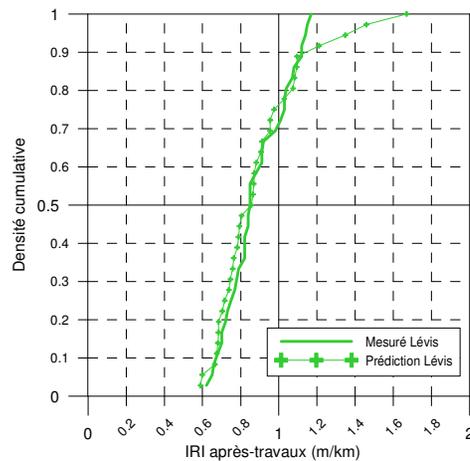
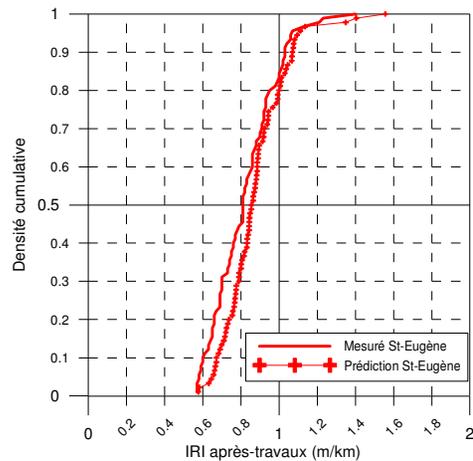
Abaque d'aide à la prédiction des IRI après-travaux
(Correction / Couche d'usure (avec VTM)) (Corr + CU)





Prédiction (Corr BB + CU)

Comparaison de la prédiction et de l'obtenu (Correction / Couche d'usure (avec VTM))



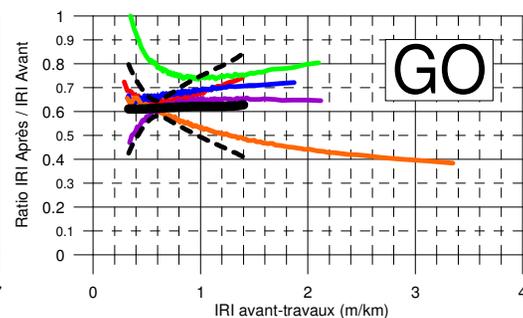
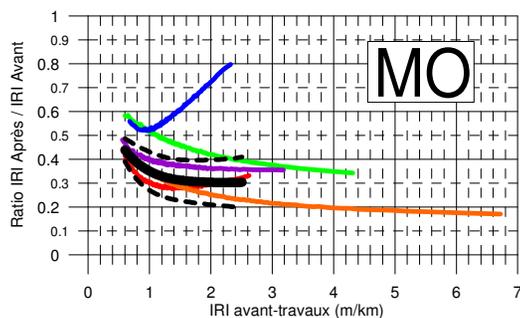
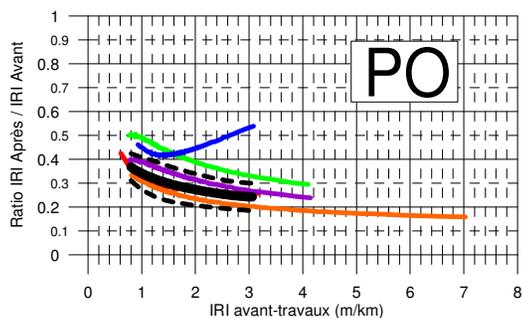
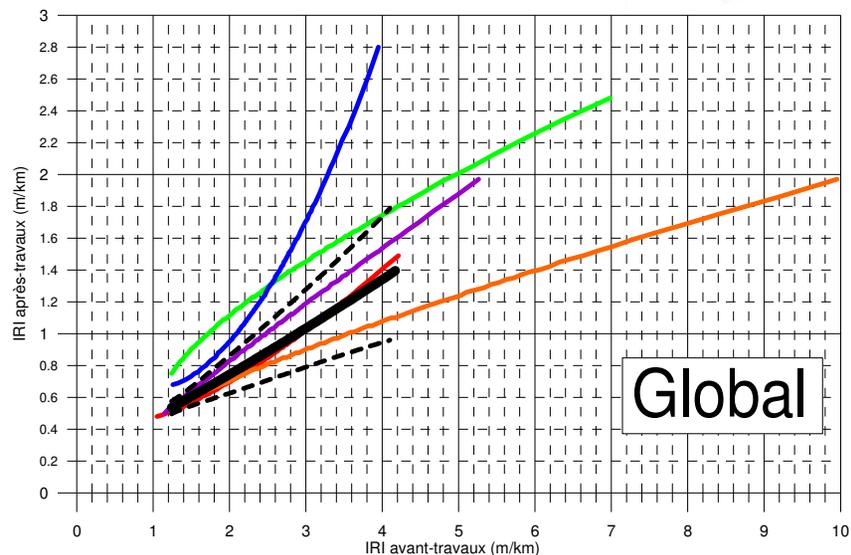
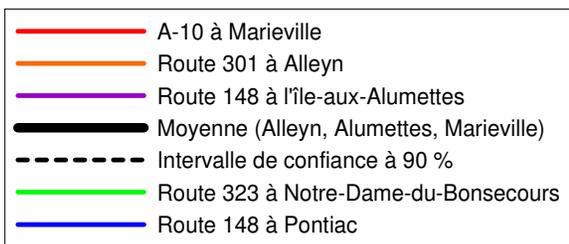
+ Intervention (Corr BB + CU)

Bilan quantitatif

	St-Eugène		Lévis		Ste-Hélène-de-Bagot		Ste-Julie		Cap St-Ignace		Charny	
	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel	Prédit	Réel
IRI moyen [m/km]	0.877	0.823	0.897	0.883	0.739	0.737	0.954	0.897	0.691	0.642	0.831	0.811
Nombre de 100 m	90	90	36	36	116	116	132	132	88	88	60	60
Rejet [nb]	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0
Pénalité [nb]	3	1	3	0	4	3	12	6	2	1	3	0
Acceptable [nb]	0	2	1	0	4	3	10	7	2	0	2	0
Bonus [nb]	87	87	32	36	108	110	108	119	84	87	54	60
Bilan [\$]	6700	6930	2020	2470	8930	8810	5610	7410	7230	8260	3480	5090
Diff. IRI [%]	-6.6		-1.6		-0.3		-6.4		-7.6		-2.5	
Diff. Bilan [%]	3.3		18.2		-1.4		24.3		12.5		31.6	

+ Intervention (PI + Re + Cu)

Abaque d'aide à la prédiction des IRI après-travaux
(Planage / Renforcement / Couche d'usure (avec VTM)) (PI-Re-Cu)

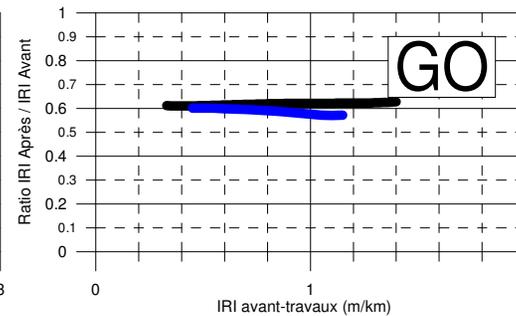
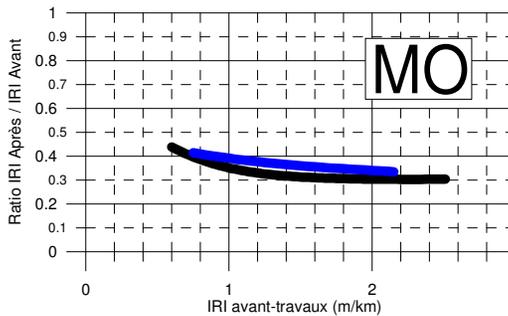
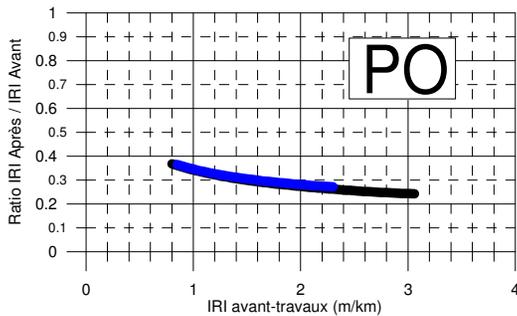
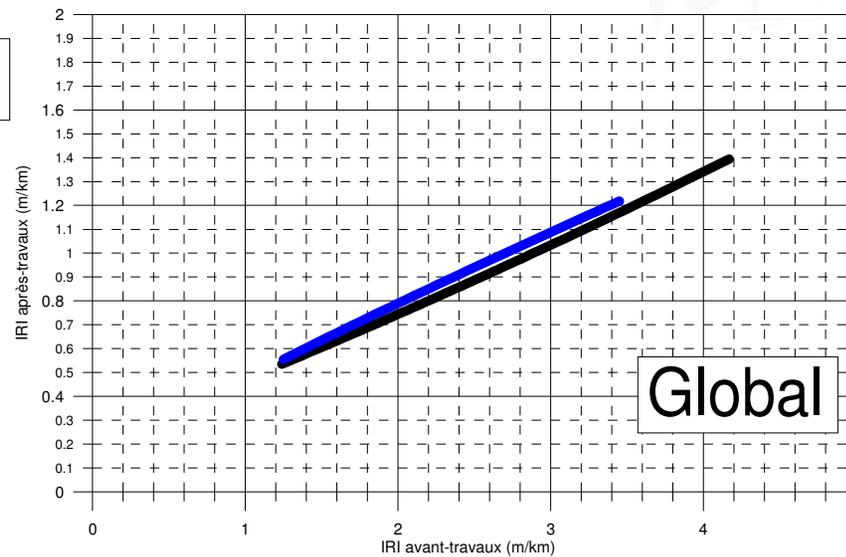




Comparaison

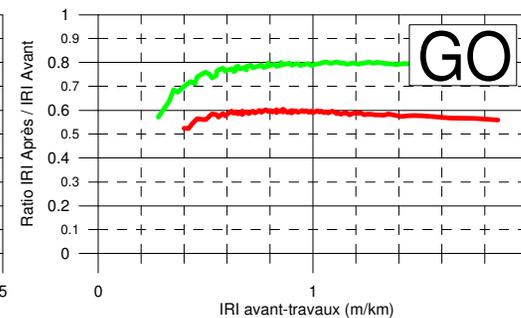
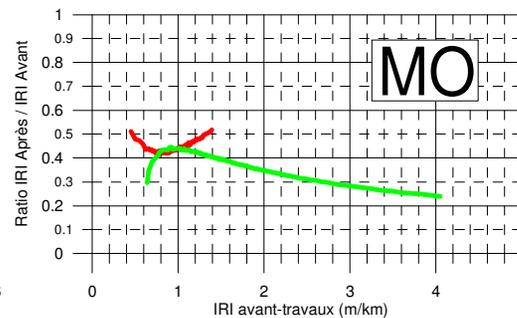
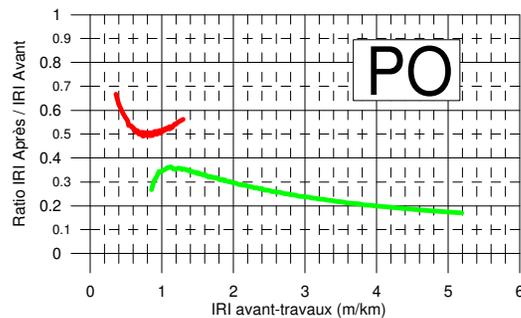
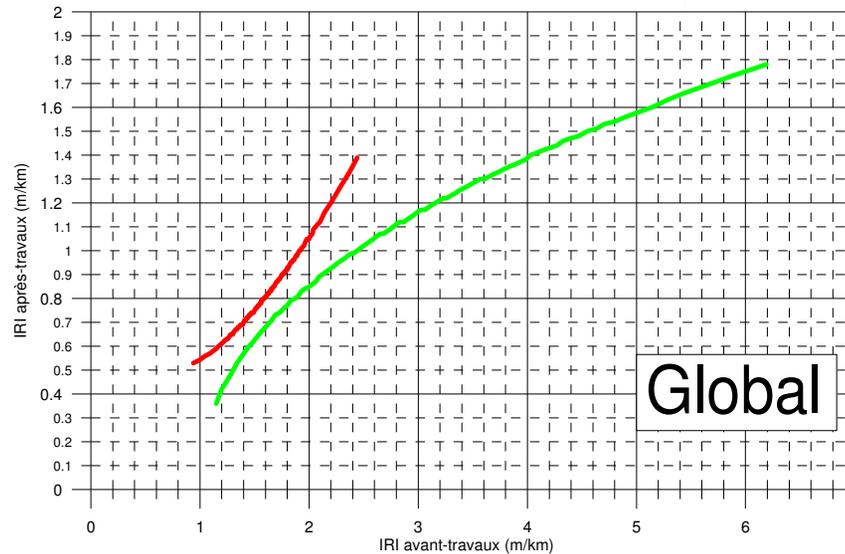
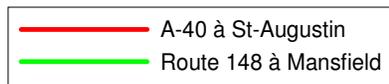


Comparaison entre les valeurs moyennes des abaques



+ Intervention (PI + Cu)

Abaque inachevé d'aide à la prédiction des IRI après-travaux
(Planage / Couche d'usure (avec VTM)) (PI + Cu)

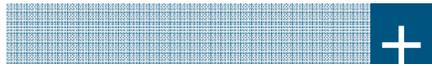


+ Conclusions

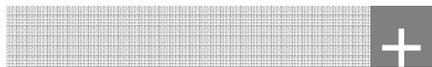
- + Il est possible de prédire de façon assez précise la répartition des IRI_{Globaux} après-travaux à partir des IRI_{PO, MO et GO} avant-travaux. Cela est d'une grande utilité pour prédire un bilan monétaire et déterminer si une clause d'uni est atteignable.
- + Cela fonctionne bien dans le cas de l'intervention (Correction + Couche d'usure). L'abaque y est garni. On peut s'attendre à ce que la précision soit moins élevée dans le cas de l'intervention (Planage + Renforcement + Couche d'usure) parce que seuls trois projets ont été inclus dans l'abaque.
- + Selon les données disponibles, l'influence de l'intervention est assez semblable dans les cas (Planage + Renforcement + Couche d'usure) et (Correction + Couche d'usure). Les différences sont cependant logiques.
- + Certains projets semblent peu compatibles avec certaines interventions (ex.: Planage + Couche d'usure à Mansfield) (Aspect de recherche future)



Lien avec le rapport d'étape 2



Choix des cas



Abaques



Poursuite du projet

+ Poursuite du projet

- + Ajouter des cas aux abaques existants
 - PI + Re + Cu
 - PI + Cu
- + Développer des abaques additionnels pour de nouvelles interventions (des projets sont déjà traités et disponibles (ex.: PI + Corr + Cu))
- + Réaliser des relevés avant-travaux de niveau projet cette saison.
- + Développer d'un utilitaire EXCEL de prédiction des IRI après-travaux à partir des IRI avant-travaux calculés dans ProVAL.
- + Publication à l'externe ?
- + Budget ?



Merci de votre attention

www.lvm.ca

