



SNC • LAVALIN



La chaussée performe trop bien... on a dû se tromper! Le cas de l'autoroute 25 en PPP

Formation technique annuelle 2020 de Bitume Québec – En format virtuel

Louis D'Amours, ing., M. Sc. A. – SNC-Lavalin Environnement et géosciences

2020-12-09



Table des matières

1. Introduction
2. Méthodologie d'auscultation
3. Bilan de diagnostic des chaussées municipales
 - 3.1 Dégradations-types en milieu municipal et leurs causes
 - 3.2 Gélivité des chaussées
 - 3.3 Capacité structurale
4. Performance du projet en PPP de l'autoroute 25 de Montréal à Laval depuis 2011
 - 4.1 Contexte du projet
 - 4.2 État de l'évolution des performances
 - 4.3 Savoir-faire à la suite de cette réussite
5. Conclusion
 - 5.1 Comment utiliser nos bilans d'état de chaussées pour concevoir une réhabilitation adéquate
 - 5.2 Conclusion pour les PPP



1. Introduction

Évolution de la méthodologie d'auscultation

Bilan de la performance en milieu municipal

Approche conceptuelle pour la chaussée de l'A-25 en PPP

Bilan de la performance de l'A-25

Approche conceptuelle à préconiser en milieu municipal et autoroutier



2. Méthodologie d'auscultation

Évolution des méthodologies

L'évolution des méthodologies d'auscultation de chaussées a été fulgurante au cours des derniers 10 ou 15 ans

Maintenant, l'intelligence artificielle vient même nous aider à en faire l'analyse des dégradations

Toutefois, on s'aperçoit qu'il surgit des technologies simplistes qui tentent de venir remplacer des technologies beaucoup plus précises, mais sans grand succès réel



Relevé visuelle des dégradations - Années 1980

Étudiants avec Clipboard



Windshield survey – Appréciation visuelle depuis un véhicule en mouvement

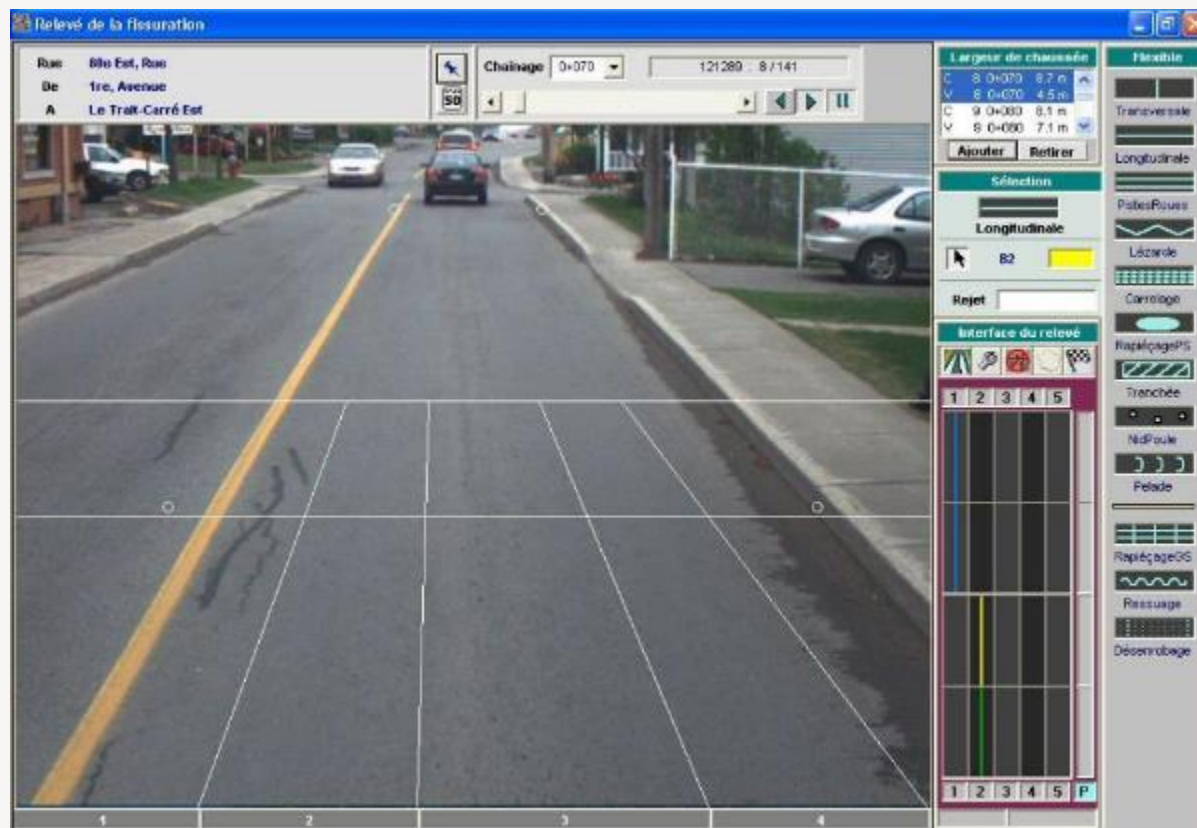


Avez-vous vu la dégradation?... moi non plus!!

Véhicule multifonction - Première génération (1987)



Relevé de la fissuration - Première génération



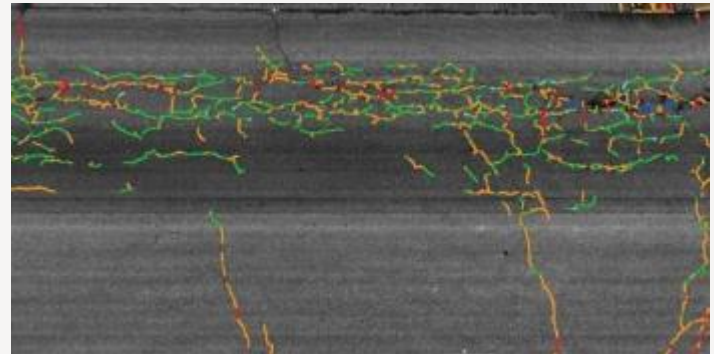
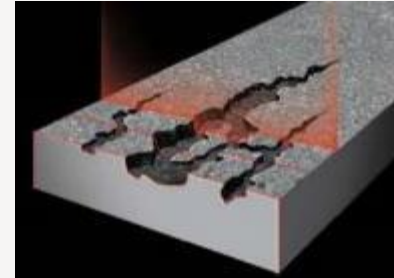
Véhicule multifonction actuel (2011)



Système laser de mesure de fissures

Laser Crack Measurement System (LCMS)

- › Détection automatique de la fissuration
- › Images et profils 3D de la chaussée
- › Auscultation à haute vitesse

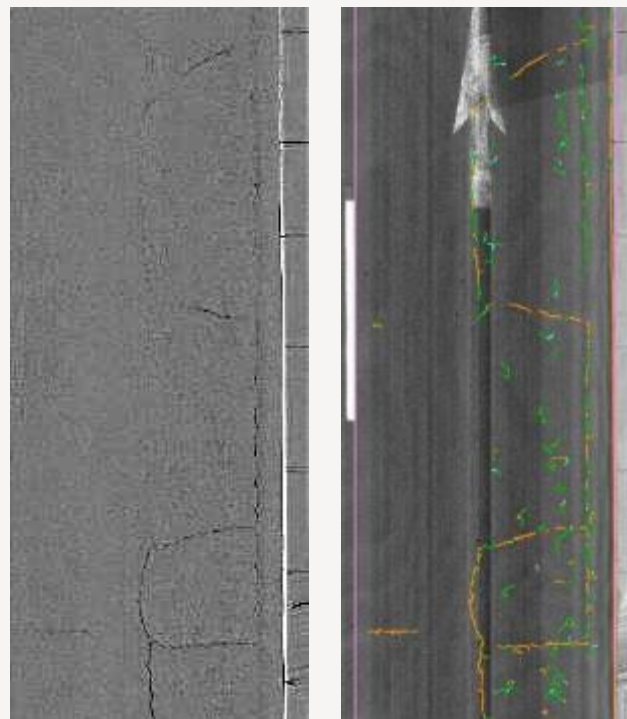


Détection automatique de la fissuration

Image numérique



Image 3D



Détection automatique de la fissuration

Image numérique

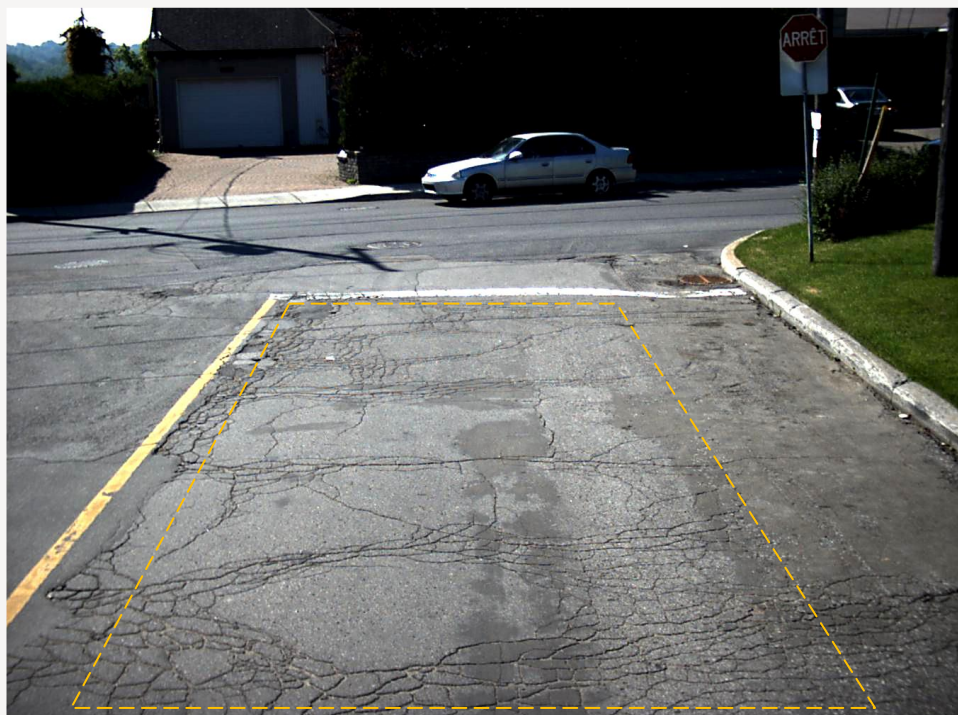
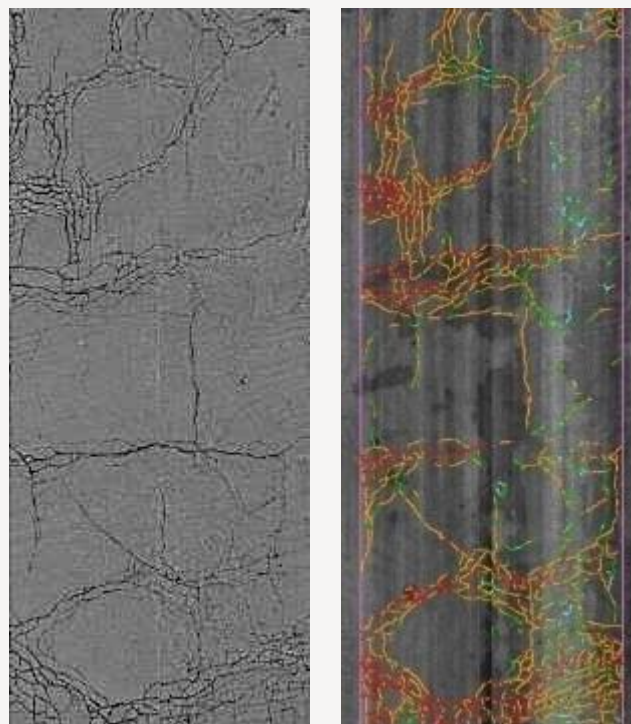


Image 3D



Nouvelle technologie

Ça n'a pas de bon sens

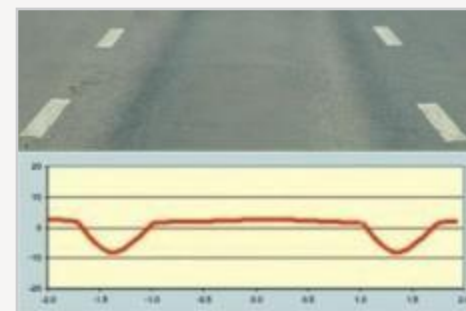


SVP, pas de retour en arrière!

Mesure de l'orniérage



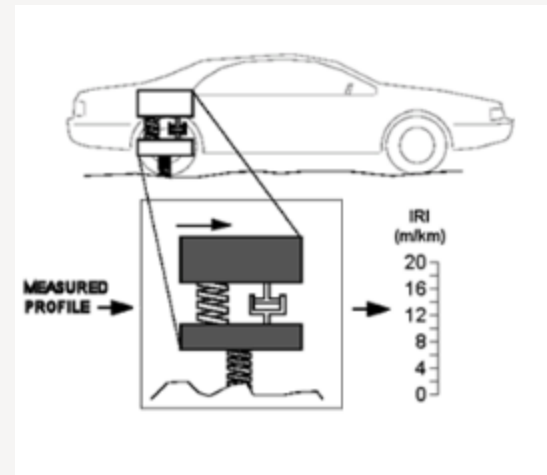
- › Détection automatique avec le système LCMS
- › Une précision au 1 millimètre



Confort au roulement

Mesure du pseudo-profil et calcul de l'indice IRI (Indice de Rugosité International)

Norme ASTM-E950-94 – Classe 1



Méthodologie – Gélivité des chaussées

Gélivité de ces chaussées

Profil été – Profil hiver

ΔIRI (m/km)



Méthodologie – Gélivité des chaussées

Tranches de gel

Établissement des statuts de l'indicateur CH-3 – Susceptibilité au gel

Statut	Gélivité	Cote	ΔIRI (m/km)
Excellent	Non gélif	1	$\leq 0,75$
Bon	Faible	2	$> 0,75$ à $1,50$
Moyen	Moyenne	3	$> 1,50$ à $2,25$
Mauvais	Élevée	4	$> 2,25$ à $3,0$
Très mauvais	Très élevée	5	$> 3,0$

Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable, d'égouts et des chaussées, Guide destiné au milieu municipal québécois, ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH), novembre 2013.



Méthodologie – Capacité structurale

Défectomètre à masse tombante (F.W.D. – 7 à 250 kN)

- › Portance globale
- › Besoins de renforcement
- › Durée de vie résiduelle
- › Où est la faiblesse de la chaussée
- › Nature du sol support



Méthodologie – Capacité structurale

F.W.D.

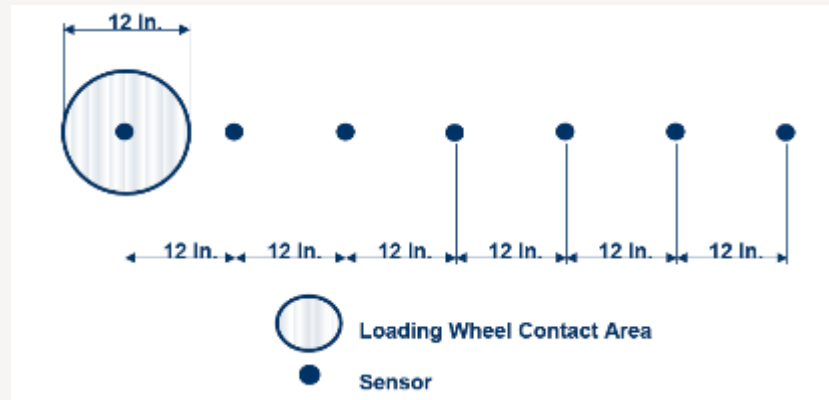
Mesure de la déflexion de la chaussée en 9 points (variable)

› 0, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1 200, 1 500 mm

Mesure dynamique

- › Charge dynamique de type impulsion
- › Charge 7 à 250 kN (≈ 40 kN, essieu 80 kN)

Norme ASTM D4694 : *Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device*



Méthodologie – Capacité structurale

Capacité structurale en fonction de la durée de vie résiduelle

Établissement des statuts de l'indicateur CH-4 – Capacité structurale en fonction de la durée de vie résiduelle

Statut	Cote	Durée de vie résiduelle
Excellent	1	> 25 ans
Bon	2	> 15 à 25 ans
Moyen	3	> 5 à 15 ans
Mauvais	4	0 à 5 ans
Très mauvais	Sans objet	Sans objet

Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable, d'égouts et des chaussées, Guide destiné au milieu municipal québécois, ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH), novembre 2013.



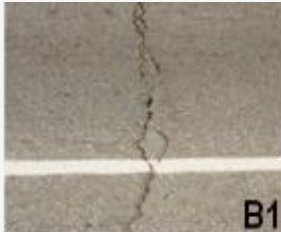
Méthodologie – Capacité structurale

En fonction du renforcement requis

Capacité portante						
Résumé de la section						
Date du relevé	Nombre d'essais	ECAS	Déflexion représentative (µm)	Déflexion admissible (µm)	Vie résiduelle (ans)	Portance
2011-11-01	4	250000	2029	1304	3	Très faible
Détails des essais						
Chainage	Dir.	Voie	Module de surface (MPa)	Module infrastruct. (MPa)	Vie résiduelle (ans)	Renforc. requis (mm)
49	-	-	181	76	20	7
100	-	-	178	76	18	13
149	-	-	170	84	15	23
201	-	-	125	62	4	56

3. Bilan de diagnostic des chaussées municipales

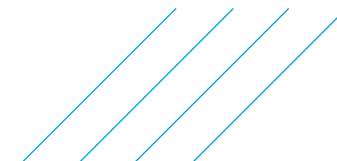
3.1 Dégradations-types en milieu municipal et leurs causes

Types de dégradation	Niveaux de sévérité		
Fissure transversale	 A1	 B1	 C1
Fissure longitudinale			
Fissure latérale			
Lézarde	 A2	 B2	 C2
Carrelage			
Puisard (fissuration)			
Pelade	 A3	 B3	 C3
Rapiéçage temporaire			
Rapiéçage mécanisé			
Tranchée			
Resurfaçage			

3. Bilan de diagnostic des chaussées municipales

3.1 Dégradations-types en milieu municipal et leurs causes

Types de dégradation	Causes potentielles
Fissure transversale	› Retrait thermique › Vieillissement et fragilisation du revêtement › Remontée de fissures après des travaux de resurfaçage › Joint de construction mal exécuté › Mauvais drainage
Fissure longitudinale	› Vieillissement et fragilisation du revêtement › Remontée de fissures après des travaux de resurfaçage › Joint de construction mal exécuté › Mauvais drainage › Ségrégation de l'enrobé à la pose (ex. : centre de l'épandeur)
Carrelage	› Fatigue › Vieillissement de la chaussée › Capacité portante insuffisante



3. Bilan de diagnostic des chaussées municipales

3.1 Dégradations-types en milieu municipal et leurs causes

Types de dégradation	Causes potentielles
Pelade	› Mauvaise adhérence de la couche de surface (ex. : manque de liant d'accrochage, incompatibilité chimique, saleté entre les couches) › Épaisseur insuffisante de la couche de surface › Chaussée fortement sollicitée par le trafic
Rapiéçage	› Travail mal fait ou joint mal construit
Tranchée	› Compactage insuffisant des matériaux de remblayage de la tranchée › Hétérogénéité des matériaux (tranchées/chaussées existantes) › Relâchement des contraintes (perte de support latéral dans la tranchée) › Remblayage incomplet sous les bords du revêtement › Manque d'étanchéité du joint de coupe



Bilan des dégradations

Deux villes typiques

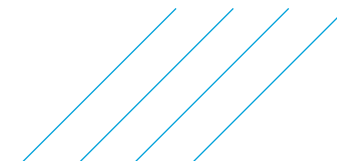
Types	Unité	Ville A Quantité pour réseau de 55 km (valeur absolue)	Ville B Quantité pour réseau de 115 km (valeur absolue)
Transversale	m. linéaire	720 (52,40 %)	488 (39,42 %)
Longitudinale	m. linéaire	360 (26,20 %)	421 (34,00 %)
Piste de roues	m. linéaire	294 (21,40 %)	329 (26,58 %)
Carrelage	m ²	28	16
Rapiéçage	m ²	28	55
Tranchée	m ²	33	16
Pelade	m ²	2	0



Confort au roulement

Deux villes typiques

Confort au roulement	Mesure de l'IRI (m/km)	Ville A – 55 km Proportion (%)	Ville B – 115 km Proportion (%)
Très bon	$0 \leq \text{IRI} \leq 3,2$	26	6
Bon	$3,2 < \text{IRI} < 5,0$	36	4
Passable	$5,0 \leq \text{IRI} < 6,4$	16	29
Mauvais	$6,4 \leq \text{IRI} < 7,5$	12	25
Très mauvais	$7,5 \leq \text{IRI}$	10	36



Orniérage

Deux villes typiques

Niveau de service	Profondeur d'ornièrè (mm)	Ville A – 55 km Proportion (%)	Ville B – 115 km Proportion (%)
Très bon	1 à 4	43	71
Bon	5 à 9	33	25
Passable	10 à 19	20	4
Mauvais	≥ 20	4	0



3.2 Gélivité des chaussées

En moyenne, moins de 5 % des chaussées ont une gélivité de moyenne à très élevée. Autour de 15 % des chaussées évaluées ont une gélivité qualifiée de faible. En moyenne, 75 à 85 % des chaussées sont non gélives... très surprenant!... mais encore, lesquelles chaussées présenteront un succès par un resurfaçage unique

Statut	Gélivité	Ville C (45 km)	Ville D (175 km)
Excellent	Non gélif	80 %	85 %
Bon	Faible	19 %	11 %
Moyen	Moyenne	Moins de 1 %	2 %
Mauvais	Élevée	Moins de 1 %	1 %
Très mauvais	Très élevée	Moins de 1 %	1 %

Attention! Ceci est pour des critères en milieu municipal



3.3 Capacité structurale

Ville C – Réseau de 45 km

Statut	Durée de vie résiduelle	Proportion
Excellent	> 25 ans	65 %
Bon	> 15 à 25 ans	14 %
Moyen	> 5 à 15 ans	16 %
Mauvais	0 à 5 ans	5 %

Attention au resurfaçage ou remplacement d'enrobé sans renforcer la chaussée avec enrobé plus épais



4. Autoroute 25 entre Montréal et Laval

Étude de cas – Performance du projet en PPP
depuis 2011

4.1 Contexte du projet

Autoroute 25 entre Montréal et Laval

- › PPP (4 années de design-construction (2007-2011), 31 années d'entretien)
- › 7,2 km d'autoroute à 4 voies
- › 11 ponts et 2 échangeurs
- › 1 pont majeur au-dessus de la rivière des Prairies
- › Concessionnaire : MacQuarie en 2006 et Transurb depuis 2018
- › Ingénierie – Construction : Kiewit-Parsons
- › Géotechnique et chaussées : SNC-Lavalin



4.1 Contexte du projet

- › $\neq$ la meilleure chaussée ou la plus durable
- › = la chaussée avec la valeur actualisée nette (du prix coûtant présent) la plus basse sur la durée du contrat → Analyse du coût sur le cycle de vie (LCCA)
- › Un dollar investi en 2043 (dans 32 ans) ne vaut que 0,21 \$ en dollars aujourd'hui (avec 5 % de taux d'escompte)



4.1 Le projet – Les critères de performance

Autoroute 25 – Montréal-Laval

Critères de performance	
IRI (m/km)	< 2,2 m pour section de 100 m
Orniérage	< 8 mm pour section de 100 m
Dégradation de surface	< 75 m de fissures (> 25 mm) pour section de 100 m
Adhérence	CFT > 55 pour section de 100 m
Gélivité	IRI (hiver) < 3,0 pour section de 100 m



4.1 Le projet – Les critères de performance

Spécifications du PPP

- › Chaque section « non performante » de 100 m :
 - › 4 points de « non-performance » pour IRI
 - › 8 points de « non-performance » pour orniérage



4.1 Le projet – Les critères de performance

Points de « non-performance » VS déduction

Points de non-performance par jour	Déduction (\$ / points / jour)
0-15	0
16-25	250
26-50	375
51-75	500
> 76	750



4.1 Le projet – Les critères de performance

Traitement des non-performances

2 à 4 sections non performantes sur 210 sections $\approx 1 \%$

Pénalités $\rightarrow 4\,000\ \$/\text{jour}$



4.1 Le projet – Les critères de performance

Variation des indicateurs de performance

Distribution according to normal distribution

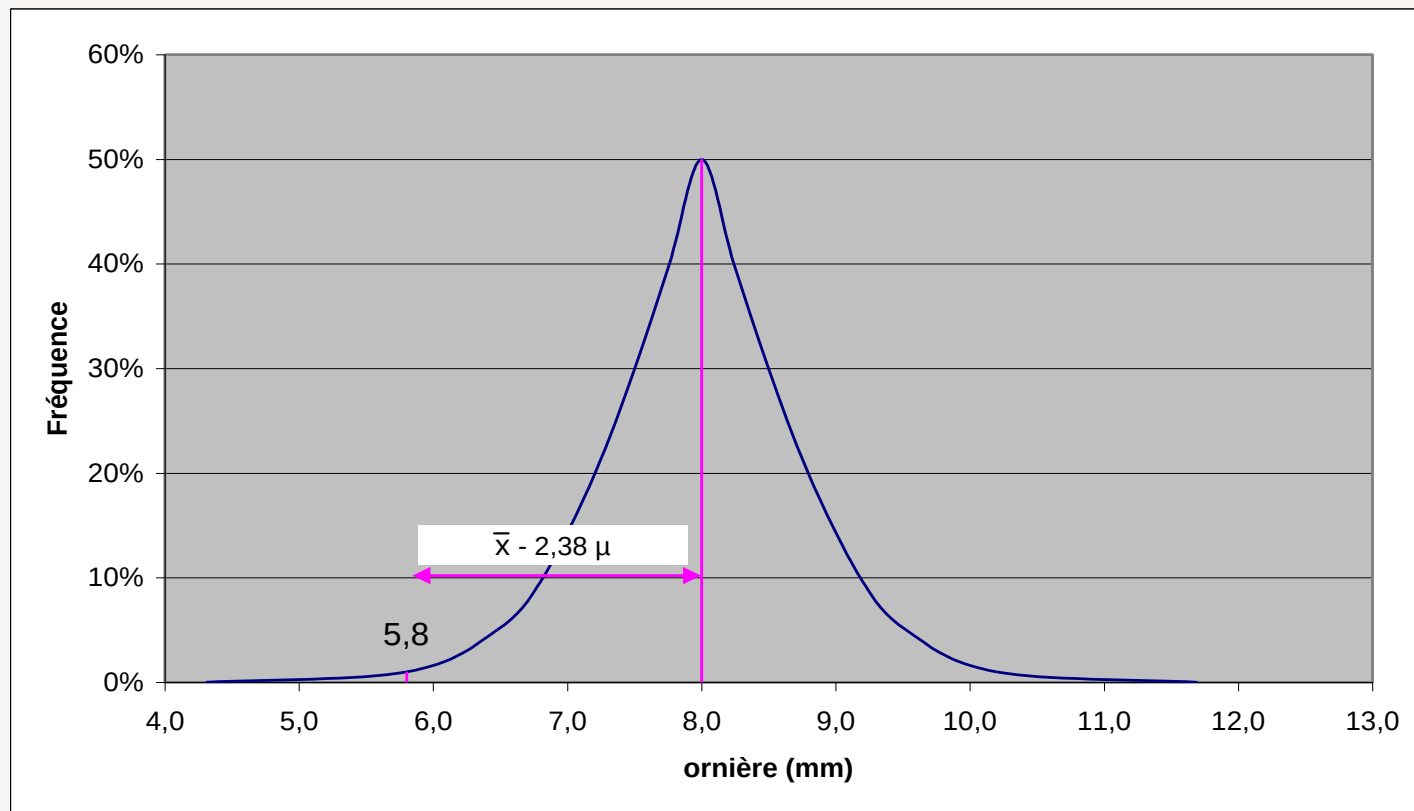
$\bar{X}$ Max (1 %) = Critères de performance - (2,38 x écart-type)

Ornière moyenne max. du réseau (1 %) = 8 mm - (2,38 (0,9 mm)) = 5,8 mm



4.1 Le projet – Les critères de performance

Distribution normale



Ornière moyenne du réseau = 8,0 mm

Écart-type = 0,9 mm



Approche conceptuelle

1. Influence des critères de performance
2. 8 conceptions pour chaussée flexible et 4 conceptions pour chaussée rigide
3. Analyse du coût sur le cycle de vie (LCCA)



Influence des critères de performance

Conclusion des relevés (chaussée flexible)

- › Les sections auscultées sur l'autoroute 25 montrent que la limite de 8 mm pour l'orniérage sera atteinte sur certaines sections de 100 m ($< 1\%$) en une période de 12 ans
- › Les valeurs obtenues sur l'autoroute 25 existante montrent que la limite de performance de 2,2 pour l'IRI sera atteinte dans une période de 8 ans, pour quelques sections de 100 m

➔ **Intervention (de type resurfaçage) prévue aux 8 ans**

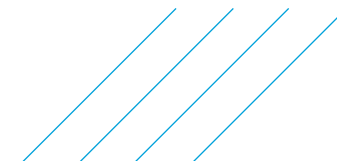


Conception structurale

Intrant important : le trafic de conception

› Plusieurs valeurs en cours de route en relation avec les études de trafic

	Design initial	Design final
AADT 2010	46 058	51 505
AADT 2021	50 618	57 463
Période de design	32 ans	32 ans
Nombre de jour/année	287	260
Taux d'accroissement	0 à 1%	1 %
« Truck factor »	1,2	1,2
% de la voie	75 %	75 %
% de direction	50 %	50 %
% de camion	10 %	13 %
Total d'ÉCAS	21 039 000	29 373 000



Conception structurale

Autres intrants

Type de sol	Module M_R
Till (SM_{FIN})	48 MPa
Roc (GP, GW)	90 MPa

Conception de chaussée

- › Logiciels Chaussée 1.0 : (2006) et 2.0 : (2007)
(basés sur AASHTO 93)



Conception structurale (préliminaire (au bid))

À la phase proposition, évaluation de 3 conceptions avec protection partielle contre le gel (< 50 mm)

- › Sous-fondation fixée à 600 mm
- › Fondation fixée à 300 mm

Type de chaussée	Épaisseur du revêtement
Chaussée flexible conventionnelle (32 ans)	240 mm
Chaussée flexible « longue durée » avec base résistante à la fatigue	205 mm
Chaussée flexible avec rechargement structural en enrobé à l'an 8	210 mm + 50 mm (8 ans)



Conception structurale finale

Conception par étape (Staged Construction)

- › Étant donné qu'une intervention est prévue à 8 ans, pourquoi ne pas renforcer la chaussée à cette étape!

Trafics admissibles (ÉCAS) en fonction de l'épaisseur d'enrobé

Épaisseur d'enrobé	220 mm	280 mm	
Trafic permissible (ÉCAS)	13 267 000	57 822 000	
Comparaison au trafic de conception			Total
Trafic de conception	6 491 000 (0-8 ans)	22 882 000 (8-32 ans)	29 373 000 (0-32 ans)
% d'utilisation	49 %	45 %	94 %



Analyse du coût sur le cycle de vie (LCCA)

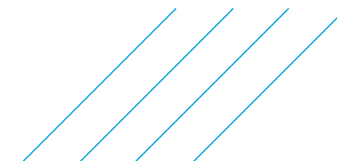
Évaluation des 3 designs initiaux, mais seulement basée sur la performance de l'IRI et des ornières, incluant les coûts de :

- › Construction et gestion de la circulation
- › Entretien (meulage ou planage, resurfaçage, scellement de fissures ou des joints)

Coût des 3 designs

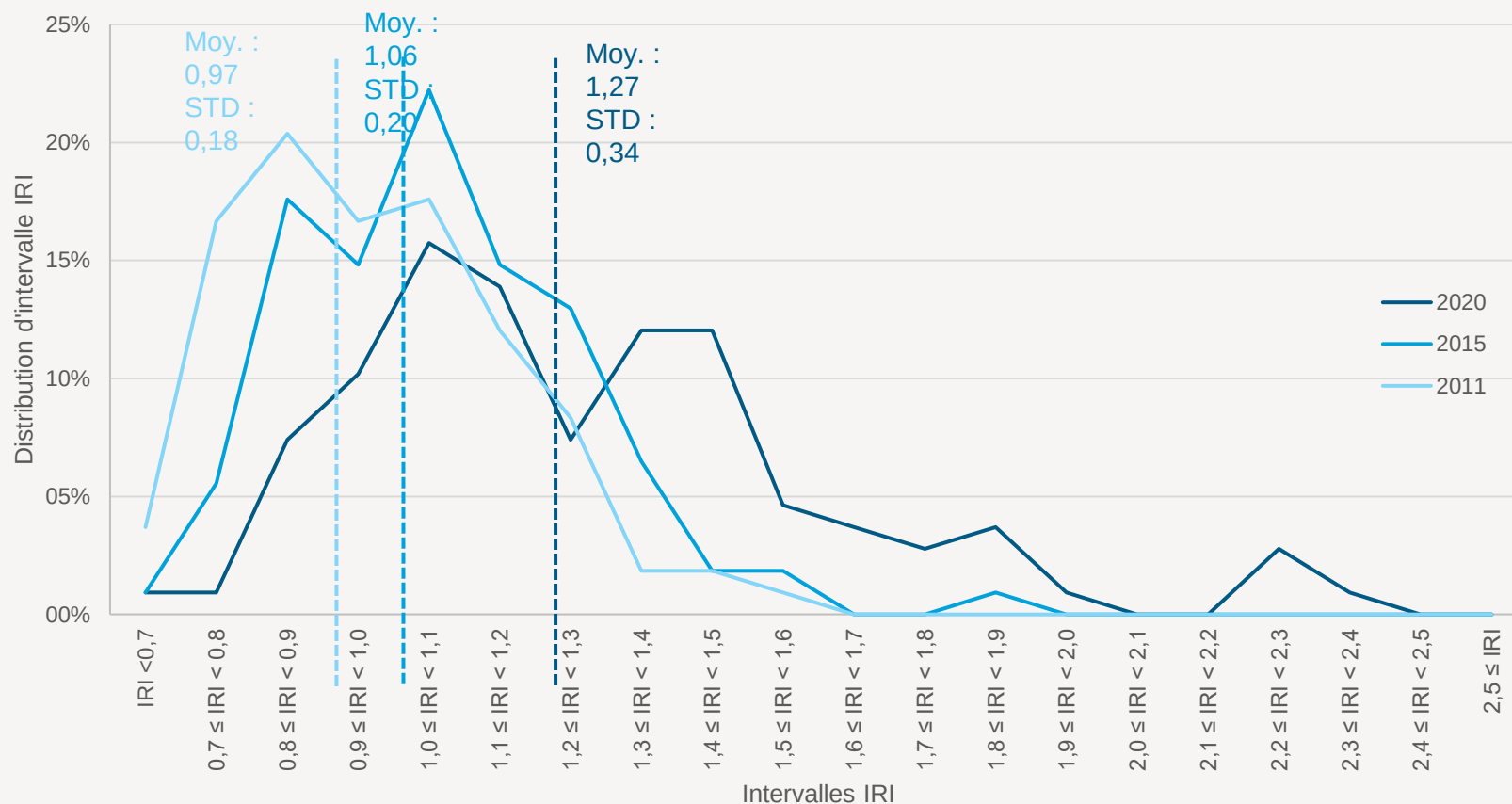
Type de chaussée	Coût de construction	VAN
Chaussée flexible conventionnelle	10 180 904 \$	12 409 343 \$
Chaussée flexible avec rechargement structural en enrobé	9 607 792 \$	11 813 767 \$
Chaussée flexible « longue vie »	9 833 075 \$	12 045 051 \$

La chaussée rigide a été éliminée à cause du critère d'adhérence qui était beaucoup trop sévère



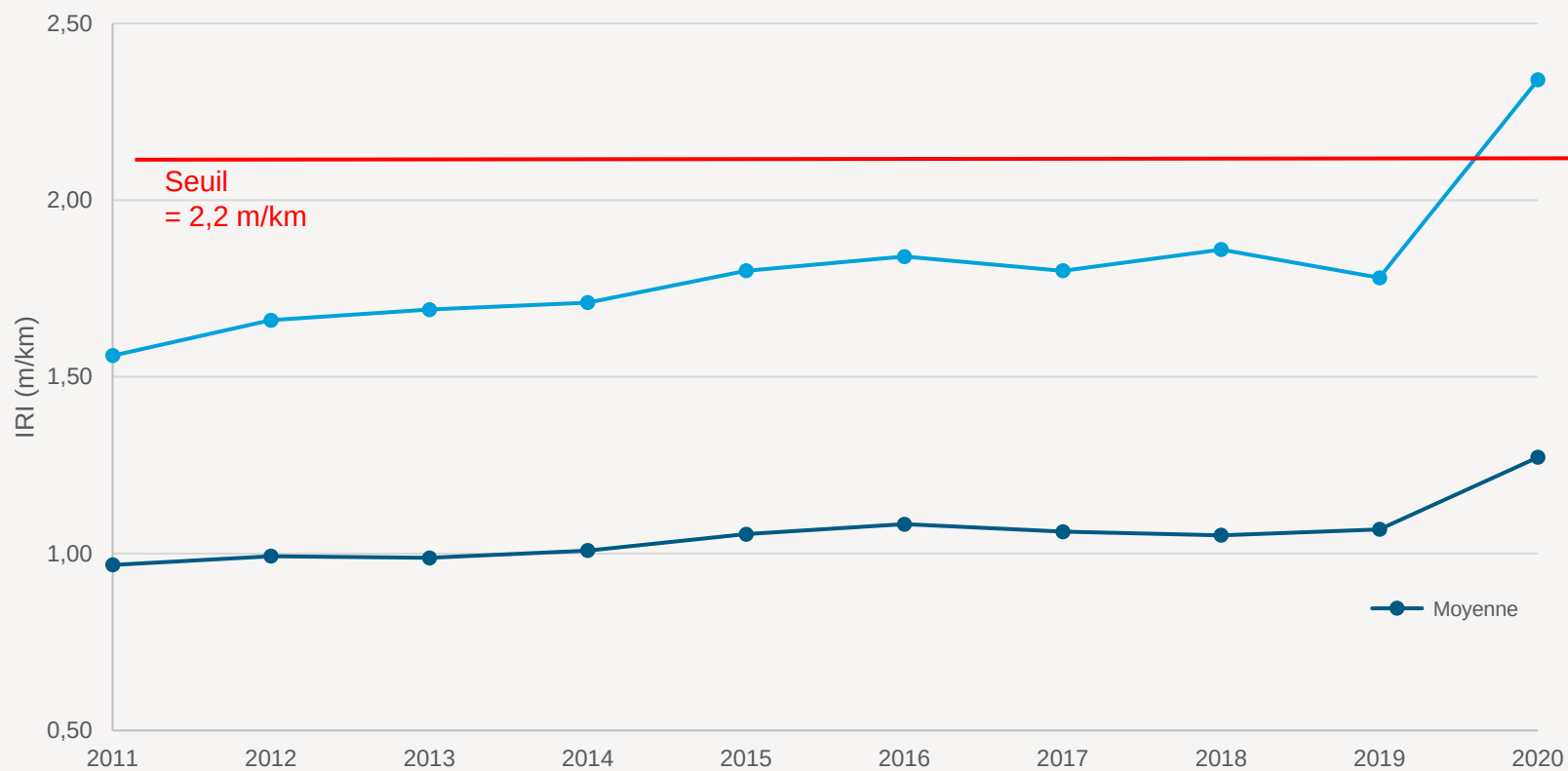
4.2 Validation de la performance pour les 9 premières années (IRI)

Évolution de l'IRI – Autoroute 25



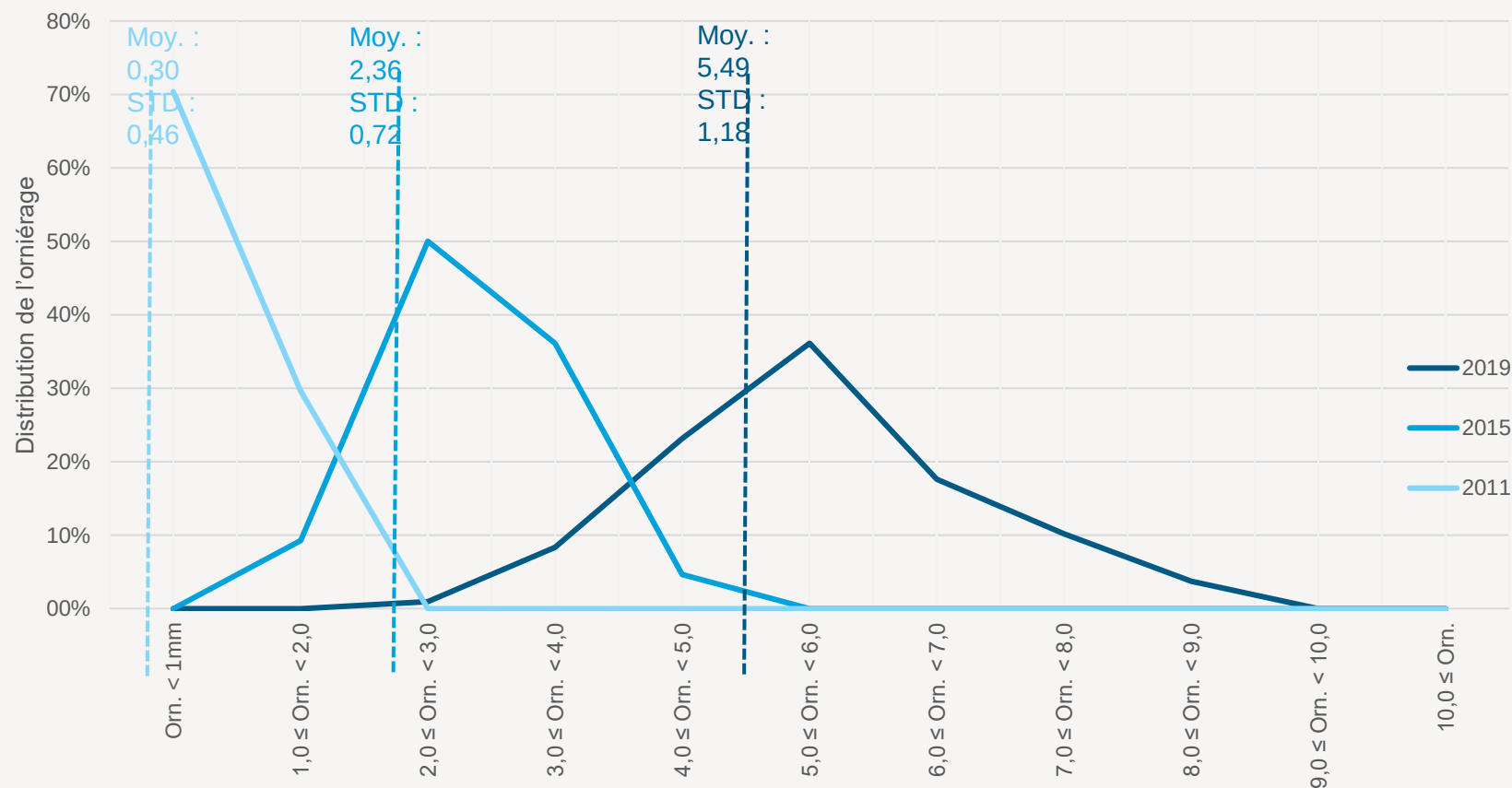
Évolution de l'IRI (2011-2020)

Évolution de l'IRI – Autoroute 25



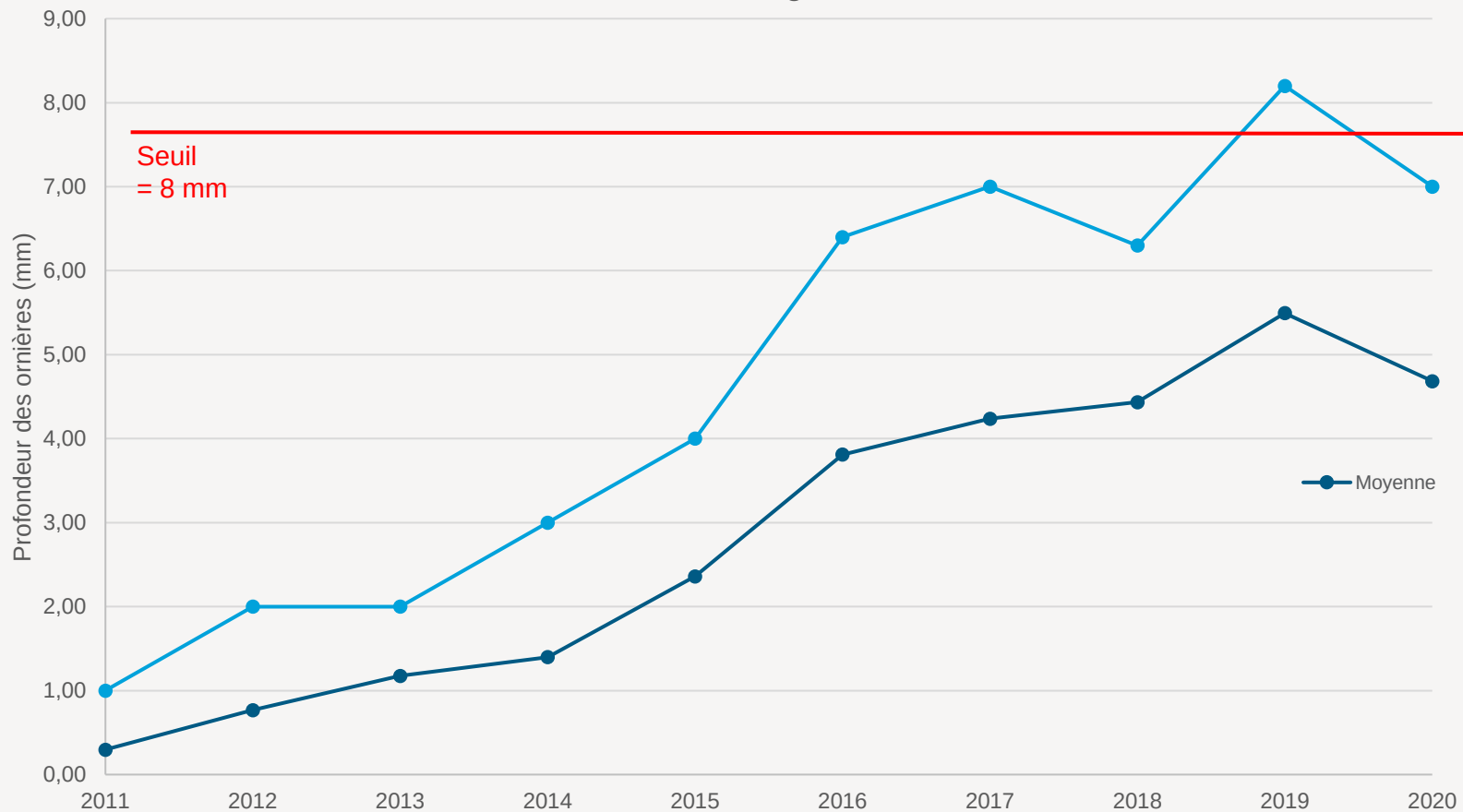
Validation de la performance pour les 8 premières années (orniérage)

Évolution de l'orniérage – Autoroute 25



Évolution de l'orniérage (2011-2020)

Évolution de l'orniérage – Autoroute 25



Validation de la performance pour les 8 premières années (orniérage)

Attention à l'approche statistique

Âge	Ornière moyenne (mm)	Ornière (mm) Écart-type	Intervalle de confiance de 99 %	
			Distribution normale	Valeur avec NC de 1 %
4	2,5	0,72	4,1 mm	4,0 mm
8	5,5	1,18	8,2 mm	8,2 mm

La distribution normale semble fonctionner



Étude de cas – Orniérage pour d'autres réseaux

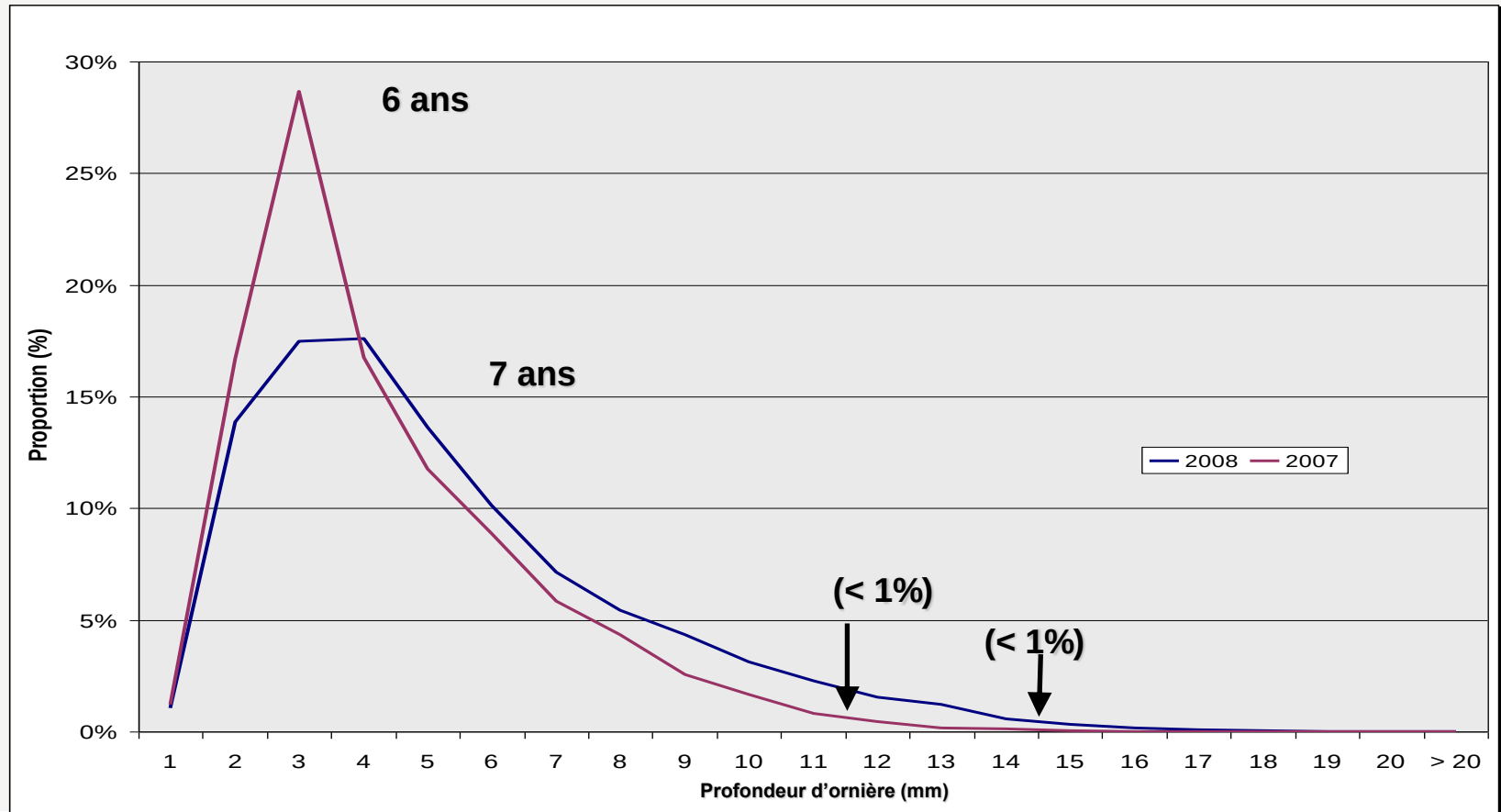
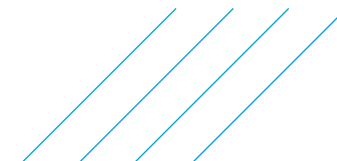


Figure 4

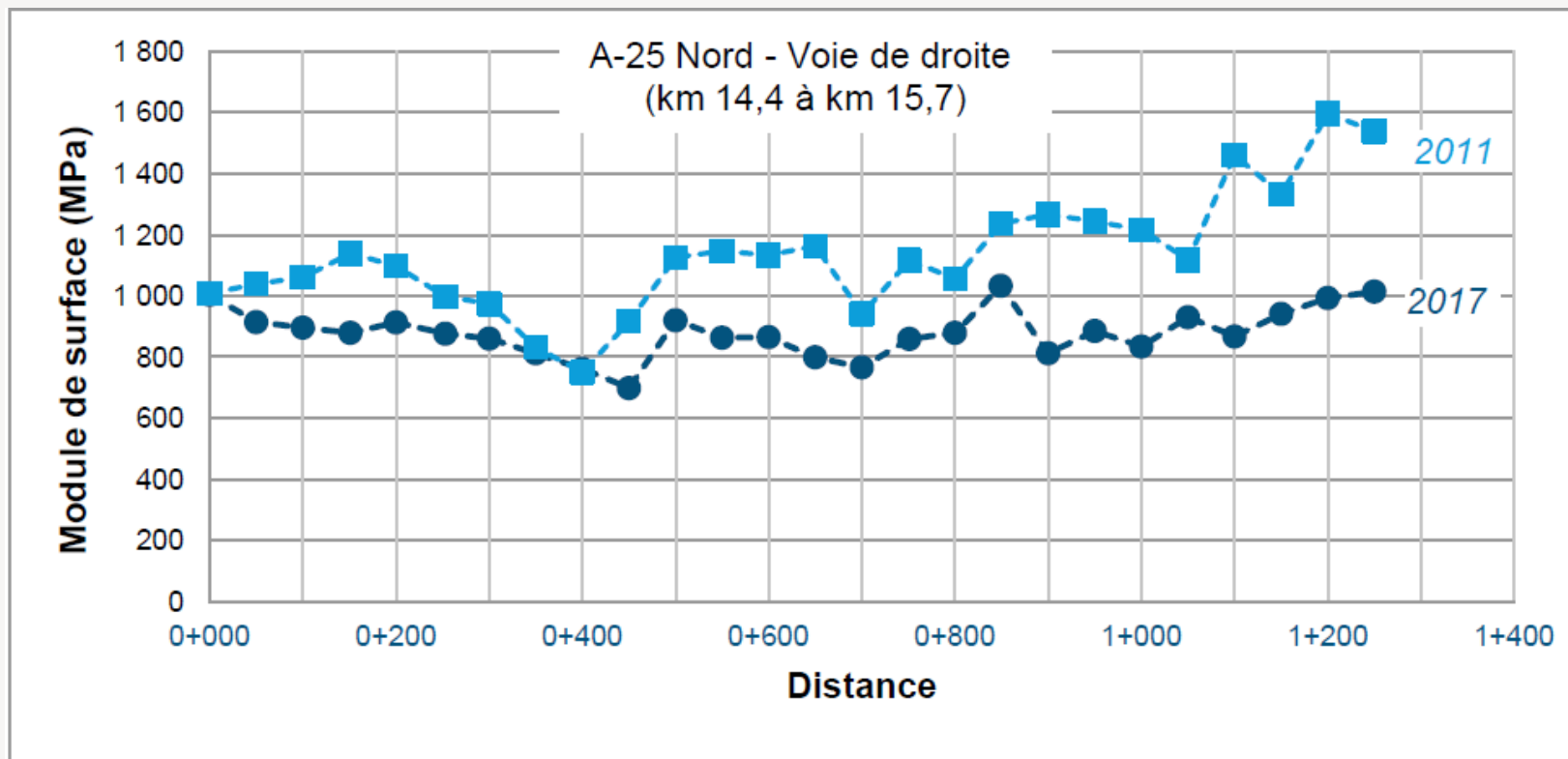
Étude de cas – Orniérage pour d'autres réseaux

Attention à l'approche statistique

Âge	Ornière moyenne (mm)	Ornière (mm) Écart-type	Intervalle de confiance de 99 %	
			Distribution normale	Figure n° 4
6	4,3	2,2	9,5 mm	11 mm
7	5,2	2,8	11,9 mm	14 mm



Validation de la capacité structurale



Validation de la capacité structurale

- › Perte d'environ 20 % de capacité totale en 7 ans
- › Aucun renforcement nécessaire avec le nouveau trafic pour les 25 prochaines années (14 M ÉCAS)
- › Aucun renforcement nécessaire avec le trafic établi en 2006 depuis 25 ans (23 M ÉCAS)
- › M_R de fondation réel beaucoup plus élevé que prévu (70 à 112 MPa au lieu de 48 MPa)



4.3 Savoir-faire à la suite de cette réussite

- › Le logiciel Chaussée 2.0 nous donne une chaussée structuralement plus forte qu'escompté
- › Le calcul de la conception par étape est un long processus d'itération
- › Les performances prévues après les 8 premières années devaient montrer un IRI non conforme, mais en réalité, ce fut l'orniérage qui démontrait des déficiences après 8 ans
- › Le fait de réutiliser le till excavé sur l'ensemble du tracé sur argile a certainement homogénéisé le comportement au gel du till, ce qui a eu comme résultat des chaussées plus résistantes au gel



5. Conclusion

5.1 Comment utiliser vos bilans d'état de chaussées pour concevoir une réhabilitation adéquate

- › Connaître sa performance au gel est impératif pour concevoir adéquatement, car un resurfaçage simple (ou remplacement d'enrobé) sur une chaussée gélive sera de l'argent jeté à la rue
- › Connaître sa capacité structurale permettra de concevoir une épaisseur d'enrobé adéquate pour résister au trafic
- › La gestion des chaussées du réseau routier municipal avec un logiciel performant permettra des économies substantielles à long terme, en permettant d'intervenir au bon endroit, au bon moment et surtout, avec le bon type d'intervention



5. Conclusion

5.2 Conclusion pour les PPP

- › Nouvelle façon d'aborder la conception de chaussées avec les critères de performance
- › LCCA pour analyser la valeur actuelle la plus basse
- › Est-ce que Chaussée 2.0 (AASHTO 93) produit une conception conservatrice?
- › Le design avec l'approche AASHTO ME nous aurait montré la vraie performance de la chaussée en termes d'IRI et d'orniérage?



Merci!

Questions?

louis.damours@snclavalin.com

