



Chaire de recherche industrielle  
du CRSNG sur l'interaction  
charges lourdes-climat-chaussées



## DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE PRÉDICTION DE L'UNI DES CHAUSSÉES FLEXIBLES

Symposium i3c du 19 Novembre 2020

Présenté par: **Youdjari Djonkamla**

Sous la direction de: **Guy Doré**



UNIVERSITÉ  
LAVAL

Faculté des Sciences et de génie  
Département de génie civil



## Plan de la présentation

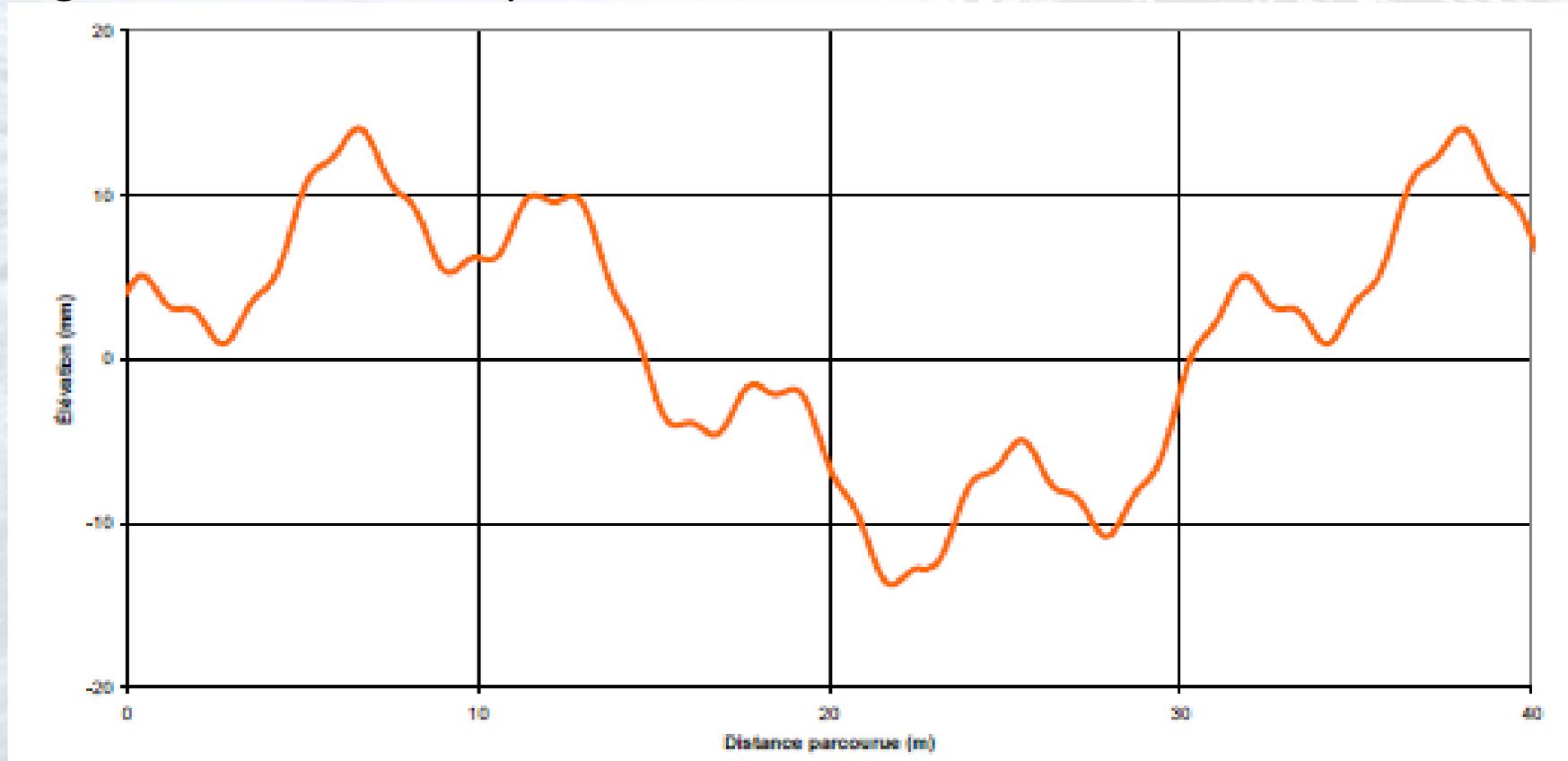
1. **Concept d'uni**
2. **Revue des connaissances sur les modèles de prédiction d'uni**
3. **Objectifs de la recherche**
4. **Formulation mathématique**
5. **Étalonnage du modèle**
6. **Validation du modèle**
7. **Conclusion et recommandations**

## Concept d'uni

- ✓ Certaines dégradations à la surface de chaussée affectent la dynamique des véhicules : d'où le problème de l'uni
- ✓ Dégradations : Les ornières, le soulèvement au gel et les fissures transversales, le carrelage, le désenrobage, les fissures de fatigue, le nid-de-poule et la pelade
- ✓ Problème d'uni: problèmes de sécurité, de confort et de coût d'utilisation de l'automobile

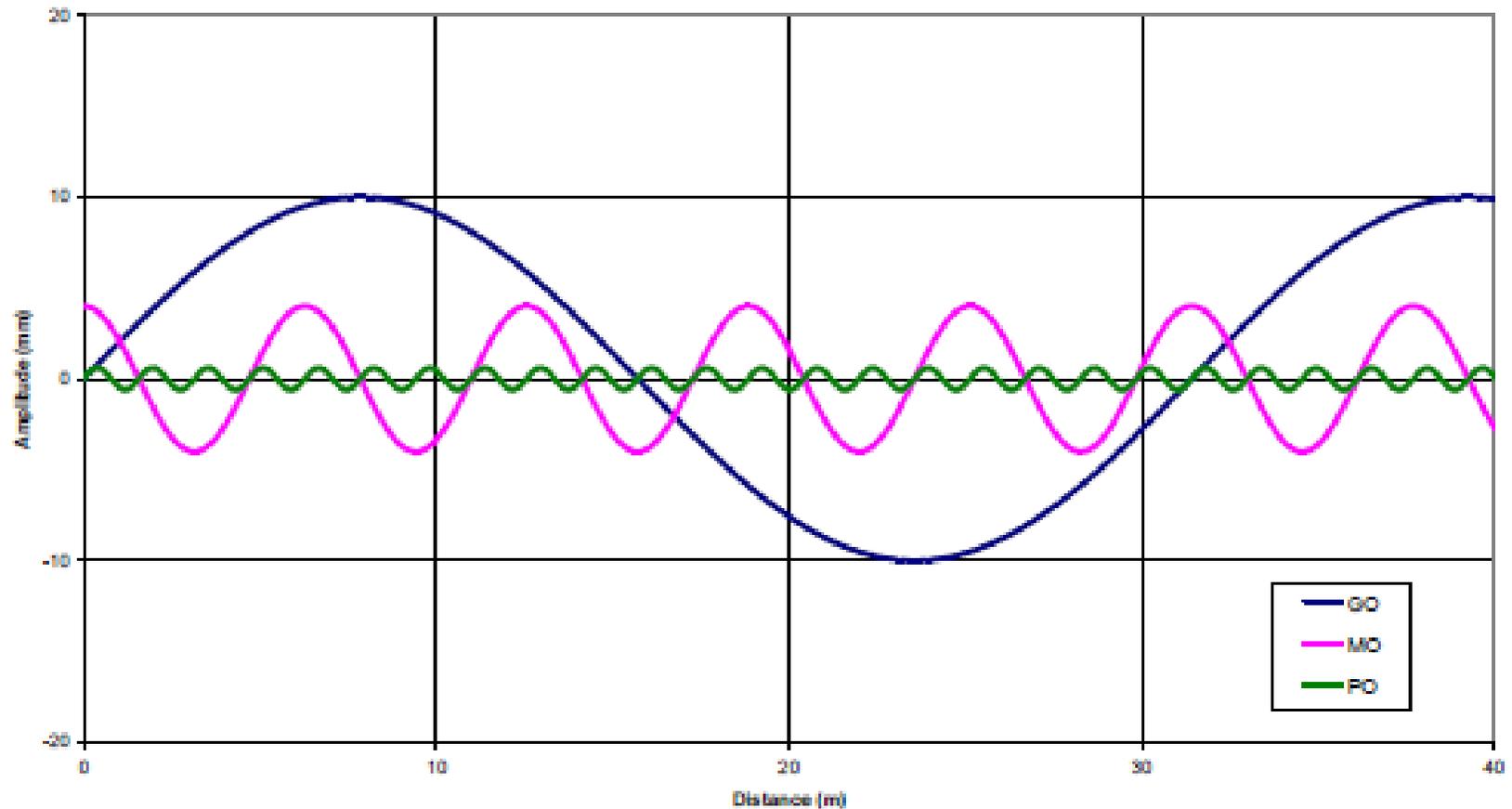
# Concept d'uni

- ✓ Surface de chaussée est représentée par un pseudo profil: longueur d'onde et amplitude



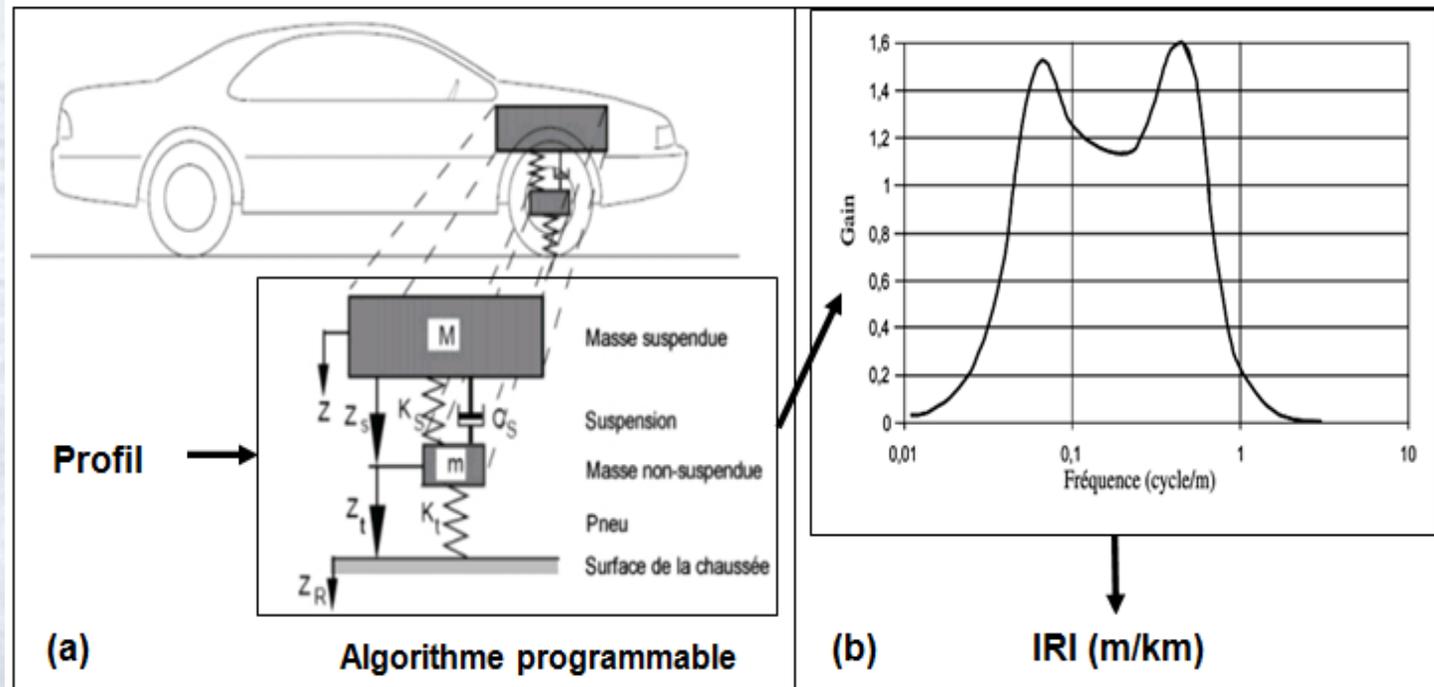
# Concept d'uni

- ✓ Surface de chaussée est représentée par un pseudo profil: longueur d'onde et amplitude



# Concept d'uni

## Représentation de l'uni: Indice de Rugosité Internationale (IRI)



Modèle « quart de véhicule » (adapté de Sayers et Karamihas 1998)

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{\frac{L}{V}} \left( \left| \dot{Z}_s - \dot{Z}_t \right| \right) dt$$

# Revue des connaissances sur les modèles de prédiction d'uni

- ✓ Plusieurs modèles existent, mais les plus importants sont présentés
  - ✓ MEPDG (NCHRP 1-37A, 2004): IRI
  - ✓ MMOPP (Ullidtz,1978): SV

## Constataion principale

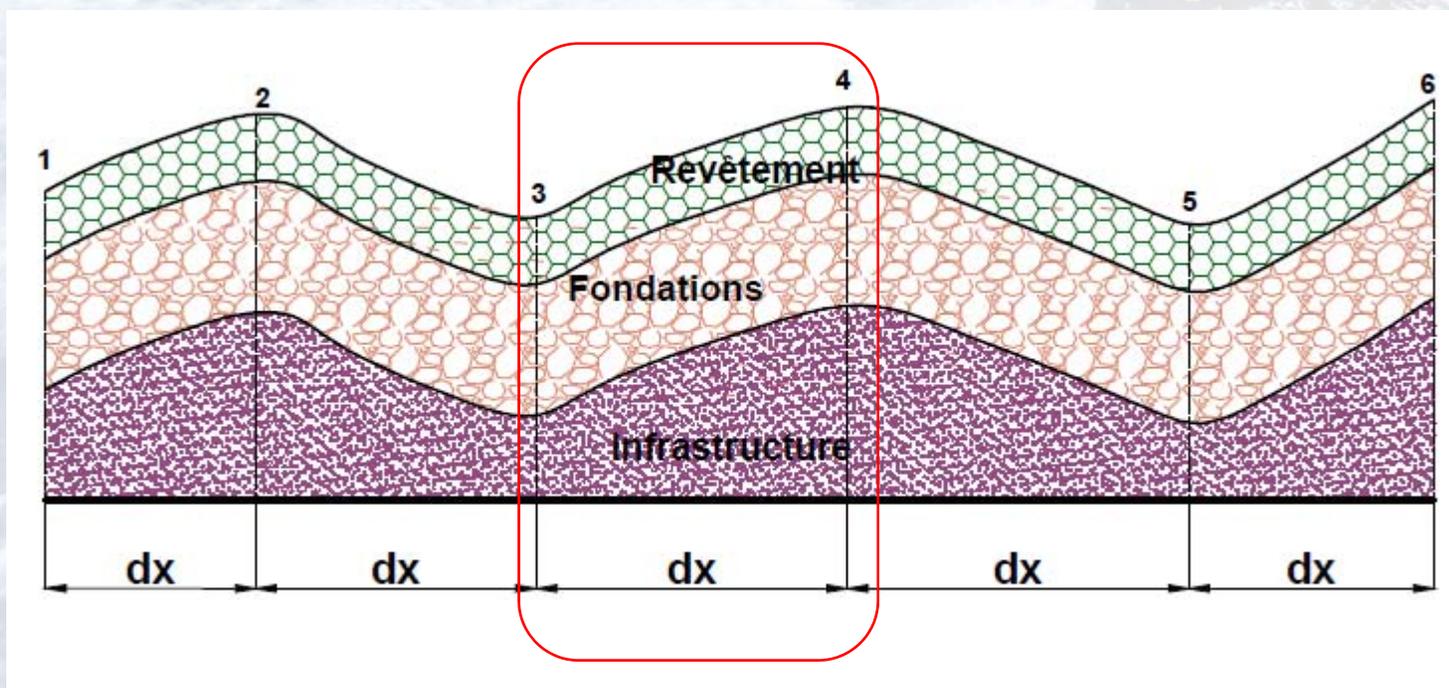
- ✓ Part importante d'empirisme dans les modèles existants, excepté celui d'Ullidtz qui est cependant un outil théorique.

## Objectifs de la recherche

- ✓ Développer un modèle mathématique de prédiction d'uni, en termes de l'IRI, et en se basant sur les principes physiques et statistiques (mécaniste-empirique)
- ✓ Spécifiquement il s'agit de:
  - Dériver un modèle mathématique adéquat
  - Étalonner et valider ledit modèle

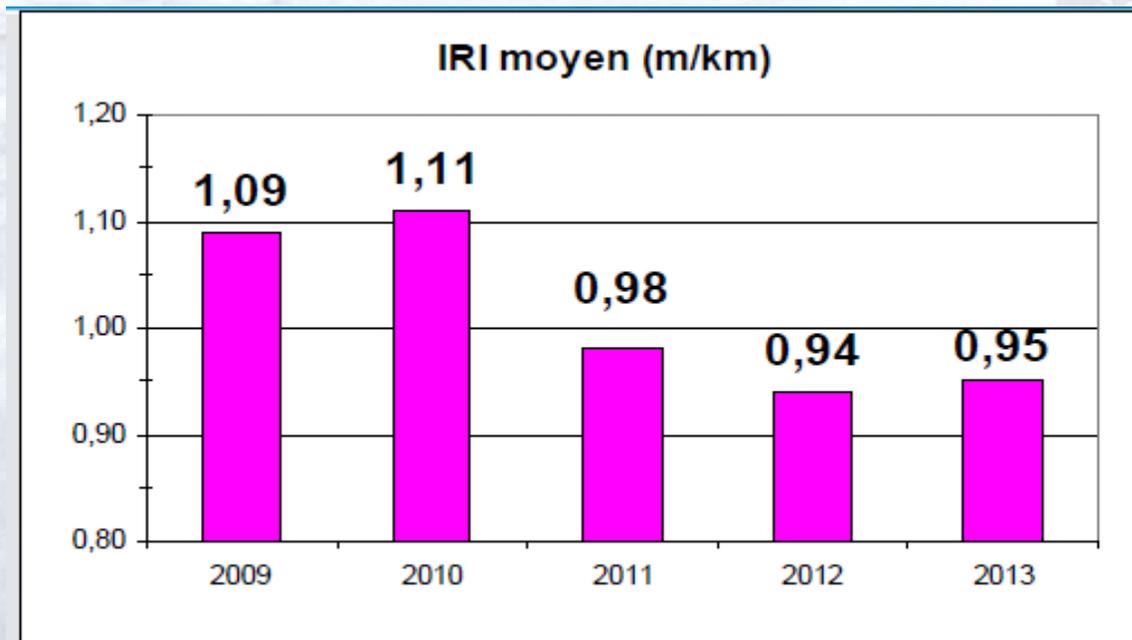
## Formulation mathématique: hypothèses

**Hypothèse 1 :** le profil longitudinal peut être divisé en plusieurs segments dont les surfaces supérieures sont caractérisées par des pentes



# Formulation mathématique: hypothèses

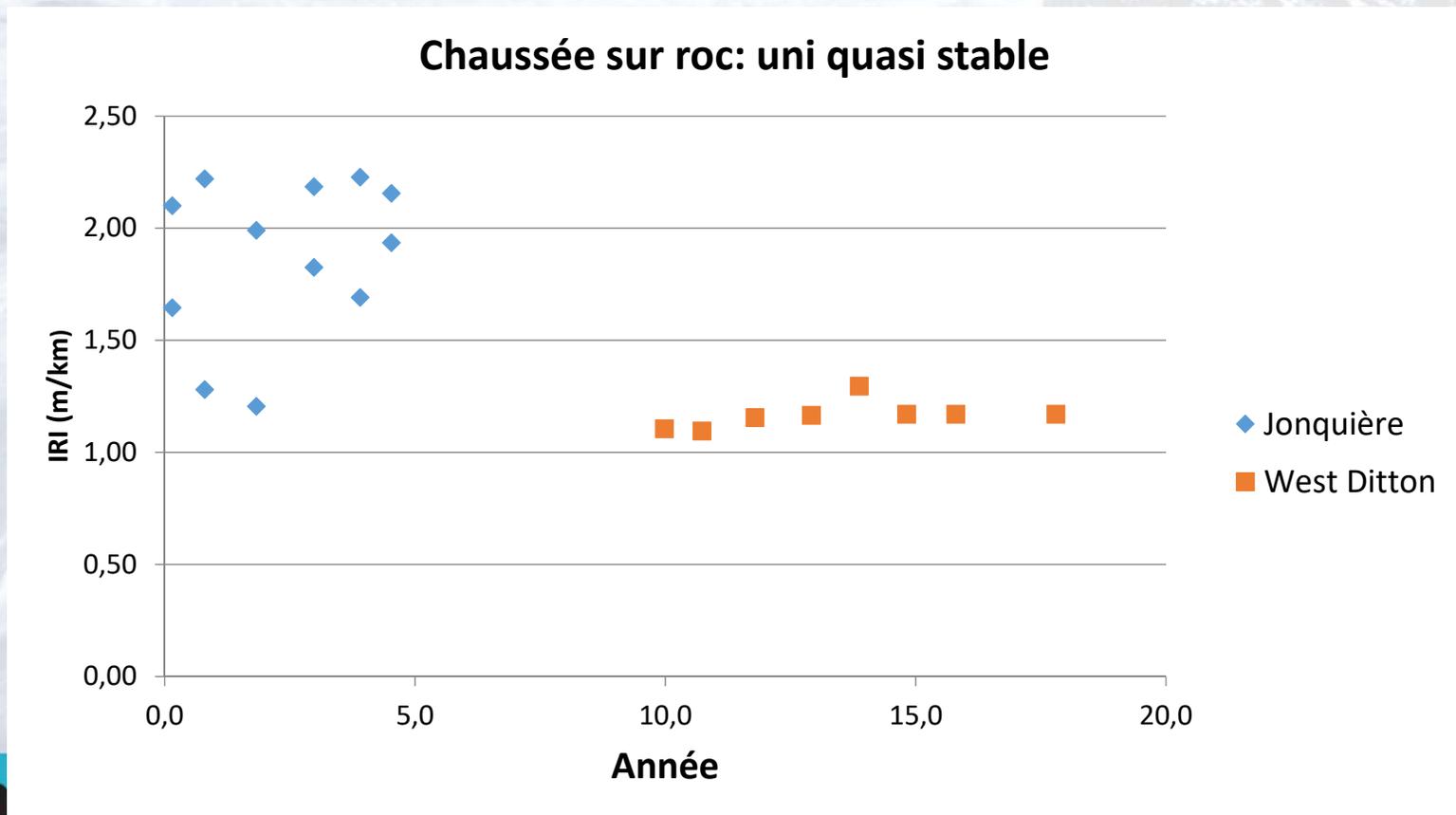
**Hypothèse 2** : Les chaussées neuves ont un problème d'uni initial, qui en termes de l'IRI est de l'ordre de 1 m/km



Uni initial  
Données MTQ (Hebert 2014)

## Formulation mathématique: hypothèses

**Hypothèse 3 :** Les déformations du sol d'infrastructure sont les principaux facteurs de dégradation de l'uni



## Formulation mathématique: hypothèses

**Hypothèse 4** : l'évolution de l'uni est principalement due à l'évolution de la déformation permanente et de celle du soulèvement au gel

**Hypothèse 5** : 9-10m peuvent être considérés comme des longueurs d'onde reflétant l'effet du sol d'infrastructure (OCDE 1984, Doré 1997 et Vaillancourt 2004)

**Hypothèse 6**: les fissures transversales sont considérées comme des facteurs aggravants

**Hypothèse 7**: le modèle n'est valable que pour le cycle de vie initial d'une chaussée flexible (15-35 ans)

## Formulation mathématique: équation dérivée

L'équation de l'uni au temps t :

$$IRI_t = (IRI_0 + IRI_{t_{\varepsilon_p}} + IRI_{t_s}) \times \varphi(F_t)$$

$$IRI_t = \left( IRI_0 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{e}{(n-1) \times dx} \left( \left| \varepsilon_{p(i-1)} - \varepsilon_{p(i)} \right| \right) \times C_1 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-1) \times dx} \left( \left| S_{(i-1)} - S_{(i)} \right| \right) \times C_2 \right) \times \varphi(F_t)$$

$$\varphi(F_t) = 1 + C_3 * F_t$$

$IRI_0$ : uni initial

$\varepsilon_p$  : déformation permanente

S: soulèvement au gel

dx: demi longueur d'onde

e: épaisseur du sol

$\varphi(F_t)$  : une fonction qui représente l'effet des fissurations transversales

K: coefficient représentant l'effet d'amplification dynamique

$C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$ : coefficients d'étalonnage

n: nombre de point de mesure le long du profil

# Formulation mathématique: paramètres du modèle

$$IRI_t = \left( IRI_0 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{e}{(n-1) \times dx} \left( \left| \varepsilon_{p(i-1)} - \varepsilon_{p(i)} \right| \right) \times C_1 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-1) \times dx} \left( \left| S_{(i-1)} - S_{(i)} \right| \right) \times C_2 \right) \times \varphi(F_t)$$

## ✓ Paramètres fixes le long d'un tracé donné

- ❖ dx: 5 m (demi longueur d'onde)
- ❖ K=1,45 (simulation avec ProVAL)
- ❖ Épaisseur du sol (e): 300 mm (épaisseur maximale de la PST)
- ❖ Uni initial=0,95 m/km
- ❖  $\phi(F_t) \geq 1$  ( $F_t$ : obtenue d base des données mais mérite d'approfondissement)
- ❖  $C_1=0,85$ ,  $C_2=0,95$  et  $C_3= 0,0009$  (obtenue par régression )

# Formulation mathématique: paramètres du modèle

$$IRI_t = \left( IRI_0 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{e}{(n-1) \times dx} \left( \left| \varepsilon_{p(i-1)} - \varepsilon_{p(i)} \right| \right) \times C_1 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-1) \times dx} \left( \left| S_{(i-1)} - S_{(i)} \right| \right) \times C_2 \right) \times \varphi(F_t)$$

## ✓ Paramètres variables le long d'un tracé donné

❖ Modèle de S développé par Konrad et al. (1981 et 2005)

$$S = 1,09 \times dt \times SP \times grad(T)$$

$$SP \times S_s = (116 - 75 \times \log(d_{50}(FF))) \times 10^3$$

❖ Modèle de  $\varepsilon_p$  développé dans le cadre de ce projet de recherche

$$\varepsilon_p (\%) = \left( \alpha \frac{S_r}{\rho_d} + \beta \right) \left( \frac{N}{1000} \right)^{(k_1 \rho_d + k_2 P80 + k_3 P2 + k_4 Cc + k_5 VB)}$$

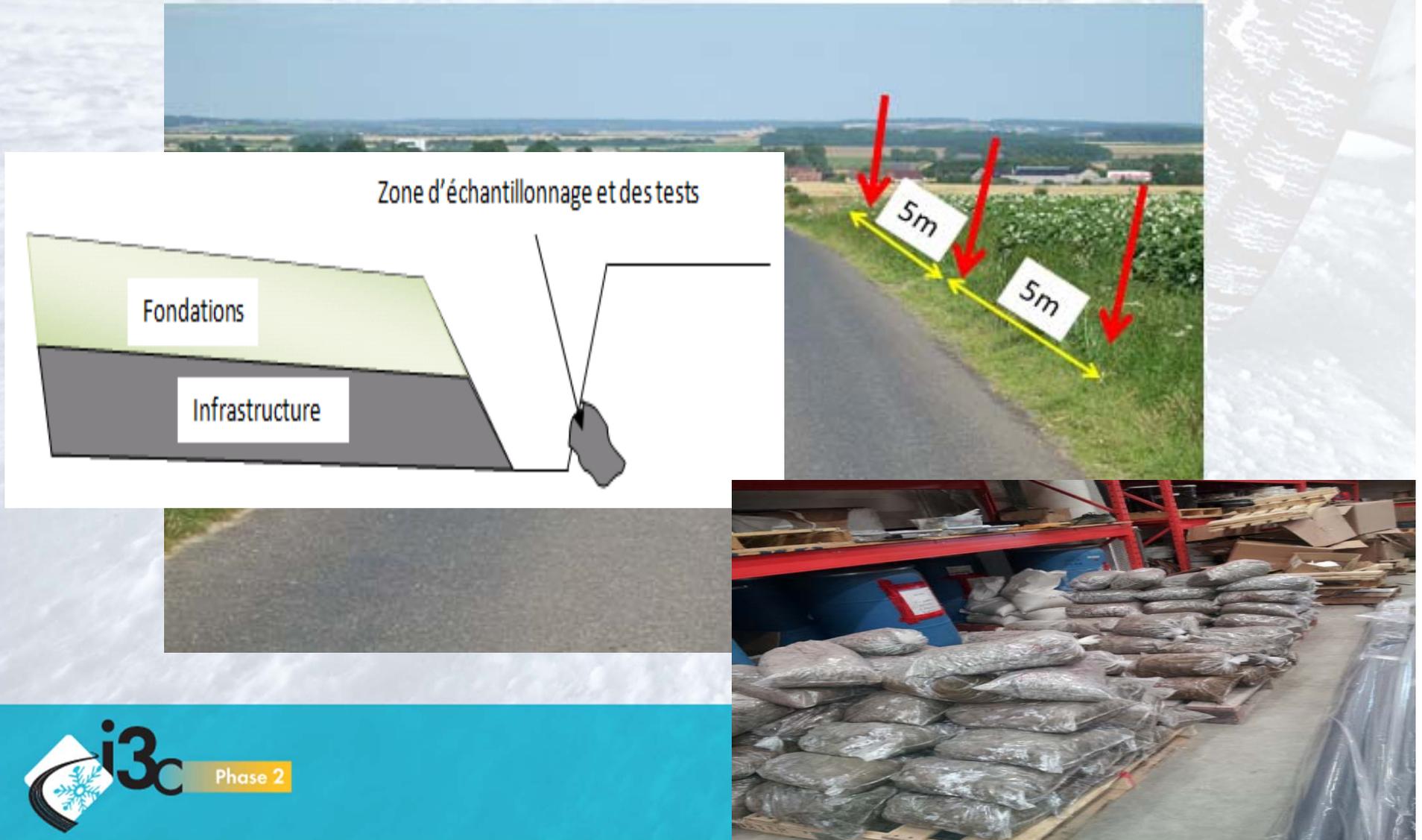
# Étalonnage du modèle: base des données

## MTQ et LTPP

Localité	ECAS_J	FC	Temps (ans)	ECAS_I	ECAS_F	IRI_MI (m/km)	IRI_MF (m/km)	Ft_M (mm/m)	Grad(T) (°C/m)
Champlain (891021)	1338	3	6 à 12	2 596 419	5 696 680	1,43	2,14	203.8	-
Donnacona (891125)	903	5	11 à 14	3 848 618	5 309 269	2,03	2,83	-	0,95
Scott-Ste-Marie (891127)	713	5	11à 16	3 038 831	5 060 337	2,59	2,87	-	1,5
St-Celestin (63E98D11)	1707	2	0,1 à 1,5	50 754	771 978	1,28	1,91	0	0,88
St-Martyrs (38E94M14)	378	2	0,4 à 6,6	45 090	791 661	1,72	5,41	190.9	2,65

# Étalonnage du modèle: principe d'échantillonnage

Échantillonnage : 10 points espacés de 5m



## Étalonnage du modèle: paramètres visés

$$IRI = \left( IRI_0 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{e}{(n-1) \times dx} \left( \left| \varepsilon_{p(i-1)} - \varepsilon_{p(i)} \right| \right) * C1 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-1) \times dx} \left( \left| S_{(i-1)} - S_{p(i)} \right| \right) * C2 \right) \times \varphi(F_t)$$

Cas de résultat des essais de caractérisation sur le sol de Donnacona

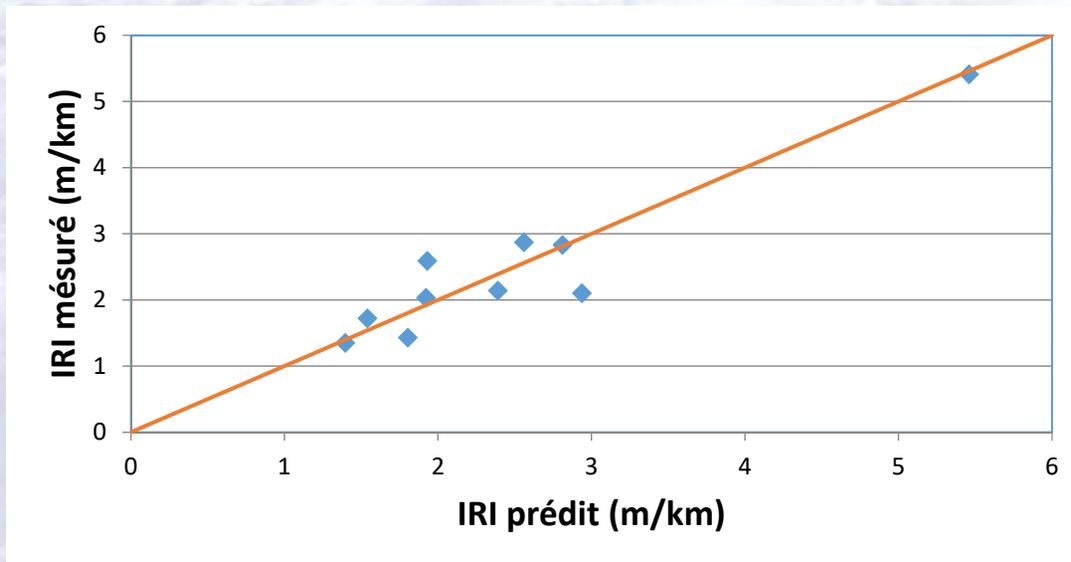
Point	VB	Fines (%)	Argile (%)	Cc	Pd (kg/m <sup>3</sup> )	Sr (%)	Ss (m <sup>2</sup> /g)	D50(FF) (um)
1	0,91487	82,4	4,6	1,67	1790	90,62	19,15	32
2	0,70034	83,8	9,5	1,7	1660	98,01	14,66	33
3	0,70592	73,8	10,4	1,68	1750	97,26	14,77	29
4	0,70736	71,2	6,3	2,1	1720	96,84	14,80	30
5	0,6337	77,5	7,5	2,46	1750	94,32	13,26	32
6	0,74579	84,1	8,4	2,83	1690	97,92	15,61	32
7	0,75116	78,8	10,5	1,81	1685	98,75	15,72	28
8	0,61108	81,6	10,3	1,33	1730	95,25	12,79	30
9	0,70699	79,6	11,3	0,9	1670	97,73	14,79	28
10	0,68106	83,6	12,7	0,69	1660	96,99	14,25	26

# Étalonnage du modèle: constantes d'étalonnage

Outil Solver du logiciel Excel: minimisation de la différence de la somme des carrés

$$IRI = \left( IRI_0 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{e}{(n-1) \times dx} (|\varepsilon_{p(i-1)} - \varepsilon_{p(i)}|) * C1 + K \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-1) \times dx} (|S_{(i-1)} - S_{p(i)}|) * C2 \right) \times (1 + C3 * F_t)$$

$$C1 = 0,85; C2 = 0,95; C3 = 0,0009$$

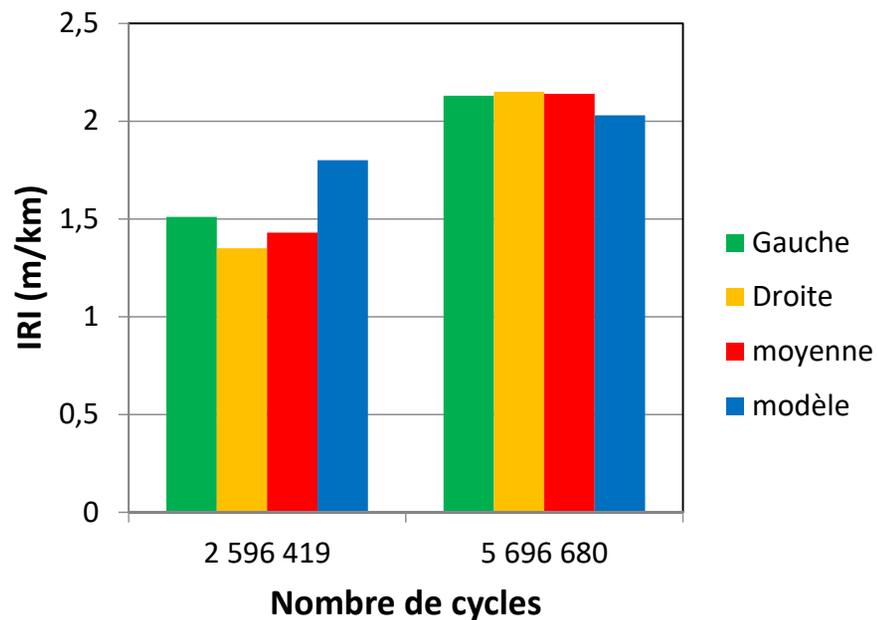


- ✓ 5 sections (différente chaussée)
- ✓ 10 observations
- ✓ Erreur absolue = 0,28 m/km
- ✓ Erreur relative = 1,15%

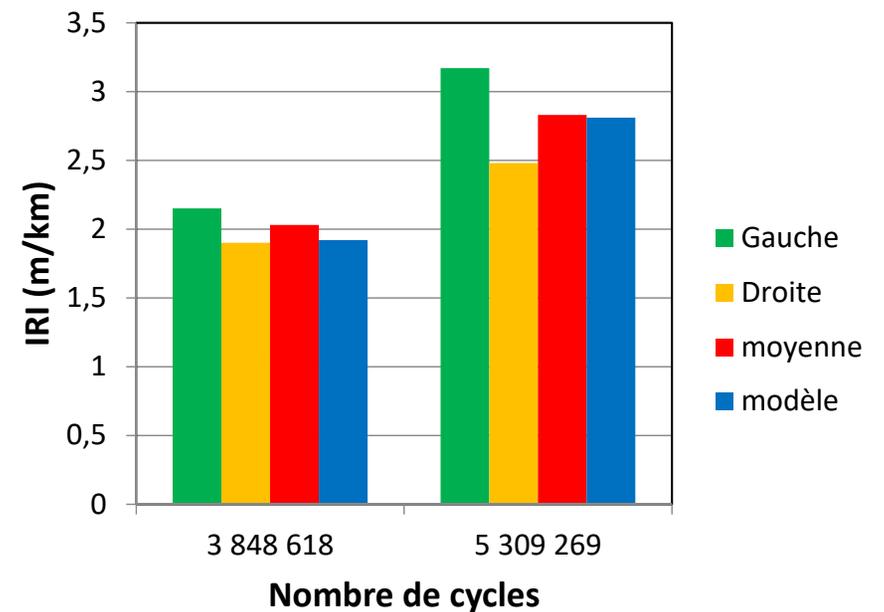
Écart absolu acceptable, car inférieur à 0,48 m/km (répétabilité) et à 0,73 m/km (reproductibilité) (Leroux 1995)

# Étalonnage du modèle: analyse des résultats

## Champlain (891021)



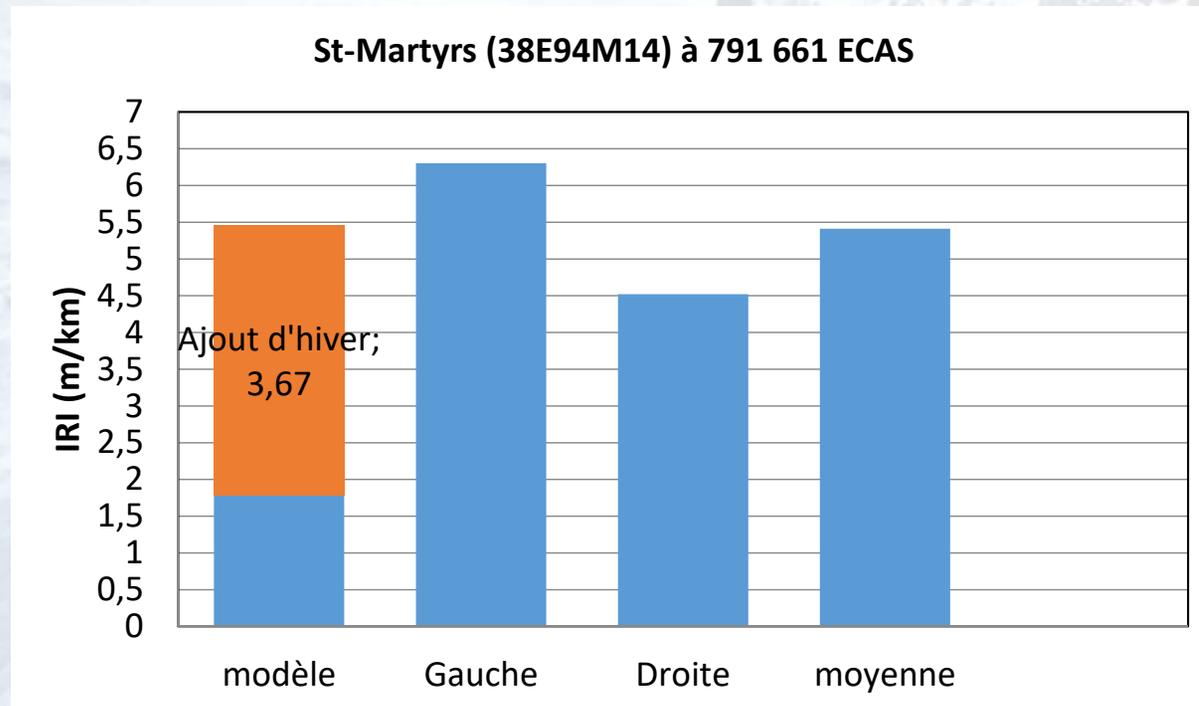
## Donnacona (891125)



Variation de 0,1 à 0,71 m/km

Variation 0,2 à 0,36 m/km

# Étalonnage du modèle: analyse des résultats

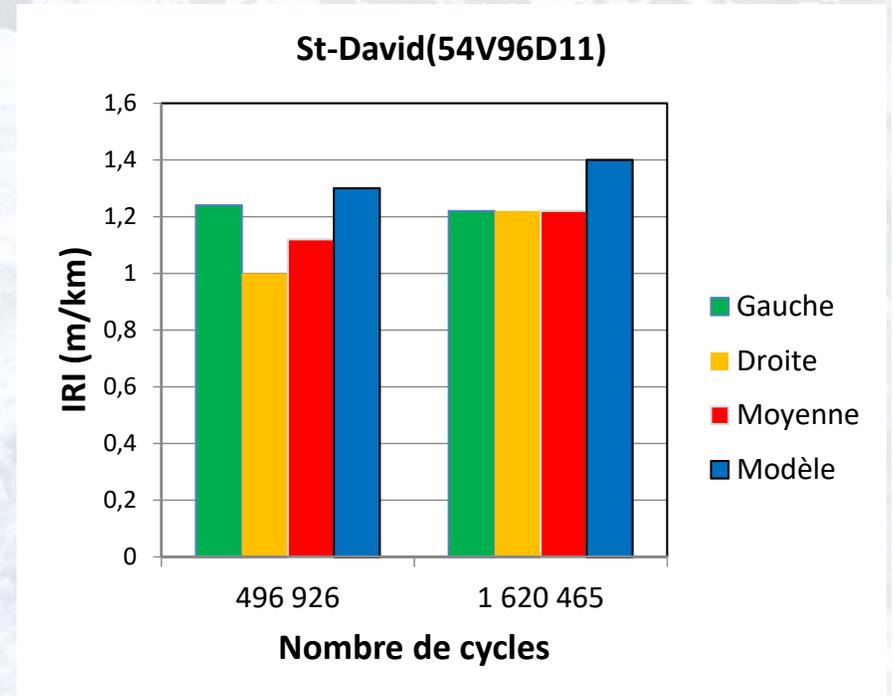
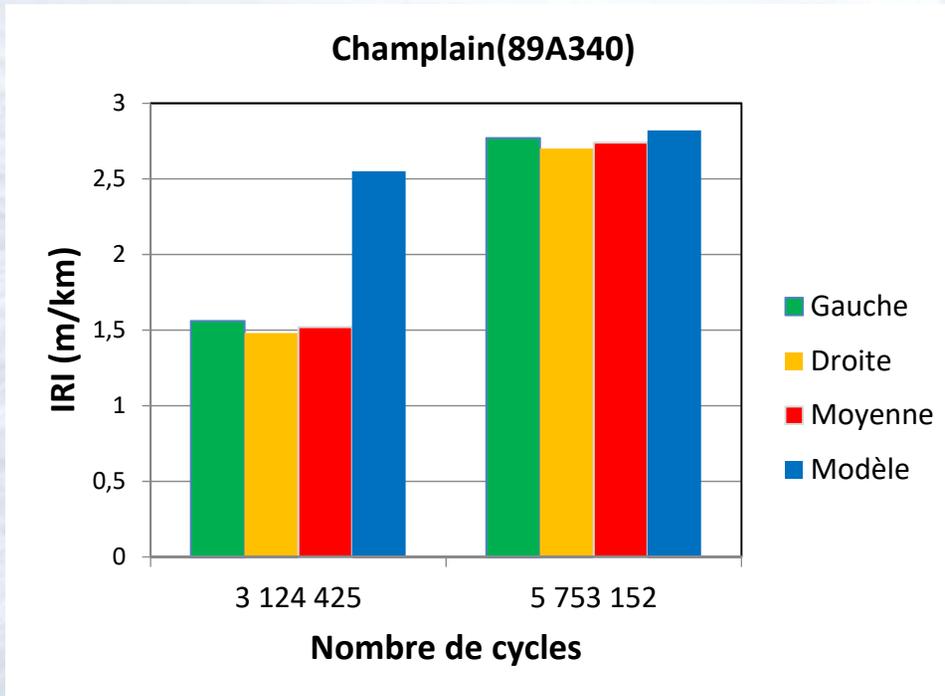


Variation de 0,84 à 0,94 m/km

## Validation du modèle: principe de niveau

Niveau 1	Propriétés géotechniques requises à chaque 5m sur une section visée (comparable à l'IRI au 100m)
Niveau 2	Propriétés géotechniques requises à chaque 5m sur quelques sections de 50m (comparable à IRI au 10m)
Niveau 3	Propriétés géotechniques disponibles à certains points et écart-types du sol des paramètres du sol de même nature

# Validation du modèle: Exemple de validation par le 3<sup>ème</sup> niveau



Écart est globalement inférieur à 0,2 m/km à l'exception du cas de Champlain (89A340) au cycle 3 124 425 qui est d'environ 1 m/km

## Conclusion et recommandations

- ✓ Un modèle développé sur les bases physiques en ayant dans sa forme mathématique la déformation permanente ( $\epsilon_p$ ), le soulèvement au gel (S), la fissuration transversale ( $F_t$ ) et le coefficient (K) représentant l'effet d'amplification ou d'atténuation des longueurs d'onde
- ✓ Un modèle étalonné avec des données fiables des bases de données de MTQ et de LTPP. Les erreurs relatives et absolues sont respectivement de 1,15 % et 0,24 m/km et sont acceptables par rapport aux tolérances observées de la littérature (Leroux 1995)

## Conclusion et recommandations

- ✓ Pour faciliter l'utilisation du modèle, le principe d'utilisation par 3 niveaux a été proposé
- ✓ La validation du modèle par des données sur différents sites et notamment au premier niveau d'utilisation est vivement recommandée. Cette validation devrait se faire aussi sur des différentes structures de chaussée flexible
- ✓ La prédiction des fissures transversales et son insertion dans le modèle méritent d'être approfondies
- ✓ La prise en compte de la déformation permanente résiduelle due au dégel dans le modèle d'uni proposé mérite aussi de travaux de recherche additionnels



Chaire de recherche industrielle  
du CRSNG sur l'interaction  
charges lourdes-climat-chaussées

**MERCI À MON DIRECTEUR GUY DORÉ**  
**MERCI AUX PARTÉNAIRES DE LA CHAIRE**  
**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

Partenaires

