



# Projet Regina Bypass

## Structures innovatrices de chaussées bitumineuses

Formation Bitume Québec  
Novembre 2017

Présenté par Yvan Paquin, ing. en remplacement de Marc Proteau ing.



# AGENDA

- CADRE DU PROJET
- CONCEPTION ROUTIÈRE
- APPROCHE MÉCANISTE DE LA CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE
- STRUCTURES DE CHAUSSÉE FLEXIBLES
- COMBINATION: PROCESSUS DE RECYCLAGE EN PLACE ET ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS (BROWNFIELD)
- SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES POUR SUIVI DES PERFORMANCES

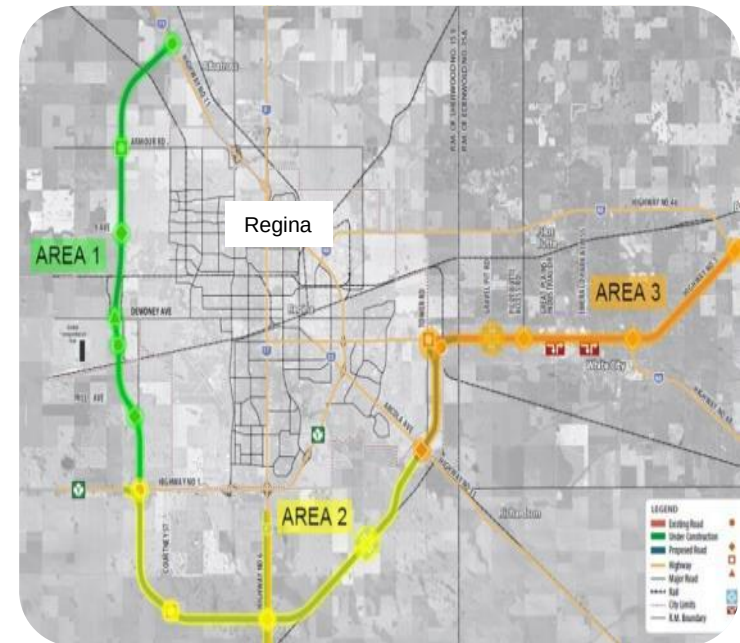
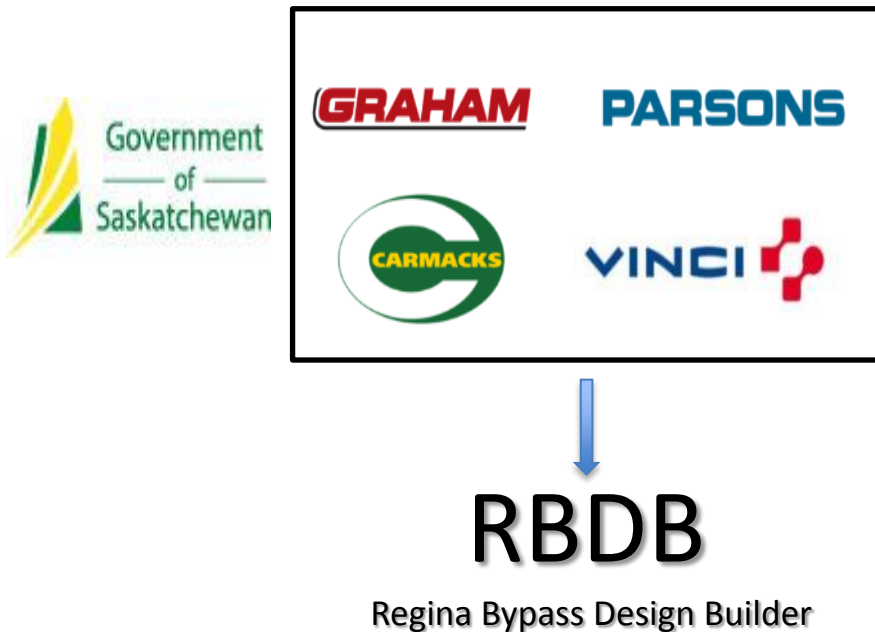




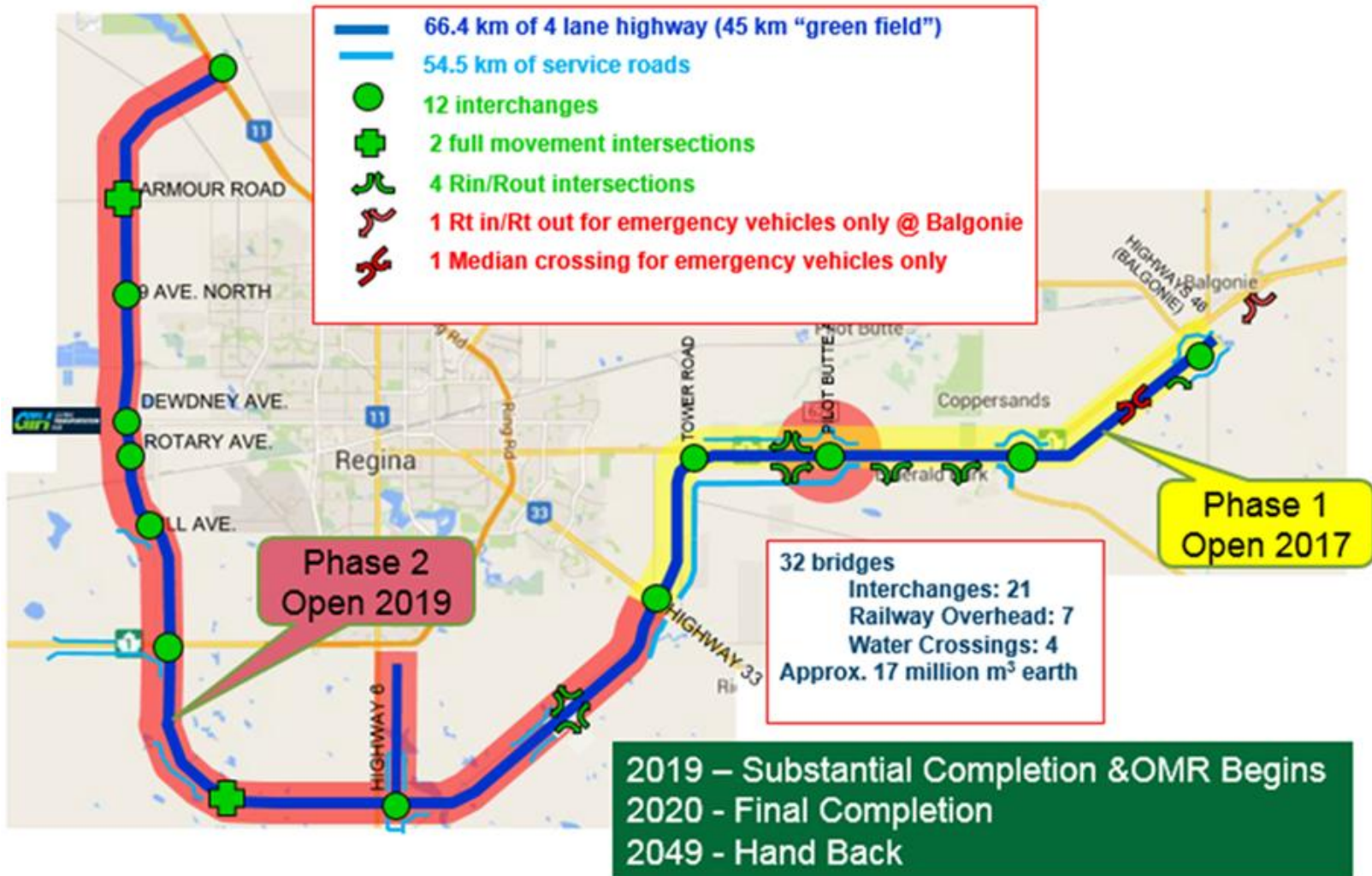
# CADRE DU PROJET

# CADRE DU PROJET

- PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ (PPP)
- CONTRAT DE TYPE CCFEE (DBFOM)
  - Conception- Construction-Financement-Exploitation- Entretien



# CADRE DU PROJET







# CONCEPTION ROUTIÈRE

# CONCEPTION ROUTIÈRE

---

## HYPOTHÈSES DE BASE

CONCEPTION DE LA STRUCTURE DE L'AUTOROUTE CONFORME À L'ENSEMBLE DES SPÉCIFICATIONS LOCALES

- HAUTEUR DES ACCOTEMENTS AU MINIMUM AU-DESSUS DU NIVEAU DES EAUX DE DRAINAGE
- DÉGAGEMENT DE LA NEIGE
- DÉGAGEMENTS MINIMAUX AU-DESSUS DU PONCEAU
- ÉPAISSEUR MINIMUM POUR PRÉVENIR LE GONFLEMENT DU AU GEL

# DÉFIS DU DESIGN

---

## CARACTÉRISTIQUES UNIQUES ET PERFORMANCES EXIGÉES

- DURÉE MINIMALE DE LA CONCEPTION INITIALE DE LA CHAUSSÉE
  - 15 ans
- ÉPAISSEUR MINIMALE DES ENROBÉS BITUMINEUX
  - 80 mm
- DURÉE DE LA CONCESSION
  - 30 ans
- DURÉE DE VIE UTILE RÉSIDUELLE (RSL) SUIVANT LA CONCESSION DE 30 ANS
  - 15 ans
- RENFORCEMENT MAXIMAL DU REVÊTEMENT BITUMINEUX APRÈS 30 ANS:
  - 50 mm
- SPÉCIFICATIONS CONTRACTUELLES PERMETTANT L'UTILISATION DE NOUVEAUX PRODUITS ET DE TECHNOLOGIES INNOVANTES



# CONCEPTION ROUTIÈRE

---

## CRITÈRES DE PERFORMANCE

### — ORNIÉRAGE MOYEN

- < 10 mm sur 40% des surfaces
- < 20 mm pour tous segments de 50 m

### — INDICE DE RUGOSITÉ INTERNATIONAL (IRI)

- < 2,5 m/km sur 40% des surfaces
- < 3,0 pour tous segments de 50 m

### — «SEAL SCORE»

- Algorithme du Ministère de la voirie et de l'infrastructure de la Saskatchewan
- < 3,0

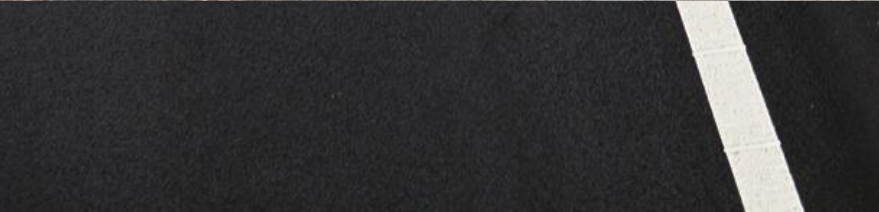
### — COEFFICIENT D'ADHÉRENCE (SN)

- > 30

### — ABSENCE DE TOUT FAIBLESSE STRUCTURALE ÉVIDENTE

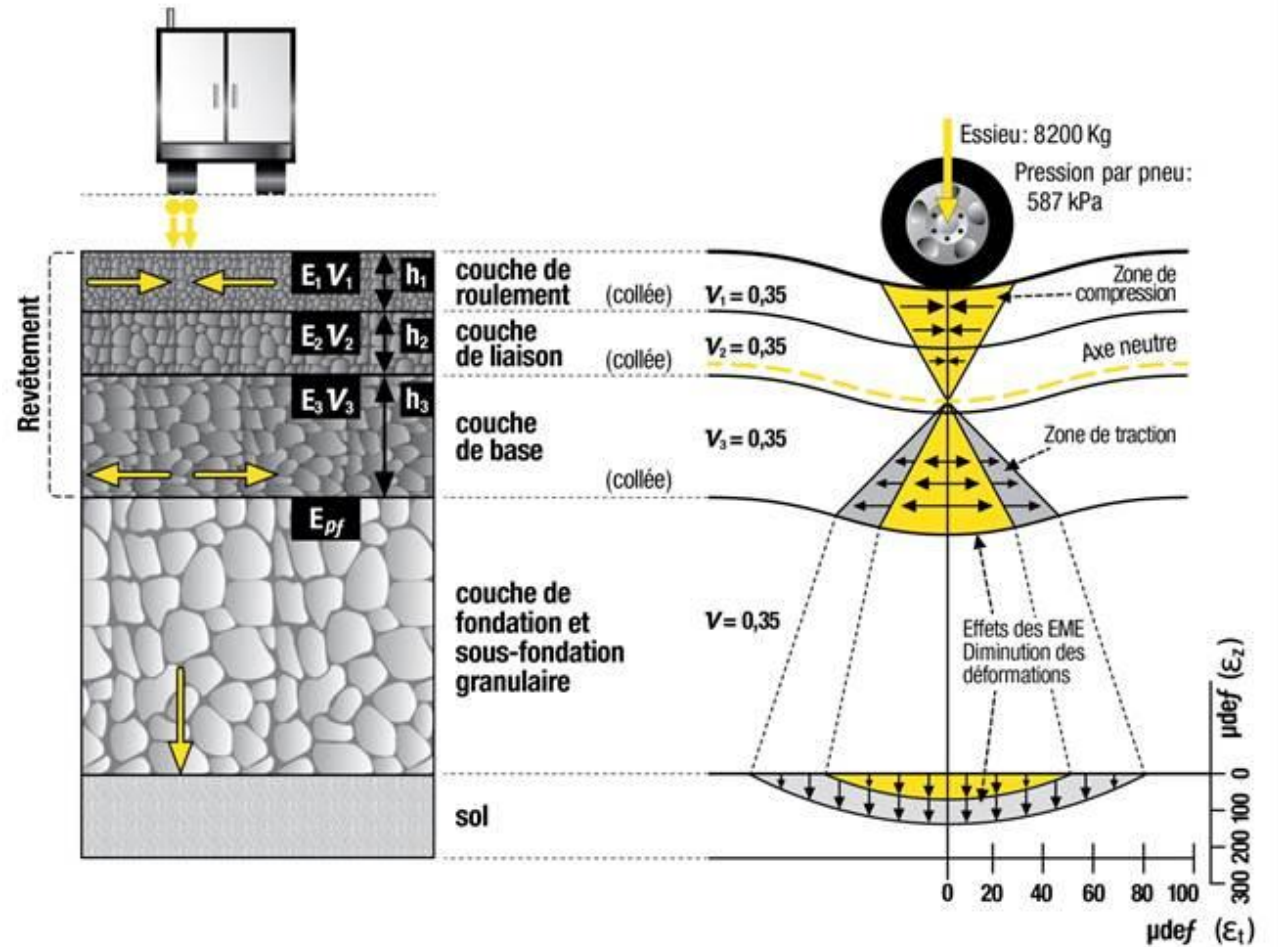


# APPROCHE MÉCANISTIQUE DE CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE



# APPROCHE MÉCANISTIQUE DE CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE

## LE CONCEPT



# APPROCHE MÉCANISTIQUE DE CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE

## ADAPTATION DE LA PERFORMANCE DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS AUX CONDITIONS CLIMATIQUES

| Description                                                                                                                        | Régions                     |                      |                                | Références                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                                                                                                                                    | Vancouver<br>Toronto<br>É-U | Montréal             | <i>Regina</i>                  | NF EN 13108-1<br>EME Classe 2 |
| Modules $ E^* $ , MPa <ul style="list-style-type: none"><li>15°C, 10 Hz</li><li>10°C, 10 Hz</li><li>5°C, 10 Hz</li></ul>           | > 14 000                    | > 11 000<br>> 14 000 | > 11 000<br><i>&gt; 14 000</i> | > 14 000                      |
| Fatigue, $10^6$ cycles, $\mu_{def}$ <ul style="list-style-type: none"><li>10°C, 10 Hz, TCD</li><li>10°C, 25 Hz, 2 points</li></ul> | > 130                       | > 130                | > 150                          | > 130                         |
| Résistance à l'orniérage,<br>30 000 cycles, % <ul style="list-style-type: none"><li>100 mm, 60°C</li></ul>                         | < 5,0                       | < 5,0                | < 7,5                          | < 7,5                         |
| Résistance au retrait<br>thermique, °C                                                                                             | < -22                       | < -28                | < -28                          | ---                           |



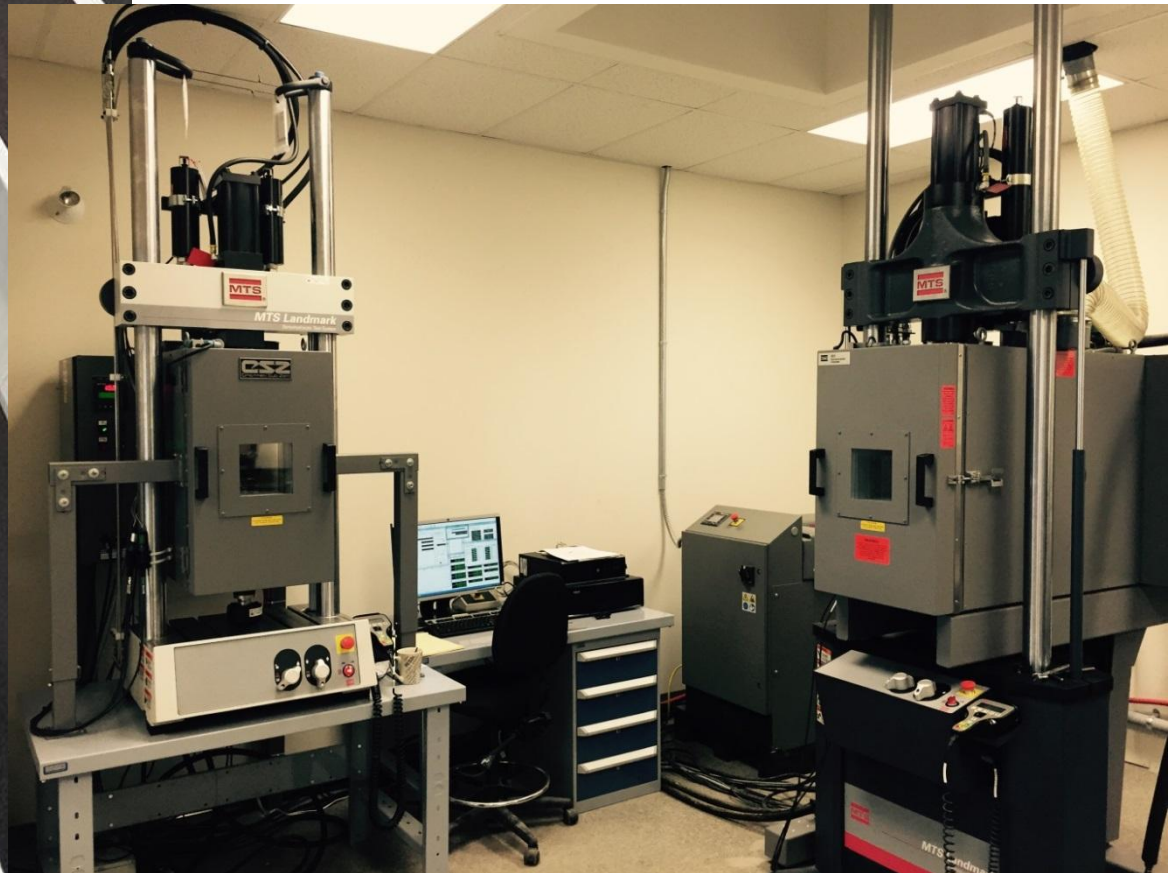
# APPROCHE MÉCANISTE DE CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE

## GREENFIELD (NOUVEAUX SEGMENTS)

VALIDATION DE LA CAPACITÉ PORTANTE DE LA PLATE-FORME AU-DESSUS  
DE LA COUCHE DE FORME



# STRUCTURES DE CHAUSSÉE FLEXIBLES



# GREENFIELD (NOUVEAUX SEGMENTS)

---

## BASE DE CALCUL POUR LA CONCEPTION DE LA CHAUSSÉE

- UTILISATION D'ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS ADAPTÉS AU CLIMAT FROID POUR LES COUCHES DE BASE ET INTERMÉDIAIRES
- UTILISATION DU BITUME MODIFIÉ (PMB) PG 64-37 POUR LES COUCHES D'USURE SEMI-DENSES DE 0-10 MM
- TEMPÉRATURE ANNUELLE MOYENNE DE 3,1°C
- TRÈS FAIBLE CAPACITÉ PORTANTE DE LA COUCHE DE FORME (ARGILE)
  - CBR 2,5 % (Module statique  $E_{v2}=15$  MPa)
- VALIDATION DE L'UTILISATION DE TILL POUR LA COUCHE DE FORME
  - CBR de 7 et 10
- OPTIMISATION DU SCÉNARIO DE MAINTENANCE À LONG TERME SELON LES ANALYSES MÉCANISTIQUES.

# GREENFIELD (NOUVEAUX SEGMENTS)

## APPROCHE TECHNOLOGIQUE

UTILISATION D'UN LOGICIEL DE CONCEPTION MÉCANIQUE PERMETTANT LA VALORISATION DE LA PERFORMANCE MÉCANIQUE SUPÉRIEURE DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS EN TERMES DE RIGIDITÉ ET DE RÉSISTANCE EN FATIGUE

- MODULE DE RIGIDITÉ

- $|E^*|$  à 10 °C, 10 Hz > 8,000 MPa

- $|E^*|$  T eq., 10 Hz > 14,000 MPa

- RÉSISTANCE À LA FATIGUE : E6 À 10°C, 10 HZ, > 160  $\mu$ DEF

- RÉSISTANCE AU RETRAIT THERMIQUE : < -30°C





# CONCEPTION DU MÉLANGE

## PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DE LA FORMULATION DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS

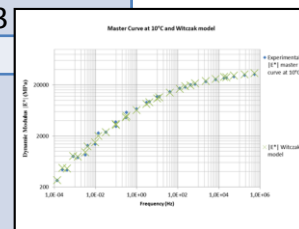
- OPTIMISATION DE LA STRUCTURE GRANULAIRE OBTENUE PAR UNE MODÉLISATION PRÉDICTIVE DE SON ARRANGEMENT ET DE SA POROSITÉ (VIDES DANS L'AGRÉGAT MINÉRAL - VMA)
- UTILISATION DE LIANTS HYDROCARBONÉS DE HAUTE PERFORMANCE
- PERFORMANCES BASÉES SUR DES ANALYSES RHÉOLOGIQUES (MODULES DE RIGIDITÉ , RÉSISTANCE À LA FATIGUE, RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE, ETC.)
- UTILISATION D'ENROBÉS RECYCLÉS (RAP)
- UTILISATION D'ADDITIFS SPÉCIAUX
- ADÉQUATION (ÉQUILIBRE) ENTRE LA MEILLEURE PERFORMANCE MÉCANIQUE ET UN CLIMAT TRÈS FROID



# STRUCTURE DE CHAUSSÉE FLEXIBLE

## RÉSULTAT DES TESTS DE PERFORMANCE: ENROBÉS / RHÉOLOGIE

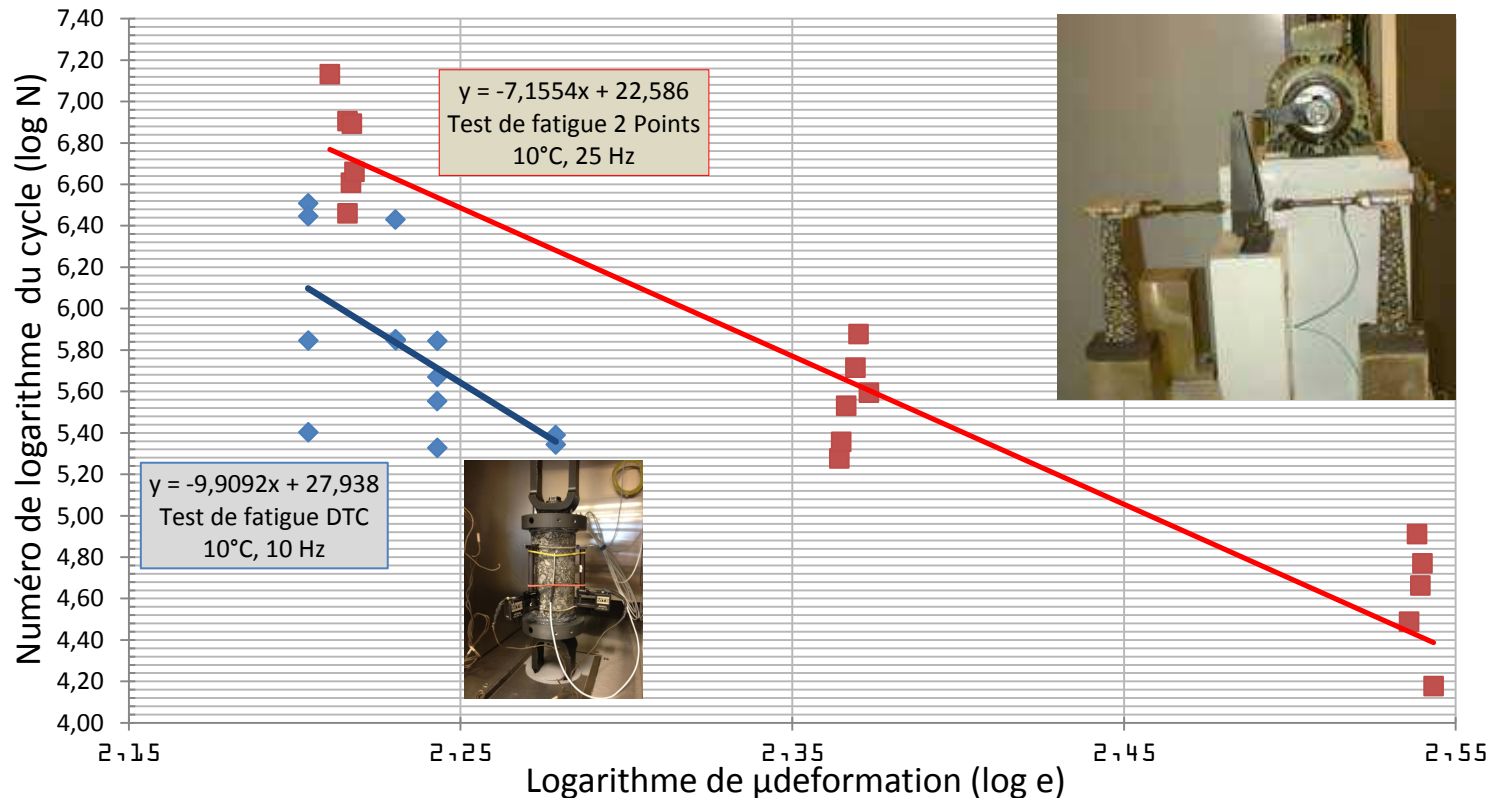
| Caractéristiques                                                                                                                                                        | MODULES ÉLEVÉS             | COUCHE D'USURE        | Références           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|
|                                                                                                                                                                         | Conception du mélange      | Conception du mélange |                      |
| <b>% de vides</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>100 girations</li> <li>75 coups (Marshall)</li> </ul>                                                          | 3,4<br>2,6                 | 4,1<br>3,5            | LC 26-320            |
| <b>Résistance à l'orniérage, %, 60°C</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>après 3 000 cycles</li> <li>après 10 000 cycles</li> <li>après 30 000 cycles</li> </ul> | 4,3                        | 5,1<br>6,1            | LC 26-410            |
| <b>Profondeur de texture, mm</b>                                                                                                                                        |                            | 0,8                   | NF EN ISO 13473-1    |
| <b>Ratio de résistance à la tension, TSR, %</b>                                                                                                                         | 93                         | 93                    | AASHTO T 283         |
| <b>Stabilité Marshall, N</b>                                                                                                                                            | 28 866                     | 17 735                |                      |
| <b>Modules complexes, MPa</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>10°C, 10 Hz</li> <li>5°C, 10 Hz</li> <li>T eq., 10 Hz</li> </ul>                                   | 11 849<br>15 600<br>17 100 | 5 494<br><br>9 100    | LC 26-700            |
| <b>Résistance à la fatigue, <math>\mu</math>def</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>À 1,0 million de cycles, 10°C, 10 Hz</li> </ul>                              | 164                        | ---                   | Méthodologie CTA TCD |
| <b>Retrait thermique (TSRST), °C</b>                                                                                                                                    | -32,8                      | -39,7                 | AASHTO TP 10-93      |
| <b>Coefficient de résistance au polissage, Cpp</b>                                                                                                                      |                            | 0,50                  | LC 21-102            |



# STRUCTURE DE CHAUSSÉE FLEXIBLE

## CORRÉLATION ENTRE LES MÉTHODOLOGIES DE RÉSISTANCE À LA FATIGUE

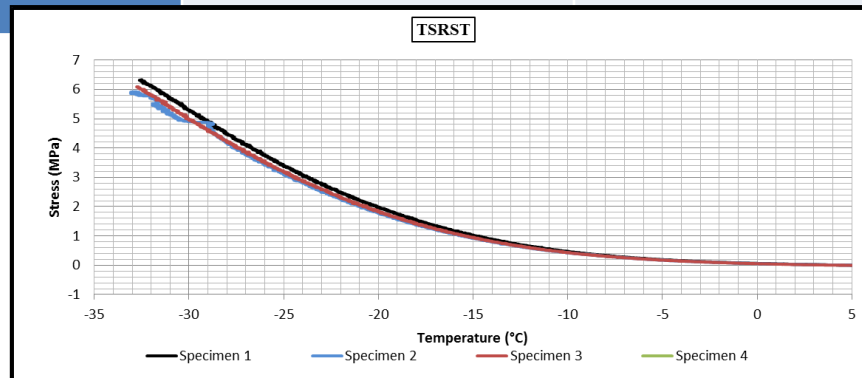
### COMPARAISON DES COURBES DE FATIGUE



# STRUCTURE DE CHAUSSÉE FLEXIBLE

## CONCEPT D'ENROBÉS / FISSURATION THERMIQUE

| DESCRIPTION                                                                                                                                               | MODULES ÉLEVÉS | COUCHE D'USURE |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| <b>Adaptation à la température</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Fiabilité recherchée</li><li>• Profondeur, mm</li></ul>                        | 98<br>125      | 98<br>25       |
| <b>Ajustement au trafic, MESALs</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Rapide</li><li>• Lent</li></ul>                                               | 13,2<br>15,5   | 13,2<br>15,5   |
| <b>Température ajustée PG</b>                                                                                                                             | -32,4          | -35,4          |
| <b>Résistance au retrait thermique, TSRST</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Résistance thermique, °C</li><li>• Tension de rupture MPa</li></ul> | -32,8<br>6,1   | -39,7<br>5,3   |





# STRUCTURE DE CHAUSSÉE FLEXIBLE

## COMPARAISON ENTRE UNE STRUCTURE INNOVANTE UTILISANT DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS ET UN MÉLANGE CONVENTIONNEL

| DESCRIPTION                     | STRUCTURE UTILISANT<br>DES ENROBÉS DE BITUME À<br>MODULES ÉLEVÉS | MÉLANGE CONVENTIONNEL<br>D'ENROBÉS CHAUDS<br>(HMA) |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| COUCHE DE SURFACE               | 5,0 cm Couche de roulement, 0 -12,5 mm, PG 64-37                 |                                                    |
| COUCHE INTERMÉDIAIRE            | 5,0 cm HM 0-14 mm                                                | 5,0 cm HMA 0-14 mm                                 |
| BASE DE BITUME                  | 8,5 cm HM 0-14 mm                                                | 13,5 cm HMA 0-20 mm                                |
| COUCHE GRANULAIRE               | 20,0 cm granulats                                                | 20.0 cm granulats                                  |
| COUCHE INFÉRIEURE<br>GRANULAIRE | 62,5 cm granulats                                                | 57,5 cm granulats                                  |
| FONDATION                       | 15 Mpa, indice portant californien (CBR) de 2,5                  |                                                    |
| ÉPAISSEUR D'ENROBÉ<br>TOTALE    | 18,5 cm                                                          | 23,5 cm                                            |

# COMBINAISON: PROCESSUS DE RECYCLAGE EN PLACE ET ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS (BROWNFIELD)



# TRAVAUX DE RETRAITEMENT EN PLACE

---

## PROCÉDURE DE RETRAITEMENT

### TRAVAUX PRÉLIMINAIRES

- ANALYSE DES STRUCTURES EXISTANTES (FORAGE ET ÉCHANTILLONNAGE)
- UTILISATION D'UN DÉFLECTOMÈTRE À MASSE TOMBANTE (FWD), MESURE DE LA CAPACITÉ PORTANTE ET RÉTRO-CALCULS
- FENÊTRES D'EXPLORATION POUR DES ÉCHANTILLONNAGES REPRÉSENTATIFS

### ÉTAPES DE CONSTRUCTION

- FRAISAGE À FROID
- PULVÉRISATION DES ENROBÉS EXISTANTS
- TRAITEMENT SUR-PLACE AVEC DE LA MOUSSE DE BITUME ET DU CIMENT
- APPLICATION D'UN APPRÊT BITUMINEUX À ABSORPTION ÉLEVÉE
- APPLICATION DE LA COUCHE DE BASE EN ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS
- APPLICATION DE L'ÉMULSION D'ACCROCHAGE
- APPLICATION DE LA COUCHE DE ROULEMENT

# TRAVAUX DE RETRAITEMENT SUR PLACE

## MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

- CAPACITÉ PORTANTE EN DESSOUS DU SGSG, CBR 5 %, EV2= 30 MPA
- COUCHE D'USURE DE 50 MM EN UTILISANT UN BMP PG 64-37
- MODULES INDIRECTS (10°C, 124 MS) DE LA COUCHE TRAITÉE À FROID:
  - 3,000 MPa
- MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS
  - $|E^*|$  à 10 °C, 10 Hz > 8,000 MPa
  - $|E^*|$  Teq., 10 Hz > 14,000 MPa
  - Résistance à la fatigue de E6 à 10°C, 10 Hz, > 160  $\mu$ def
  - Résistance au rétrécissement thermique : < -30°C





# TRAVAUX DE RETRAITEMENT (FDR) SUR PLACE

## COMPILATION DES PRINCIPAUX CONTRÔLES



| Description                                                                                                                                                                            | Production                                                                       | Formulation                                       | Référence                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Modules de tension indirect, MPa</b> <ul style="list-style-type: none"><li>à 10°C, 124 ms</li><li>à 15°C, 124 ms</li></ul>                                                          | 3 799 (après 34 jours de durcissement)<br>2 902 (après 34 jours de durcissement) | 4 321 à 4 596<br>(après 28 jours de durcissement) | NF EN 12697-26              |
| <b>Force de tension, kPa</b> <ul style="list-style-type: none"><li>Sèche</li><li>Mouillée</li></ul>                                                                                    | 310 (moyenne de 43 résultats)<br>254 (moyenne de 43 résultats)                   | 276 à 385<br>232 à 315                            | Manuel Wirtgen,<br>Ed. 2010 |
| <b>Collage des couches, résistance en traction, MPa, 20°C</b> <ul style="list-style-type: none"><li>Interface FDR/modules élevés</li><li>Modules élevés/ couche de roulement</li></ul> | > 0,21 (rupture de la couche retraitée)<br><br>0,28 à 0,35                       |                                                   | LC 25-010 et<br>LC 25-011   |

# SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES POUR LE SUIVI DES PERFORMANCES

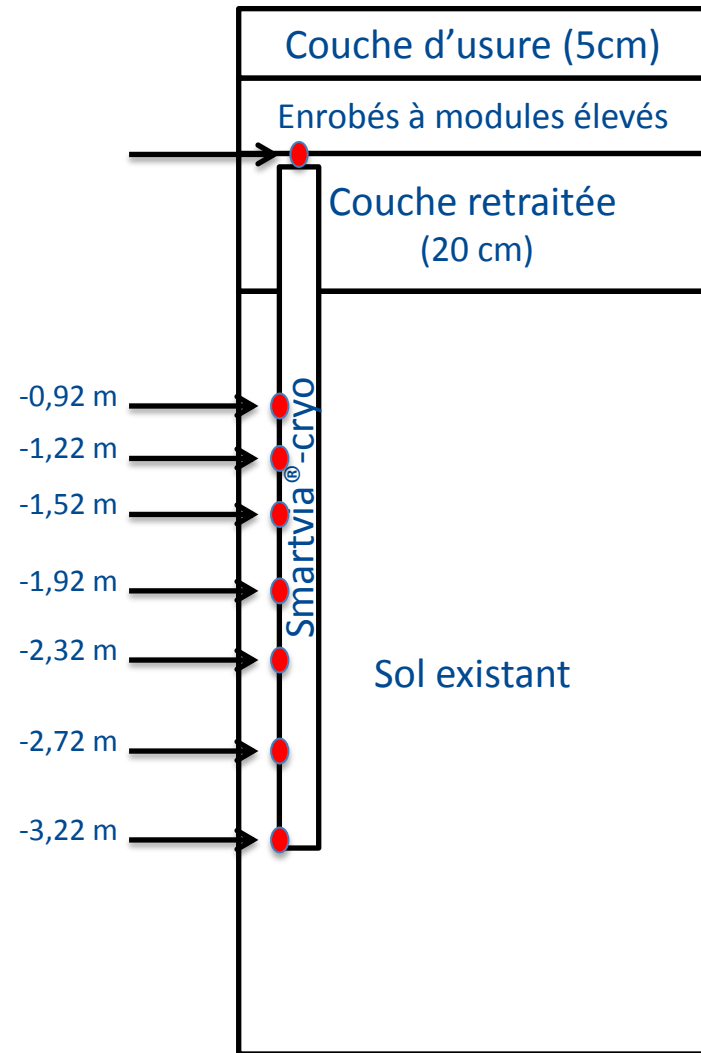


## INSTRUMENTATION DE LA CHAUSSÉE

# SURVEILLANCE SUR PLACE / MESURE DE LA TEMPÉRATURE

## CONCEPTION ADAPTÉE

- LONGUEUR DE 3 MÈTRES
  - 8 senseurs de température
- SYSTÈME DE CUEILLETTE DES DONNÉES
  - Boîte électronique alimentée à l'énergie solaire
  - Système intégré d'acquisition des données
  - Transfert au serveur à la vitesse 3G  
≡ aux 10 minutes



# SURVEILLANCE SUR PLACE / MESURE DE LA TEMPÉRATURE



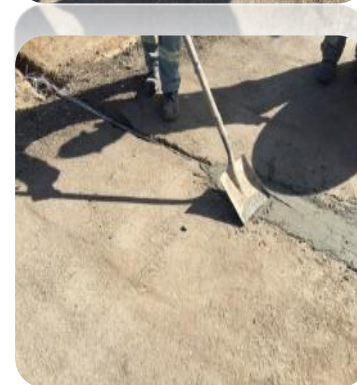
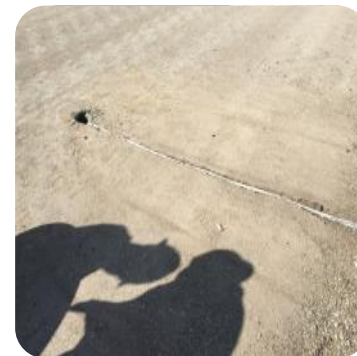
FORAGE



INSTALLATION  
DES CAPTEURS



SCELLAGE

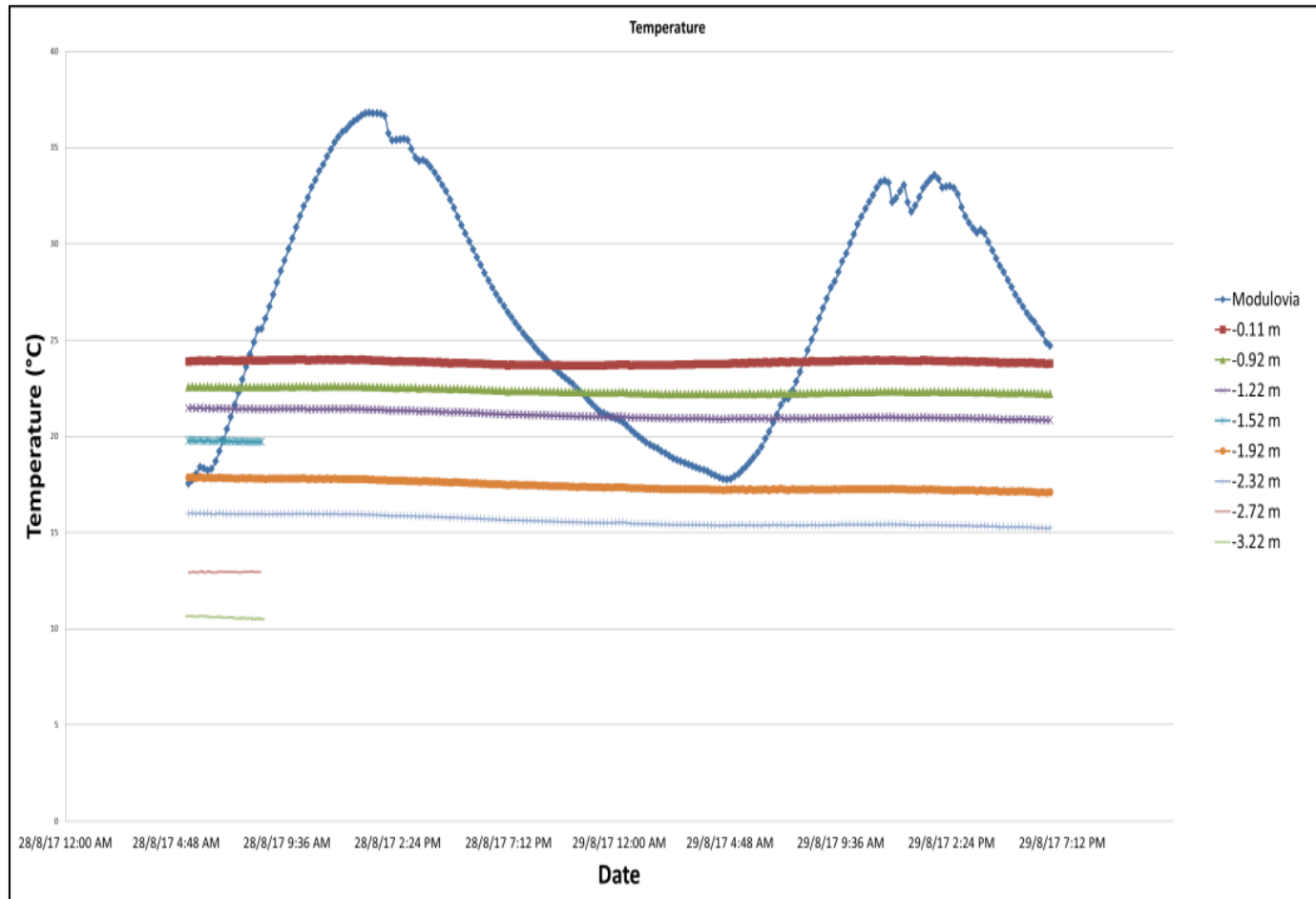


SCELLAGE  
DES CÂBLES



# SMARTVIA®-CRYO

DONNÉES RECUEILLIES DU 28 AOÛT 2017, À 5 H 20,  
AU 29 AOÛT 2017, À 6 H 40



# SURVEILLANCE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE

## 3 NOEUDS

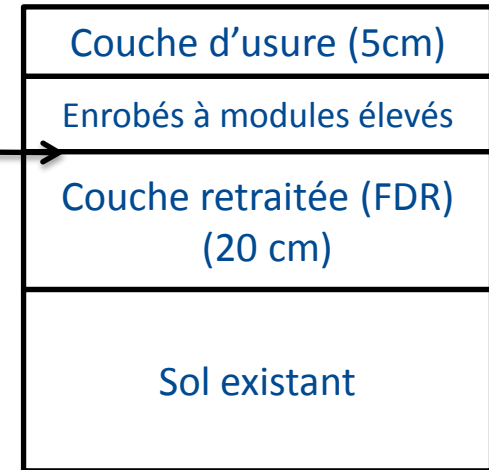
### — CHARGE VERTICALE

- 4 capteurs

### — DÉFORMATION

- 12 capteurs

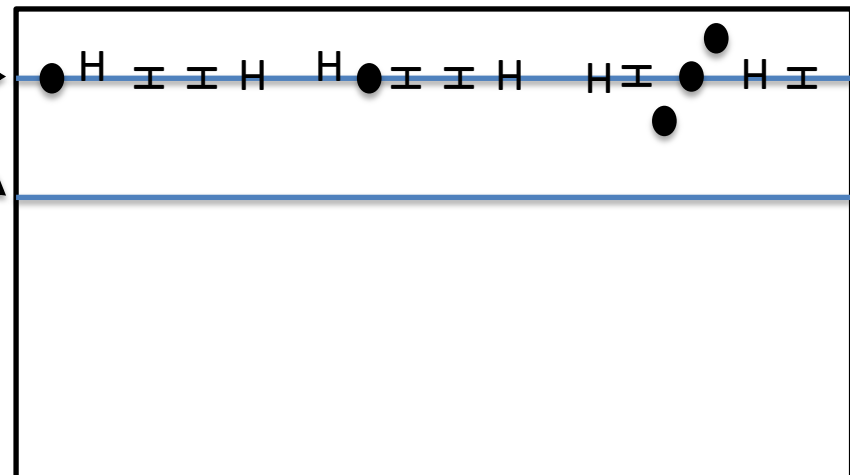
Position des capteurs



Voies de circulation

H Capteurs de déformation

● Capteurs de charge verticale



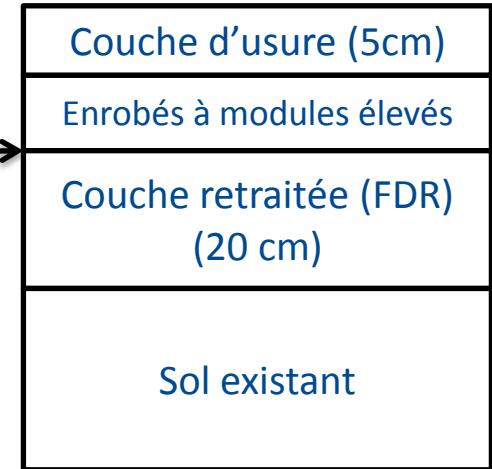
VUE DU DESSUS

# SURVEILLANCE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE

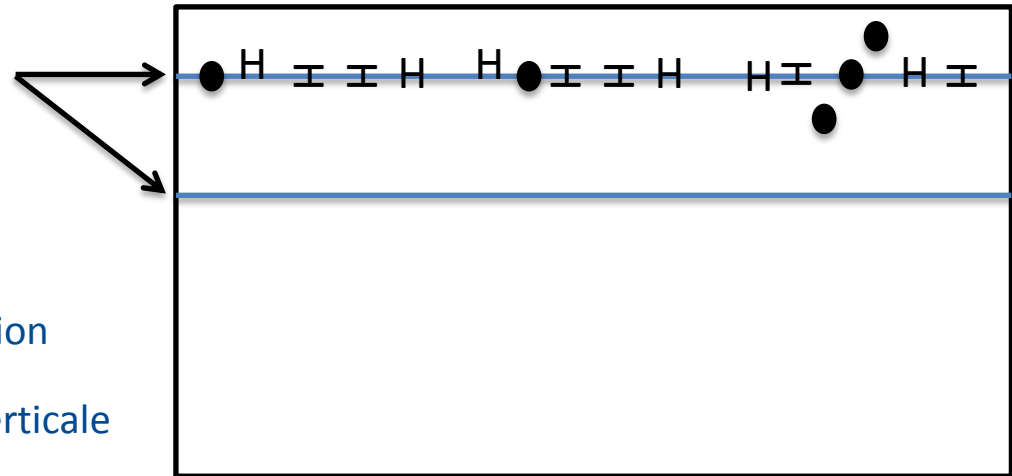


Voies de circulation

Position des capteurs



- H Capteurs de déformation
- Capteurs de charge verticale



VUE DU DESSUS

# SYSTÈME DE SURVEILLANCE SUR PLACE

## SURVEILLANCE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE





# EN RÉSUMÉ

---

- CONTRAT DE TYPE CCFEE (DBFOM) PERMETTANT L'UTILISATION DE NOUVEAUX PRODUITS ET DE TECHNOLOGIES INNOVANTES
- CONCEPTION MÉCANIQUE DE LA CHAUSSEE
  - Démonstration des performances mécaniques supérieures des enrobés à modules élevés
  - Optimisation du scénario de maintenance à long terme par analyse mécanistique
- ADAPTATION DU DESIGN DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS AU CLIMAT LOCAL
- PREMIÈRE COMBINAISON DES RETRAITEMENTS EN PLACE À HAUTE PERFORMANCE AVEC DES ENROBÉS À MODULES ÉLEVÉS
- SYSTÈME DE SURVEILLANCE EN TEMPS RÉEL
  - Réaction mécanique de la structure en prévision de l'optimisation de la maintenance à long terme
  - Mesure de la température jusqu'à 3 mètres de profondeur



CENTRE TECHNIQUE  
AMÉRIQUES

OUVRIR LA VOIE  
AUX IDÉES NEUVES