

**Restitution des résultats de l'ORSI « DEDIR »**  
**du Dimensionnement à l'Entretien Durable des Infrastructures Routières**  
**IFSTTAR Nantes - 17 mai 2018**

**Nouvelles utilisations des mesures de  
bassins de déflexion pour caractériser  
l'état structurel des chaussées**

**Vinciane LE BOURSICAUD**  
**IFSTTAR**

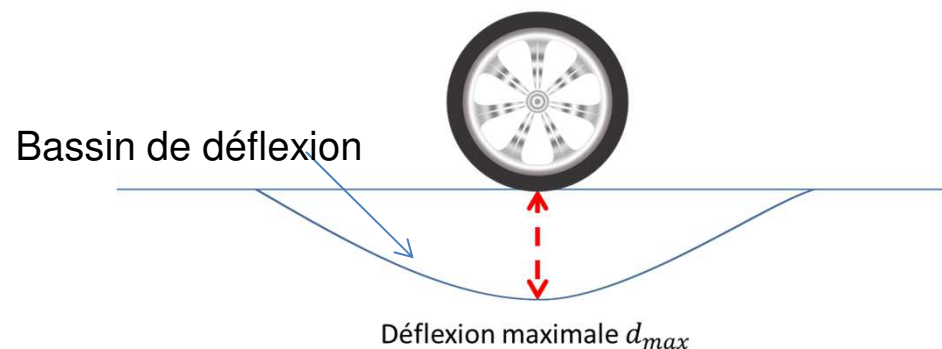
## Problématique

- Patrimoine routier français de plus d'un million de kms.
- Nécessité d'améliorer la connaissance de l'état du patrimoine pour optimiser sa maintenance.
- Plusieurs méthodes d'évaluation structurelle
  - *Mesure de la déformation sous charge*  
*caractérisation mécanique (déflexion)*



## Problématique

- Que signifie la déflexion de la chaussée?
  - Charge routière induit une flexion de la structure mesurée en surface →  
Déflexion
  - Image de la rigidité globale  
de la structure



- Exploitation de ces mesures
  - Estimation de la durée de vie résiduelle d'une route par calcul inverse basé sur l'ensemble du bassin (à l'échelle locale).
  - Détection des zones homogènes ou dégradées (à l'échelle d'un itinéraire).

## Appareils utilisés en France



FWD

Curviamètre

Déflectographe

Mesure à point fixe

Mesure en quasi continu

- Mesure de la déflexion maximale et de la forme du bassin
- Besoin d'une meilleure exploitation des bassins de déflexions du curviamètre et du déflectographe
- Collaboration avec les opérateurs d'appareils afin de mieux valoriser les mesures
  - CRR (Curviamètre, indicateurs, données terrain sur itinéraire)
  - STAC/Cerema/CRR (Essais croisés sur structure connue)

## Indicateurs sur la mesure

Indicateurs	Définition	Description
<b>D<sub>0</sub>: Déflexion maximale</b>	$D_0 = D_{max}$ ( $D_0$ = Déflexion au centre de la plaque du FWD)	Donne une indication sur la rigidité de structure et du sol.
<b>RoC: Rayon de courbure</b>	$RoC = \frac{L^2}{(2 * D_0 * (1 - D_{200}/D_0))}$ avec L=200 m dans le cas du FWD	Donne une indication des performances mécaniques des couches de chaussées.
<b>Rd: Produit Rd</b>	$Rd = RoC * D_0$	Pour une chaussée souple, traduit l'état du corps de chaussée.
<b>BLI: Base Layer Index ou SCI: Surface Curvature Index</b>	$BLI = D_0 - D_{300}$	Donne une indication sur les états des couches de surface.
<b>MLI: Middle Layer Index ou BDI: Base Damage Index</b>	$MLI = D_{300} - D_{600}$	Donne une indication sur les états des couches de base.
<b>LLI: Lower Layer Index ou BCI: Base Curvature Index</b>	$LLI = D_{900} - D_{600}$	Donne une indication sur les états des couches de base et de fondation.
<b>IBR: Indice bruit route (seulement pour les mesures curviamètre)</b>	Surface de la valeur absolue du signal entre 1,65m et 2,90m.	Plus l'indice est élevé, plus il y a de risque de décollement de couche et de fissures. Si l'IBR est inférieur à 2,5 la chaussée n'a pas de décollement.

## Indicateurs utilisés à l'échelle d'un réseau

Indicateurs	Définition	Description
Système RAG	Dépend de $D_{max}$ , RoC, BLI, MLI et LLI	En fonction de la chaussée et des différentes valeurs des paramètres, classification de la chaussée en saine, douteuse ou endommagée.
SM: Surface Modulus	$SM_{(0)} = 2 * \sigma_0 * (1 - \nu^2) * \left(\frac{a}{d_0}\right)$ <p>a le rayon de la plaque  <math>d_0</math>: la déflexion pour x=0  <math>\sigma_0</math>: la contrainte exercée en x=0  <math>\nu</math>: le coefficient de poisson</p>	Donne une information sur les modules des matériaux de fondation.
SMD: Surface Modulus Differential	$SMD = SM_{(600)} - SM_{(1200)}$	Caractérise le comportement de la plateforme
SSI: Structural strength index	$SSI_{jk} = 100 * (1 - \alpha e^{\frac{-\beta}{\delta_i^\gamma}})$ $SSI = f(\delta_i)$ <p><math>\alpha, \beta, \gamma</math> des constantes;  <math>\delta_i</math> la déflexion sous la charge j et k type et dimensionnement de chaussée</p>	Variation de 0% (structure inadaptée au trafic) à 100% (structure parfaitement adaptée au trafic). Basé sur l'évaluation statistique de déflexions et permet de caractériser l'état de la couche de forme et la structure de la chaussée de façon indépendante.

## Objectif

# Amélioration de l'interprétation des mesures de bassin de déflexion du déflectographe et du curviamètre.

### — Bénéfices attendus:

- Traitement des bassins de déflexion à l'échelle d'un itinéraire:
  - Découpage en zones (homogènes ou non).
  - Identification de défauts (décollement, variation de module).
- Amélioration des procédures de calcul inverse (à l'échelle locale).
  - Prise en compte des corrections de mesures dans le calcul inverse.
  - Validation des nouvelles procédures de calcul inverse sur structures connues.

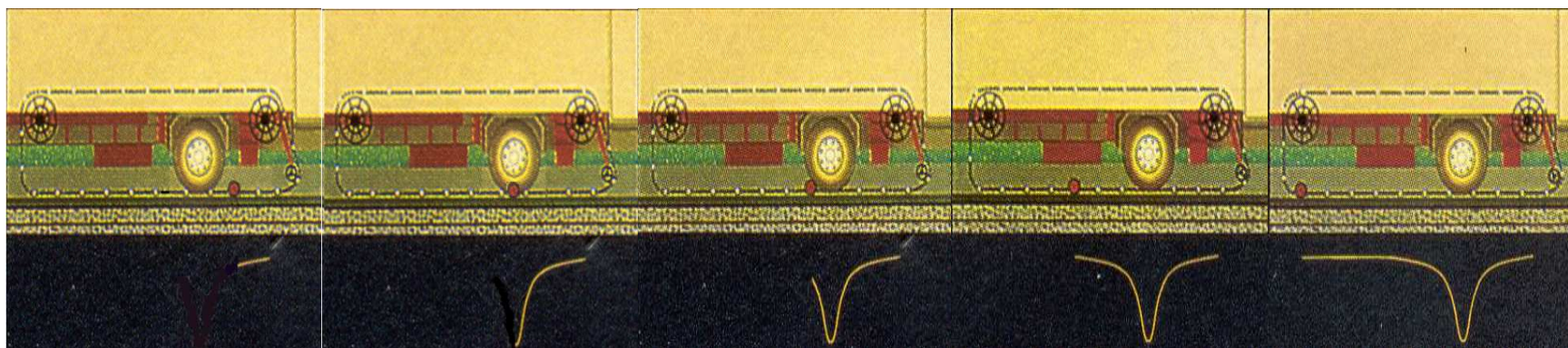
## Plan

- **Fonctionnement des appareils**
- Procédure de correction
- Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites
- Détermination d'indicateurs optimisés pour la détection de défauts



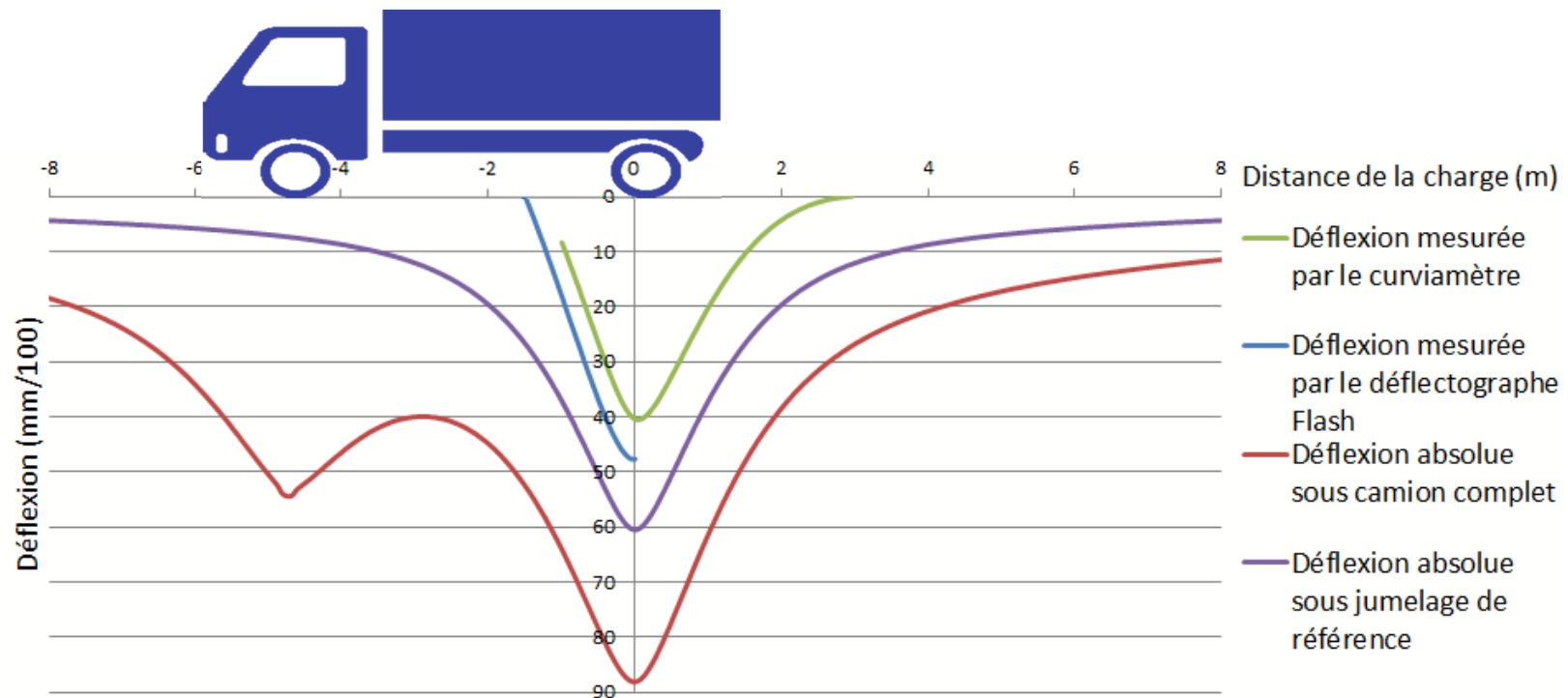
## Fonctionnement du curviamètre

- **Exemple principe du curviamètre**
  - Mesure à l'aide d'un géophone posé sur la chaussée pendant l'avancement du camion.
  - Mesure réalisée entre 1 m avant le passage de l'essieu arrière et 3 m après.



## Fonctionnement des appareils

- Analyse du fonctionnement des appareils sur mesures expérimentales et théoriques (ALIZE)
  - **Présence de biais de mesure liés aux hypothèses de mesure.**
    - Charge multiple d'un camion > charge de référence (jumelage 65 kN).
    - Déflexion réelle > déflexion de référence .
    - Curviamètre: Déflexion et pente du bassin de déflexion supposées nulles à 3 m de la charge.
    - Défectographe Flash: Déflexion supposée nulle à 1.5 m de la charge et points d'appuis supposés fixes dans la zone d'influence de la charge



## Plan

- Fonctionnement des appareils
- **Procédure de correction**
- Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites
- Détermination d'indicateurs optimisés pour la détection de défauts

## Procédure de correction

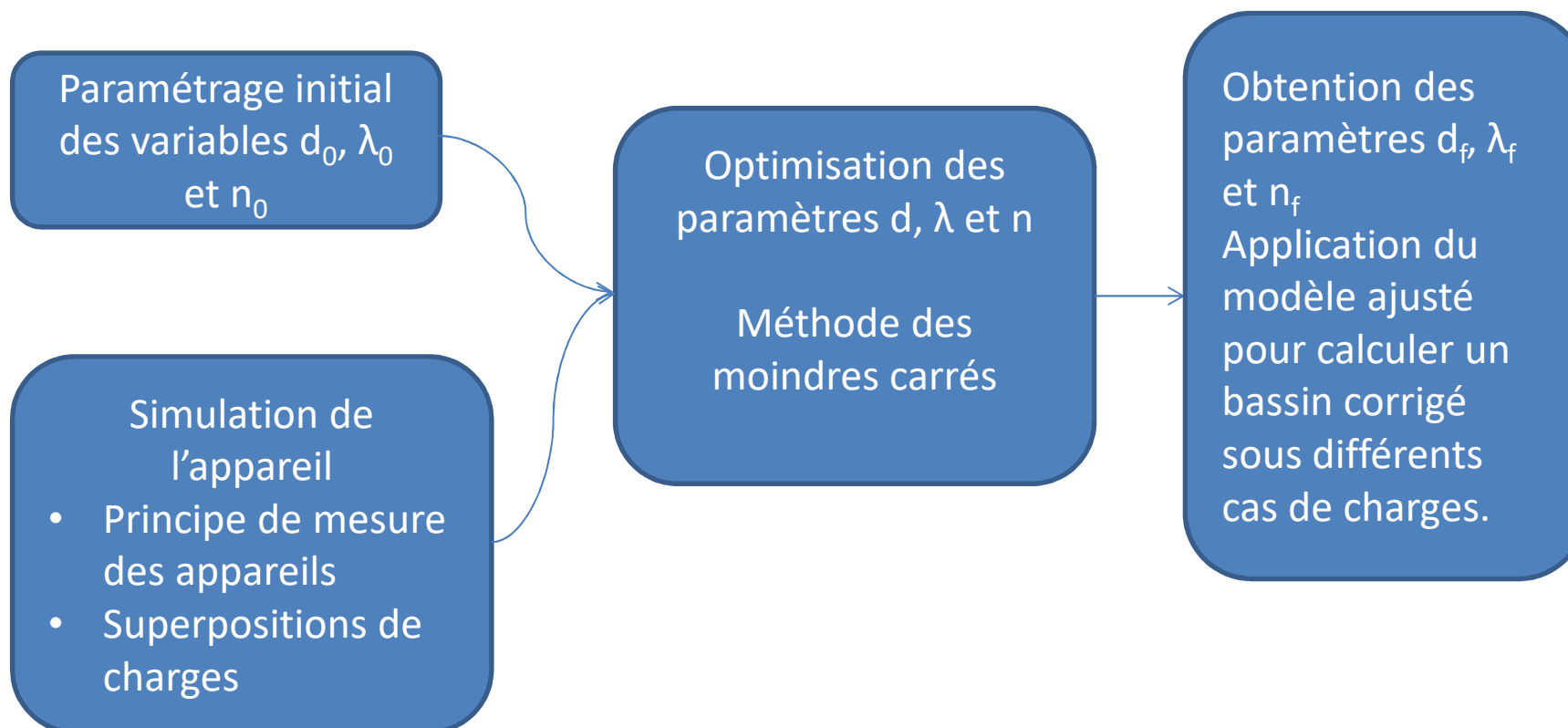
- Déflection mesurée par les appareils sous-estimée par rapport à la déflection sous jumelage de référence.
- Choix d'un modèle de bassin de déflection
  - Etude de trois modèles simples de bassin de déflection. [1][2][3]
  - Choix du modèle de Jouve et Martinez, sans a priori sur la structure, défini par:
    - $d \rightarrow$  La déflection maximale
    - $\lambda \rightarrow$  Le point d'inflexion du bassin de déflection
    - $n \rightarrow$  Un facteur de forme du bassin de déflection

$$W_{JM}(x) = \frac{d}{\left[1 + \frac{1}{2n+1} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^2\right]^n}$$

- Définition d'une méthode de correction qui tient compte des biais de mesures :
  - Superposition de charges
  - Principe de mesure de l'appareil
  - Minimisation de l'écart entre le bassin simulé et mesuré

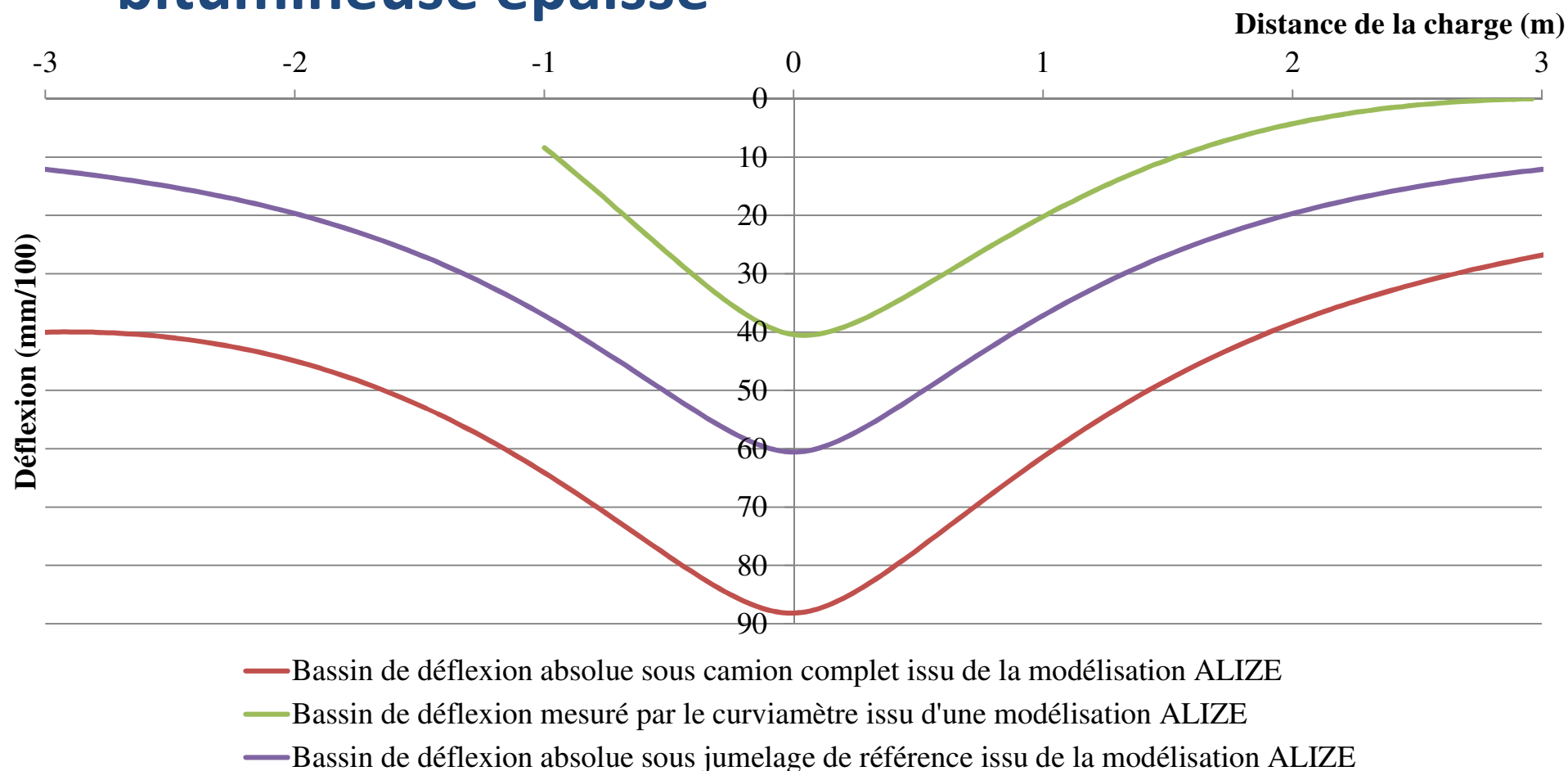
## Procédure de correction

- **Algorithme de correction du bassin de déflexion par le modèle de Jouve et Martinez**



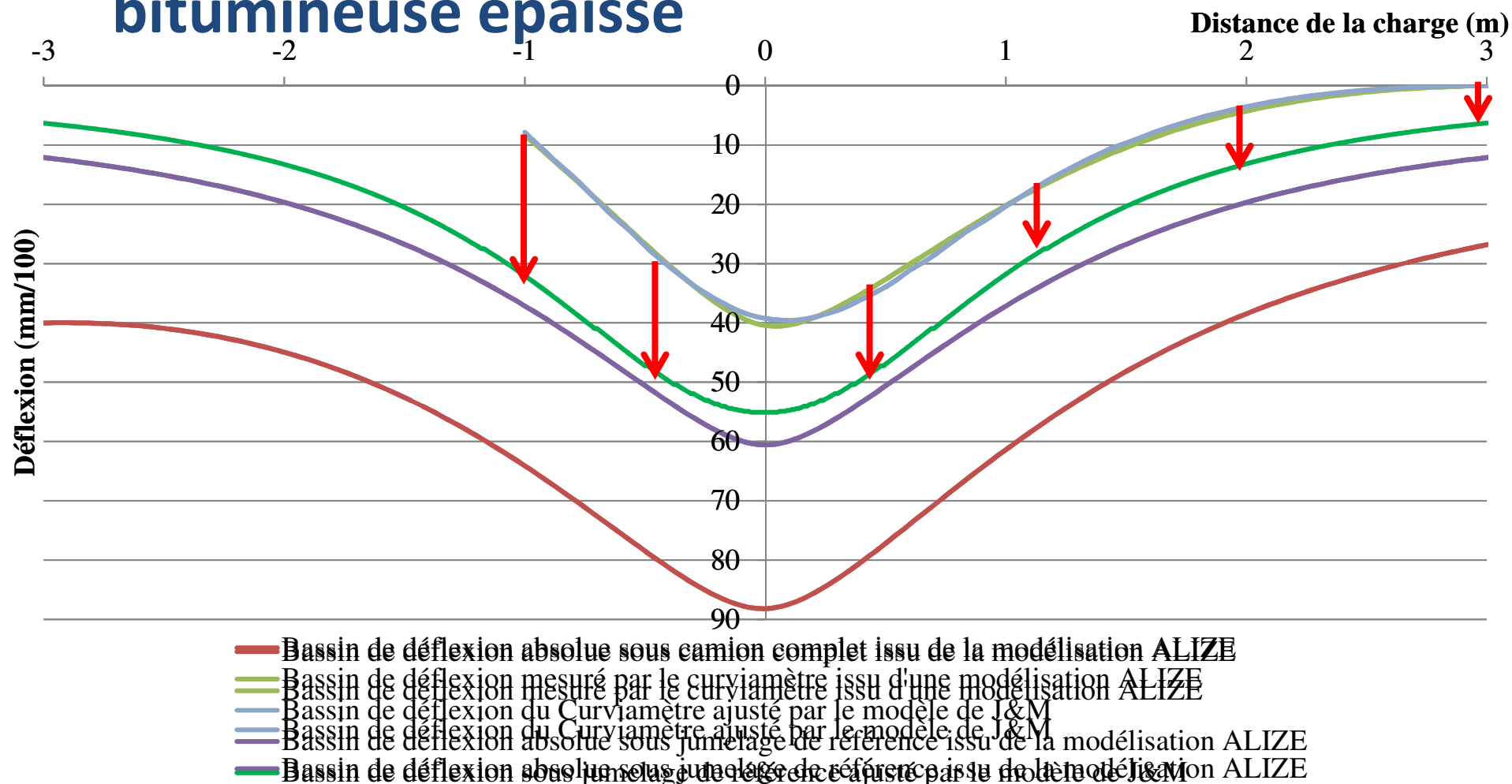
## Procédure de correction

- Exemple de bassins obtenus pour une structure bitumineuse épaisse



## Procédure de correction

- Exemple de bassins obtenus pour une structure bitumineuse épaisse



## Procédure de correction

- Les bassins corrigés sont proches du bassin sous jumelage de référence
  - La forme du bassin
  - La déflexion maximale
- Comparaison numérique exhaustive sur
  - 6 structures
  - 6 températures
  - 2 appareils (Curviamètre et Déflectographe Flash)
- Résultat satisfaisant (écart des surfaces  $< 5\%$ ) sur chaussées souples et bitumineuses (2/3 des cas)
  - Meilleurs résultats obtenus avec le curviamètre
- Possibilité d'utiliser les bassins corrigés pour
  - Le calcul d'indicateurs FWD mondialement reconnus
  - Le calcul inverse des modules des couches sous une charge de référence (dimensionnent)



## Plan

- Fonctionnement des appareils
- Procédure de correction
- **Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites**
- Détermination d'indicateurs optimisés pour la détection de défauts

## Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites

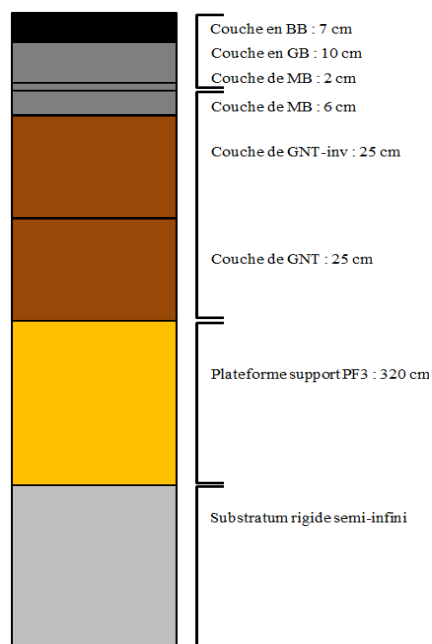
- ***Validation terrain GAP***
  - Informations sur la structure
  - Référence modélisation ALIZE
- **Validation terrain STAC**
  - Informations sur la structure données par le STAC
  - Référence modélisation ALIZE

## Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites

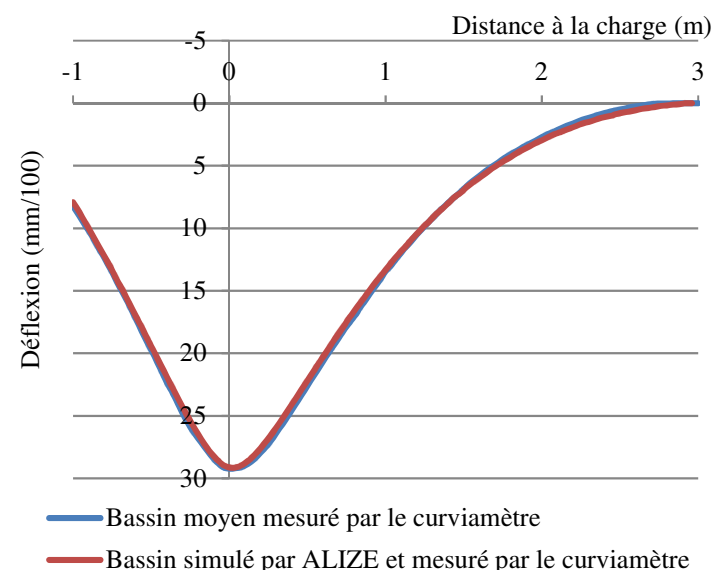
- **Evaluation de la procédure sur site du GAP**
- **Mesures de 1993**
- **Etude menée sur une structure bitumineuse et une souple.**
- **5 passages sur un point test**

## Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites

- Calage d'une modélisation unique de la chaussée par rapport aux mesures du curviamètre.



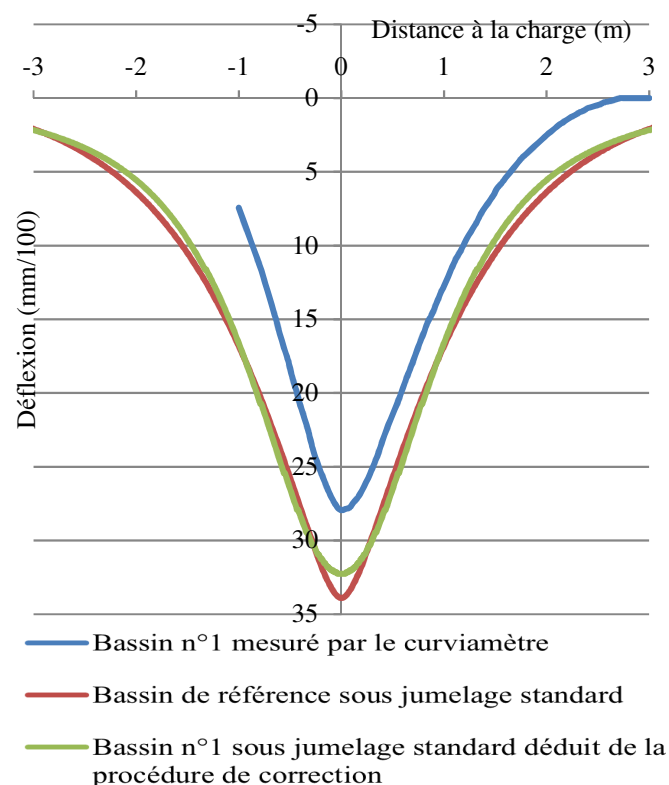
Calage pour le curviamètre



Structure de référence

## Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites

- Amélioration de la forme des bassins corrigés.
- Calcul inverse sur les bassins corrigés satisfaisant.



	Section 3 PEM		
	Modules d'Young de référence (MPa)	Mesures du curviamètre	
		Moyenne (MPa)	Moyenne de la correction (MPa)
$E_{BB}$	7000	8100 (16%)	7670 (10%)
$E_{GB+MB}$	4000	3760 (6%)	4392 (10%)
$E_{GNT}$	140	103 (26%)	106 (24%)
$E_{SOL}$	65	98 (51%)	68 (4%)
$E_{SUB}$	55000	55000	55000

## Conclusion sur la procédure de correction

- Mise en place d'une procédure de correction sans a priori sur la structure.
- Obtention d'un bassin de déflexion indépendant de l'appareil (Flash et Curviamètre)
- Forme et niveau de déflexion des bassins corrigés plus proches des bassins de référence.
- Validation de la procédure sur chaussée bitumineuse et souple théoriques.
- Validation de la procédure sur mesures réelles.
- Résultat de calcul inverse des modules amélioré

## Plan

- Fonctionnement des appareils
- Procédure de correction
- Validation de la méthode de correction sur des mesures sur sites
- **Détermination d'indicateurs optimisés pour la détection de défauts**

## Mise au point de méthodes de détection des défauts

**Objectif des mesures de déflexion sur itinéraire routier :**

- Détection des zones dégradées
- Identification des types de défauts : matériau de faible module, interface décollée

**Comment identifier ces défauts à partir des bassins de déflexion ?**

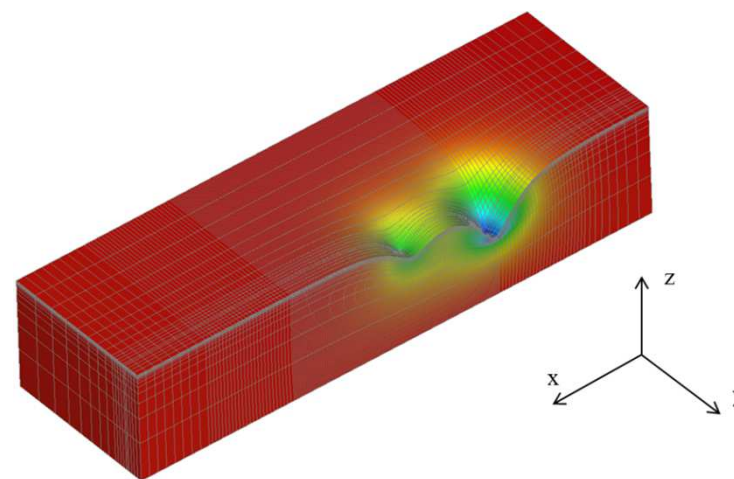
**Approche utilisée :**

- simulation de la réponse d'une chaussée présentant différents défauts (calculs éléments finis) - recherche d'indicateurs sensibles à la présence d'un type donné de défaut.



## Détection de défauts

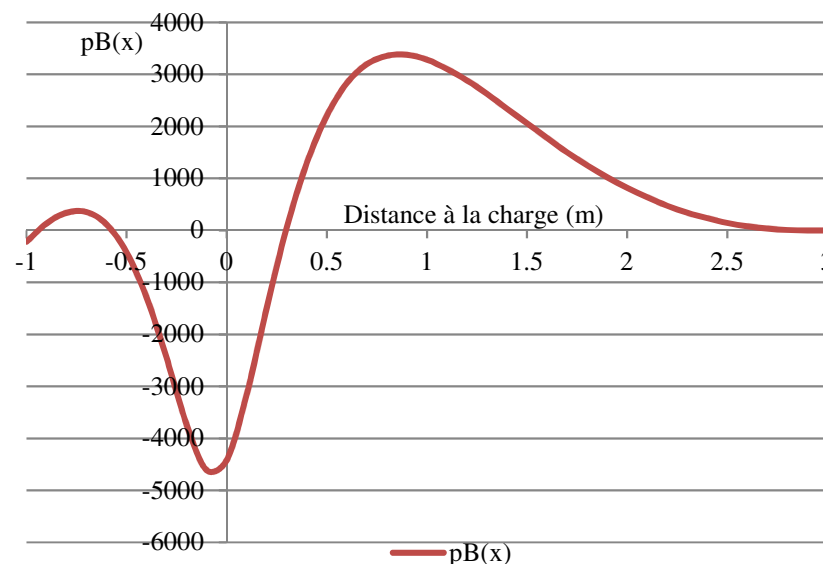
- Etude numérique (par éléments finis) de sensibilité du bassin à la présence de différents défauts.
  - Simulation des appareils sur une distance de 10m
- Etude de l'effet de la variation de module et décollement des couches.
- Recherche d'indicateurs optimisés pour la détection des défauts (décollement,



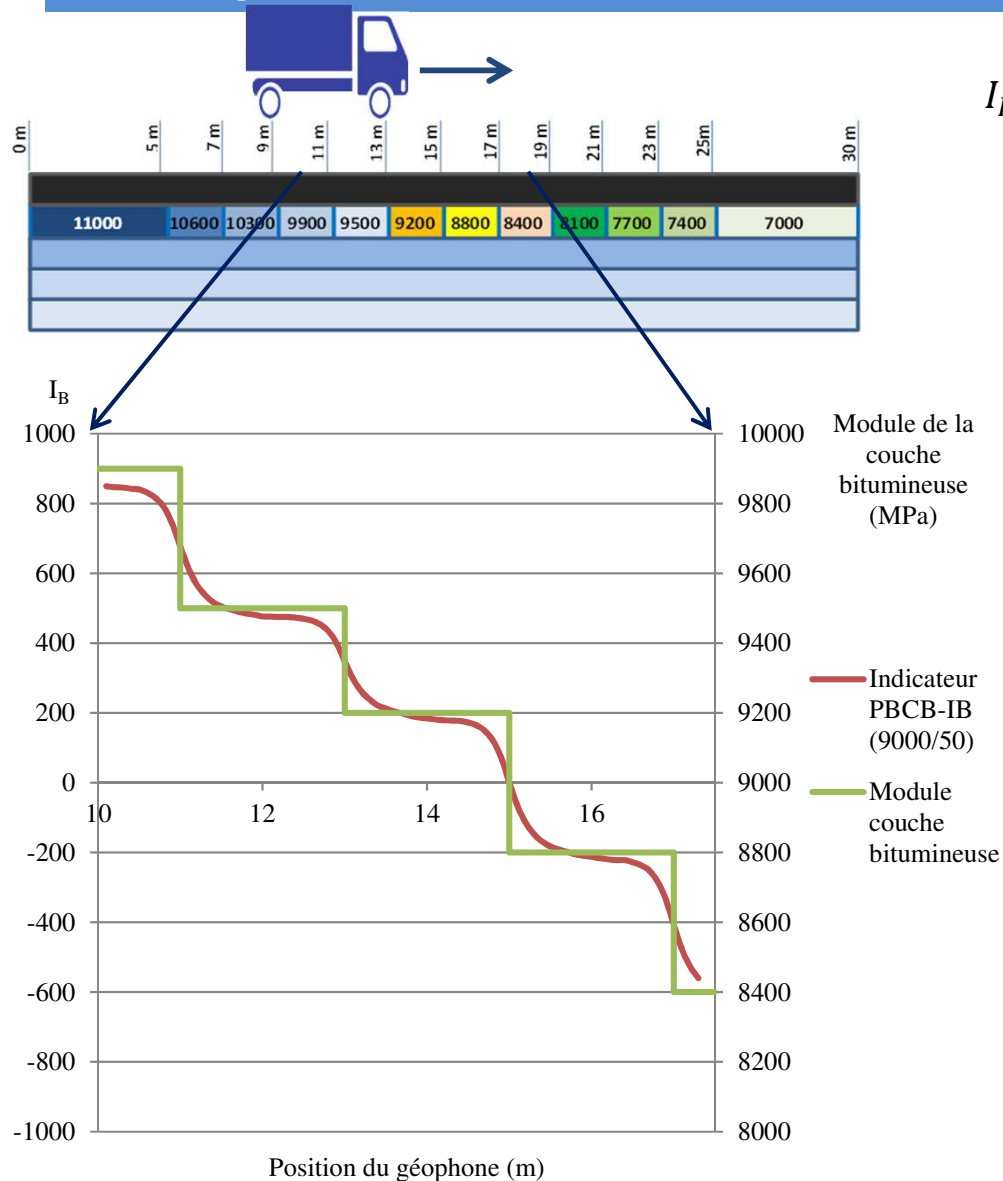
Simulation de la déflexion engendrée par un curviamètre sur une chaussée avec un décollement d'interface

## Elaboration d'un indicateur capable de détecter une variation de module

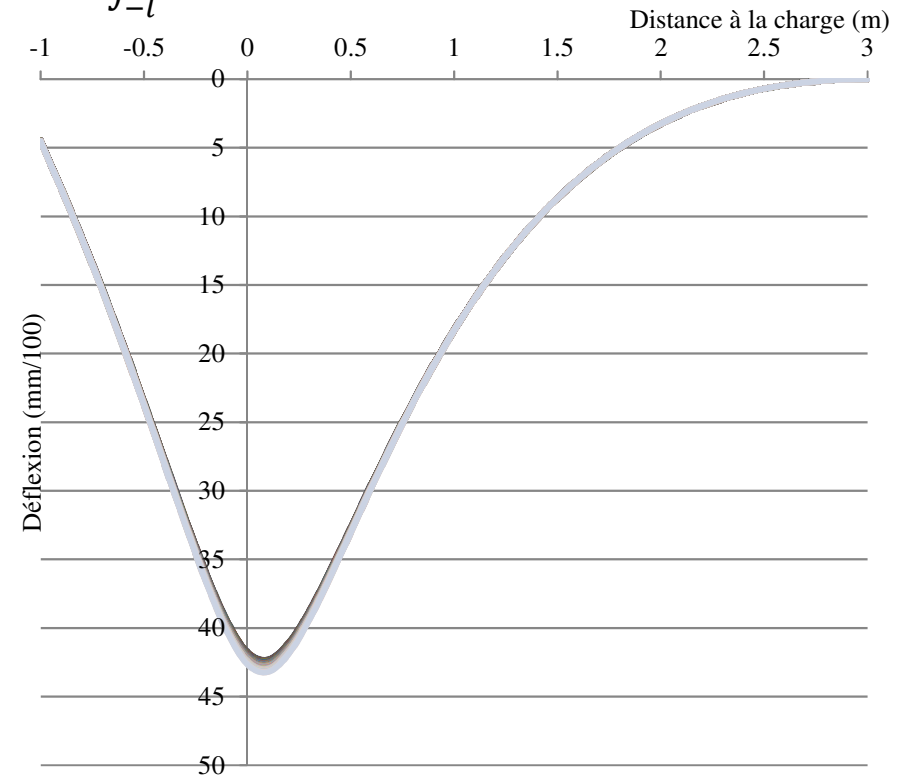
- Recherche d'un indicateur «  $I_j = \int_{-l}^{+l} p_j(x)w(x, E_l)dx$  » caractérisé par une fonction de pondération «  $p_j(x)$  » qui soit essentiellement sensible à la valeur du module  $E_j$  sur un domaine prédéfini



## Exemple de variation de modules



$$I_B(X) = \int_{-l}^{+l} p_B(x) w(X+x; \{E_B\}) dx - I_{BR}(X)$$

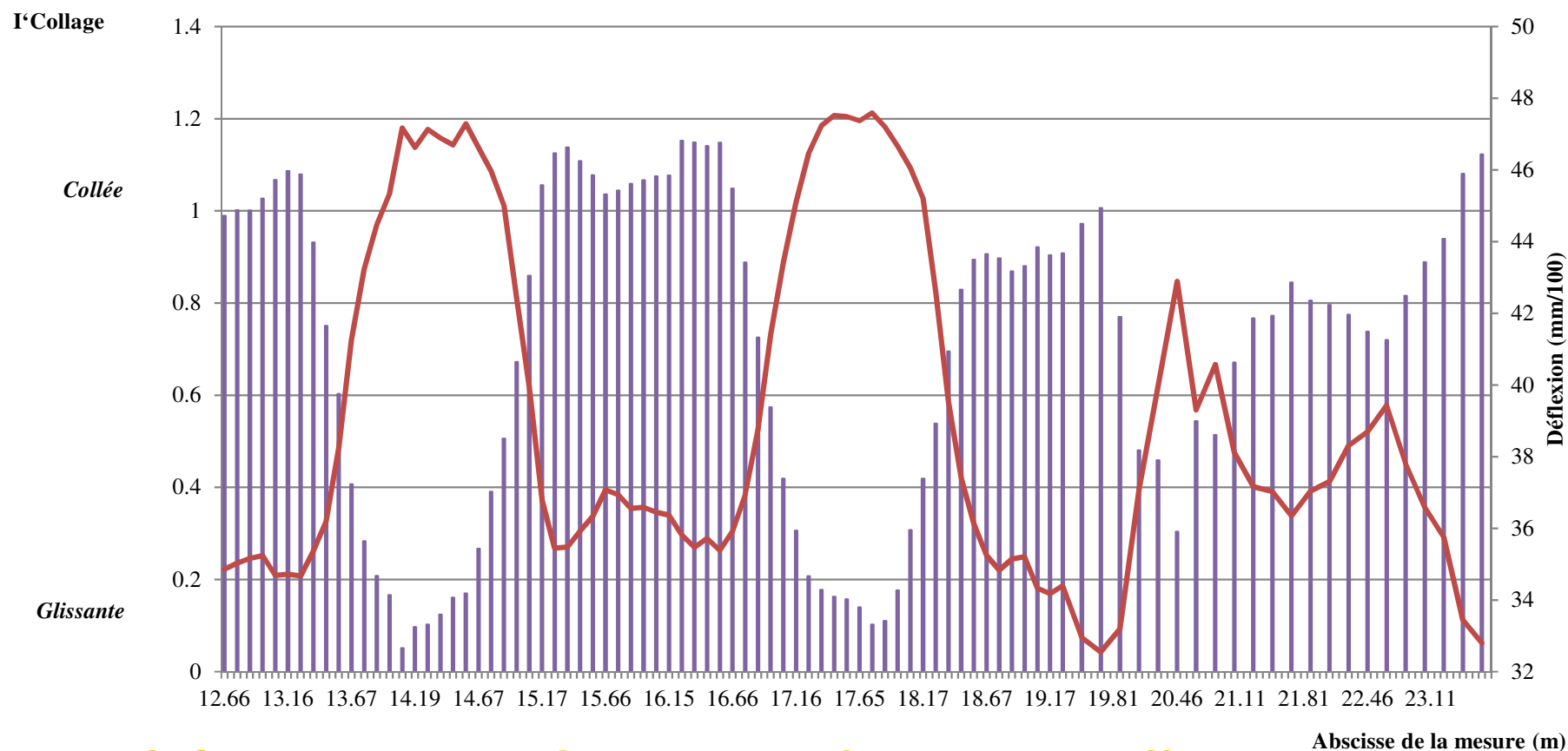


- Détermination de la valeur de l'indicateur  $I_B$  pour une variation de modules de la couche bitumineuse.
- $IB \approx E-E_{ref}$

## Résultats obtenus

- Bassins de déflexion peu affectés par la variation de module.
- Indicateur de la déflexion maximale peu sensible au défaut.
- Méthode de construction d'indicateurs optimisés pour la détection d'un type de défaut donné.
- Méthode validée pour des variations de modules et des décollements d'interface.

## Indicateurs sur mesures réelles



- Cohérence entre  $d_{\text{max}}$  et indicateurs collage.
- Indicateur collage plus indépendant du sol que  $d_{\text{max}}$ .

## Intérêts et perspectives

- **Processus de correction de la mesure de déflexion** (applicable pour le curviamètre et le déflectographe Flash)
  - Définition par simulation numérique et validation expérimentale
  - Possibilité pour les gestionnaires de disposer d'un indicateur plus précis et indépendant de l'appareil
- Possibilité de réaliser les calculs inverses sur les mesures corrigées pour évaluer les modules des couches de chaussée nécessaires pour les études de renforcement.
- Mise en place d'indicateurs de détection de défauts
  - Décollement / Perte de module d'une couche.
- Application possible à de nouveaux appareils de mesure de déflexion à grande vitesse (TSD, RAPTOR,...)

## Perspectives

- **Appliquer les travaux précédents sur des mesures réelles recueillies sur itinéraire.**
  - Analyse statistique pour découper l'itinéraire en zones homogènes.
  - Détermination de bassins types par zones homogènes tout en identifiant les défauts de chaque zone.
  - Calcul inverse sur bassin type
  - Comparaison avec des mesures de référence
- **Soutenance de thèse (Septembre 2018)**

## Merci de votre attention

**IFSTTAR**

**Allée des Ponts et Chaussées**

**CS4**

**44344 BOUGUENNAIS Cedex**

**France**

**Tél. +33 (0)2 40 84 59 29**

**[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)**

**[vinciane.le-boursicaud@ifsttar.fr](mailto:vinciane.le-boursicaud@ifsttar.fr)**