dgac

STAC

Journée Technique 2009

Auscultation structurelle des chaussées aéronautiques au déflectomètre à masse tombante HWD

Michaël BROUTIN

STAC – Infrastructures aéronautiques
Etudes et Recherches

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Développement durable
Infrastructures, transports et mer
Prévention des risques

Présent pour l'avenir

Plan de l'exposé

- Position du problème
- I - Présentation du matériel de mesure et du principe de l'essai
- II - Modèle mécanique et méthode de résolution
- III - Quelques résultats
- Conclusion et perspectives

L'auscultation structurelle des chaussées aéronautiques :

=> Détermination des caractéristiques mécaniques de la chaussée.

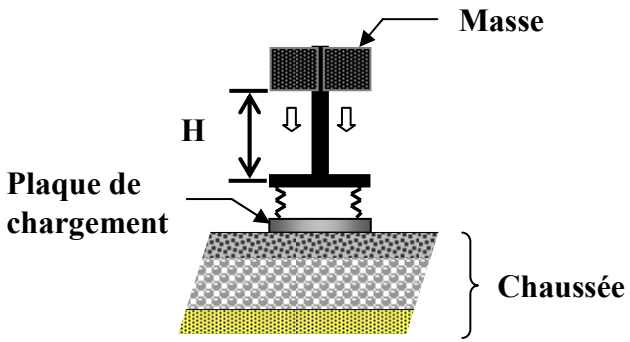
- Jusqu'à aujourd'hui : utilisation de la remorque de portance du STAC
- Décembre 2005 : Acquisition par le STAC d'un HWD, appareil sollicitant la chaussée sur un mode dynamique (chute d'une masse).

→ Gros besoins en modélisation.

I- Principe de l'essai HWD

APPAREIL A MASSE TOMBANTE

Création d'un chargement impulsionnel censé simuler le passage d'une roue d'avion

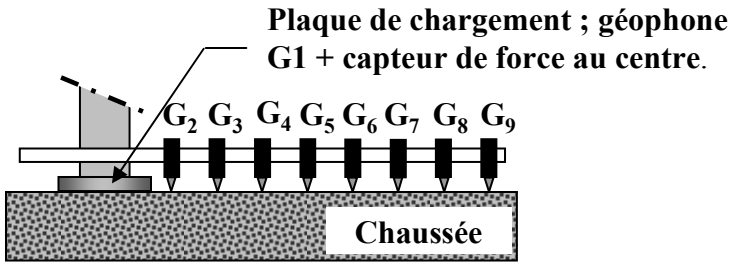


MESURE EN CONTINU DE LA DEFORMATION DE LA CHAUSSEE

A l'aide des géophones G_1 à G_9

ET DE L'EFFORT APPLIQUE

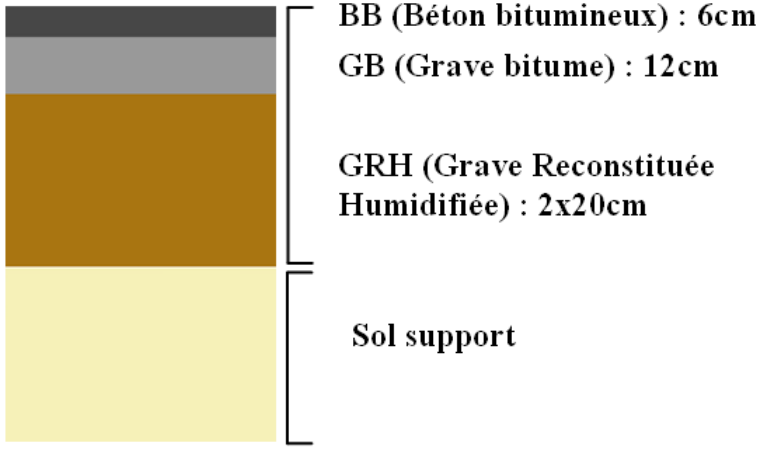
A l'aide d'un capteur intégré à la plaque de chargement



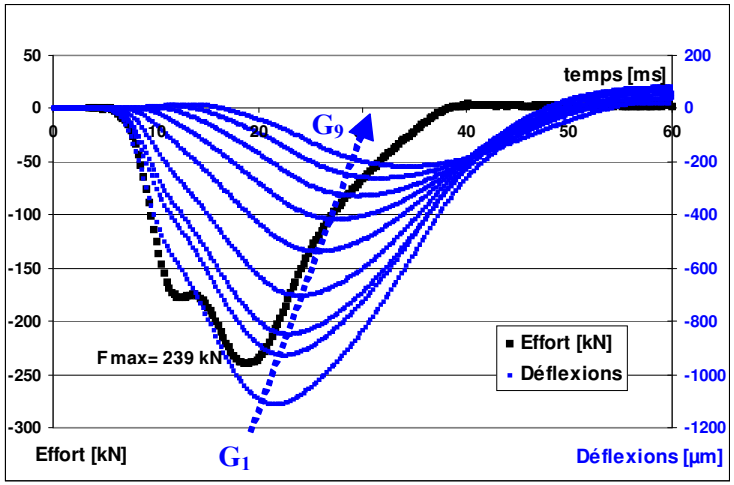
I- Principe de l'essai HWD

Exemple de résultats d'essai :

(ancienne planche d'essais STAC ; T=10°C ; F = 24 tonnes)



Structure étudiée



Réponse des géophones

I- Principe de l'essai HWD

Interprétation des résultats :

Procédure en 2 étapes :

1) Identification de paramètres (« Calcul inverse »)

- Choix d'un modèle mécanique
- Identification des paramètres du modèle (calcul « grille », algorithme de convergence…)

2) Evaluation des performances de la structure.

- Calcul direct (même modèle ; utilisation des paramètres rétrocalculés)
- Utilisation de lois de fatigue

I- Principe de l'essai HWD

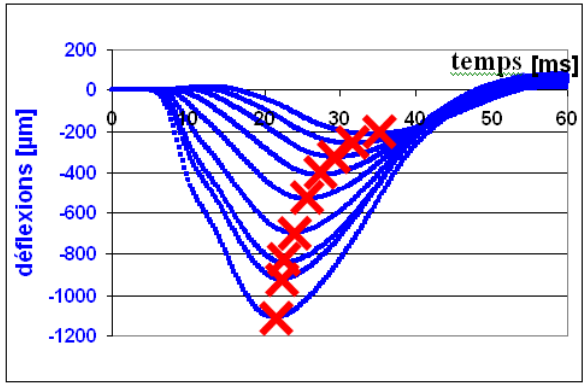
Méthode classique :

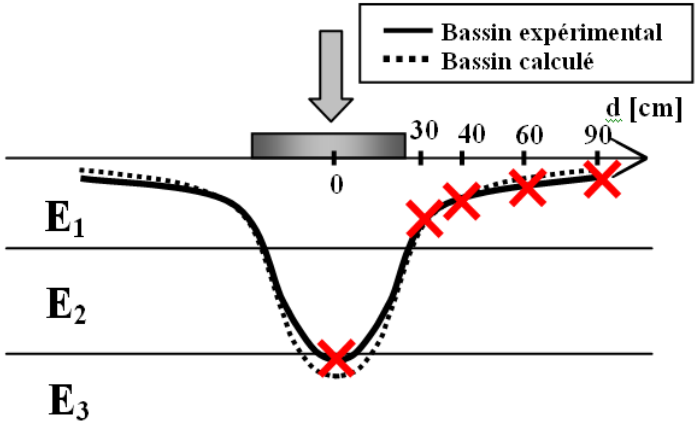
1) Modèle multicouche linéaire élastique de Burmister (Alizé ; BakFAA)

- Paramètres du modèle : H_i,E_i et ν_i, collage aux interfaces.
- Calcul des déformations induites par le chargement statique d'une plaque.

2) Calage d'un bassin de déflexion « pseudo-statique »

- Reconstitué à partir des maxima enregistrés sur chaque géophone





I- Principe de l'essai HWD

Processus itératif (méthode statique) :

Problème de minimisation de la fonction $f(\vec{E}) = \sum_{k=1}^{m} q_k \left(w_k(\vec{E}) - d_k \right)^2$

- ***Différentes méthodes de résolution*** *(ex : Gauss Newton) :*
- ***Principe général :***

1) Choix d'un vecteur E initia $(E)^0$

2) A chaque étape : $(E)^N = (E)^{N-1} + (\Delta E)$

3) Fin quand le critère est atteint

-> $\left\| f(\vec{E}_N) \right\| \leq e_0$ ou $\left\| f(\vec{E}_{N+1}) - f(\vec{E}_N) \right\| \leq e_0'$ ou $N \geq N_0$

- ***Exemple de calcul à l'aide du logiciel BakFAA :***

I- Principe de l'essai HWD

Limites des méthodes d'exploitation existantes :

1) Elles sont basées sur l'utilisation de **modèles statiques** ne correspondant pas à la **réalité physique de l'essai**.

2) L'identification des paramètres mécaniques du modèle est effectuée à l'aide d'un bassin de déflexion pseudo-statique, reconstitué à l'aide des maxima mesurés sur chaque géophone de mesure. Ceci conduit à n'exploiter qu'une **infime part de l'information disponible**.

→ Développement de modèles dynamiques

II- Le modèle dynamique

- ***Présentation du modèle :***

  Modèle dynamique aux éléments finis utilisant le module DYNI de CESAR-LCPC.

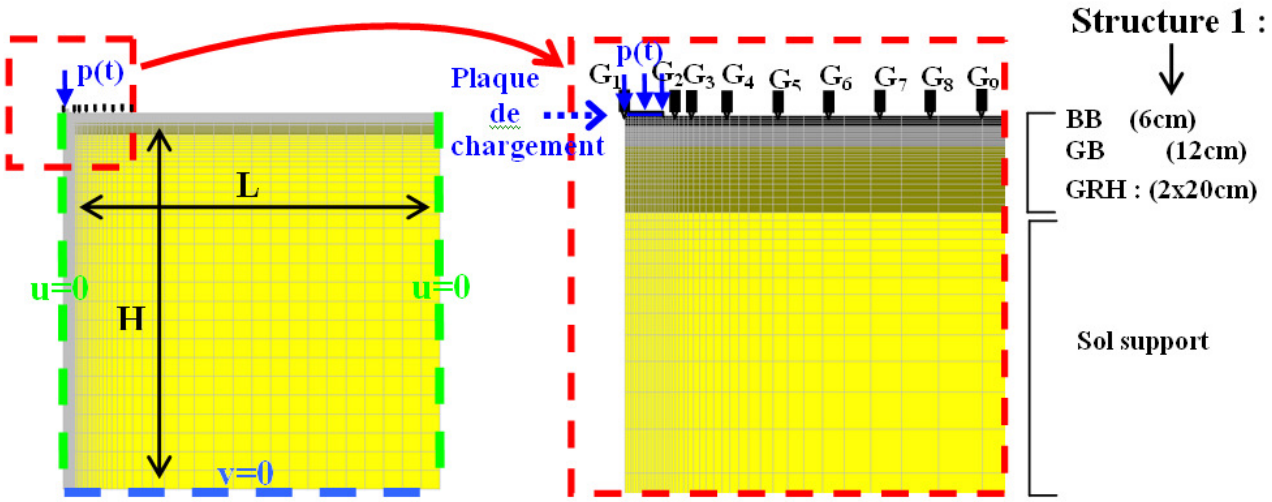
  - Géométrie
  - Lois de comportement

- ***Exemples de résultats numériques***

- ***Calcul inverse***

Maillage 2D axisymétrique :

II- Le modèle dynamique



- Le maillage retenu doit permettre :

- d'atteindre la précision numérique recherchée, en lien avec les résultats de l'étude expérimentale de répétabilité réalisée sur la planche instrumentée du STAC.

- d'optimiser les temps de calcul

- d'éviter les problèmes de dispersion numérique

- La cohérence avec la discrétisation temporelle a été vérifiée.

II- Le modèle dynamique

Lois de comportement :

- Elasticité linéaire
- Prise en compte de l'amortissement :

- Seul disponible dans CESAR : amortissement structurel de Rayleigh.

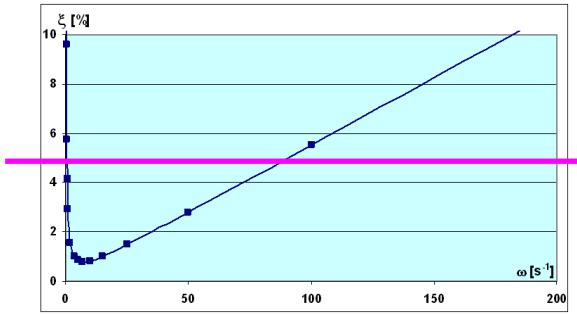
$Mu^{\cdot\cdot}+Cu^{\cdot}+Ku=P(t)$ $\quad C=\alpha M+\beta K$

- Actuellement dans CESAR : amortissement « global » ie α et β=Cstes pour l'ensemble de la structure

- Signification physique des coefficients α et β ?

Pour une fréquence de sollicitation $f=\omega/2\pi$, le taux d'amortissement vaut

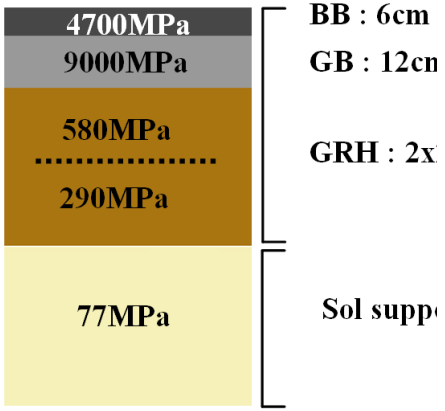
$\xi=1/2(\alpha/\omega+\beta.\omega)$



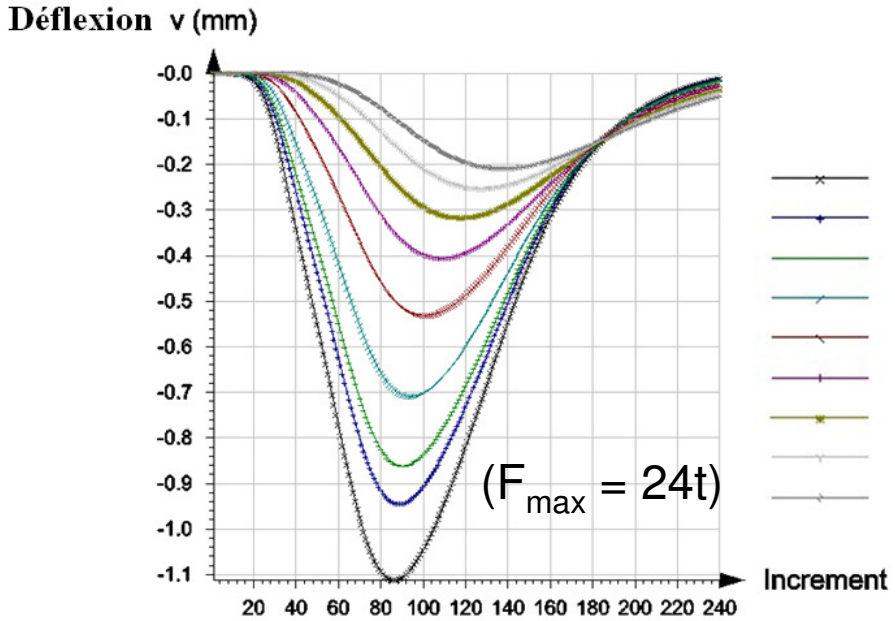
$\xi_{moy} = 5\%$

II- Le modèle dynamique

Exemple de résultats numériques :



(ξ = 5%)



Géophone	Distance au centre
G1	(0cm)
G2	(30cm)
G3	(40cm)
G4	(60cm)
G5	(90cm)
G6	(120cm)
G7	(150cm)
G8	(180cm)
G9	(210cm)

II- Le modèle dynamique

Calcul inverse : Démarche

- **Inconnues du problèmes :**

On suppose connus :	Inconnues du problème :
➢Les épaisseurs des couches (e_i)	➢Les modules d'Young des couches (E_i)
➢Les coefficients de Poisson (ν_i)	➢L' amortissement structurel (ξ)
➢Le collage aux interfaces (C_i)	➢La profondeur de substratum (H)

- **Développement d'une procédure d'identification :**

1) Choix d'une fonction objective et d'une erreur de minimisation

- Etude de sensibilité théorique

- Intégration de données expérimentales de répétabilité afin de choisir de façon cohérente l'erreur de minimisation

2) Choix et programmation d'un algorithme de convergence

II- Le modèle dynamique

Développement d'une procédure d'identification ; Travaux préliminaires :

- **1) Etude de répétabilité expérimentale.**
- **2) Etude de sensibilité théorique :**
  - Calculs d'incertitude
  - Détermination des coefficients de sensibilité des différents paramètres du modèle (e_i,E_i, ρ_i, H, ξ…)
- **3) Utilisation des résultats de 1) et 2) pour développer une méthode d'identification « manuelle »**

II- Le modèle dynamique

Procédure d'identification ;

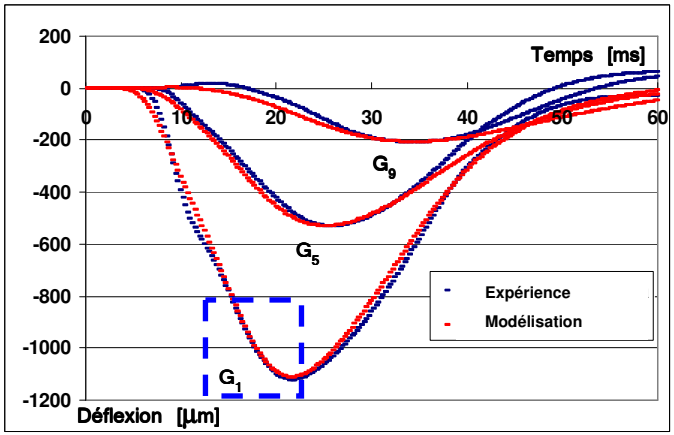
Algorithme de convergence :

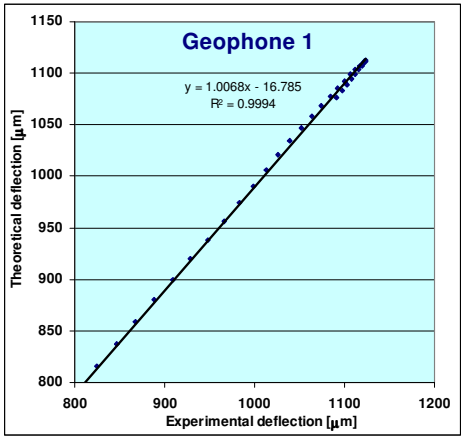
- Programmé et vérifié sur un jeu de données simulées.
- Pour le moment procédure simplifiée : détermination des E_i et de ξ ; H est préalablement déterminé par une méthode indépendante.
- Prochaine étape : algorithme à tester sur données réelles (planche instrumentée du STAC)

III- Quelques résultats

Exemple de résultat d'identification sur données réelles :

- Ancienne planche d'essais du STAC (Structure parfaitement connue; Etude géotechnique préalable ->H + estimation de E_{Sol})
- Identification « manuelle »





Comparaison avec la méthode statique :

	E_{BB}	E_{GB}	E_{GRH1}	E_{GRH2}	E_{Sol}
E_i Modèle dynamique [MPa]	4000	7500	510	240	77
E_i Modèle de Burmister (Alizé) [MPa]	4700	9000	580	290	120

III- Conclusions et perspectives

Améliorations en cours et futures du modèle actuel :

- Validation de l'algorithme de convergence développé sur données expérimentales.
- Amélioration du modèle d'amortissement (amortissement de Rayleigh par couches ? Amortissement hystérétique pour les couches supérieures ?)

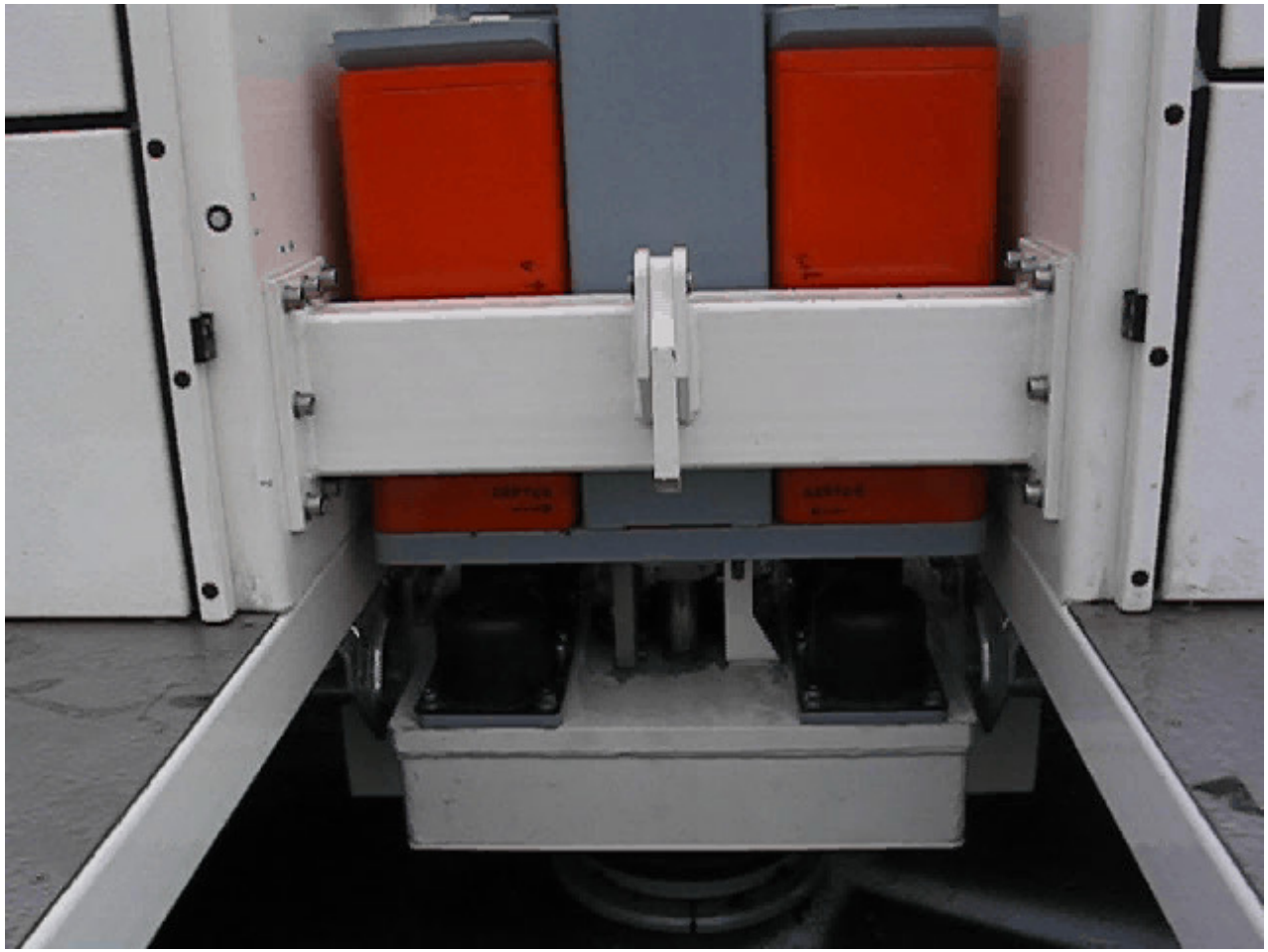
Validation expérimentale :

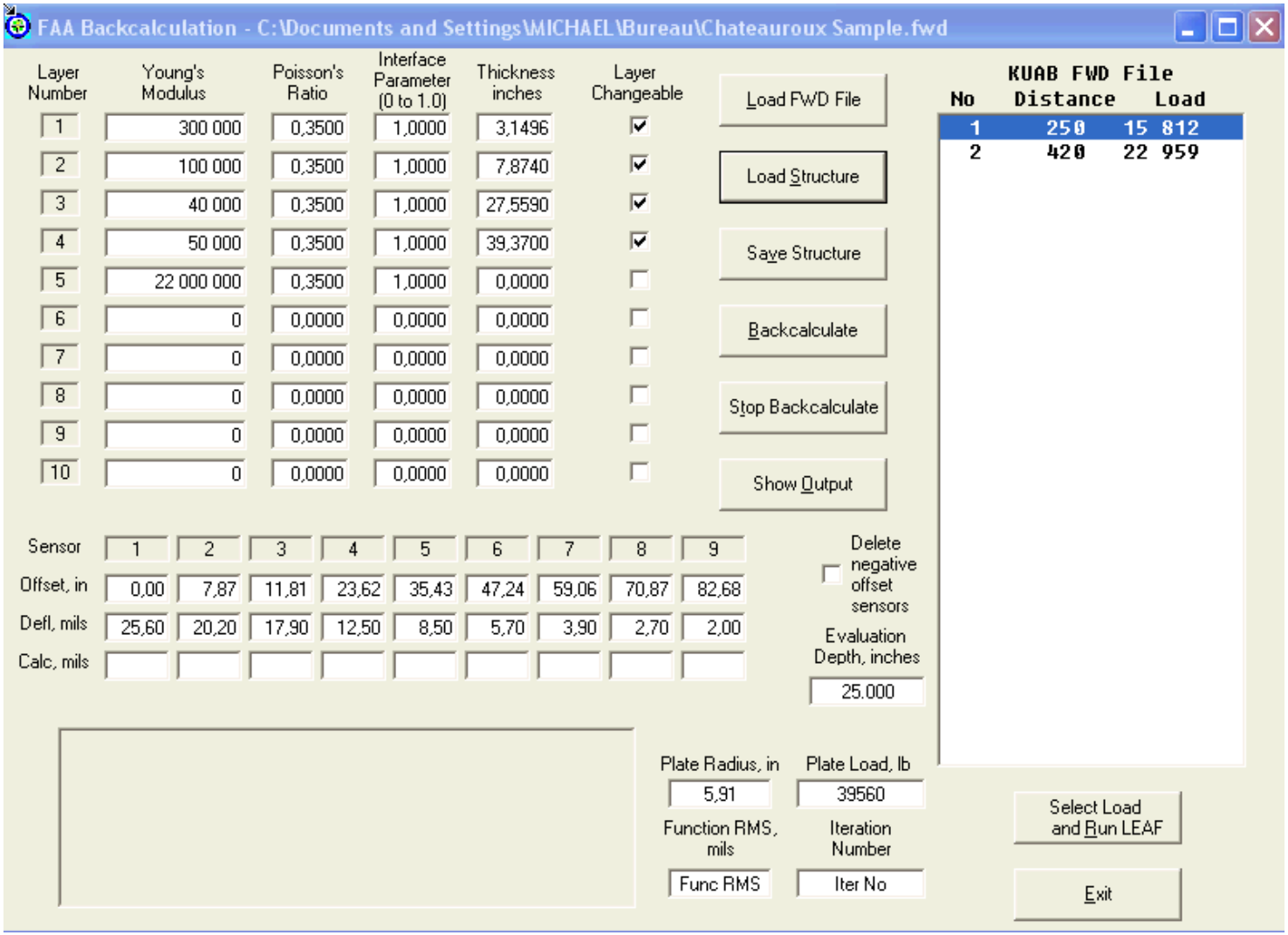
- Utilisation de la planche instrumentée du STAC
- Réalisation d'essais matériaux (modules complexes pour les matériaux bitumineux ; essais à la colonne résonnante pour les matériaux non traités) : Validation des modules ainsi que de ξ rétrocalculés.
- Meilleure interprétation des différences entre les modules « rétrocalculés » et mesurés en laboratoire : prise en compte de la nature « non drainée » de l'essai -> essais sur le manège de fatigue du LCPC Nantes en conditions « nappe haute » et « nappe basse » ?

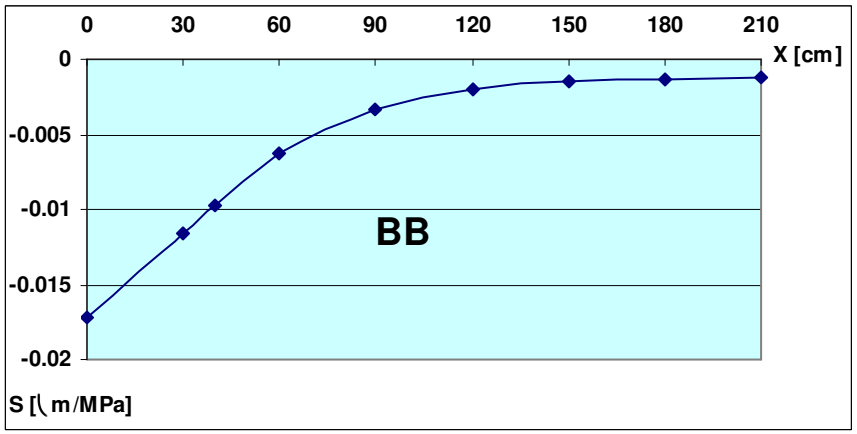
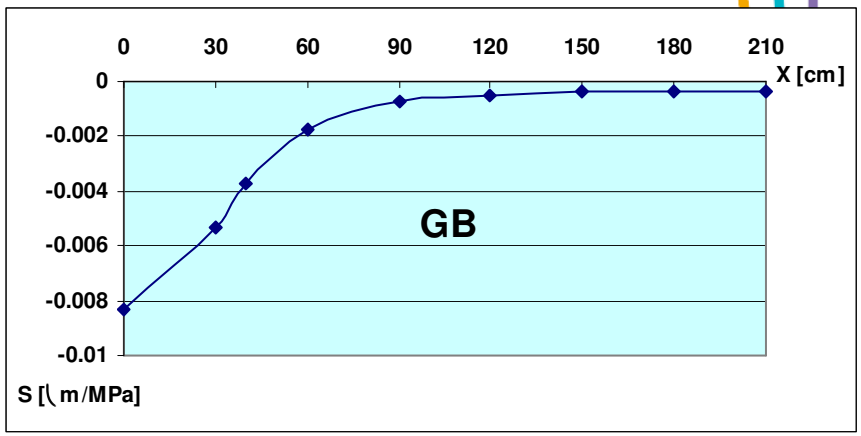
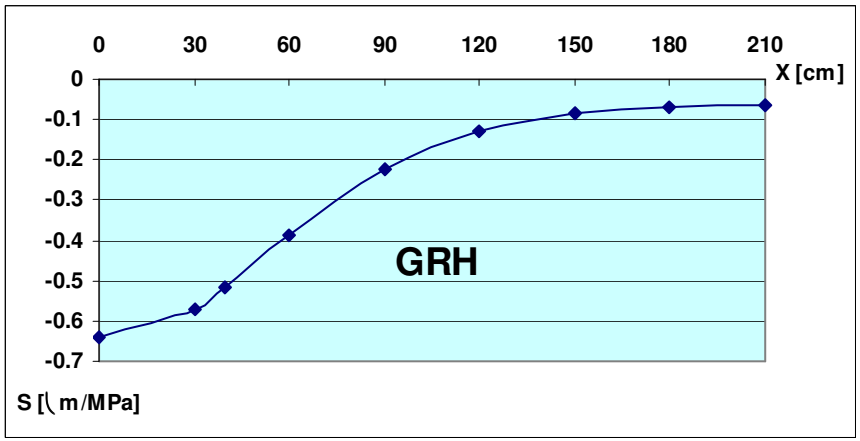
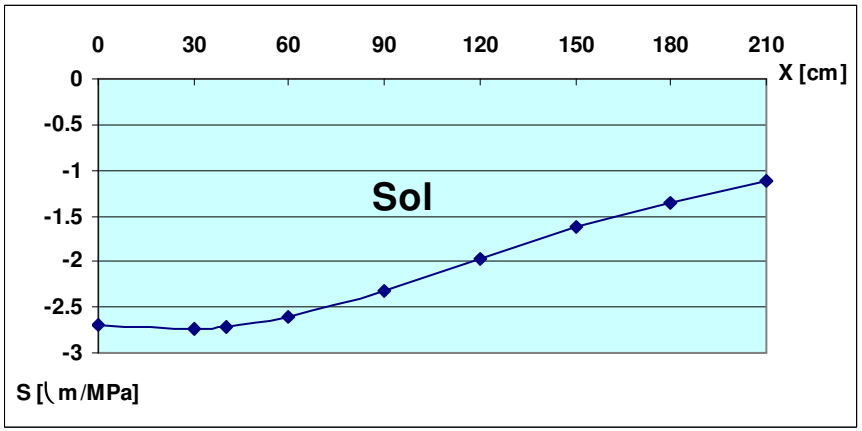
Merci de votre attention

Michaël BROUTIN
STAC/IA/Etudes et recherches
michael.broutin@aviation-civile.gouv.fr
01 49 56 82 47

PRI-2100-S




FAA Backcalculation - C:\Documents and Settings\MICHAEL\Bureau\Chateauroux Sample.fwd
Layer Number
Young's Modulus
Poisson's Ratio
Interface Parameter (0 to 1.0)
Thickness inches
Layer Changeable
1 300 000 0,3500 1,0000 3,1496
2 100 000 0,3500 1,0000 7,8740
3 40 000 0,3500 1,0000 27,5590
4 50 000 0,3500 1,0000 39,3700
5 22 000 000 0,3500 1,0000 0,0000
6 0 0,0000 0,0000 0,0000
7 0 0,0000 0,0000 0,0000
8 0 0,0000 0,0000 0,0000
9 0 0,0000 0,0000 0,0000
10 0 0,0000 0,0000 0,0000
Load FWD File
Load Structure
Save Structure
Backcalculate
Stop Backcalculate
Show Output
KUAB FWD File
No Distance Load
1 250 15 812
2 420 22 959
Sensor 1 2 3 4 5 6 7 8 9
Offset, in 0,00 7,87 11,81 23,62 35,43 47,24 59,06 70,87 82,68
Defl, mils 25,60 20,20 17,90 12,50 8,50 5,70 3,90 2,70 2,00
Calc, mils
Delete negative offset sensors
Evaluation Depth, inches
25.000
Plate Radius, in
5,91
Plate Load, lb
39560
Function RMS, mils
Func RMS
Iteration Number
Iter No
Select Load and Run LEAF
Exit

II- Le modèle dynamique

Coefficients de sensibilité relatifs aux modules