



**HAL**  
open science

**Évaluation de la compacité d'un enrobé bitumineux au Radar  
à Sauts de Fréquences - Calibrage du modèle de calcul.  
Campagne d'essais d'aptitude par comparaisons  
inter-laboratoires - Détermination de la masse volumique  
apparente en place - Déviation de Sélestat (67)- A35**

Bruno Beaucamp

► **To cite this version:**

Bruno Beaucamp. Évaluation de la compacité d'un enrobé bitumineux au Radar à Sauts de Fréquences - Calibrage du modèle de calcul. Campagne d'essais d'aptitude par comparaisons inter-laboratoires - Détermination de la masse volumique apparente en place - Déviation de Sélestat (67)- A35. ENDSUM. 2015, pp.19. <hal-04532028>

**HAL Id: hal-04532028**

**<https://hal.science/hal-04532028v1>**

Submitted on 4 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# **Évaluation de la compacité d'un enrobé bitumineux au Radar à Sauts de Fréquences Calibrage du modèle de calcul**

**Campagne d'essais d'aptitude par comparaisons inter-laboratoires  
Détermination de la masse volumique apparente en place**

**Déviation de Sélestat (67)- A35**



Rapport



## Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1.0.0	03/09/2015	Version initiale
1.0.1	10/09/2015	Corrections mineures

## Affaire suivie par

Cyrille FAUCHARD- LRR/GST/UEA
Tél : 02 35 68 92 95/ Fax : 02 35 68 81 72
Courriel : <a href="mailto:Cyrille.Fauchard@cerema.fr">Cyrille.Fauchard@cerema.fr</a>

## Rédacteur

---

**Bruno BEAUCAMP- LRR/GST/UEA**

Mesures réalisées par : Cyrille FAUCHARD, Bruno BEAUCAMP



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Principe du calibrage du modèle de calcul de la compacité</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Données de référence</b>	<b>12</b>
3.1	Choix des points de calibrage . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>14</b>
4.1	Modèle de compacité calibré . . . . .	14
4.2	Compacité et masse volumique apparente après calibrage . . . . .	15
4.2.1	Figure imposée : mesures ponctuelles . . . . .	15
4.2.2	Figure libre : profils . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>18</b>



## Table des figures

1	Compacités radar sans calibrage et mesures normalisées de référence. . .	13
2	Courbe de réponse du modèle de calcul de compacité calibré. . . . .	14
3	Compacité après calibrage des mesures ponctuelles. . . . .	16
4	Masse volumique apparente après calibrage des mesures ponctuelles. . .	16
5	Compacité des profils 1 à 6 après calibrage. . . . .	17
6	Masse Volumique Apparente des profils 1 à 6 après calibrage. . . . .	18



## Liste des tableaux

1	Masse Volumique Apparente et compacité de référence . . . . .	13
2	Compacité de référence et permittivités mesurées aux points de calibrage . . . . .	14



## 1 Introduction

Le Laboratoire Régional de Strasbourg (CEREMA - DterEst) a organisé en septembre 2014 une campagne d'essais d'aptitude inter-laboratoires concernant la détermination de la masse volumique apparente (MVA) en place, destinée aux membres du Club de Laboratoires de la Région Est (CLaRE).

L'Unité Électromagnétisme Appliqué (UEA) du Laboratoire Régional de Rouen (CEREMA - DterNC) a participé à cette campagne afin d'évaluer sa technique de détermination de la compacité des enrobés bitumineux par méthodes électromagnétiques hautes fréquences.

L'étude a fait l'objet d'un premier rapport en novembre 2014<sup>1</sup> présentant la méthode et les premiers résultats sans calibrage. Il est conseillé de s'y reporter pour la bonne compréhension du présent document.

A l'été 2015, le Laboratoire de Strasbourg a fourni aux intervenants les mesures de références obtenues par méthodes normalisées en laboratoire sur 12 éprouvettes, afin de procéder au recalage des mesures brutes de la première phase. Ce document présente la méthode de calibrage utilisée et les résultats obtenus.

## 2 Principe du calibrage du modèle de calcul de la compacité

Pour mémoire les mesures radar sont utilisées pour déterminer la permittivité diélectrique du béton bitumineux qui sera ensuite injectée dans le modèle de calcul de la compacité (1) faisant intervenir :

- la permittivité du béton bitumineux issue des mesures radar  $\varepsilon_{bb}$  ;
- la permittivité des constituants  $\varepsilon_g$ ,  $\varepsilon_f$ ,  $\varepsilon_b$  et  $\varepsilon_e$  ;
- leur masse volumique  $\rho_g$ ,  $\rho_f$ ,  $\rho_b$  et  $\rho_e$  ;
- la teneur massique des ingrédients exprimée par rapport à la masse totale de matériau sec  $T_g$ ,  $T_f$ ,  $T_b$  et  $T_e$  ;
- un paramètre d'ajustement empirique  $\alpha$ .

Les lettres en indices désignent les différents constituants :

- $bb$  pour le béton bitumineux ;
- $g$  pour les granulats ;
- $f$  pour les fines d'apport ;
- $b$  pour le bitume ;
- $e$  pour l'eau ;

$$C = \frac{(\varepsilon_{bb}^\alpha - 1) \cdot Z}{\varepsilon_g^\alpha + \frac{\rho_g}{\rho_f} \cdot \frac{T_f}{T_g} \cdot \varepsilon_f^\alpha + \frac{\rho_g}{\rho_b} \cdot \frac{T_b}{T_g} \cdot \varepsilon_b^\alpha + \frac{\rho_g}{\rho_e} \cdot \frac{T_e}{T_g} \cdot \varepsilon_e^\alpha - Z} \quad (1)$$

Où  $Z$  est une constante définie par :

$$Z = 1 + \frac{\rho_g}{\rho_f} \cdot \frac{T_f}{T_g} + \frac{\rho_g}{\rho_b} \cdot \frac{T_b}{T_g} + \frac{\rho_g}{\rho_e} \cdot \frac{T_e}{T_g}$$

1. [BEAUCAMP - DTerNC]. Évaluation de la compacité d'un enrobé bitumineux au Radar à Sauts de Fréquences-Estimation initiale sans calibrage. Rapport, novembre 2014.

Le détail de la méthode de détermination de la compacité a été présenté dans le précédent rapport de novembre 2014 avec les résultats sans calibrage. Dans la mesure où le béton bitumineux contient 38 % d'apport externe d'origine inconnue, on ne peut déterminer en laboratoire la permittivité des granulats et les calculs étaient basés sur une estimation  $\varepsilon_g = 4,7$ .

Le calibrage va consister à ajuster la permittivité des granulats  $\varepsilon_g$  pour que le modèle de calcul colle au mieux aux données de références fournies (minimisation). Le processus est automatisé sous Matlab : la routine basée sur la fonction `fminsearch` va déterminer la valeur de  $\varepsilon_g$  permettant de minimiser la distance entre les compacités de référence et les compacités issues du modèle de calcul. Le processus est répété pour les deux jeux de valeurs des passages 1 et 2 de la figure libre.

A l'issue, nous obtenons une nouvelle valeur de  $\varepsilon_g$ , moyenne des deux résultats précédents et un nouveau modèle de calcul calibré. Les compacités finales seront alors recalculées à partir de ce nouveau modèle pour les figures libre et imposée et traduites en masse volumique apparente.

### 3 Données de référence

Les données de référence du tableau 1 sont issues des mesures en laboratoire par méthodes normalisées de 12 carottes dont les numéros correspondent au numéros des points de la figure imposée. Pour les besoins de notre modèle, la Masse Volumique Apparente de référence est convertie en valeur de compacité par la formule (2).

$$C_{ref} = \frac{MVA_{ref}}{MVR_{enr}} \quad (2)$$

avec :

- $C_{ref}$  : compacité de référence ;
- $MVA_{ref}$  : masse volumique apparente de référence en  $kg/m^3$  ;
- $MVR_{enr} = 2431kg/m^3$  : masse volumique réelle de l'enrobé ;

#### 3.1 Choix des points de calibrage

Les compacités déterminées par méthode radar sans calibrage ( $\varepsilon_g = 4,7$ ) sont représentées sur la figure 1, en bleu pour le premier passage, en rouge pour le second. Les mesures de référence issues du tableau 1 sont en vert.

Globalement, les mesures radar sont en deçà des mesures de référence et le sens de variation d'un point à l'autre est respecté, à l'exception du point n° 5 qui sera exclu du processus de calibrage. Le point 9 n'a pas de données de référence et le point 8 semble bien divergent. Au final les points de calibrage retenus sont les carottes 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11 et 12. Les compacités de référence et les permittivités mesurées au radar pour les deux passages sont données dans le tableau 2.

## Données de référence

N° carotte	Masse Volumique Apparente de référence $MVA_{ref}(kg/m^3)$	Compacité de référence $C_{ref}(\%)$
1	2306	94,86
2	2343	96,38
3	2324	95,60
4	2370	97,49
5	2258	92,88
6	2306	94,86
7	2326	95,68
8	2291	94,24
9	Pas de valeur	Pas de valeur
10	2331	95,89
11	2384	98,07
12	2362	97,16

TABLE 1 – Masse Volumique Apparente et compacité de référence

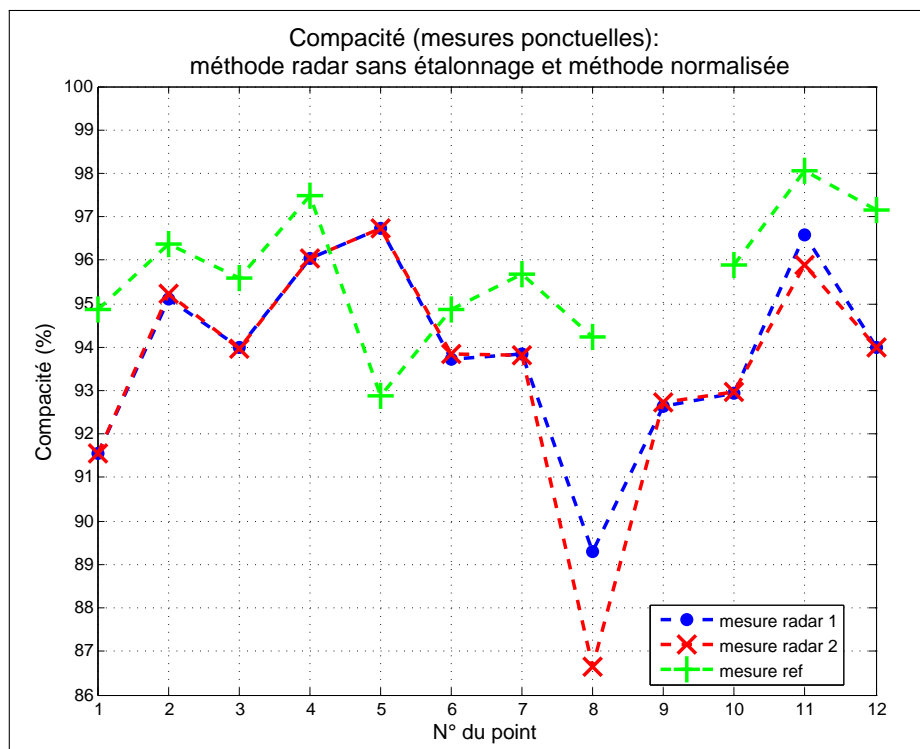


FIGURE 1 – Compacités radar sans calibrage et mesures normalisées de référence.

N° carotte	Compacité $C_{ref}$ (%)	Permittivité (mesure 1)	Permittivité (mesure 2)
1	94,86	4,13	4,13
2	96,38	4,29	4,30
3	95,60	4,24	4,24
4	97,49	4,34	4,34
6	94,86	4,23	4,23
7	95,68	4,23	4,23
10	95,89	4,19	4,19
11	98,07	4,36	4,33
12	97,16	4,24	4,24

TABLE 2 – Compacité de référence et permittivités mesurées aux points de calibrage

## 4 Résultats

### 4.1 Modèle de compacité calibré

Le processus de calibrage sous Matlab nous donne  $\varepsilon_g = 4,5838$  pour la première série de mesure et  $\varepsilon_g = 4,5807$  pour la seconde. Nous retiendrons pour le modèle calibré la valeur de permittivité des granulats  $\varepsilon_g = 4,58$ .

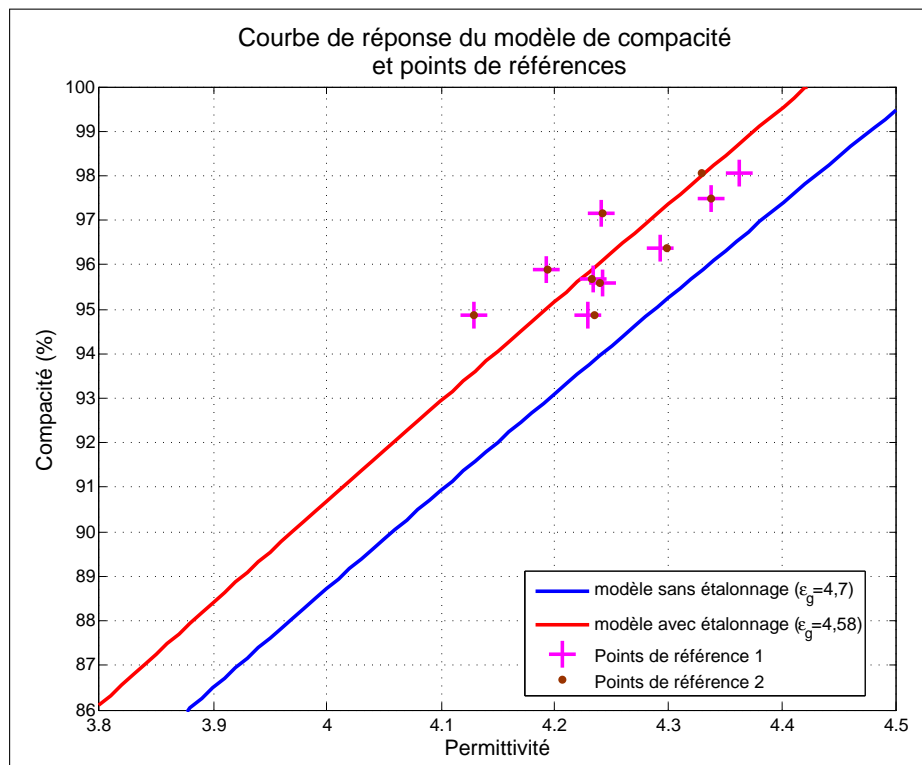


FIGURE 2 – Courbe de réponse du modèle de calcul de compacité calibré.

La figure 2 montre les deux courbes de réponse du modèle de calcul de la compacité, sans calibrage en bleu ( $\varepsilon_g = 4,7$ ) et après calibrage en rouge ( $\varepsilon_g = 4,58$ ). Les deux séries de points de référence associées au deux séries de mesure de permittivité sont également représentées sous forme de croix cyan et points marron. On note une augmentation de la compacité de l'ordre de 2% pour une augmentation de  $\varepsilon_g$  de 0,12.

## 4.2 Compacité et masse volumique apparente après calibrage

Le nouveau modèle calibré ( $\varepsilon_g = 4,58$ ) est utilisé pour recalculer la compacité des mesures ponctuelles statiques (figure imposée) et des profils en continu (figure libre). La Masse Volumique Apparente est calculée suivant la formule (3).

$$MVA = C \cdot MVR \quad (3)$$

avec :

- $C$  : compacité;
- $MVA$  : masse volumique apparente en  $kg/m^3$ ;
- $MVR = 2431kg/m^3$  : masse volumique réelle de l'enrobé;

### 4.2.1 Figure imposée : mesures ponctuelles

Les résultats de calcul de la compacité après calibrage sont donnés sur la figure 3 et la traduction en masse volumique apparente sur la figure 4. Les données sont représentées en bleu pour la première série de mesures, en rouge pour la seconde et en vert pour les mesures de référence par méthode normalisée. Globalement les résultats se sont recentrés vers les mesures de référence. On conserve un écart significatif sur les points 5 et 8.

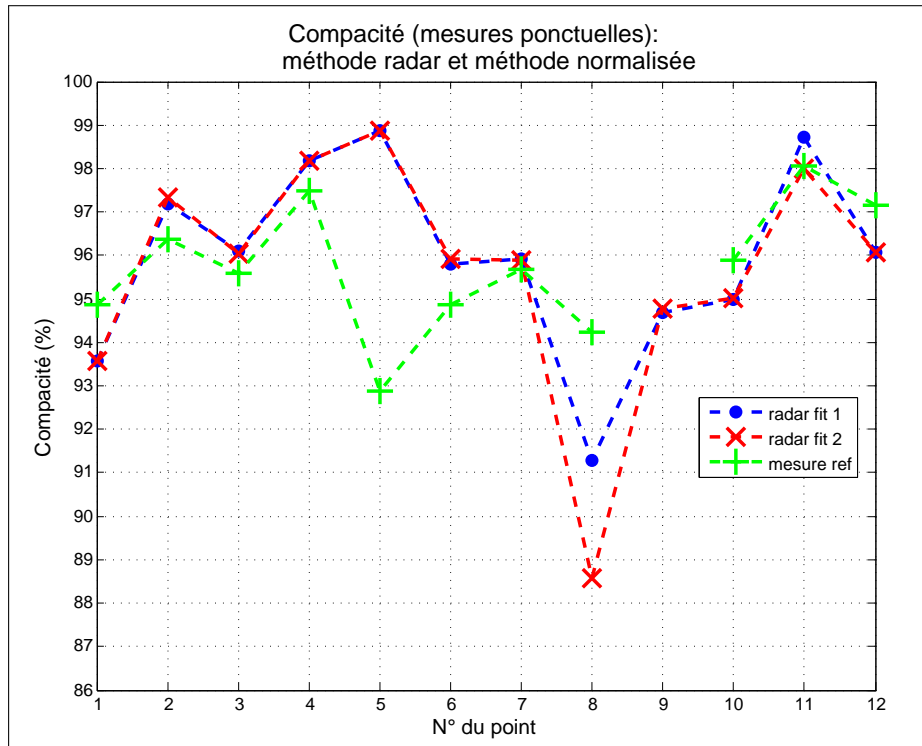


FIGURE 3 – Compacité après calibrage des mesures ponctuelles.

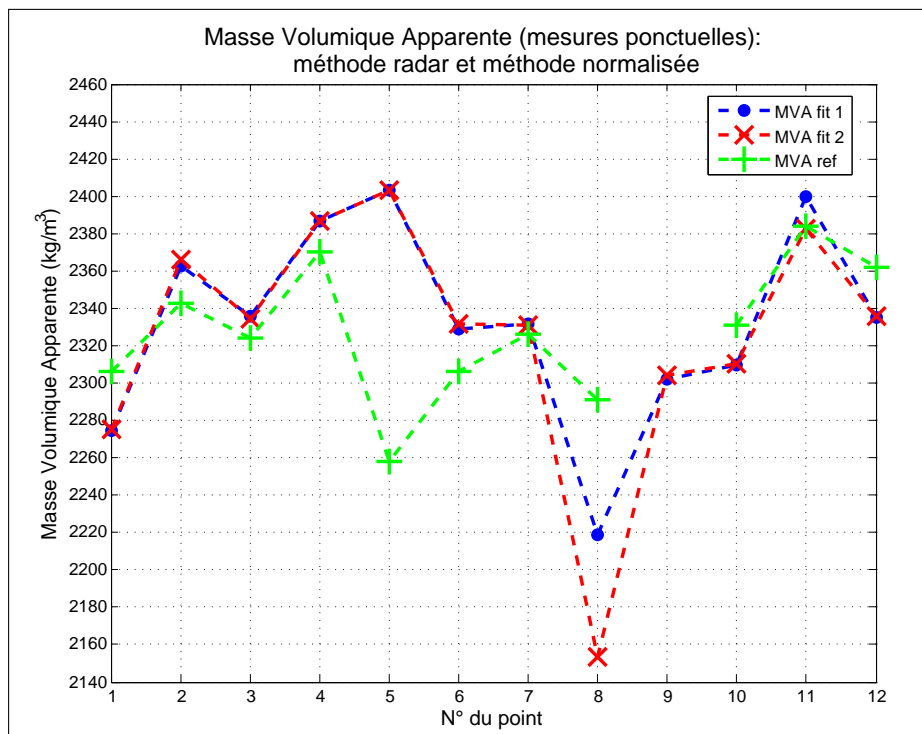


FIGURE 4 – Masse volumique apparente après calibrage des mesures ponctuelles.

#### 4.2.2 Figure libre : profils

Pour les mesures en continu le long de 6 profils, les résultats de calcul de la compacité après calibrage sont donnés sur la figure 5 et la traduction en masse volumique apparente en figure 6.

Sur la courbe de compacité, les limites basse (92%) et haute (96%) couramment admises sont représentées en pointillés rouges. Les zones où l'antenne a été instable sont encadrées en marron sur les graphes.

Le calibrage a eu pour effet de relever les courbes et on note des compacités globalement élevées.

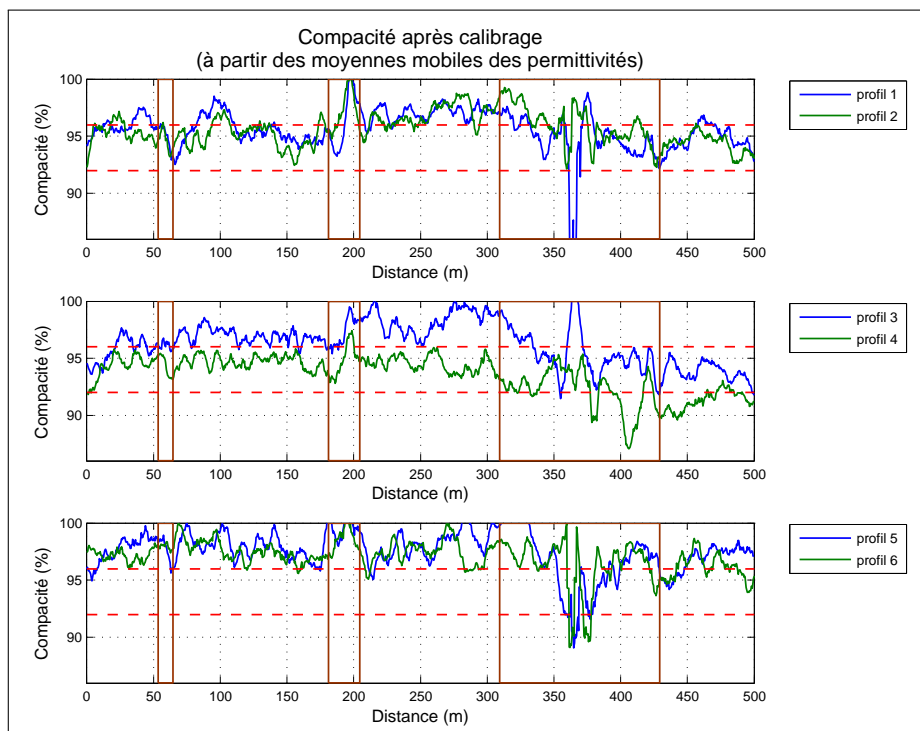


FIGURE 5 – Compacité des profils 1 à 6 après calibrage. En cadre marron, zones "chaotiques" liées à de forts mouvements d'antenne.

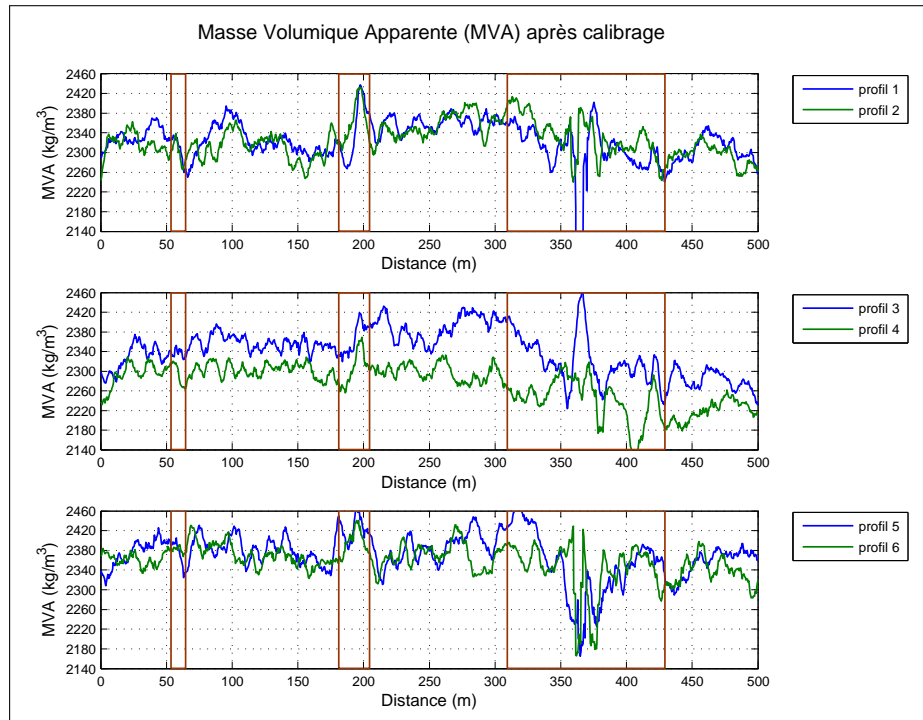


FIGURE 6 – Masse Volumique Apparente des profils 1 à 6 après calibrage. En cadre marron, zones "chaotiques" liées à de forts mouvements d'antenne.

## 5 Conclusion

Les mesures de masse volumique apparente issues de méthodes normalisées ont permis de calibrer notre modèle à partir de compacités de référence en 9 points. Les résultats obtenus après calibrage seront transmis au laboratoire de Strasbourg pour être comparés aux données des autres appareils utilisés lors de cette campagne d'essai. Dans le cadre du développement de notre méthode de détermination de la compacité par radar à sauts de fréquence, il serait également utile de récupérer les épaisseurs précises de la couche d'enrobé de chacune des carottes afin de vérifier par une seconde méthode les valeurs de permittivité.

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Energie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures  
Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

**Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement**

Direction territoriale Normandie Centre : 10 chemin de la poudrière - CS 90245 - F-76121 Le Grand Quevilly cedex - Tél : +33 (0)2 35 68 81 00

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public - Siret 130 018 310 00289 - TVA Intracommunautaire : FR 94 130018310 - [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)