



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Evaluation des méthodes à grand rendement pour la mesure des déflexions de chaussées routières

Bewertung von Hochleistungsmethoden zur Ermittlung der Deflektionswerte von Fahrbahnen

Evaluation of high-performance methods for measuring road pavement deflections

Nibuxs Sàrl

Mehdi Ould-Henia, Ing. civil, dr ès science EPF
Parisa Rossel, Ing. civile, dr ès science KTH
Othmane Siwar, Ing. civil EPF

Berner Fachhochschule

Maïssa Gharbi, Ing. civile, dr ès science ECN
Nicolas Bueche, Ing. civil, prof., dr ès science EPF
Aybike Öngel, Ing. civile, Prof. Dr

Infralab SA

Pascal Bauer, DES Sciences Physiques
Anthony Gautier, Ing. civil INSA
Sandro Chiavuzzo, Technicien de mesure

Projet de recherche TRU_20_02A_01
sur demande de l'Office fédéral des routes OFROU
Mars 2026 | 1819

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion: Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Evaluation des méthodes à grand rendement pour la mesure des déflexions de chaussées routières

Bewertung von Hochleistungsmethoden zur Ermittlung der Deflektionswerte von Fahrbahnen

Evaluation of high-performance methods for measuring road pavement deflections

Nibuxs Sàrl

Mehdi Ould-Henia, Ing. civil, dr ès science EPF

Parisa Rossel, Ing. civile, dr ès science KTH

Othmane Siwar, Ing. civil EPF

Berner Fachhochschule

Maïssa Gharbi, Ing. civile, dr ès science ECN

Nicolas Bueche, Ing. civil, prof., dr ès science EPF

Aybike Öngel, Ing. civile, Prof. Dr

Infralab SA

Pascal Bauer, DES Sciences Physiques

Anthony Gautier, Ing. civil INSA

Sandro Chiavuzzo, Technicien de mesure

Projet de recherche TRU_20_02A_01

sur demande de l'Office fédéral des routes OFROU

Mars 2026 | 1819

Mentions légales

Centre de recherche et équipe de projet

Direction de projet

Mehdi Ould-Henia

Membres

Parisa Rossel

Maïssa Gharbi

Nicolas Bueche

Öngel Aybike

Anthony Gautier

Pascal Bauer

Sandro Chiavuzzo

Rita Galrito

Othmane Siwar

Commission d'accompagnement

Président

Martin Horat

Membres

Vincent Gorgé

Tony Bühler

Martin Arraigada

Alain Jacot

Yvan Ramel

Olivier Schalbetter

Cofinancement du projet de recherche

République et canton de Neuchâtel – Département du développement territorial et de l'environnement - Service des ponts et chaussées

Canton de Vaud – Direction générale de la mobilité et des routes DGMR – Division Entretien

Canton du Valais – Département de la mobilité, du territoire et de l'environnement – Service de la mobilité

Demandeur

Office fédéral des routes OFROU

Source

Le document peut être téléchargé gratuitement sur
<https://www.mobilityplatform.ch/>

Mars 2026

Table des matières

Index des figures	8
Index des tableaux.....	13
Index des abréviations	14
Résumé	15
Zusammenfassung.....	18
Summary	21
1 Introduction.....	25
1.1 Problématique (situation actuelle)	25
1.2 Objectifs et méthodologie	25
2 État des connaissances.....	27
2.1 Méthodes de mesure de la déflexion.....	27
2.1.1 Appareils traditionnels et à faible rendement....	27
2.1.2 Appareils à grand rendement :.....	30
2.1.3 Comparaison des appareils	33
2.2 Identification et analyse des normes VSS/SN : Une	
étude transnationale des pratiques de normalisation..	37
2.2.1 Normes VSS/SN.....	37
2.2.2 Étude de la normalisation dans différents pays	38
2.2.3 Synthèse	38
2.3 Exploitation de mesures de déflexions	38
2.3.1 Principaux facteurs d'influence sur les	
déflexions	38
2.3.2 Analyses des essais.....	42
2.4 Conclusion.....	44
3 Campagne de mesures expérimentales	47
3.1 Programme de mesures	47
3.2 Réalisation des mesures.....	50
3.2.1 Mesures TSD	50
3.2.2 Mesures Raptor	51
3.2.3 Mesures HWD.....	53
3.3 Synthèse des conditions de mesure	54
3.3.1 Conditions de température et saisonnière	54
3.3.2 Vitesse de mesure.....	59
4 Contrôle des livraisons des données	61
4.1 Données TSD.....	61
4.2 Données HWD	66
4.3 Données RAPTOR.....	66

5	Analyse de répétabilité des mesures	69
5.1	Répétabilité des mesures TSD	69
5.1.1	Comparaison des mesures sous la charge.....	69
5.1.2	Comparaison des mesures de la déflexion la plus éloignée de la charge.....	73
5.2	Répétabilité des mesures RAPTOR	77
5.2.1	Comparaison des mesures sous la charge.....	77
5.2.2	Comparaison des mesures de la déflexion la plus éloignée de la charge.....	83
5.3	Discussion.....	88
6	Comparaison des données brutes	93
6.1	Découpage en zones homogènes	93
6.2	Comparaison des méthodes de mesure	97
6.3	Comparaison des déflexions sous la charge	98
6.4	Comparaison des déflexions maximales.....	107
6.5	Comparaison des déflexions Do à une température de référence	110
6.6	Comparaison des SCI300	119
6.7	Comparaison des MLI	128
6.8	Comparaison des LLI.....	137
6.9	Comparaison des déflexions D1500	146
6.10	Discussion – Comparaison des données brutes	156
7	Estimation des propriétés mécaniques des structures	159
7.1	Approche élastique linéaire	159
7.1.1	Hypothèses mécaniques générales	159
7.1.2	Correction de l'effet de la température	162
7.1.3	Calcul des modules élastiques	163
7.1.4	Comparaison statistique des modules élastiques	166
7.2	Approche viscoélastique	177
7.3	Discussion – Comparaison des modules élastiques ..	183
8	Conclusions et recommandations	185
8.1	Conclusions	185
8.2	Recommandations pour la normalisation	186
	Annexes A – Comparaison des déflexions maximales	188
	Bibliographie	194
	Clôture du projet	198

Index des figures

Figure 1 : Méthodologie du projet de recherche	26
Figure 2 : Principe de mesure du curvimètre [2]	28
Figure 3 : Défectographe Lacroix [1].....	29
Figure 4 : a) Vue générale d'un FWD [4], b) Principe de mesure du FWD [5]	29
Figure 5 : Rolling Wheel Deflectometer [1].....	31
Figure 6 : Raptor : a) Croquis du camion et de la remorque Raptor [9], b) Lasers [10]	31
Figure 7 : Vue générale du TSD [15]	33
Figure 8 : a) principe de mesure de la pente de déflexion [16], [17], b) Bassin de déflexion [16].....	33
Figure 9 : Comparaison entre les mesures de pente HSD, les mesures de déflexion FWD et Flash sur les trois sections.[19]	35
Figure 10 : Comparaison des profils de pente HA TSD et de déflexion centrale FWD sur chaussée composite souple [20].....	35
Figure 11 : Comparaison des résultats de RWD et FWD [21]	36
Figure 12 : Comparaison des déflexion maximales mesurées par le FWD et le RAPTOR (RWD) [8].....	36
Figure 13 : Comparaison des valeurs Défectographe – Raptor [22].....	37
Figure 14 : Facteur d'ajustement de la température (AASHTO [32]) de [31].....	40
Figure 15 : Bassin de déflexion simulés avec Abaqus [37].....	41
Figure 16 : Influence de la distance entre la charge et une fissure verticale sur la mesure de déflexion [27].....	41
Figure 17 : Influence de : a) la largeur de la fissure transversale, b) la largeur de la fissure longitudinale sur la déflexion [38]	42
Figure 18 : Indicateurs BLI, MLI, LLI [1]	43
Figure 19 : Schéma synoptique présentant les paramètres définis et leur association aux différentes couches d'une structure routière selon la nomenclature de l'AIPCR [51].....	45
Figure 20 : Cartographie des tronçons routiers sélectionnés (violet : routes nationales, rouge : routes cantonales).....	48
Figure 21 : Photo du TSD lors de l'intervention en Suisse.....	50
Figure 22 : Problème de coordonnées GPS du TSD sur l'axe T9 (tracé théorique en rouge / points GPS du TSD en bleu)	51
Figure 23 : Photo du Raptor lors de sa 1ère intervention en Suisse	51
Figure 24 : Graphique comparatif des déflexions Raptor / HWD 2022 sur la T9 (section n°14)	52
Figure 25 : Photo de l'appareil de mesure HWD utilisé pour ces mesures.....	54
Figure 26 : Graphique des dates et heures de mesures pour chaque appareil / intervention.....	56
Figure 27 : Graphique des températures de l'air pendant les mesures pour chaque appareil / intervention	58
Figure 28 : Graphique des températures de surface de l'enrobé pendant les mesures pour chaque appareil.....	58

Figure 29 : Graphique des températures des matériaux bitumineux pendant les mesures pour chaque appareil.....	59
Figure 30 : Graphique des vitesses moyennes de mesures pour chaque appareil ...	60
Figure 31 : Exemple de bassins de déflexions mesurés par le TSD - Distribution des données aux capteurs 0, 300 mm et 1500 mm.....	62
Figure 32 : Comparaison entre les bassins de déflexions estimés et reçues	63
Figure 33 : Pourcentage total des pentes négatives détectées sur toutes les zones mesurées	64
Figure 34 : Pentes de déflexions mesurées sur une structure rigide [53].	65
Figure 35 : Pentes de déflexions mesurées sur une structure souple [53]	65
Figure 36 : a) Séquence de valeurs valables insuffisante. b) Proportion du secteur avec un bassin de déflexion défini	66
Figure 37 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+)	70
Figure 38 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile	71
Figure 39 : Comparaison statistique des déflexions Do mesurées sur les zones 1,2 et 3 lors de chaque passage du TSD sur la RC4530+	71
Figure 40 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens)	72
Figure 41 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens) – Moyenne mobile	72
Figure 42 : Comparaison statistique des déflexions Do mesurées sur les zones 1, 2,3 et 4 lors de chaque passage du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens)	73
Figure 43 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+)	74
Figure 44 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile	74
Figure 45 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du TSD sur la RC4530+	75
Figure 46 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens).....	76
Figure 47 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens) – Moyenne mobile	76
Figure 48 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens)	77
Figure 49 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+)	78
Figure 50 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile	79
Figure 51 : Comparaison statistique des déflexions Do mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la RC4530+	80
Figure 52 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens).....	80
Figure 53 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens) – Moyenne mobile	81
Figure 54 : Comparaison statistique des déflexions Do mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens).....	81

Figure 55 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la T9 (sens-)	82
Figure 56 : Comparaison statistique des déflexions Do mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens)	82
Figure 57 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+)	83
Figure 58 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile	84
Figure 59 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la RC4530+	84
Figure 60 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N+ (sens+)	85
Figure 61 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N+ (sens+) – Moyenne mobile	86
Figure 62 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la N1+	86
Figure 63 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N+ (sens+)	87
Figure 64 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N+ (sens+) – Moyenne mobile	87
Figure 65 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la N1+	87
Figure 66 : Découpage en zone homogène des secteurs auscultés	95
Figure 67 : Comparaison des déflexions Do corrigées en fonction la charge appliquée	99
Figure 68 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge - RC1003+	100
Figure 69 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge - RC1003-	101
Figure 70 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge – RC4530+	101
Figure 71 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge – RC3140+	102
Figure 72 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge – RC2410+	102
Figure 73 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge – T9-	103
Figure 74 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge – T9+	103
Figure 75 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge – N1+ (Nyon – Ecublens)	104
Figure 76 : Comparaison des déflexions Do corrigée en fonction de la charge – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	104
Figure 77 : Comparaison des déflexions caractéristiques	106
Figure 78 : Distribution des positions où la valeur maximale de déflexion a été observée	108
Figure 79 : Comparaison des déflexions maximales enregistrées par appareil	109

Figure 80 : Comparaison des déflexions Do corrigées à 15°C et 50 kN enregistrées par les trois appareils.....	111
Figure 81 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – RC1003+	112
Figure 82 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – RC1003-	112
Figure 83 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – RC4530+	113
Figure 84 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – RC2410+	113
Figure 85 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – RC3140+	114
Figure 86 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – T9+	114
Figure 87 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – T9-	115
Figure 88 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – N1+ (Nyon – Ecublens)	115
Figure 89 : Comparaison des déflexions Do @ 15°C – 50 kN – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	116
Figure 90 : Comparaison des déflexions caractéristiques @ 15°C – 50 kN	118
Figure 91 : Comparaison des SCI300 mesurés par les trois appareils	120
Figure 92 Comparaison des SCI300 – RC1003+	121
Figure 93 : Comparaison des SCI300 – RC1003-	121
Figure 94 : Comparaison des SCI300 – RC4530+	122
Figure 95 : Comparaison des SCI300 – RC2410+	122
Figure 96 : Comparaison des SCI300 – RC3140+	123
Figure 97 : Comparaison des SCI300 – T9+	123
Figure 98 : Comparaison des SCI300 – T9-	124
Figure 99 : Comparaison des SCI300 – N1+ (Nyon – Ecublens)	124
Figure 100 : Comparaison des SCI300 – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	125
Figure 101 : Comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur SCI300	127
Figure 102 : Comparaison des MLI mesurés par les trois appareils	129
Figure 103 : Comparaison des MLI – RC1003+	130
Figure 104 : Comparaison des MLI – RC1003-	130
Figure 105 : Comparaison des MLI – RC4530+	131
Figure 106 : Comparaison des MLI – RC2410+	131
Figure 107 : Comparaison des MLI – RC3140+	132
Figure 108 : Comparaison des MLI – T9+	132
Figure 109 : Comparaison des MLI – T9-	133
Figure 110 : Comparaison des MLI – N1+ (Nyon – Ecublens)	133
Figure 111 : Comparaison des MLI – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	134
Figure 112 : Comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur MLI	136
Figure 113 : Comparaison des LLI mesurés par les trois appareils	138
Figure 114 : Comparaison des LLI – RC1003+	139
Figure 115 : Comparaison des LLI – RC1003-	139
Figure 116 : Comparaison des LLI – RC4530+	140
Figure 117 : Comparaison des LLI – RC2410+	140
Figure 118 : Comparaison des LLI – RC3140+	141
Figure 119 : Comparaison des LLI – T9+	141
Figure 120 : Comparaison des LLI – T9-	142
Figure 121 : Comparaison des LLI – N1+ (Nyon – Ecublens)	142
Figure 122 : Comparaison des LLI – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	143
Figure 123 : Comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur LLI	145
Figure 124 : Comparaison des déflexions D1500 mesurés par les trois appareils ..	147

Figure 125 : Comparaison des SCI300 – RC1003+	149
Figure 126 : Comparaison des SCI300 – RC1003-.....	149
Figure 127 : Comparaison des SCI300 – RC4530+	150
Figure 128 : Comparaison des SCI300 – RC2410+.....	150
Figure 129 : Comparaison des SCI300 – RC3140+	151
Figure 130 : Comparaison des SCI300 – T9+	151
Figure 131 : Comparaison des SCI300 – T9-.....	152
Figure 132 : Comparaison des SCI300 – N1+ (Nyon – Ecublens)	152
Figure 133 : Comparaison des SCI300 – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	153
Figure 134 : Comparaison des valeurs moyennes des déflexions D1500	155
Figure 135 : Résultats du calcul inverse sur toutes les zones étudiées – HWD.....	164
Figure 136 : Résultats du calcul inverse sur toutes les zones étudiées – TSD.....	165
Figure 137 : Résultats du calcul inverse sur toutes les zones étudiées – RAPTOR	166
Figure 138 Comparaison des modules élastiques – RC1003+	167
Figure 139 : Comparaison des modules élastiques – RC1003-	167
Figure 140 : Comparaison des modules élastiques – RC4530+	168
Figure 141 : Comparaison des modules élastiques – RC2410+	168
Figure 142 : Comparaison des modules élastiques – RC3140+	169
Figure 143 : Comparaison des modules élastiques – T9+	169
Figure 144 : Comparaison des modules élastiques – T9-.....	170
Figure 145 : Comparaison des modules élastiques – N1+ (Nyon – Ecublens).....	170
Figure 146 : Comparaison des modules élastiques – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains).....	171
Figure 147 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC1003+	172
Figure 148 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC1003-	172
Figure 149 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC4530+	173
Figure 150 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC2410+.....	173
Figure 151 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC3140+.....	174
Figure 152 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – T9+	174
Figure 153 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – T9-	175
Figure 154 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – N1+ (Nyon – Ecublens).....	175
Figure 155 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	176
Figure 156 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC1003+	178
Figure 157 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC1003-.....	178
Figure 158 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC4530+	179
Figure 159 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC2410+	179
Figure 160 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC3140+	180
Figure 161 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – T9+	180
Figure 162 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – T9-.....	181

Figure 163 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – N1+ (Nyon – Ecublens)	181
Figure 164 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	182
Figure 165 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC1003+	188
Figure 166 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC1003-	189
Figure 167 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC4530+	189
Figure 168 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC2410+	190
Figure 169 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC3140+	190
Figure 170 : Comparaison des déflexions maximales DMax – T9+	191
Figure 171 : Comparaison des déflexions maximales DMax – T9-	191
Figure 172 : Comparaison des déflexions maximales DMax – N1+ (Nyon – Ecublens)	192
Figure 173 : Comparaison des déflexions maximales DMax – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)	192

Index des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des appareils selon [18]	34
Tableau 2 : Méthodes de correction des déflexions	41
Tableau 3 : Synthèse des indicateurs usuels de la mesure de déflexion.....	43
Tableau 4 : Valeur critique des indicateurs structurels [1]	43
Tableau 5 : Liste des tronçons du programme de mesure TSD – Raptor	47
Tableau 6 : Dates et heures de mesure pour chaque appareil / intervention	55
Tableau 7 : Températures de mesure pour chaque appareil / intervention.....	57
Tableau 8 : Synthèse des vitesses moyennes de mesure pour chaque appareil / intervention	59
Tableau 9 : Indicateur de répétabilité des mesures Do TSD pour la RC 4530	89
Tableau 10 : Indicateur de répétabilité des mesures Do TSD pour la N1+ (Nyon – Ecublens)	89
Tableau 11 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 TSD pour la RC 4530	89
Tableau 12 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 TSD pour la N1+ (Nyon – Ecublens)	89
Tableau 13 : Indicateur de répétabilité des mesures Do RAPTOR pour la RC 453090	90
Tableau 14 : Indicateur de répétabilité des mesures Do RAPTOR pour la N1+ (Nyon – Ecublens)	90
Tableau 15 : Indicateur de répétabilité des mesures Do RAPTOR pour la T9-	90
Tableau 16 : Indicateur de répétabilité des mesures Do RAPTOR pour la RC 453090	91
Tableau 17 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 RAPTOR pour la N1+ (Nyon – Ecublens)	90
Tableau 18 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 RAPTOR pour la T9-	91
Tableau 19 : Statistiques sur les zones homogènes.....	96
Tableau 20 : Position des capteurs rapport à la charge et par appareil.....	98
Tableau 21 : Modes de chargements par appareil.....	98

Tableau 22 : Synthèse des déflexions caractéristiques mesurées par les trois appareils sur les différentes zones.....	105
Tableau 23 : Synthèse des déflexions caractéristiques mesurées par les trois appareils sur les différentes zones.....	117
Tableau 24 : Synthèse des SCI300 moyens mesurées par les trois appareils sur les différentes zones.....	126
Tableau 25 : Synthèse des MLI moyens mesurées par les trois appareils sur les différentes zones.....	135
Tableau 26 : Synthèse des LLI moyens mesurées par les trois appareils sur les différentes zones.....	144
Tableau 27 : Synthèse des D1500 moyens mesurées par les trois appareils sur les différentes zones.....	154
Tableau 28 : Synthèse des comparaisons des différents appareils.....	157
Tableau 29 : Synthèse des épaisseurs des couches utilisées pour le calcul inverse.	161
Tableau 30 : Structure totale pour la modélisation pour le calcul inverse.....	161

Index des abréviations

FWD.	Falling Weight Deflectometer
TSD	Traffic Speed Deflectometer
RAPTOR	Rapid Pavement Tester
RWD	Rolling Wheel Deflectometer
HWD	Heavy Wheight Deflectometer
SCI	Surface Curvature Index
MLI	Middle Layer Index
LLI	Lower Layer Index
Di	Déflexion à une distance i de la charge
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
WARRIP	Western Australian Road Research and Innovation Program
AUTC	Area Under The Curve
MET	Method Of Equivalent Thickness
PCHIP	Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial
EL	Elastique
VE	Viscoélastique
ADAM	Adaptive Moment Estimation
MAE	Mean Absolute Error

Résumé

La portance des chaussées est un critère fondamental dans la gestion des infrastructures routières, influençant directement les décisions concernant les réfections nécessaires et le dimensionnement du renforcement des routes selon la norme VSS-40733B. En Suisse, l'évaluation de cet aspect déterminant se fait en pratique au niveau du projet, et dans de rares cas au niveau du réseau selon l'indice I₅ défini dans la norme VSS-40925B.

Historiquement, les mesures de portance en Suisse ont été limitées aux réseaux cantonaux et communaux, et occasionnellement aux routes nationales, principalement à cause des limites des méthodes traditionnelles telles que Benkelman, Lacroix, et FWD/HWD. Ces méthodes, bien qu'efficaces, offrent un faible rendement et ne permettent pas des mesures étendues au niveau du réseau, restreignant ainsi l'évaluation à des projets spécifiques et souvent réalisées en statique ou à basse vitesse.

Cependant, l'avènement de véhicules capables de mesurer les déflexions à la vitesse du trafic représente un progrès technologique significatif, offrant la possibilité d'étendre l'évaluation de la portance à un niveau réseau. Cette avancée ouvre des perspectives prometteuses pour des analyses plus globales qui pourraient améliorer substantiellement la planification de l'entretien lourd des chaussées.

La sélection des tronçons de route à étudier a été effectuée en collaboration étroite avec les maîtres d'ouvrage et les membres du groupe de recherche, portant sur des structures de chaussées déjà bien documentées. Le programme de mesure couvre un total de 101 km répartis sur trois cantons (NE, VD, VS), illustrant une diversité de contextes routiers. Ces tronçons se décomposent en 56 km de routes nationales et 44 km de routes cantonales, les routes communales étant exclues du fait de l'inadéquation des gabarits des véhicules de mesure pour ces réseaux.

Les caractéristiques variées des tronçons choisis incluent différents types de structures de chaussée, souples et semi-rigides, avec des épaisseurs de matériaux bitumineux variant entre 14 et 24 cm, et des charges de trafic spécifiques à chaque tronçon. Les mesures sont effectuées principalement à l'aide de deux appareils à grand rendement, le RAPTOR et le TSD, complétées par des mesures ponctuelles réalisées avec un FWD/HWD (Falling / Heavy Weight Deflectometer). Cette approche méthodologique permet une comparaison représentative des appareils de mesure de la portance.

L'analyse des données recueillies au cours de la campagne de mesure révèle que les appareils TSD et RAPTOR présentent une excellente répétabilité des mesures, mettant en évidence des tendances similaires sur différents types de chaussées. Ces véhicules ont systématiquement identifié des zones de faible portance, marquées par des déflexions élevées, ainsi que des zones plus rigides avec des déflexions moindres. Cette consistance démontre la fiabilité des appareils dans la détection des variations structurelles des chaussées.

Cependant, de légères divergences entre les séries de données obtenues lors de différents passages d'un même véhicule sont également observées. Ces variations peuvent être attribuées à divers facteurs tels que la variabilité de la position latérale du véhicule de mesure ou la précision de la localisation, particulièrement pour les zones avec une mauvaise couverture GNSS (tunnels et vallées par exemple).

L'étude comparative des données brutes collectées par le TSD, le RAPTOR et le FWD/HWD révèle des différences conceptuelles entre ces appareils, bien que les déflexions mesurées montrent des similitudes significatives, offrant ainsi une évaluation cohérente du comportement des structures routières. Une tendance générale est que le TSD tend à sous-estimer les déflexions sur les chaussées rigides par rapport au FWD/HWD, qui semble plus sensible aux petites déformations, une différence probablement attribuable aux principes de mesure distincts des deux appareils. Cet écart peut être attribué au fait que les valeurs de déflexion issues du TSD proviennent d'un traitement d'intégration numérique intermédiaire des valeurs physiques mesurées par ses capteurs, et qui sont des vitesses de déflexion. Le RAPTOR, en revanche, présente des mesures de déflexion très proches de celles du FWD/HWD, permettant une évaluation similaire de l'état structurel de la chaussée.

L'analyse de la déflexion la plus éloignée (D1500) par le TSD montre une grande variabilité sur de courtes distances. Les indicateurs de déflexion Surface Curvature Index (SCI300), Middle Layer Index (MLI) et Lower Layer Index (LLI), analysés pour le TSD et le RAPTOR, démontrent leur capacité à détecter efficacement les zones de faiblesse structurelle, grâce à leur résolution de mesure spatiale élevée.

Les divergences entre les classifications des indicateurs de déflexion MLI et LLI entre les appareils de mesure découlent de la sensibilité différenciée des appareils.

Les modules de rigidité élastiques obtenus à partir de calculs inverses des données du TSD démontrent une variabilité plus importante par secteur par rapport aux valeurs issues du FWD/HWD, en particulier concernant les modules des couches de fondation et du sol.

Ce constat est particulièrement pertinent car il indique que, malgré une meilleure capacité du TSD à détecter des variations locales, il existe une tendance de cet appareil à produire des estimations qui peuvent diverger des valeurs de référence obtenues par des méthodes plus traditionnelles comme le FWD/HWD. Cette observation soulève des questions importantes sur l'interprétation des données du TSD, surtout dans le cadre de l'évaluation des propriétés mécaniques des couches de fondation et du sol, utiles pour la planification de l'entretien et la réhabilitation des chaussées.

Les mesures du RAPTOR, réalisées durant des périodes de températures élevées, n'ont pas permis dans le cadre de ce projet une comparaison des modules élastiques à la température de référence standard de 15 °C.

La comparaison entre les approches élastique et viscoélastique pour l'estimation des modules de rigidité par calcul inverse a également mis en lumière des divergences significatives. L'approche admettant un comportement élastique des matériaux a offert

des résultats stables et prévisibles. En contrepartie, l'approche admettant un comportement viscoélastique des matériaux, censée être plus réaliste théoriquement, n'a pas démontré de bénéfices marqués en termes de précision dans un contexte de mesures à haute vitesse, comme avec le TSD. Néanmoins, les différences entre les résultats obtenus par les deux méthodes restent relativement mineures, suggérant que l'approche élastique demeure une méthode valable et adéquate pour l'estimation des modules élastiques des couches granulaires.

En conclusion, ce projet de recherche a révélé le potentiel significatif des appareils à haut rendement tels que le TSD et le RAPTOR pour améliorer l'évaluation de la portance des chaussées en Suisse. Plusieurs recommandations sont formulées pour optimiser leur utilisation et assurer une normalisation effective des pratiques de mesure.

Pour le TSD, il est recommandé de prendre en compte ses limitations dans la mesure des structures routières particulièrement rigides ou très épaisses, où les anomalies dans les bassins de déflexion peuvent altérer la qualité des données.

Concernant le RAPTOR, bien que cet appareil offre des mesures directes, et qui semblent cohérentes, de la déflexion de la chaussée, l'absence de documentation détaillée sur le système propriétaire de traitement des données limite l'analyse approfondie des résultats. Il est également conseillé de prendre en compte l'influence des températures élevées durant les mesures, qui peuvent affecter la comparabilité des modules élastiques avec des conditions standards.

Pour l'ensemble des appareils, il est important de réaliser les mesures durant des périodes où les températures sont modérées (entre 10 et 25°C) et stables, idéalement la nuit, pour minimiser les variations journalières et l'effet très sensible des gradients thermiques dans les matériaux bitumineux.

La normalisation suisse peut enfin admettre dès à présent l'applicabilité des appareils à grand rendement pour la mesure de la portance, au niveau réseau avec une exploitation des indicateurs issus des déflexions. A moyen terme, et avec l'amélioration des procédures de post-traitement des données mesurées et de calcul inverse, une utilisation de ces appareils au niveau projet pourrait être envisagée.

Zusammenfassung

Die Tragfähigkeit der Fahrbahnen ist ein zentrales Kriterium bei der Verwaltung von Strasseninfrastrukturen. Sie beeinflusst direkt Entscheidungen über notwendige Instandsetzungen sowie die Dimensionierung von Strassenverstärkungen gemäss der Norm VSS 40 733B. In der Schweiz erfolgt die Beurteilung dieses wichtigen Aspekts in der Praxis vorwiegend auf Projektebene und nur selten auf Netzebene, dabei wird der I5-Index gemäss Norm VSS 40 925B als Bewertungsgrundlage herangezogen.

Historisch beschränkten sich Tragfähigkeitsmessungen in der Schweiz auf kantonale und kommunale Strassenetze sowie vereinzelt auf Nationalstrassen. Dies lag hauptsächlich an den begrenzten Möglichkeiten herkömmlicher Messmethoden wie Benkelman, Lacroix und FWD/HWD. Zwar liefern diese Verfahren präzise Ergebnisse, doch aufgrund ihrer geringen Leistungsfähigkeit eignen sie sich kaum für umfassende Messungen auf Netzebene. Die Erhebungen erfolgen meist nur projektspezifisch und stationär oder bei niedrigen Geschwindigkeiten.

Die Einführung von Messfahrzeugen, die Deflektionen bei Verkehrsgeschwindigkeit erfassen können, markiert einen bedeutenden technologischen Fortschritt. Sie eröffnet neue Möglichkeiten für Tragfähigkeitsbewertungen auf Netzebene und bietet vielversprechende Perspektiven für umfassendere Analysen, die die Planung grosser Erhaltungsmassnahmen deutlich verbessern könnten.

Die Auswahl der untersuchten Strassenabschnitte erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Auftraggebern und Mitgliedern der Forschungsgruppe. Dabei lag der Fokus auf gut dokumentierten Strassenstrukturen. Das Messprogramm umfasste insgesamt 101 km in drei Kantonen (NE, VD, VS) und deckt damit eine Vielzahl an Strassensituationen ab. Die Abschnitte setzen sich aus 56 km Nationalstrassen und 44 km Kantonsstrassen zusammen. Kommunale Strassen wurden aufgrund der für diese Netze ungeeigneten Fahrzeugabmessungen nicht berücksichtigt.

Die gewählten Abschnitte umfassen verschiedene Fahrbahnkonstruktionen, sowohl flexible als auch halbstarre, mit bituminösen Schichtdicken zwischen 14 und 24 cm und jeweils spezifischen Verkehrslasten. Die Hauptmessungen wurden mit den Hochleistungsgeräten RAPTOR und TSD durchgeführt und durch punktuelle Messungen mittels FWD/HWD (Falling/Heavy Weight Deflectometer) ergänzt. Dieser methodische Ansatz erlaubt einen repräsentativen Vergleich der eingesetzten Tragfähigkeitsmesssysteme.

Die Auswertung der während der Messkampagne erhobenen Daten zeigt, dass TSD und RAPTOR eine hervorragende Wiederholbarkeit der Messergebnisse aufweisen und ähnliche Trends über verschiedene Fahrbahntypen hinweg erkennen lassen. Beide Fahrzeuge identifizierten systematisch Zonen mit geringer Tragfähigkeit, erkennbar an hohen Deflektionen, sowie steifere Bereiche mit geringeren Deflektionen. Diese Konsistenz bestätigt die Zuverlässigkeit der Geräte bei der Erkennung struktureller Unterschiede in der Fahrbahn.

Allerdings wurden kleinere Abweichungen zwischen den Datensätzen festgestellt, die bei mehreren Durchfahrten desselben Fahrzeugs entstanden. Diese Unterschiede können durch verschiedene Faktoren erklärt werden, wie etwa seitliche Positionsvariabilität des Messfahrzeugs oder Genauigkeitsprobleme bei der Lokalisierung, insbesondere in Bereichen mit schlechter GNSS-Abdeckung (z. B. Tunnel und Täler).

Der Vergleich der mit TSD, RAPTOR und FWD/HWD erhobenen Rohdaten zeigt konzeptionelle Unterschiede zwischen den Messsystemen, auch wenn die erfassten Verformungen weitgehende Übereinstimmungen aufweisen und eine konsistente Bewertung des Verhaltens von Strassenaufbauten ermöglichen. Insgesamt neigt der TSD dazu, die Deflektionen auf starren Fahrbahnen im Vergleich zum empfindlicheren FWD/HWD zu unterschätzen, vermutlich bedingt durch unterschiedliche Messprinzipien. Die TSD-Werte basieren auf einer numerischen Integration der gemessenen Deflektionsgeschwindigkeiten. Im Gegensatz dazu liefert der RAPTOR Deflektionswerte, die denen des FWD/HWD sehr nahekommen und damit eine vergleichbare Bewertung des strukturellen Zustands der Fahrbahn ermöglichen.

Die Analyse der Durchbiegung in grösster Entfernung zur Last (D1500) des TSD weist eine hohe Variabilität auf, insbesondere über kurze Messdistanzen. Die für den TSD und RAPTOR ermittelten Indikatoren Surface Curvature Index (SCI300), Middle Layer Index (MLI) und Lower Layer Index (LLI) bestätigen durch ihre hohe räumliche Auflösung die Fähigkeit, strukturelle Schwachstellen präzise zu erfassen.

Divergenzen zwischen den Klassifizierungen der Indikatoren MLI und LLI der verschiedenen Messgeräte sind auf die unterschiedliche Empfindlichkeit der Geräte zurückzuführen.

Die aus den TSD-Daten invers berechneten elastischen Steifigkeitsmodule zeigen eine höhere Variabilität als die mit dem FWD/HWD bestimmten Werte, insbesondere bei den Modulen der Fundations- und Untergrundschichten.

Dies ist insofern von Bedeutung, als der TSD zwar lokale Variationen besser erkennt, jedoch tendenziell zu abweichenden Schätzungen gegenüber den Referenzwerten traditioneller Methoden wie FWD/HWD neigt. Diese Beobachtung wirft wichtige Fragen zur Interpretation der TSD-Daten auf, insbesondere hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von Fundations- und Untergrundschichten, die für die Erhaltungsplanung und Instandsetzung wesentlich sind.

Die mit dem RAPTOR bei hohen Umgebungstemperaturen durchgeführten Messungen ermöglichten in diesem Projekt keine vergleichende Analyse mit den elastischen Modulen bei der Referenztemperatur von 15 °C.

Der Vergleich zwischen elastischen und viskoelastischen Verfahren zur inversen Bestimmung der Steifigkeitsmodule zeigte deutliche Unterschiede. Während der elastische Ansatz stabile und vorhersehbare Ergebnisse lieferte, erwies sich der theoretisch realistischere viskoelastische Ansatz bei Hochgeschwindigkeitsmessungen wie mit dem TSD nicht als deutlich genauer. Die Unterschiede zwischen beiden Methoden waren insgesamt gering, was darauf hindeutet, dass der elastische Ansatz weiterhin eine

geeignete Methode zur Schätzung der elastischen Eigenschaften granularer Schichten darstellt.

Abschliessend zeigt dieses Forschungsprojekt das erhebliche Potenzial von Hochleistungsmesssystemen wie TSD und RAPTOR zur verbesserten Bewertung der Tragfähigkeit von Fahrbahnen in der Schweiz auf. Verschiedene Empfehlungen wurden formuliert, um ihre Nutzung zu optimieren und eine effektive Normierung der Messpraxis sicherzustellen.

Für den TSD wird empfohlen, dessen Einschränkungen bei der Messung besonders steifer oder sehr dicker Fahrbahnaufbauten zu berücksichtigen, da Anomalien in den Deflektionsbecken die Datenqualität beeinträchtigen können.

Beim RAPTOR gilt, dass dieses Gerät zwar direkte und scheinbar konsistente Deflektionsmessungen der Fahrbahn liefert, jedoch die fehlende detaillierte Dokumentation des proprietären Datenverarbeitungssystems eine vertiefte Analyse der Ergebnisse erschwert. Zudem sollte der Einfluss hoher Temperaturen während der Messungen berücksichtigt werden, da diese die Vergleichbarkeit der elastischen Module mit Standardbedingungen beeinträchtigen können.

Für alle Messsysteme ist wichtig, die Messungen in Phasen mit mässigen und stabilen Temperaturen (zwischen 10 °C und 25 °C) durchzuführen, idealerweise nachts, um tägliche Schwankungen und den hochsensiblen Einfluss von Temperaturgradienten in bituminösen Materialien zu minimieren.

Die Schweizer Normung kann bereits heute den Einsatz von Hochleistungsgeräten zur Tragfähigkeitsmessung auf Netzebene mit der Auswertung von aus Deflektionsmessungen abgeleiteten Indikatoren anerkennen. Mittelfristig und mit der Weiterentwicklung von Verfahren zur Datenaufbereitung und inversen Berechnung könnte auch ein Einsatz dieser Geräte auf Projektebene in Betracht gezogen werden.

Summary

Pavement bearing capacity is a fundamental criterion in the management of road infrastructure, directly influencing decisions concerning necessary maintenance and the defining the need of reinforcements. In Switzerland, this crucial aspect is assessed using the I5 index defined in the VSS-40925B standard, which guides maintenance decisions based on the structural characteristics of the pavements.

Historically, bearing capacity measurements in Switzerland have been limited to cantonal and communal networks, and occasionally to national roads, mainly due to the limitations of traditional methods such as Benkelman, Lacroix, and FWD/HWD. Although effective, these methods are low-yielding and do not allow for extensive network-level measurements, thus restricting the evaluation to specific projects and often carried out statically or at low speed.

However, the advent of vehicles capable of measuring deflections at traffic speed represents a significant technological advancement, offering the possibility of extending the assessment of bearing capacity to a network level. This advancement opens promising perspectives for more comprehensive analyses that could substantially improve the planning of pavement maintenance.

The selection of road sections to be studied was carried out in close collaboration with project owners and research group members, focusing on pavement structures that are already well-documented. The measurement program covers a total of 101 km spread over three cantons (NE, VD, VS), illustrating a diversity of road contexts. These sections are divided into 56 km of national roads and 44 km of cantonal roads, with communal roads excluded due to the inadequacy of the measurement vehicles' templates for these networks.

The varied characteristics of the chosen sections include different types of pavement structures, flexible and semi-rigid, with bituminous material thicknesses varying between 14 and 24 cm, and specific traffic loads for each section. The measurements are carried out mainly using two high-throughput devices, the RAPTOR and the TSD, supplemented by measurements with an FWD/HWD (Falling / Heavy Weight Deflectometer). This methodological approach allows capturing a precise and representative picture of the comparison of the current state of pavement bearing capacity across the studied sections using the three devices.

The analysis of data collected during the measurement campaign reveals that the TSD and RAPTOR devices present excellent repeatability of measurements, highlighting similar trends across different types of pavements. These instruments have systematically identified areas of low bearing capacity, marked by high deflections, as well as more rigid areas with less deflection. This consistency demonstrates the reliability of the devices in detecting structural variations in pavements.

However, slight divergences between the data series obtained during different measurements are also observed. These differences can be attributed to various factors such as lateral position variability of the measurement vehicle or GPS signal accuracy especially in areas with poor GNSS coverage, such as tunnels or deep valleys, potentially leading to localization inaccuracies.

The comparative analysis of raw data collected by the TSD, the RAPTOR, and the FWD/HWD reveals conceptual differences between these devices, although the deflections measured show significant similarities, thus providing a coherent assessment of the behavior of road structures. A key observation is that the TSD tends to underestimate deformations on rigid pavements compared to the FWD/HWD, which seems more sensitive to small deformations, a difference likely attributable to the distinct measurement principles of the two devices. On the other hand, the RAPTOR presents deflection measurements very close to those of FWD/HWD, allowing a similar assessment of the structural condition of the pavement.

The analysis of the furthest deflection (D1500) by the TSD shows great variability over short distances. The deflection indicators Surface Curvature Index (SCI300), Middle Layer Index (MLI) and Lower Layer Index (LLI), analyzed for both the TSD and RAPTOR demonstrate their ability to effectively detect structural weakness areas, thanks to their high spatial resolution.

Discrepancies in MLI and LLI classification between devices arise from differences in sensor sensitivity and device response characteristics.

The results of the elastic moduli obtained from backcalculating the TSD data demonstrate increased variability compared to the ones derived from FWD/HWD data, particularly concerning the moduli of foundation layers and soil.

This finding is particularly relevant as it indicates that, despite the TSD's increased capability to detect local variations, there is a tendency for this device to produce estimates that may diverge from values considered as references by more traditional methods like the FWD/HWD. This observation raises important questions about the interpretation of TSD data, especially in the context of assessing the mechanical properties of foundation layers and soil, which are crucial for planning maintenance and rehabilitation of pavements.

An issue has been identified with the RAPTOR measurements conducted during periods of high surface temperatures, compromising the comparison of elastic moduli at the standard reference temperature of 15 °C. This variation in temperature conditions has restricted the harmonization of results and affected the reliability of comparisons between devices.

The comparison between elastic and viscoelastic approaches for estimating elastic moduli has also highlighted significant divergences. The elastic approach, despite its simplicity, has provided more stable and predictable results, which is advantageous for rapid measurements in real traffic conditions. In contrast, the viscoelastic approach, although more complex, has not demonstrated marked benefits in terms of accuracy

in a high-speed measurement context like with the TSD. However, the differences between the results obtained by the two methods remain relatively minor, suggesting that the elastic approach remains a valid and adequate method for estimating the elastic moduli of granular layers.

In conclusion, this research project has revealed the significant potential of high-throughput devices such as the TSD and RAPTOR to enhance the assessment of pavement bearing capacity in Switzerland. However, several recommendations are formulated to optimize their use and ensure effective standardization of measurement practices.

For the TSD, it is recommended to consider the limitations when measuring particularly rigid or very thick road structures, where anomalies in deflection basin can alter the quality of the data. The use of deflection data to assess the condition of structural layers should be prioritized for a more robust and reliable analysis.

Regarding the RAPTOR, although this device offers direct and precise measurements of pavement deflection, the lack of detailed communication on the data processing system limits the in-depth analysis of results. It is also advised to consider the influence of high temperatures during measurements, which can affect the comparability of elastic moduli with standard conditions.

For both devices, it is crucial to conduct measurements during periods when surface temperatures are lower and more stable (between 10 & 25 °C), ideally at night, to minimize daily variations and the strong influence of thermal gradients in bituminous materials.

Swiss standardization can now formally acknowledge the applicability of high-productivity devices for network-level bearing capacity assessment, based on the use of deflection indicators. In the medium term, and with improvements in data post-processing procedures and backcalculation methods, the use of these devices at the project level could also be envisaged.

1 Introduction

1.1 Problématique (situation actuelle)

La portance d'une chaussée est un indicateur structurel déterminant permettant l'identification de la mesure de réfection optimale et le dimensionnement du renforcement. Dans cette optique, la normalisation suisse comprend un indice d'état relatif à la portance (I_5) conformément à la norme VSS-40925B.

En raison des structures de chaussées appliquées (profils types), les mesures de déflexions sont actuellement principalement effectuées sur le réseau cantonal et communal mais également parfois au niveau des routes nationales. Les méthodes appliquées en Suisse pour l'évaluation de la portance (Benkelman, Lacroix, FWD/ HWD) ne sont pas perçues comme des mesures à grand rendement pouvant être mises en œuvre au niveau du réseau. Le FWD (Falling Weight Deflectometer) et le HWD (Heavy Weight Deflectometer) appartiennent à la même famille d'appareils de mesure. Leur principale différence réside dans la charge appliquée : le HWD permet de générer des charges plus élevées que le FWD. Actuellement, l'évaluation de la portance des chaussées se limite au niveau projet en raison du faible rendement des méthodes de mesure historiques, qu'elles soient statiques ou à basse vitesse, ce qui a entravé la récolte de l'indice de portance I_5 en pratique.

Au cours des dernières années, des véhicules qui permettent de mesurer les déflexions à la vitesse du trafic ont fait leur apparition. Désormais, cette avancée technologique permet l'applicabilité de l'évaluation de la portance au niveau du réseau, offrant ainsi des perspectives prometteuses d'analyses qui pourraient potentiellement contribuer de manière significative à l'optimisation de la planification de l'entretien dit lourd. Bien que prometteurs, les performances, l'exploitation des mesures et le domaine d'application de ces appareils doivent encore être étudiés de manière approfondie afin d'évaluer leur potentiel et leur possible utilisation sur le réseau routier suisse.

1.2 Objectifs et méthodologie

Considérant l'état de la recherche dans le domaine, l'objectif global du projet consiste à évaluer le potentiel et le domaine d'application de méthodes à grand rendement permettant de déterminer la portance des chaussées. Afin d'atteindre cet objectif global, il est essentiellement attendu les résultats suivants :

- Identification du domaine d'application des méthodes de mesure à grand rendement de la portance.
- Analyse des méthodes d'exploitation des mesures et possibilité d'établissement d'indicateurs pertinents relatifs à la planification de l'entretien, identification des

dommages structures et dans la mesure du possible évaluation de la durée de vie résiduelle de la chaussée.

- Apport pour la normalisation, ceci tout spécifiquement pour les thématiques suivantes : relevés d'état, mesures de portance, indices d'état et gestion de l'entretien.

La méthodologie de travail proposée se base sur des approches expérimentales et théoriques (calculs) complémentaires, avec comme fil rouge l'évaluation du potentiel des méthodes à grand rendement pour compléter et remplacer partiellement les méthodes traditionnelles.

La Figure 1 illustre la méthodologie du projet basée sur les objectifs décrits ci-dessus :

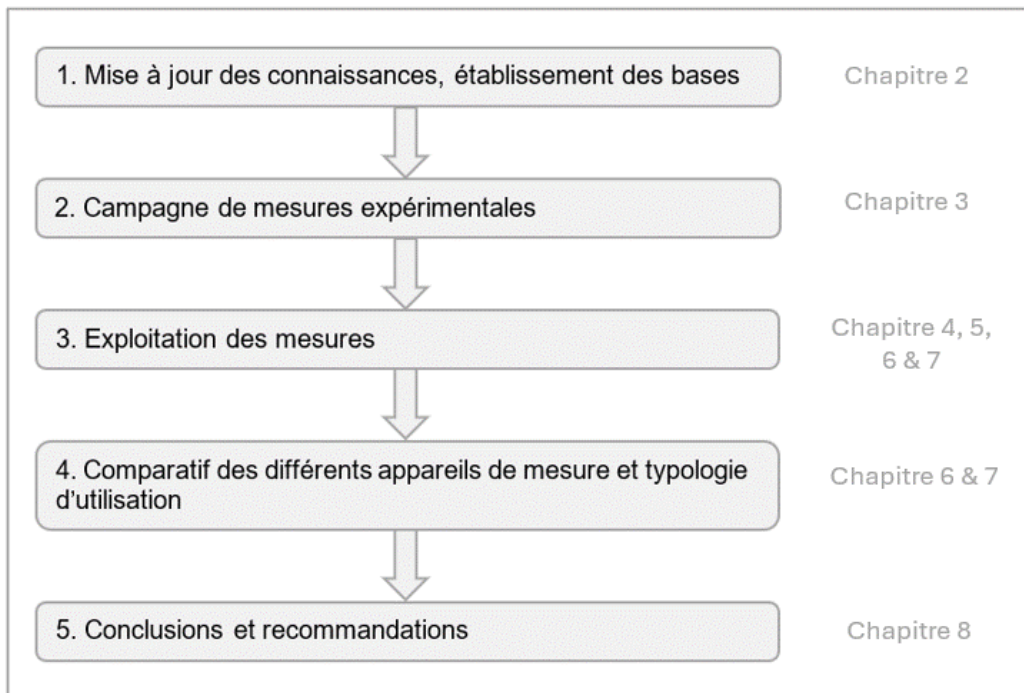


Figure 1 : Méthodologie du projet de recherche

La structure du rapport est également illustrée par cette figure, établissant un lien entre les différents chapitres de ce document et la structure initiale du projet. Cette représentation sert de guide visuel pour orienter le lecteur et illustrer comment chaque section du rapport s'aligne avec les objectifs et les phases prévues du projet, assurant ainsi une cohérence et une progression logique dans la présentation des résultats de recherche.

2 État des connaissances

Ce chapitre comprend, tout d'abord, une mise à jour des connaissances dans le domaine des appareils de mesures pour la déflexion (cf. chapitre 2.1). Un accent particulier est mis sur les appareils selon leur mode de fonctionnement, par exemple ceux basés sur des lasers utilisés en tant que profilomètres (Raptor) ou ceux basés sur une mesure avec lasers à effet Doppler (TSD), en comparaison avec les appareils couramment utilisés en Suisse (Déflectographe Lacroix/ Flash et FWD/HWD essentiellement).

Ensuite, une analyse préliminaire du marché/expérience et de la disponibilité des appareils pour une utilisation en Suisse est réalisée (cf. chapitre 2.2).

Puis, une analyse des aspects normatifs, en identifiant de manière exhaustive les normes VSS/SN potentiellement concernées par la recherche, ainsi que l'étude de la normalisation dans le domaine pour un échantillon représentatif de pays (États-Unis, France, Canada, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni) sont effectuées (cf. chapitre 2.3). Finalement, une analyse de la littérature technique et scientifique relative à l'exploitation de mesures de déflexions et l'établissement d'indicateurs pertinents est réalisée (cf. chapitre 2.4).

2.1 Méthodes de mesure de la déflexion

L'évaluation des caractéristiques structurelles des chaussées permet d'optimiser leur maintenance. La mesure de déflexion est historiquement une mesure de base pour l'évaluation de cette qualité structurelle.

En effet, les méthodes d'auscultation sont nécessaires à la fois pour connaître l'état d'un réseau, en assurant une meilleure gestion préventive et de réaliser des diagnostics plus fins, évaluer sa durée de vie ou définir les besoins d'entretien ou de réhabilitation.

Il existe de nombreuses méthodes de mesure de la déflexion :

- Plaque de chargement statique : Utilisation d'une charge statique appliquée sur une plaque pour mesurer la déformation du sol ou de la chaussée.
- Plaque de chargement dynamique : Méthode similaire avec une charge dynamique pour évaluer la réponse dynamique des structures.
- Méthodes non destructives : Utilisation de capteurs tels que des capteurs à corde vibrante, des accéléromètres ou des capteurs laser pour mesurer les déformations sans endommager la structure.

2.1.1 Appareils traditionnels et à faible rendement

Dans cette section, une description de certains des appareils de mesure utilisés en Suisse est donné.

Curviamètre : L'appareil a été utilisé dans le passé en France, en Belgique et en Suisse, il est basé sur la méthode de la poutre de Benkelman et conçu et construit en 1973 par le Centre expérimental français de recherches et d'études sur l'ingénierie civile et la construction (CEBTP) [1]. Son principe consiste à remplacer la poutre de Benkelman par une chaîne avec des géophones qui enregistrent la vitesse verticale de la surface de la chaussée en un point donné lors de la circulation d'un essieu jumelé à 18 km/h. (Figure 2) [2].

Avantages :

- Mesure continue.
- Coût.

Inconvénients :

- Précision.
- Complexité d'opération.

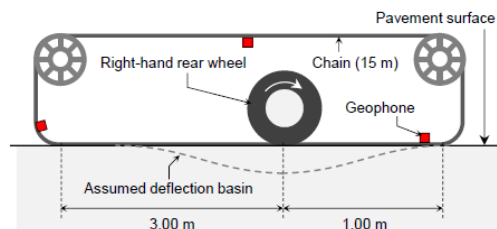


Figure 2 : Principe de mesure du curviamètre [2]

Défectographe Lacroix/ Flash : Les déflectographes Lacroix/Flash (Figure 3) mettent en œuvre une méthode statique ou semi-statique pour mesurer la déflexion de la chaussée lors de passages à vitesse réduite (de 2 à 8 km/h) du véhicule de type camion à deux essieux. L'essai consiste à évaluer la déflexion de la chaussée entre chaque jumelage de l'essieu arrière du véhicule à l'aide de bras palpeurs équipés de capteurs rotatifs et fixés sur une poutre de référence.

Avantages :

- Fiabilité : Méthode éprouvée depuis plusieurs décennies.
- Simplicité d'utilisation : Facile à utiliser et à entretenir.
- Coût relativement inférieur à celui des systèmes de mesure basés sur une technologie laser.

Inconvénients :

- Temps de mesure : Les relevés sont plus lents et nécessitent la fermeture temporaire de la voie de circulation.
- Portée limitée : Le faible rendement rend cette technologie peu adaptée à l'évaluation de réseaux routiers étendus.
- Moins précis que les systèmes de mesure basés sur la technologie laser.
- Technologie inadaptée à l'analyse des chaussées rigides

Expérience et utilisation :

- Historique d'utilisation éprouvé : Les appareils Lacroix/Flash sont utilisés en Suisse depuis plusieurs décennies, constituant une base de données historique importante et une méthodologie d'évaluation bien maîtrisée.
- Fiabilité reconnue : Leur fiabilité a été confirmée par l'usage sur le long terme, et leur simplicité d'exploitation en fait un outil largement adopté par les ingénieurs en infrastructures.

Disponibilité :

- Disponibilité sur le marché : Les appareils sont commercialisés par un fournisseur en France.



Figure 3 : Défectographe Lacroix [1]

Falling Weight Deflectometer (FWD) /Heavy Weight Deflectometer (HWD): Les FWD et HWD sont des appareils de mesure de la déflexion de la chaussée par application d'une charge dynamique. Le principe du FWD repose sur l'application d'un choc vertical bref sur la chaussée. La chute contrôlée d'un poids sur la chaussée engendre une charge d'une valeur de 30 à 120 kN, et jusqu'à 240 kN pour le Heavy Weight Deflectometer (HWD) (Broutin, 2010 [3]). La déflexion est alors relevée et enregistrée par l'intermédiaire de géophones à différentes distances du point d'impact. Le principe de mesure du FWD est illustré dans la Figure 4.

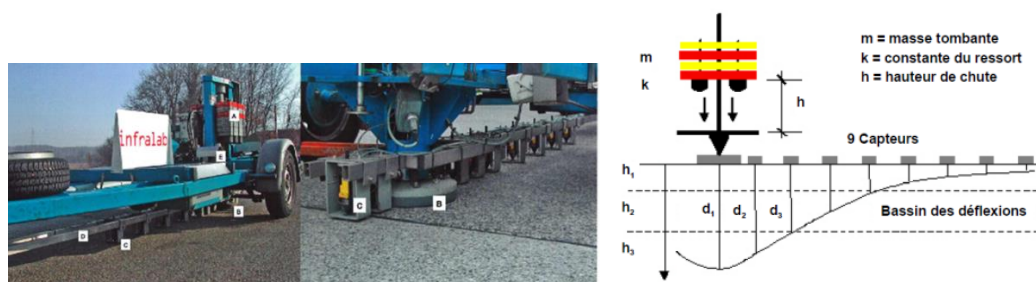


Figure 4 : a) Vue générale d'un FWD [4], b) Principe de mesure du FWD [5]

Avantages :

- La charge impulsionnelle reproduit de manière représentative le passage d'un poids lourd en circulation réelle.
- Les mesures peuvent être réalisées en un temps relativement court.
- Les capteurs utilisés offrent un niveau de précision élevé dans l'évaluation de la déflexion.

Inconvénients :

- Le fonctionnement en mode stop-and-go du FWD/HWD nécessite la fermeture temporaire de la voie de circulation, ce qui peut engendrer des interruptions de trafic. [6].
- Le rendement des mesures est relativement faible et dépend fortement du nombre de points mesurés ainsi que du pas de mesure choisi.

Expérience et utilisation :

- Simulations réalistes : Les appareils FWD/HWD appliquent une charge dynamique, permettant d'obtenir des données représentatives des conditions réelles de sollicitation de la chaussée.
- Usage étendu : les appareils FWD/HWD sont largement utilisés pour l'acquisition de données de déflexion, constituant une méthode de référence dans le domaine du diagnostic structurel des chaussées.

Disponibilité :

- Marché bien établi : les FWD et HWD sont commercialisés par plusieurs fournisseurs spécialisés.

2.1.2 Appareils à grand rendement :

Ces dernières années, des appareils d'auscultation à grande vitesse relevant la mesure de déflexion ont vu le jour. Ceux-ci sont conçus pour s'insérer parfaitement dans le trafic. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer le Traffic Speed Deflectometer (TSD), le Rapid Pavement Tester (Raptor) et le Rolling Wheel Deflectometer (RWD).

Rolling Weight Deflectometer (RWD) : utilise une charge roulante, souvent sous la forme d'un véhicule spécialement équipé, qui applique une charge d'un essieu de 80 kN statique ou dynamique sur la surface de la chaussée. L'appareil est équipé d'une poutre en aluminium avec quatre lasers de détection permettant de mesurer la distance jusqu'à la surface de la chaussée. Trois lasers sont utilisés pour mesurer la distance jusqu'à la surface de chaussée non déformée (c'est-à-dire en amont et en dehors du bassin de déflexions), tandis qu'un quatrième laser, situé entre les roues jumelées et juste derrière l'essieu arrière, mesure la distance à la surface de chaussée déformée. La déflexion est ensuite calculée en comparant les profils relevés par les lasers au fur et à mesure de l'avancement de l'appareil RWD [7].

Avantages :

- Haute précision : permet d'obtenir des mesures fiables de la déformation sous charge, offrant ainsi une analyse détaillée de l'état structurel de la chaussée.
- Faible impact sur le trafic : permet l'auscultation rapide de longues sections de chaussée, tout en limitant les perturbations pour les usagers.
- Adaptabilité : peut être utilisé sur divers types de structures de chaussées et de revêtements, offrant une large compatibilité d'application.

Inconvénients :

- Coût important,
- Complexité d'opération élevée.

Expérience et utilisation :

- Mesures en continu : Efficace pour couvrir de grandes surfaces.
- Utilisation pratique : bien adapté à un usage fréquent et réactif.

Disponibilité :

- Offres spécialisées : Prototype aux Etats-Unis, à priori pas commercialisé



Figure 5 : Rolling Wheel Deflectometer [1]

Rapid Pavement Tester (Raptor) : faisant également partie de la famille RWD, le Raptor est un déflectomètre à poids roulant qui permet de mesurer en permanence la capacité portante de la chaussée à une vitesse de circulation courante. [8]. Le Raptor utilise des capteurs de distance à base de lasers ligne pour balayer la surface de la route et mesurer la déflexion. Les 9 à 24 lasers utilisés pour déterminer la déflexion de la chaussée sont placés de 3,6 m avant la charge à 1,5 m après la charge. (Figure 6).

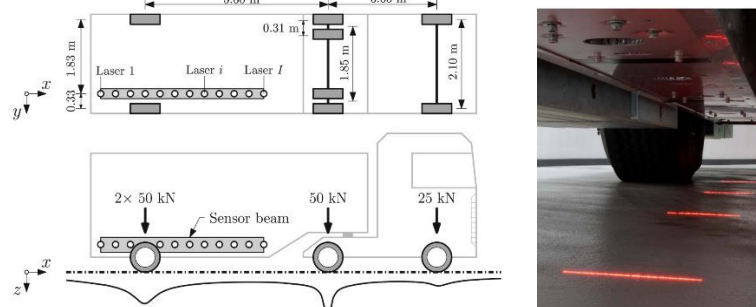


Figure 6 : Raptor : a) Croquis du camion et de la remorque Raptor [9], b) Lasers [10]

Avantages :

- Haute précision : Les mesures sont produites avec une précision élevée, la résolution atteignant l'ordre du micromètre.
- Rapidité : Le profilomètre laser peut effectuer des mesures en continu à la vitesse du trafic.
- Sans contact : les capteurs sans aucun contact physique avec la chaussée, présentent moins d'usure, et sont non destructifs pour la chaussée mesurée.

Inconvénients :

- Coût élevé du dispositif à l'acquisition.
- Les mesures peuvent être influencées par des conditions environnementales telles que la présence de poussière, d'eau ou d'autres débris sur la chaussée.

- Les capteurs nécessitent un étalonnage régulier pour maintenir la précision.

Expérience et utilisation :

- Haute précision : Les retours d'expérience en Suisse confirment la grande précision et la haute résolution des données fournies par cette technologie.
- Adoption croissante : Bien que relativement récent, le profilomètre laser suscite un intérêt croissant, notamment pour les projets nécessitant des relevés de haute précision et à forte valeur ajoutée.

Disponibilité :

- Gamme étroite : Un seul fabricant (Société Ramboll). En 2025 deux exemplaires ont été produits.

Traffic Speed Deflectometer (TSD) : Le premier prototype du TSD a été développé au Danemark par Greenwood Engineering dans les années 1990 [11]. C'est un système d'auscultation des chaussées non destructif à grand rendement. Les évaluations des chaussées utilisant le TSD impliquent la mesure de la déflexion totale de la chaussée sous l'effet de la charge de l'essieu arrière jumelé avec une charge de 10 T (Figure 7). Ces mesures permettent de déterminer la capacité portance de la chaussée [12], [13]. Le principe de mesure du TSD est un ensemble de capteurs laser à effet Doppler projetés sur la surface de la chaussée. Le changement de fréquence du laser réfléchi (effet Doppler) est utilisé pour calculer la vitesse de déplacement de la surface mesurée et, après un post-traitement du signal, la déflexion.

Le principe de fonctionnement de TSD consiste à mesurer la pente de déflexion de la chaussée en fonction de la vitesse de déflexion plutôt que de la déflexion réelle de la surface. La pente de déflexion est calculée comme décrit dans l'équation 1 [14] :

$$Slope = \frac{V_v}{V_h} \quad (1)$$

Avec :

V_v : vitesse de déflexion mesurée [$\frac{\mu m}{s}$]

V_h : vitesse du véhicule [$\frac{m}{s}$]

La déflexion de chaussée est estimée par la suite par intégration de la pente de la courbe vitesse de déflexion comme l'illustre la Figure 8.b.

Avantages :

- Mesure en mouvement : Le TSD peut effectuer des mesures à la vitesse du trafic, minimisant les perturbations du trafic.
- Couverture étendue : Permet une évaluation rapide et étendue des réseaux routiers.

Inconvénients :

- Complexité de l'interprétation des données : Les données obtenues nécessitent une analyse avancée pour être interprétées correctement.
- Sensible aux vibrations : les vibrations produites par l'essieu peuvent réduire grandement la précision des mesures.

Disponibilité :

- Fabricant principal : principalement fabriqué par Greenwood Engineering (Danemark), à l'origine de cette technologie. D'autres solutions émergentes, comme le Measure Deflectometer (MeasureRoad), sont également en développement en Europe.
- Opérateurs en Europe : Plusieurs pays européens sont équipés d'un TSD, dont le Danemark, le Royaume-Uni, l'Italie, la Pologne, l'Allemagne et la Lituanie. Les utilisateurs incluent des agences nationales (ex. : National Highways, ANAS), des instituts de recherche (BAST, IBDiM) et des universités techniques.

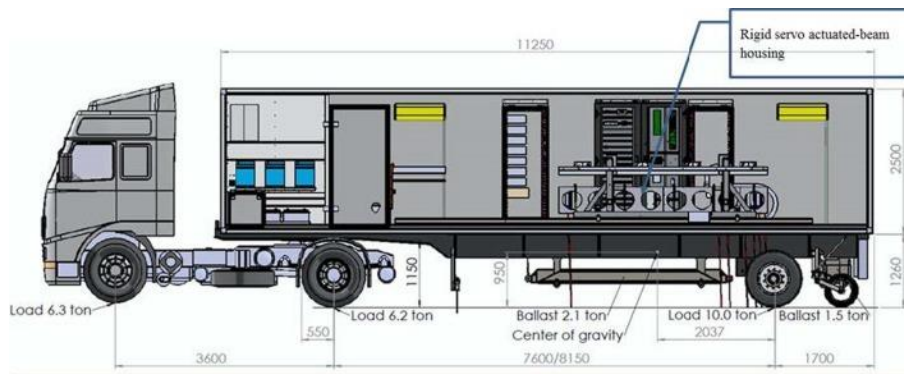


Figure 7 : Vue générale du TSD [15]

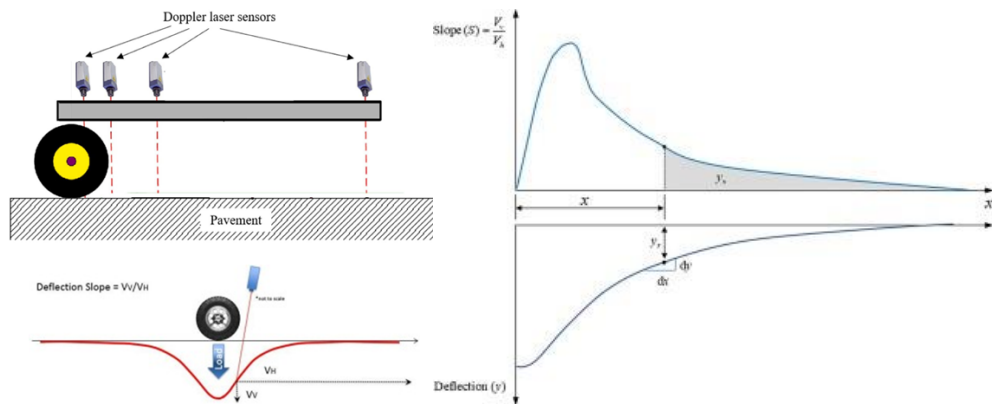


Figure 8 : a) principe de mesure de la pente de déflexion [16], [17], b) Bassin de déflexion [16]

2.1.3 Comparaison des appareils

Le Tableau 1 présente une comparaison détaillée des caractéristiques techniques de plusieurs appareils utilisés pour mesurer la déflexion des chaussées. Chaque appareil possède des spécificités uniques en termes de contact pneu-chaussée, charge appliquée, type de capteurs, précision des mesures, pas de mesure, vitesse de mesure et rendement estimé. Cette comparaison permet de mettre en lumière les forces et les limites de chaque dispositif, facilitant ainsi le choix de l'appareil le plus adapté en fonction des besoins spécifiques des projets d'auscultation routière. Les informations fournies couvrent une gamme d'appareils, y compris le Deflectographe Lacroix Flash, le Curviameter, le FWD/HWD, le Traffic Speed Deflectometer, le Rapid Pavement Tester (Raptor) et le RWD, offrant ainsi une vue d'ensemble exhaustive.

Comparaison des appareils de mesure de la déflexion [18]

	Contact pneu-chaussée	Charge [kN]	Capteurs	Précision [μm]	Pas de mesure	Vitesse de mesure [km/h]	Rendement estimé [km/j]
Deflectograph Flash	Pneus jumeles	50 ou 65	Poutre Benkelman	10	10 m à 7 km/h	7	30 à 60
Curvi-mètre	Pneus jumeles	40 à 65	Géophones	NC	5 m	18-21.6	70 à 100
F/HWD	Plaque circulaire de charge	30 à 320	Géophones	2	Variable	Statique	10
Traffic Speed Deflectometer	Pneus jumeles	50	Lasers Doppler	20	0.1 à 10 m	40-80	200
Rapid Pavement Tester (Raptor)	Pneu simple	45 à 65	Lasers ligne	20	10 m	40-90	100 à 350
RWD	Pneus jumeles	40	Lasers	NC	30 à 90 m	40-90	NC

Tableau 1 : Comparaison des appareils selon [18]

Plusieurs recherches ont entrepris des études comparatives pour analyser la performance et la cohérence des données obtenues à partir de divers dispositifs. L'étude menée par Simonin et al. (2005) [19] a comparé un TSD, un FWD et un déflectographe Lacroix Flash. Les résultats montrent que les mesures des trois appareils restent comparables sur différentes sections routières (Figure 9).

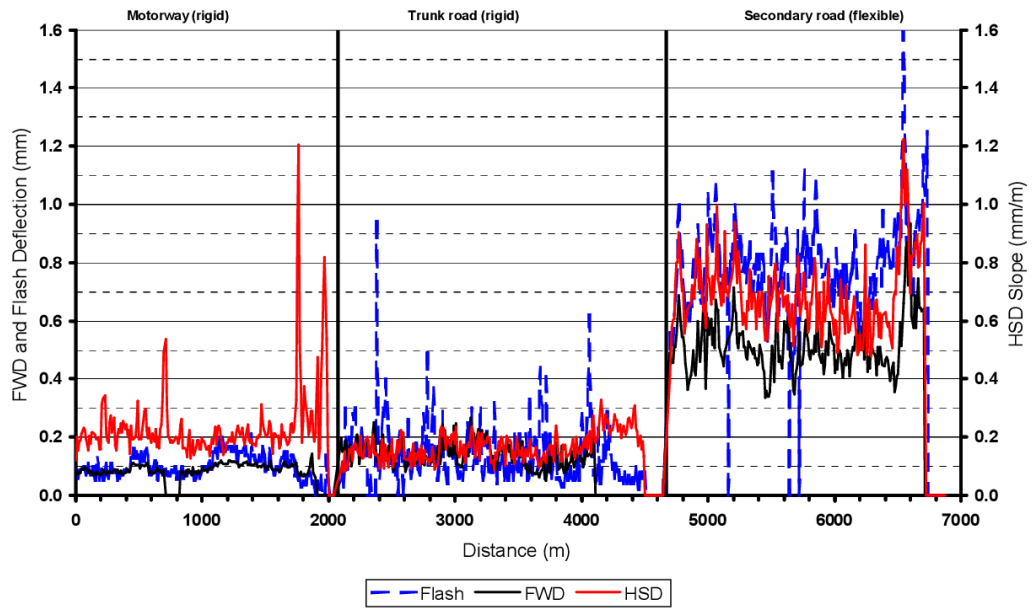


Figure 9 : Comparaison entre les mesures de pente HSD, les mesures de déflexion FWD et Flash sur les trois sections.[19]

Une comparaison menée dans [20] a été réalisée entre un profil de déflexion central FWD à intervalles de 2 m et un profil de pente de déflexion TSD moyenné sur les mêmes intervalles sur une section de 400 m d’une voie. La structure de la chaussée, comprenant à la fois des chaussées flexibles, composites et rigides, a révélé des similitudes encourageantes dans la forme des deux profils de déflexions malgré un intervalle de quatre ans entre les mesures (Figure 10).

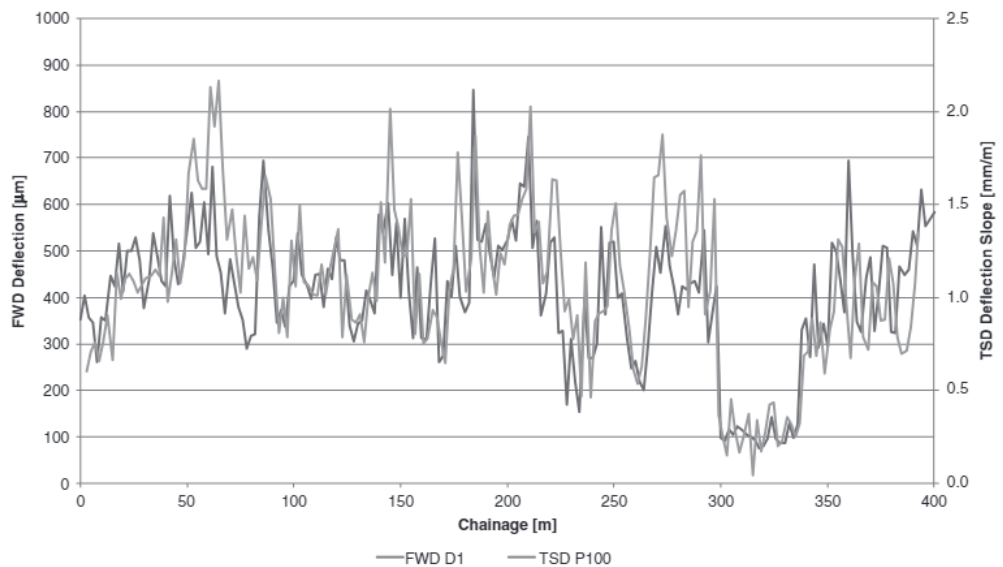


Figure 10 : Comparaison des profils de pente HA TSD et de déflexion centrale FWD sur chaussée composite souple [20]

Les mesures RWD ont également été comparées avec des données de déflexion mesurées par FWD dans [21]. Comme la montre la Figure 11, la dispersion et l’uniformité des données FWD et RWD semblent suivre de près l’état de chaque route.

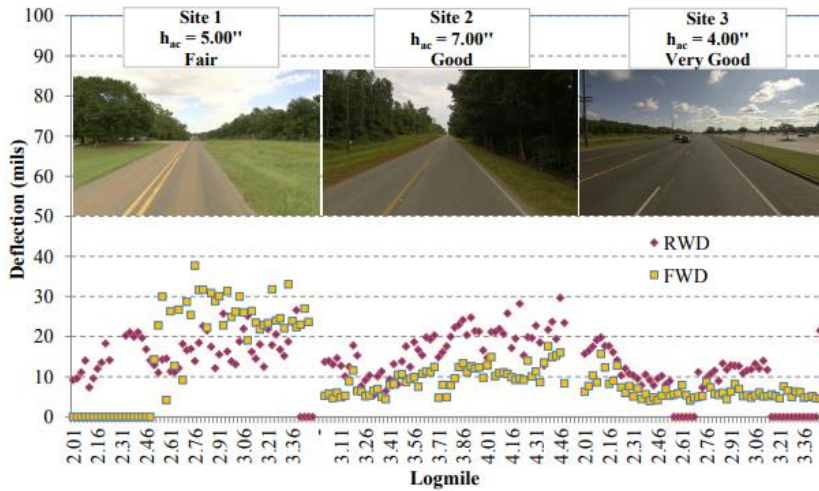


Figure 11 : Comparaison des résultats de RWD et FWD [21]

Une campagne d'essais a comparé les mesures du Raptor à celles d'un FWD dans [8], et a montré une bonne correspondance entre les deux mesures. La Figure 12 montre également la bonne répétabilité de cet appareil. Cependant, les niveaux de déflexion mesurés dans l'étude sont élevés (entre 20 et 160 1/100 mm) [8].

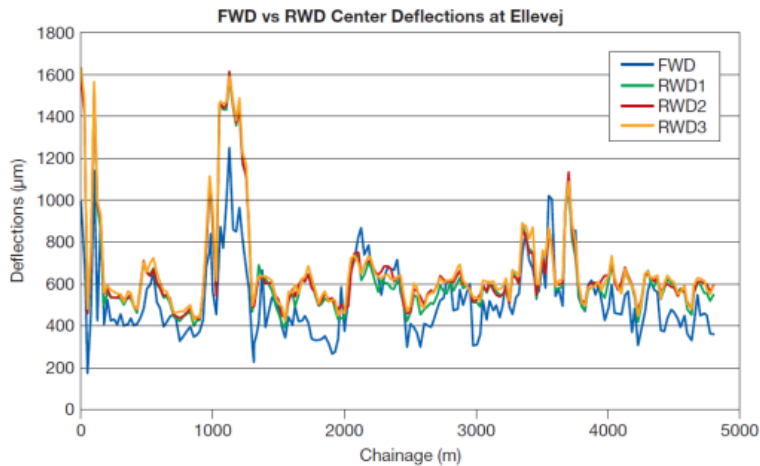


Figure 12 : Comparaison des déflexion maximales mesurées par le FWD et le RAPTOR (RWD) [8]

Dans le cadre du projet national français Durée de Vie Des Chaussées (DVDC), des essais croisés des appareils de mesure de déflexion à grande vitesse ont été effectués [22]. Des campagnes d'essais avec le Raptor ont été réalisées en Alsace et sur le réseau de l'A28. Un aperçu du comparatif des résultats Raptor vs déflectographe Lacroix Flash pour la section de route nationale en Alsace est fournie dans la Figure 13.

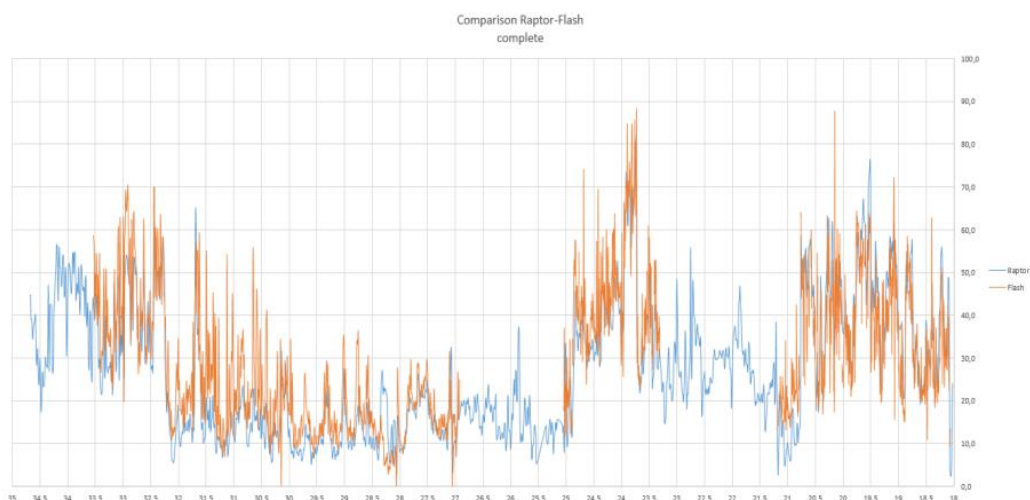


Figure 13 : Comparaison des valeurs Défectographe – Raptor [22]

2.2 Identification et analyse des normes VSS/SN : Une étude transnationale des pratiques de normalisation

Une analyse exhaustive des normes relatives au domaine des appareils de mesure de la déflexion est abordée dans le présent chapitre. L'analyse de la normalisation concerne, en plus de la Suisse, un échantillon représentatif de pays (États-Unis, France, Canada, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni).

2.2.1 Normes VSS/SN

Les normes VSS/SN, notamment la norme VSS 40 330, répertorient les trois appareils de mesures les plus utilisées en Suisse : la poutre Benkelman, le Falling weight deflectometer (FWD) et le défectographe Lacroix. Bien que le système de mesure Traffic speed deflectometer (TDS) soit mentionné brièvement dans la norme, son domaine d'application n'est pas clairement défini.

Dans la norme VSS 40 733b, qui concerne l'entretien des chaussées et le renforcement de superstructures de chaussées avec revêtements bitumineux à l'aide de mesures de déflexion, deux diagrammes de renforcement sont présentés pour la poutre Benkelman et pour le défectographe Lacroix. Le diagramme de renforcement spécifique au HWD/FWD sera disponible dans la future révision de la norme (pas disponible lors de la rédaction du présent rapport). En effet, le projet VSS2011/503 visait à établir une corrélation entre les déflexions mesurées avec la poutre Benkelman, considérée comme référence, et celles obtenues avec le FWD. L'objectif était d'ajouter à la norme VSS 40 733b un diagramme de renforcement basé sur les mesures effectuées avec le FWD.

Normes suisses potentiellement impactées par ce projet

Les normes suisse VSS 40330 et VSS 40 733b seront potentiellement impactées par les résultats de ce projet. En effet, l'intégration de données supplémentaires concernant le Traffic Speed Deflectometer (TSD) sera envisageable grâce aux informations collectées.

2.2.2 Étude de la normalisation dans différents pays

Pour un échantillon de pays spécifiques (États-Unis, France, Canada, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni), voici quelques exemples de normes pertinentes :

Aux États-Unis, les normes relatives aux mesures de déflexion sont généralement établies par l'ASTM International et d'autres organismes :

- *ASTM D4694* : Méthode de test standard pour les mesures de déflexion à l'aide d'un appareil à impulsion de type poids tombant
- *AASHTO T 256* : Méthode standard de test pour les mesures de déflexion des chaussées.

En France, les normes sont généralement publiées par l'AFNOR (Association Française de Normalisation) :

- *AFNOR (NF P98 200-1-7)* : Norme française harmonisée pour la détermination de la déflexion des matériaux de chaussée.
- *LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)* : Documentation technique sur les méthodes de mesure de déflexion [23].

Allemagne

- *DIN 18134* : Untersuchung von Boden - Plattendruckversuch : Détermination de la déflexion avec une plaque de chargement [24].
- *AP Trag B 2.1: Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen*, Teil B 2.1: *Falling Weight Deflectometer (FWD)* [25]

Royaume-Uni

- *CD 227* : Design for pavement maintenance [26]

2.2.3 Synthèse

L'étude des normes relatives aux appareils de mesure de la déflexion montre une grande diversité de pratiques entre les pays. En Suisse, le projet VSS2011/503 marque une avancée notable dans l'amélioration de l'évaluation de l'état des chaussées. À l'avenir, il sera important de poursuivre les efforts d'harmonisation des normes internationales tout en tenant compte des avancées technologiques.

2.3 Exploitation de mesures de déflexions

L'exploitation des mesures de déflexion et l'établissement d'indicateurs pertinents sont essentiels pour garantir la durabilité et l'efficacité des infrastructures. La littérature technique et scientifique continue d'évoluer pour intégrer de nouvelles technologies de mesure et pour affiner les méthodes d'évaluation basées sur la déflexion, contribuant ainsi à des pratiques de conception et de maintenance plus robustes et efficaces.

2.3.1 Principaux facteurs d'influence sur les déflexions

Effets liés à la température et à la fréquence de sollicitation

Le comportement des matériaux bitumineux est fortement influencé par la température et la fréquence de sollicitation, ce qui impacte considérablement la déflexion.

Pour les chaussées bitumineuses : À des températures élevées, l'asphalte devient plus souple, ce qui entraîne des déflexions plus importantes sous les charges de trafic.

Inversement, à des températures plus basses, l'asphalte devient plus rigide, réduisant ainsi les déflexions. [27] [28] [29].

Pour les chaussées en béton : Les chaussées en béton sont moins sensibles à la température que celles en asphalte, mais des variations peuvent encore se produire. Les joints et fissures dans le béton peuvent se dilater ou se contracter avec les changements de température, affectant les mesures de déflexion.

Simonin et al., [27] ont étudié l'effet de la température sur la mesure de déflexion des chaussées bitumineuses en utilisant le logiciel de calcul de structure ALIZE. Ils ont montré que pour une variation de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ de la température du revêtement bitumineux autour de 20°C , la déflexion varie d'environ 1.7mm/100 à 3mm/100. En plus lorsque la fréquence varie de 0.5Hz à 10Hz pour une température de 20°C la déflexion varie de 4mm/100 environ. Plus la température est élevée, plus le niveau de déflexion augmente, et plus l'effet de la température devient difficile à corriger. Pour cette raison il est recommandé de réaliser les mesures de déflexion à des températures au-dessous de 25°C .

Par conséquent, les mesures de déflexion prises à différentes températures peuvent varier considérablement, rendant nécessaire l'utilisation de corrections de température pour obtenir des comparaisons plus précises.

Une méthode proposée par Kim et Park [30] a été utilisée pour la correction de la déflexion de la chaussée. Le modèle de correction de la déflexion se base sur une analyse statique des déflexions et des températures mesurées en Caroline du Nord et présenté ci-dessous :

$$\lambda_w = \frac{w_{T_0}}{w_T} \quad (2)$$

Avec

w_{T_0} : déflexion corrigée à la température T_0

w_T : référence à la déflexion à la température T

λ_w : facteur de correction de déflexion calculé comme suit :

$$\lambda_w = 10^{-C(H_{ac})(T-T_0)} \quad (3)$$

H_{ac} : épaisseur de la couche d'asphalte et la constante de régression calculée comme suit :

$$C = -Ar + C_0 \quad (4)$$

Où

r : distance radiale par rapport au centre de la charge

A et C_0 sont les constantes déterminées pour la région (voir tableau 3.3 de [30]).

Une étude récente [31] a montré que les déflexions mesurées par le TSD sont plus sensibles à la température qu'à la vitesse de mesure. Un ajustement pour la température et la vitesse est nécessaire pour obtenir des mesures cohérentes. La méthode de correction de température AASHTO basée sur la déviation FWD qui s'applique

uniquement à Do (déflexion sous la charge) est appliquée dans cette étude. L'ajustement de la température est réalisé en utilisant un facteur de correction à la température de référence de 20°C sur le Do brut, comme illustré dans la Figure 14.

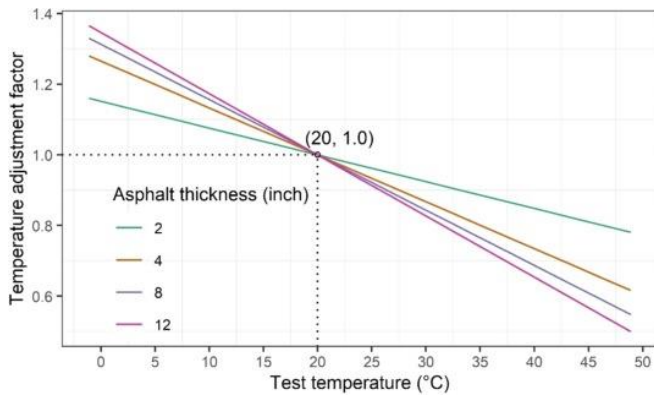


Figure 14 : Facteur d'ajustement de la température (AASHTO [32]) de [31]

Pour vérifier l'applicabilité de la méthode AASHTO aux déformations TSD, des modèles pour différentes températures d'essai ont été développés à l'aide du programme 3D-Move [31], [33]. Il est important de noter que plus la température d'essai est proche de la température de référence, plus la correction de température sera faible et donc plus fiable. Selon cette étude, il a été constaté que la méthode AASHTO basée sur FWD peut être employée pour les déflexions TSD.

D'autres méthodes de corrections ont été proposées afin de pallier ces effets de la température. Elles sont généralement basées sur des relations empiriques et permettent de corriger seulement la déflexion maximale. Le Tableau 2 présente quelques méthodes de corrections.

Méthodes de corrections de la déflexion			
France [34]	Espagne [1]	Belgique [1]	Hollande [35], [36]
$d_{15} = \frac{d_T}{1 + K * \frac{T - 15}{15}}$	$d_{15} = \frac{200d_T}{3T + 140}$	$d_{20} = K(t)d_T$ <p>Avec</p> $k(T) = 0.00026008T^2 - 0.025892789T + 1.4111835$	$d_{20} = TNF * d_T$ <p>Avec</p> $TNF = 1 + \left(0.01661 + \frac{-0.67095}{E_{pMB}}\right) \cdot (T_{MB} - 20) + \left(0.00028612 + \frac{-0.01408}{E_{pMB}}\right) \cdot (T_{MB} - 20)^2$
<p>d_T: déflexion à la température T d_{15}: déflexion à 15 °C d_{20}: déflexion à 20 °C k: coefficient dépendant du type de structure T_s: température de surface du revêtement T_{MB}: température du milieu des matériaux bitumineux E_{pMB}: épaisseur de matériaux bitumineux</p>			

Tableau 2 : Méthodes de correction des déflexions

Effets liés aux défauts structurels des chaussées

Les défauts structurels des chaussées ont un impact significatif sur la déflexion mesurée. Ces défauts, tels que les fissures, les dégradations des couches de base ou de fondation, et les déformations permanentes, peuvent altérer les résultats de mesure de déflexion. La Figure 15 illustre les bassins de déflexion simulés sous une charge dynamique sur une chaussée avec et sans fissures dans la couche traitée aux liants hydrauliques, obtenus à l'aide d'une modélisation de la réponse FWD avec le logiciel ABAQUS [37].

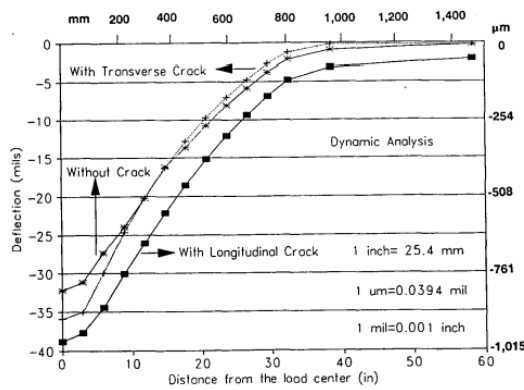


Figure 15 : Bassin de déflexion simulés avec Abaqus [37]

Une étude menée par Simonin et al. ([27]) a montré qu'une fissure transversale influence la forme du bassin de déflexion lorsqu'une mesure est effectuée à proximité du défaut. Toutefois, l'impact sur la déflexion maximale reste limité, l'augmentation n'étant pas significative et ne dépassant pas 30 [µm] (Figure 16).

Cependant, le rayon de courbure s'avère être un indicateur plus sensible au défaut dans cette configuration. Les travaux de [38] [39] [40] ont conduit à des conclusions similaires.

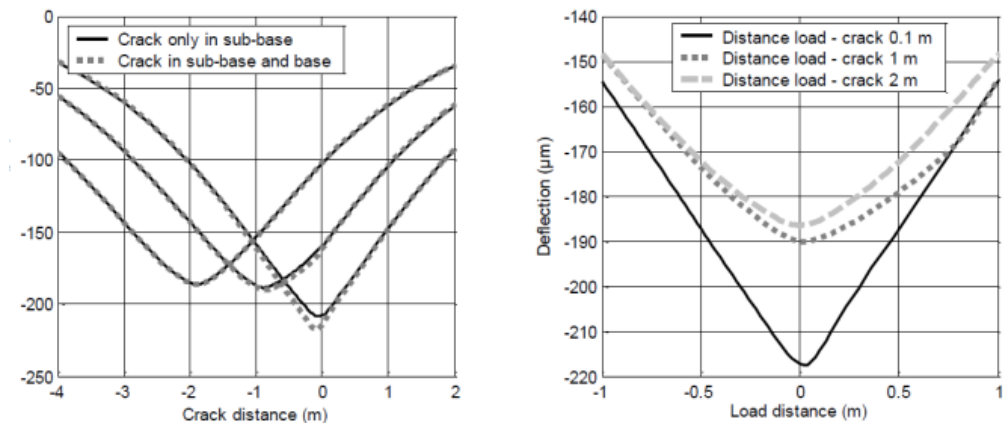


Figure 16 : Influence de la distance entre la charge et une fissure verticale sur la mesure de déflexion [27]

En 2014, Qiu et al. [38] ont présenté des travaux sur l'impact de la largeur des fissures sur la simulation de la mesure de déflexion d'un FWD. La Figure 17 montre les bassins de déflexion simulés pour cinq largeurs de fissures transversales différentes. Cette

étude a montré que la déflexion est plus sensible à une fissure transversale qu'à une fissure longitudinale.

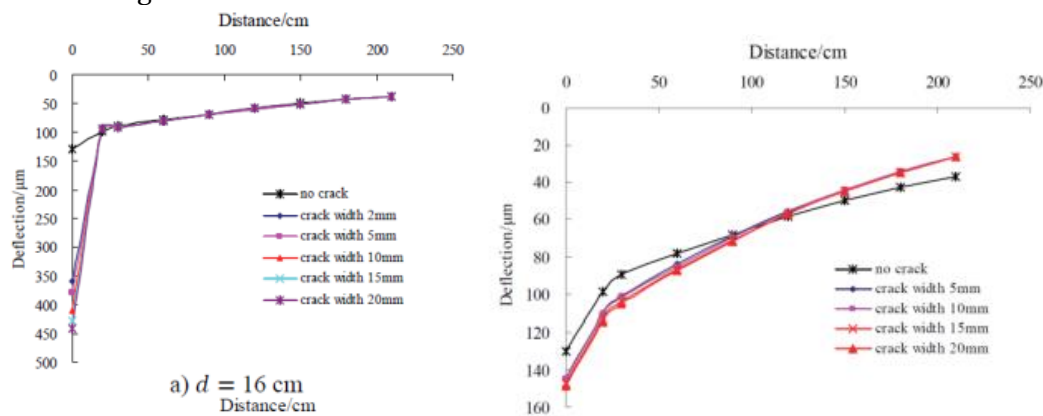


Figure 17 : Influence de : a) la largeur de la fissure transversale, b) la largeur de la fissure longitudinale sur la déflexion [38]

2.3.2 Analyses des essais

Une première méthode pour exploiter les données de portance consiste à évaluer l'état de la chaussée en estimant des valeurs directement à partir des mesures de déflexion. Par ailleurs, certains appareils d'auscultation utilisent les bassins de déflexion pour déterminer la rigidité de la chaussée via une méthode de calcul inverse, désignée également par rétro-calculation ou backcalculation en anglais. Ces deux approches seront détaillées dans les sous-chapitres suivants.

Indicateurs structurels

Les mesures de déflexion des chaussées fournissent des informations essentielles sur l'état structurel et la capacité portante des infrastructures routières. Ces mesures permettent de développer plusieurs indicateurs pertinents pour l'évaluation structurelle et la gestion des chaussées. Voici quelques-uns des principaux indicateurs dérivés des mesures de déflexion.

Tableaux des indicateurs usuels de la mesure de déflexion ([28], [41], [42], [43])

Paramètre du bassin de déflexion	Définition	Description
Rayon de courbure- R	$R_{courb} = \frac{200^2}{2D_0 \left[\left(\frac{D_0}{D_{200}} \right) - 1 \right]}$	Indication sur la structure en surface et en sommet de la couche de base
Surface Curvature Index - SCI	$SCI = BLI = d_0 - d_{300}$	Évaluation de l'intégrité des couches supérieures de la chaussée, notamment la couche de roulement et la couche de base.
Base Damage Index- BDI	$BDI = MLI = d_{300} - d_{600}$	Identification des zones faibles ou endommagées dans la couche de fondation.
Base Curvature Index - BCI	$BCI = LLI = d_{600} - d_{900}$	Évaluation de la rigidité et l'intégrité structurelle du sol.

Form factor - F	$F_1 = \frac{D_0 - D_{600}}{D_{300}}$ $F_2 = \frac{D_{300} - D_{900}}{D_{600}}$	L'indicateur F2 semble donner une meilleure corrélation tandis que F1 présente une faible corrélation.
Deflection Basin Area- A	$A = 6(D_0 + 2D_{30} + 2D_{60} + D_{90})$	

Tableau 3 : Synthèse des indicateurs usuels de la mesure de déflexion

Une décomposition du bassin de déflexion mesuré sous une roue chargée est proposée par Horak et Emery[44], [45], [46] en 1987 (Figure 18).

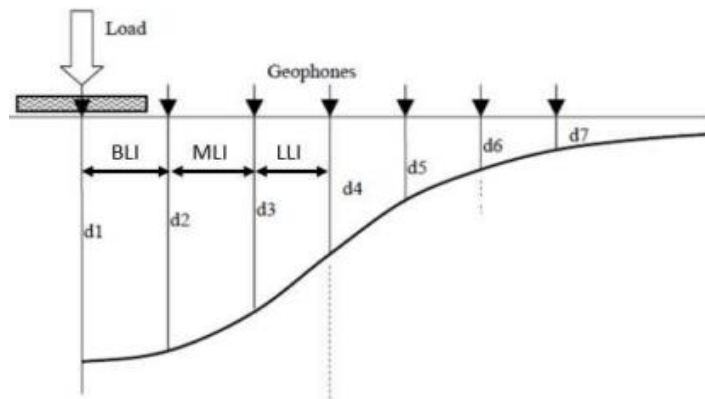


Figure 18 : Indicateurs BLI, MLI, LLI [1]

Des valeurs limites empiriques sont alors établies afin de caractériser l'état en trois catégories (voir Tableau 4) : sain, préoccupant et sévère, selon le tableau 1 dans [1] pour deux valeurs de charge (50 et 100 kN).

Valeur critique des indicateurs structurels [1]

Condition structurelle	Gamme de valeurs pour une charge de 50kN				
	R _{courb} (m)	Do (micron)	BLI (micron)	MLI (micron)	LLI (micron)
Bonne	>100	<500	<200	<100	<50
Limite	50 à 100	500 à 750	200 à 400	100 à 200	50 à 100
Dégradée	<50	>750	>400	>200	>100
Gamme de valeurs pour une charge de 100kN					
Bonne	>90	<625	<250	<115	<65
Limite	42 à 90	625 à 920	250 à 475	115 à 220	65 à 120
Dégradée	<42	>925	>475	>225	>120

Tableau 4 : Valeur critique des indicateurs structurels [1]

Limites des indicateurs

La reproductibilité des appareils F/HWD est un problème pour les indicateurs basés sur le bassin pseudo-statique de déflexion. Deux appareils différents ou deux structures de chaussée différentes peuvent donner des résultats très différents. De plus,

étant donné que les indicateurs ne peuvent pas être séparés par couche, l'impact du sol est essentiel. Il est donc important de prendre en compte l'utilisation des indicateurs lorsque la portance du sol support est faible.

Analyse inverse des mesures - Backcalculation

Des campagnes d'auscultation sont régulièrement engagées pour estimer la capacité portante et la durée de vie résiduelle des chaussées. Les bassins de déflexions obtenus par la mesure d'appareils d'auscultation (FWD, Curviamètre, Défectographes,...) permettent, en utilisant la procédure de calcul inverse, de déterminer les modules correspondant à chaque couche de la structure étudiée. Ce procédé fournit des informations mécaniques et permet d'évaluer ensuite par calcul la durée de vie résiduelle des chaussées. Il existe actuellement deux méthodes principales de calcul inverse : la méthode statique, qui repose sur des approches itératives, des bases de données ou des équations de régression pour ajuster les modules de couches à partir des bassins de déflexion mesurés, et la méthode dynamique, qui utilise un modèle multicouche élastique avec amortissement en domaine fréquentiel ou temporel afin de comparer directement les historiques de charges et de déflexions [47], [48], [49].

Les outils de rétrocalcul typiques supposaient généralement que la couche de chaussée avait des caractéristiques élastiques linéaires et n'utilisaient que le FWD pour calculer la réponse de la chaussée. Par conséquent, ces outils traditionnels pourraient ne pas être adaptés à l'utilisation directe des données TSD en raison de différents mécanismes de chargement [16],[50].

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé une mise à jour des connaissances en matière d'appareils de mesure pour la déflexion. On a accordé une attention particulière aux appareils en fonction de leur mode de fonctionnement, tels que ceux utilisant des lasers comme profilomètres (Raptor) ou ceux utilisant des lasers à effet Doppler (TSD), en comparaison avec les appareils répandus en Suisse (principalement Lacroix/Flash et FWD/HWD). Les divers types d'appareils sont bien étudiés, tout comme leur potentiel d'utilisation en Suisse.

Dans ce contexte, une première analyse du marché/expérience et de la disponibilité des appareils pour une utilisation en Suisse a été réalisée. Une étude des aspects normatifs est ensuite effectuée en identifiant de manière exhaustive les normes VSS/SN potentiellement liées à la recherche, ainsi que par l'étude de la normalisation dans le domaine pour un échantillon représentatif de pays (États-Unis, France, Canada, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni).

L'étude de la littérature technique et scientifique concernant l'utilisation de mesures de déflexion et la mise en place d'indicateurs appropriés a été minutieusement examinée. Des suggestions initiales concernant les méthodes d'exploitation ont été mises en évidence en vue de la phase 4 du projet. Cette analyse a permis de conclure que les appareils de mesure de déflexion à haut rendement ont a priori de bonnes corrélations avec les appareils « classiques », mais il est important de prendre en compte de

nombreux facteurs d'influence tels que la vitesse de mesure, la température et le type de la structure. Des approches pour corriger la déflexion ont été suggérées afin d'obtenir des comparaisons précises.

Dans le cadre de cette étude, différents paramètres ont été définis et associés aux différentes couches d'une structure routière. La figure synoptique ci-dessous présente ces correspondances et met en évidence les paramètres pris en compte dans l'évaluation des différentes couches.

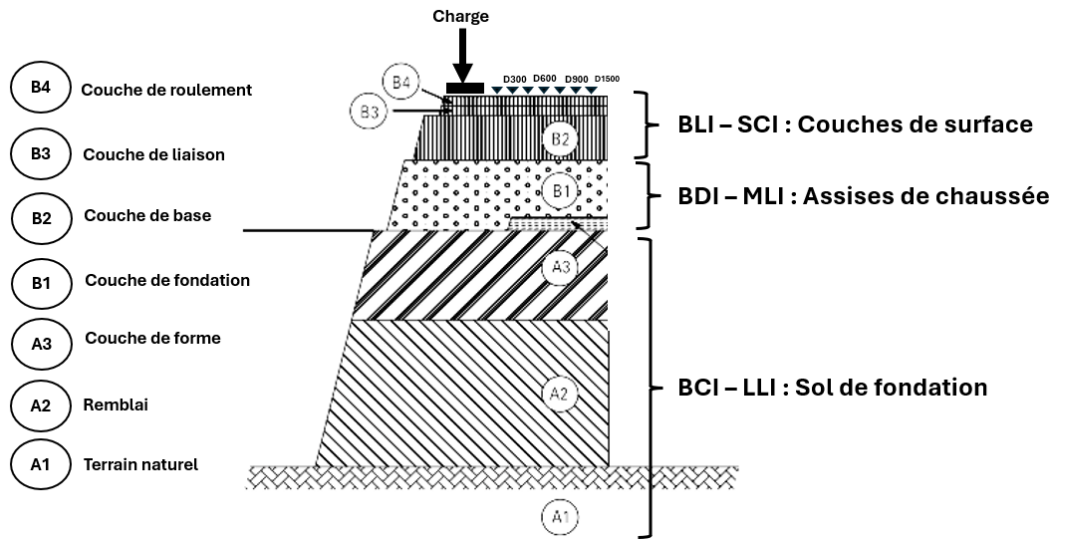


Figure 19 : Schéma synoptique présentant les paramètres définis et leur association aux différentes couches d'une structure routière selon la nomenclature de l'AIPCR [51]

3 Campagne de mesures expérimentales

3.1 Programme de mesures

Le programme de mesure expérimental consiste à effectuer des mesures de portance sur des structures de chaussées susceptibles d'être évaluées avec un appareil de mesure à grand rendement. La liste des tronçons du programme est présentée dans le tableau et la cartographie suivants.

Liste des tronçons du programme de mesure TSD - Raptor

Id	Axe	Dir.	Ré-pétition	Profil début	Profil fin	Longueur	Catégorie de route (canton)	Epais.	Matériaux de fondation	Trafic journalier moyen (TJM)
[-]	[-]	[-]	[-]	[km]	[km]	[km]	[-]	[cm]	[-]	[véh/j]
1	1003	+	1	14.431	15.031	0.600	RC (NE)	15	GNT	3'500
2	1003	+	1	17.344	21.148	3.804	RC (NE)	17	GNT	2'500
3	1003	-	1	21.148	17.344	3.804	RC (NE)	18	GNT	2'500
4	1003	-	1	15.031	14.431	0.600	RC (NE)	14	GNT	3'500
5	N1-	-	1	93.700	87.100	6.600	RN	23	Stab.	24'000
6	3140	+	1	1.379	7.079	5.700	RC (VD)	17	GNT	3'900
7	2410	+	1	3.696	6.336	2.640	RC (VD)	18	GNT	1'650
8	N1+	+	1	33.700	64.000	30.300	RN	18	GNT	
9	N1+	+	2	47.000	57.000	10.000	RN	17	GNT	40'000
10	N1+	+	3	47.000	57.000	10.000	RN	17	GNT	
11	4530	+	1	7.649	9.659	2.010	RC (VD)	24	GNT	
12	4530	+	2	7.649	9.659	2.010	RC (VD)	24	GNT	7'200
13	4530	+	3	7.649	9.659	2.010	RC (VD)	24	GNT	
14	T9	+	1	61.005	68.665	7.660	RC (VS)	18	GNT	4'600
15	T9	-	1	68.665	61.005	7.660	RC (VS)	18	GNT	4'600
16	T9	-	2	68.200	65.213	2.987	RC (VS)	18	GNT	4'600
17	T9	-	3	68.200	65.213	2.987	RC (VS)	18	GNT	4'600

Tableau 5 : Liste des tronçons du programme de mesure TSD – Raptor

Les mesures sur autoroutes sont réalisées sur la voie lente

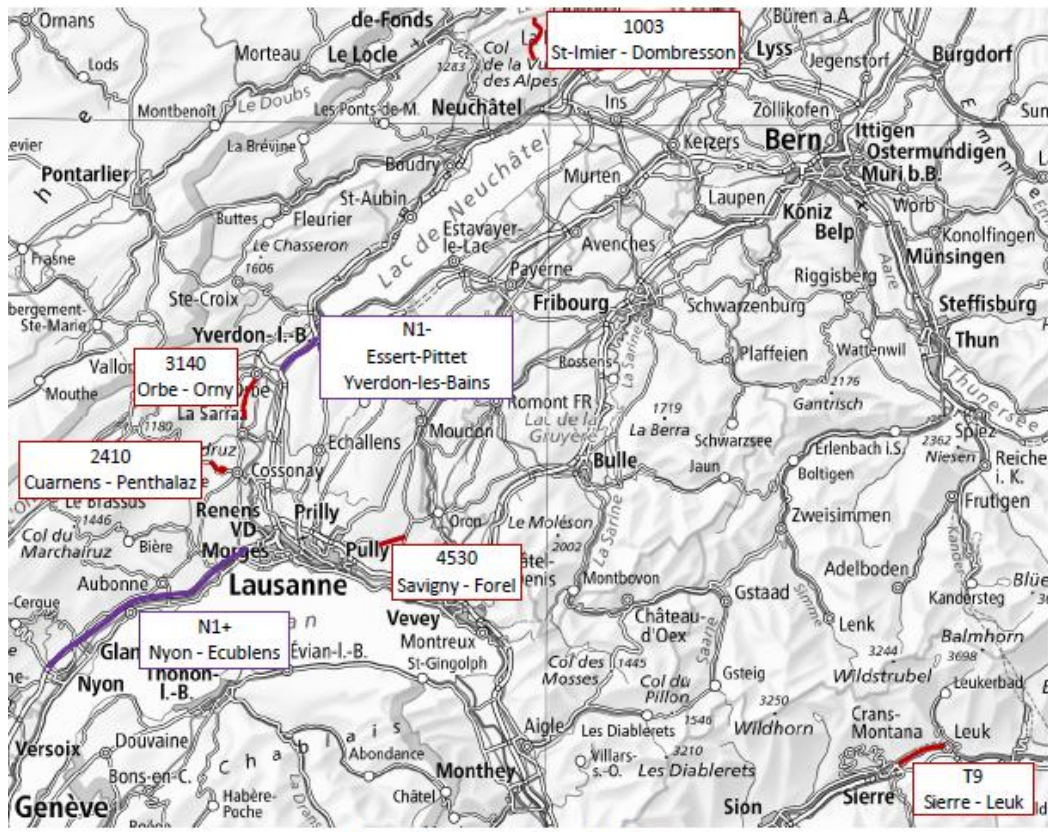


Figure 20 : Cartographie des tronçons routiers sélectionnés (violet : routes nationales, rouge : routes cantonales)

Les membres du groupe de recherche ont défini les tronçons en collaboration avec les maîtres d'ouvrage, en se basant sur des tronçons avec des structures de chaussées connues.

La longueur totale des mesures prévues selon ce programme est de 101 km avec des tronçons aux caractéristiques diverses selon :

- La localisation (répartition des tronçons sur 3 cantons (NE, VD, VS) ;
- Le type de route (56km de routes nationales / 44km de routes cantonales) ; Des tronçons de routes communales n'ont pas été proposés en raison des gabarits des véhicules de mesure (camions) qui ne sont pas adaptés pour les relevés sur réseaux routiers communaux.
- Le type de structure (souple, rigide et semi-rigide)
- Les épaisseurs de matériaux bitumineux (entre 14 et 24 cm) ;
- Les charges de trafic (2'000 véh/j à 40'000 véh/j)

Les mesures sont réalisées à l'aide de deux appareils de mesures à grand-rendement, à savoir le Raptor et le TSD. En parallèle, des mesures ponctuelles au HWD (Heavy Weight Deflectometer) sont également effectuées.

Les objectifs principaux de ces mesures sont :

- De comparer les données des appareils à grand-rendement avec celles d'un matériel de référence de mesures de déflexions en Suisse, à savoir le HWD. Pour ce faire, les conditions de mesure (conditions de température, conditions saisonnières) doivent être le plus proche possible entre les trois appareils, soit des mesures réalisées dans un laps de temps aussi court que possible ;
- De vérifier la répétabilité des mesures pour les appareils TSD et Raptor. Pour cela, 3 répétitions sont programmées pour 3 tronçons (N1+ Nyon – Ecublens, RC4530 et T9).
- Les valeurs de portance mesurées doivent être liées à la rigidité de la structure auscultée, qui est fortement dépendante de l'épaisseur des couches et des matériaux constituant la chaussée. L'épaisseur de la couche bitumineuse est mesurée en continu à l'aide d'un Géoradar faisant partie de l'équipement embarqué du Raptor.

Les prestataires des mesures à haut-rendement fournissent au minimum les données suivantes :

- Charge appliquée ;
- Valeurs de déflexions à différentes distances de la charge appliquée ;
- Date et heure de mesure ;
- Vitesse de mesure ;
- Température de l'air et de la surface de l'enrobé ;
- Tout évènement particulier pouvant affecter l'interprétation des mesures (pont, giratoire, tunnel, gendarmes couchés, déviation de trajectoire liées à des travaux, véhicules stationnés...) sont à signaler par les différents prestataires dans leurs fichiers de rendu des mesures.

La planification des mesures doit tenir compte des contraintes suivantes :

- Les mesures des 2 appareils TSD et Raptor sont à réaliser sur surface sèche. Compte tenu du fait que ces appareils viennent de Suède et de Pologne, les conditions météorologiques sont vérifiées plusieurs jours avant pour confirmer ou reporter les interventions ;
- En cas de période de forte chaleur, il est recommandé de réaliser les mesures la nuit. Dans ce cas, des autorisations spéciales sont demandées pour pouvoir circuler avec les appareils de mesures de nuit sur les autoroutes, le TSD et le Raptor étant considérés comme des véhicules poids-lourd ;
- Il est nécessaire de s'assurer que les tronçons sont le plus possible disponibles pendant les dates d'intervention programmées (pas de présence de travaux, ou du moins sur des portions limitées). Les centres d'entretiens des différents maîtres d'ouvrages sont donc consultés en amont des mesures ;
- Les mesures des appareils à grand-rendement pouvant être réalisées jusqu'à 80km/h, aucun dispositif de sécurité ou d'accompagnement n'est mis en place pendant celles-ci. A noter que cela est possible sur les voies lentes des autoroutes. En cas de relevés futurs sur les voies rapides (en dehors du cadre du mandat de recherche), un dispositif de sécurité devrait accompagner ces appareils pendant les relevés.

3.2 Réalisation des mesures

3.2.1 Mesures TSD

Le laboratoire IBDiM (Pologne) a été mandaté pour la réalisation des mesures TSD (Figure 21).



Figure 21 : Photo du TSD lors de l'intervention en Suisse

Les mesures TSD ont été réalisées les 24 et 25.08.2022, selon le programme de mesures prévu.

Plusieurs interventions initialement prévues en juin et juillet 2022 ont dû être annulées en raison de la prévision de conditions pluvieuses, les protocoles exigeant que les mesures soient effectuées sur une surface sèche.

Les données ont été livrées par IBDIM en date du 10.10.2022.

L'ensemble du programme de mesures a été relevé, ce qui a pu être contrôlé au moyen des coordonnées GPS fournies. À noter des coordonnées GPS imprécises sur la T9, probablement en raison de passages dans les tunnels avec perte de signal GPS (voir Figure 22). Après consultation, IBDIM a indiqué que les données GPS sur ce tronçon ne pouvait pas être améliorées avec leur système de mesure actuel.

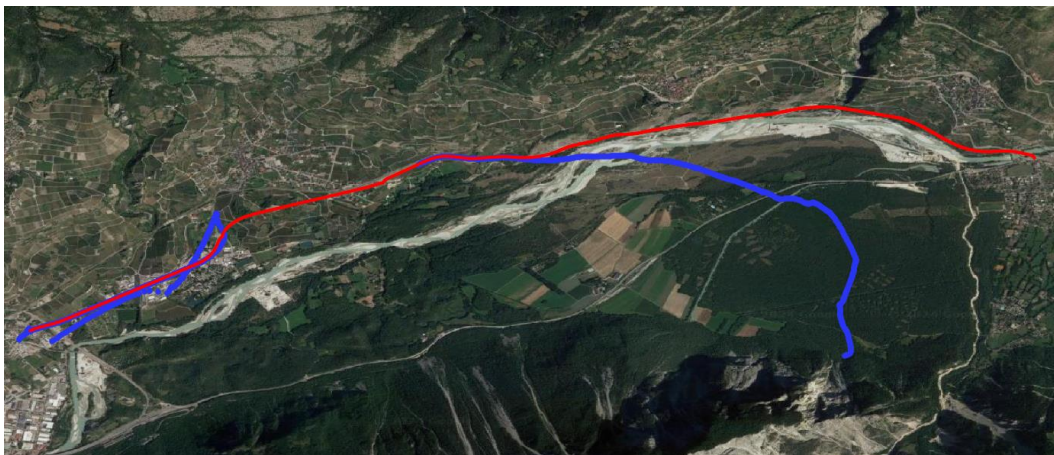


Figure 22 : Problème de coordonnées GPS du TSD sur l'axe T9 (tracé théorique en rouge / points GPS du TSD en bleu)

Le traitement détaillé des données recueillies par le TSD est exposé dans la section 4.1 de ce rapport. Cette partie décrit méthodiquement les procédures et les techniques utilisées pour analyser et intégrer les données obtenues.

3.2.2 Mesures Raptor

Les mesures Raptor devaient être initialement reprises d'un premier projet d'évaluation réalisé en 2019 pour la filiale 1 de l'OFROU.

Finalement, une nouvelle intervention Raptor a pu être financée par les cantons (NE, VD, VS) afin de mener le programme de mesures du mandat de recherche et ainsi permettre une meilleure comparaison avec le TSD et le HWD.

La société Ramboll (Suède), propriétaire du matériel Raptor, a été mandatée pour la réalisation des mesures Raptor (Figure 23).



Figure 23 : Photo du Raptor lors de sa 1ère intervention en Suisse

Les mesures Raptor ont été effectuées les 8 et 9.09.2022, conformément au programme de mesure prévus.

Les mesures ont été réalisées deux semaines après le passage du TSD. Plusieurs tentatives de mesures combinées TSD / Raptor avaient échoué notamment en raison de conditions météorologiques pluvieuses, en juin / juillet de la même année. Dans l'impossibilité de retrouver des disponibilités conjointes TSD / Radar et compte tenu du planning du projet (mesures à réaliser courant 2022), le délai de 2 semaines entre mesures TSD et Raptor a été accepté.

Les données Raptor ont été livrées par Ramboll le 8 janvier 2023. Cependant, plusieurs données n'ont pas pu être fournies par le prestataire :

- Date et heures de mesures manquantes ;
- Température de l'air manquante ;
- Données de vitesse manquantes pour une grande partie des mesures ;
- Les données sur 500m du tronçon de mesure n°10 n'ont pas pu être fournies en raison d'un « problème technique ».

De plus l'analyse des données a révélé les problèmes suivants :

- Problèmes de comparabilité avec les déflexions HWD : pour 2 mesures, les déflexions Raptor étaient décalées par rapport aux déflexions HWD (voir figure 23) ;

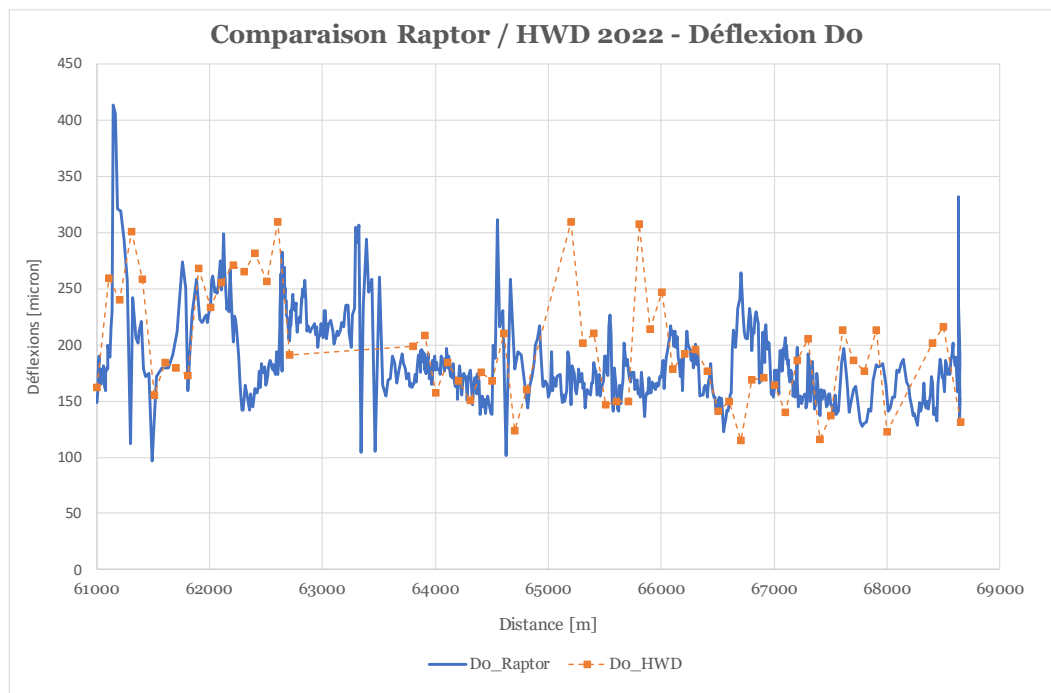


Figure 24 : Graphique comparatif des déflexions Raptor / HWD 2022 sur la T9 (section n°14)

- Problème d'intervalle entre les points de mesure Raptor. L'intervalle théorique des mesures Raptor est de 10m. Or, les inter-distances calculées au moyen des coordonnées GPS fournies ont révélé, pour 4 mesures, des intervalles différents

Le fournisseur des données Raptor a reconnu la mauvaise qualité des données fournies et a proposé de refaire les mesures. Une 2^{ème} intervention Raptor a donc eu lieu le 14 et 15.09.2023. La période de septembre a été retenue pour disposer de mesures réalisées lors de la même saison que les mesures TSD de 2022.

Les données de cette 2^{ème} intervention Raptor ont été livrées par Ramboll le 17 décembre 2023 et les problèmes qui ont eu lieu lors de la 1^{ère} intervention ont été résolus.

En même temps que les mesures de déflexions, Ramboll a également effectué des mesures avec un Georadar monté à l'avant du Raptor (voir Figure 23). A partir de l'analyse des données Radar, Ramboll a fourni l'épaisseur de matériaux bitumineux selon le même pas de mesure que les données de déflexions, soit au pas de 10m. Ces données sont à prendre avec précaution car extraites uniquement à partir des radargrammes au moyen des interfaces supposées entre enrobés et matériaux de fondation, sans recalage avec des résultats de carottages.

3.2.3 Mesures HWD

Le choix de l'appareil de référence pouvait a priori se porter sur les trois appareils historiquement et fréquemment utilisés en Suisse : Poutre Benkelman, Déflectographe Lacroix (Flash) et déflectomètre à masse tombante F/HWD. En pratique, seuls le déflectographe Lacroix et le F/HWD peuvent prétendre à un usage au niveau d'un réseau, et de grands projets.

La qualité de la mesure du bassin de déflexion est le critère qui a favorisé le choix de l'appareil F/HWD par rapport au Lacroix car cela permet, par calcul inverse, de caractériser l'ensemble des éléments constituant la chaussée : matériaux bitumineux, fondation et sol support.

Enfin, l'utilisation plus répandue de l'appareil F/HWD à travers le monde permet de bénéficier de plus d'expériences et de contributions issues d'une communauté technique et scientifique plus étendue.



Figure 25 : Photo de l'appareil de mesure HWD utilisé pour ces mesures

Les mesures HWD ont été réalisées par Infralab SA :

- Les 23 et 24 août 2022 sur l'ensemble des routes cantonales
- Le 30 août 2022 sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

Les mesures ont donc été réalisées le plus proches possibles des mesures TSD, réalisées les 24 et 25 août 2022.

Les mesures de répétabilité n'ont pas été effectuées avec le HWD, l'objectif principal étant de comparer les déflexions HWD avec celles du TSD et du Raptor et non de vérifier la répétabilité des déflexions HWD.

Les pas de mesures retenus varient entre 100 et 200m selon les axes, pour un nombre total de 1'283 points de mesures.

Une 2^{ème} campagne de mesure a eu lieu le 15.09.2023, pour disposer de points de calage avec la 2^{ème} intervention du Raptor. Cette campagne de mesure réduite n'a eu lieu que sur 4 tronçons de mesure (N°6 / 7 / 11 / 14), pour un total de 527 points de mesure.

3.3 Synthèse des conditions de mesure

3.3.1 Conditions de température et saisonnière

Il est important de maîtriser les conditions de mesure car la température des matériaux bitumineux et l'état hydrique de la fondation sont des facteurs déterminants qui affectent les résultats. A ce titre, l'objectif était de planifier les mesures dans un laps de temps le plus court possible entre les différents appareils.

Cependant et en synthèse des aléas décrits au chapitre 3.2 :

- Il est très difficile de faire venir en même temps les 2 appareils TSD et Raptor : ces matériels voyagent à travers l'Europe et sont contraints d'adapter sans cesse leur programme de mesure en fonction des conditions météorologiques. Il a finalement été accepté un délai de 2 semaines entre les mesures des 2 appareils lors des interventions de 2022.
- De plus, les mesures Raptor ont dû être réalisées de nouveau en 2023 en raison du problème de mesure. Si la période de mesure était également en septembre, les conditions hydriques de la fondation peuvent varier d'une année à l'autre et affecter la comparabilité des déflexions des 2 appareils.

A titre de contrôle / comparaison, des mesures de déflexions avec l'appareil de référence HWD ont de nouveau été effectuées lors de la même semaine que la 2^{ème} intervention du raptor en septembre 2023 (toutefois avec un programme allégé en 2023 par rapport à 2022).

Les tableaux suivants permettent de comparer les dates et heures de mesures, ainsi que les conditions de températures.

Dates et heures de mesure pour chaque appareil / intervention				
Identifiant section	TSD 2022	Raptor 2023	HWD 2022	HWD 2023
1	24.08.22 / 22:34	14.09.23 / 13:50	23.08.22 / 22:05	
2	24.08.22 / 22:38	14.09.23 / 13:53	23.08.22 / 22:26	
3	24.08.22 / 22:45	14.09.23 / 14:02	23.08.22 / 23:05	
4	24.08.22 / 22:52	14.09.23 / 14:09	23.08.22 / 23:41	
5	24.08.22 / 23:42	14.09.23 / 15:30		
6	25.08.22 / 00:06	14.09.23 / 15:45	24.08.22 / 01:09	15.09.23 / 04:46
7	25.08.22 / 00:47	14.09.23 / 16:08	24.08.22 / 02:59	15.09.23 / 06:36
8	25.08.22 / 02:19	14.09.23 / 17:37	30.08.22 / 21:22	
9	25.08.22 / 01:28	14.09.23 / 18:36		
10	25.08.22 / 01:50	14.09.23 / 18:59		
11	25.08.22 / 03:58	14.09.23 / 19:27	24.08.22 / 04:14	15.09.23 / 08:11
12	25.08.22 / 04:04	14.09.23 / 20:06		
13	25.08.22 / 04:11	14.09.23 / 20:12		
14	25.08.22 / 22:55	15.09.23 / 11:48	24.08.22 / 22:38	15.09.23 / 11:00
15	25.08.22 / 23:03	15.09.23 / 12:03	24.08.22 / 23:56	
16	25.08.22 / 23:21	15.09.23 / 12:13		
17	25.08.22 / 23:37	15.09.23 / 12:24		

Tableau 6 : Dates et heures de mesure pour chaque appareil / intervention

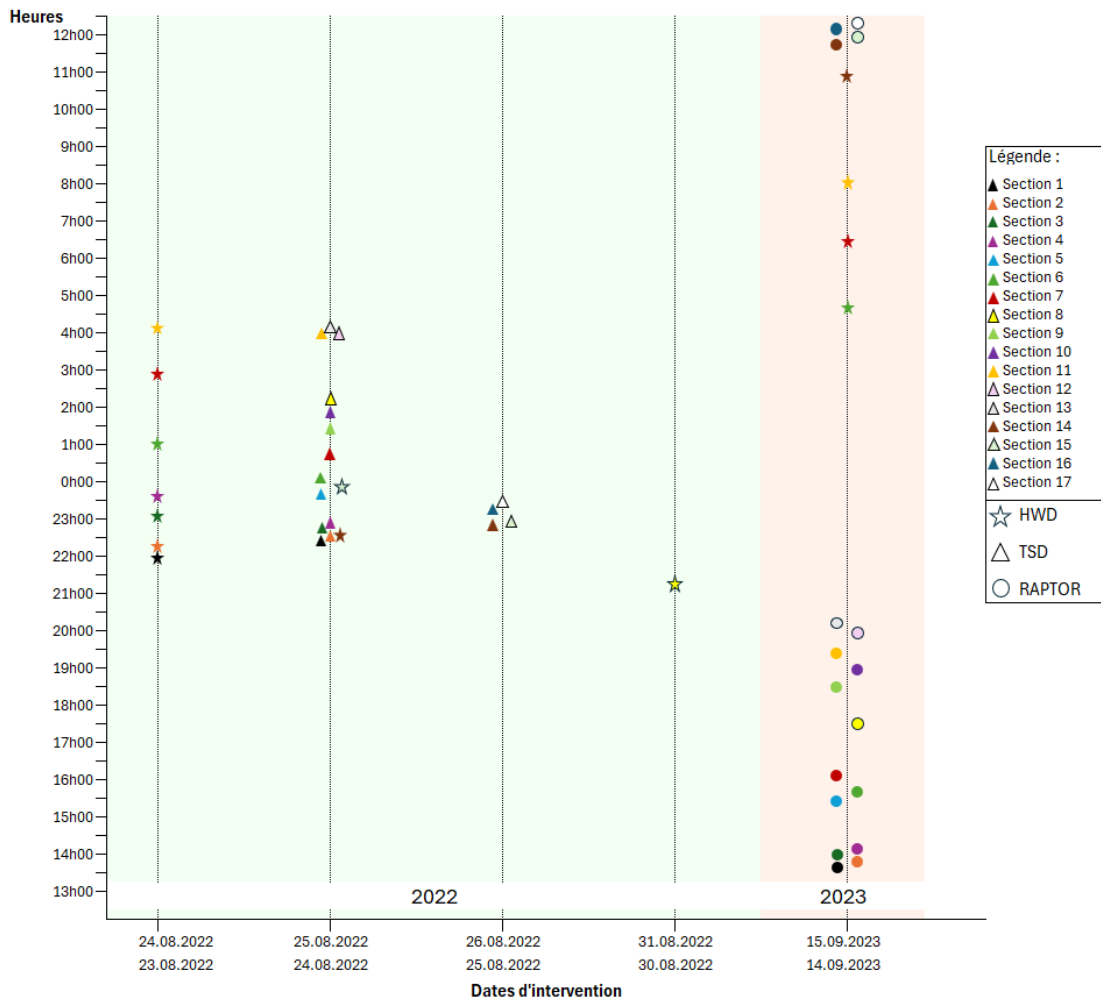


Figure 26 : Graphique des dates et heures de mesures pour chaque appareil / intervention

Températures de mesure pour chaque appareil / intervention

Id	TSD 2022			Raptor 2023			HWD 2022			HWD 2023		
	T _{air}	T _{surf}	T _{enrobé}	T _{air}	T _{surf}	T _{enrobé}	T _{air}	T _{surf}	T _{enrobé}	T _{air}	T _{surf}	T _{enrobé}
1	23.3	23.6	20.1	22.8	31.7	27.5	18.6	23.5	23.2			
2	23.0	22.2	19.4	23.1	26.1	24.2	18.1	20.7	21.4			
3	22.5	21.7	19.2	23.0	26.6	24.6	18.5	20.3	20.8			
4	22.3	22.8	19.7	24.4	29.8	26.7	18.7	20.8	20.5			
5	22.3	21.7	19.1	27.7	37.4	31.8						
6	20.5	22.0	19.3	27.5	40.9	34.8	16.6	20.8	19.5	16.9	19.1	18.6
7	21.7	22.0	19.3	26.6	39.3	34.0	18.4	20.0	18.4	18.2	19.3	18.7
8	20.7	21.3	19.4	29.0	33.7	30.8	19.4	19.3	19.7			
9	23.9	23.1	20.8	27.8	31.0	29.1						
10	23.4	22.7	20.6	26.9	29.4	28.2						
11	18.8	19.4	18.0	23.1	27.0	27.8	16.5	18.7	17.8	18.0	19.0	18.8
12	18.0	19.2	18.0	22.9	26.6	27.5						
13	17.5	19.0	17.9	22.8	26.6	27.4						
14	25.3	27.4	22.0	24.7	32.2	26.3	23.5	27.2	24.8	20.6	23.4	21.2
15	25.4	27.4	22.0	24.9	33.5	27.1	21.4	25.7	23.0			
16	25.2	28.4		26.3	35.0	27.9						
17	24.6	28.1		26.1	34.0	27.5						

Tableau 7 : Températures de mesure pour chaque appareil / intervention

Les températures de l'air et de surface de l'enrobé sont mesurés au moyen de capteurs montés sur les appareils de mesure.

La température des matériaux bitumineux est calculée au moyen des formules BELLS 3, établies dans le rapport de la Federal Highway Administration intitulé « Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement » [42].

Les conditions de température de l'air et de surface entre le TSD et le HWD sont proches (différences inférieures à 2 °C pour les températures moyennes de l'air et de surface).

En revanche, des écarts importants sont constatés entre le TSD (et HWD) et le Raptor, avec des température moyennes supérieures pour le Raptor (en moyenne +3°C pour la température de l'air, +8.7°C pour la température de surface et +7.1 °C pour la température dans l'enrobé Tenrobé).

Les différences les plus importantes sont constatées pour les sections n°5 à 8. Ces différences nécessitent une correction des déflexions à une température de référence, afin d'établir une comparaison la plus juste possible des déflexions entre appareils.

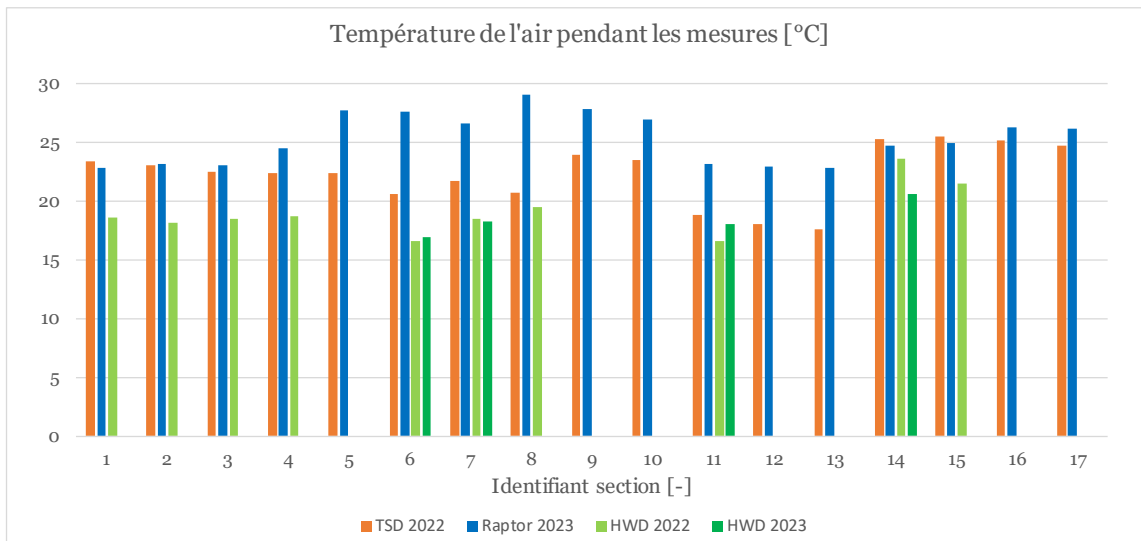


Figure 27 : Graphique des températures de l'air pendant les mesures pour chaque appareil / intervention

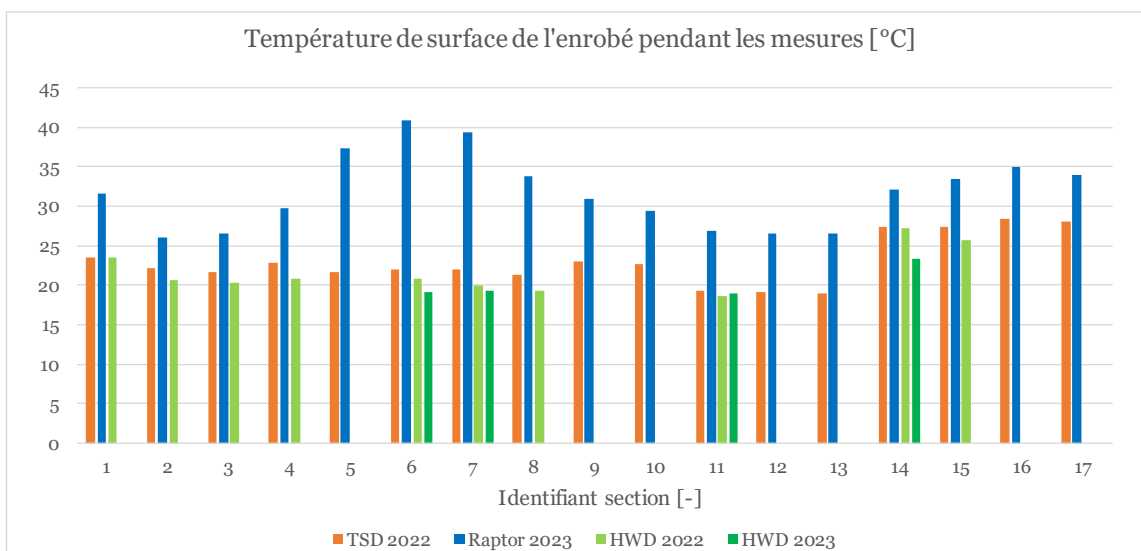


Figure 28 : Graphique des températures de surface de l'enrobé pendant les mesures pour chaque appareil

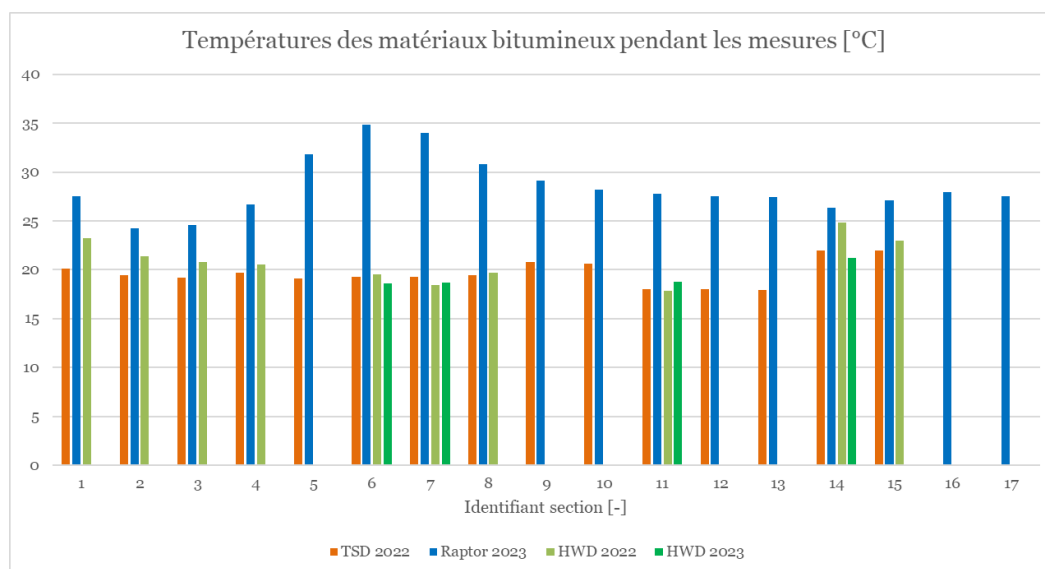


Figure 29 : Graphique des températures des matériaux bitumineux pendant les mesures pour chaque appareil

3.3.2 Vitesse de mesure

La vitesse de mesure est un paramètre important puisqu'elle a un impact sur la fréquence de sollicitation de la charge appliquée et a donc une influence sur les valeurs de déflexions mesurées (voir Tableau 8).

Vitesses moyennes de mesure pour chaque appareil [km/h]		
Identifiant section	TSD 2022	Raptor 2023
1	41.3	44.9
2	44.4	47.4
3	52.6	51.6
4	39.4	46.3
5	77.2	83.2
6	65.3	70.6
7	55.5	58.7
8	76.7	83.2
9	76.3	83.9
10	77.0	83.9
11	62.5	63.9
12	64.5	62.1
13	64.4	61.7
14	59.7	68.8
15	64.4	69.1
16	68.8	81.6
17	67.5	80.4

Tableau 8 : Synthèse des vitesses moyennes de mesure pour chaque appareil / intervention

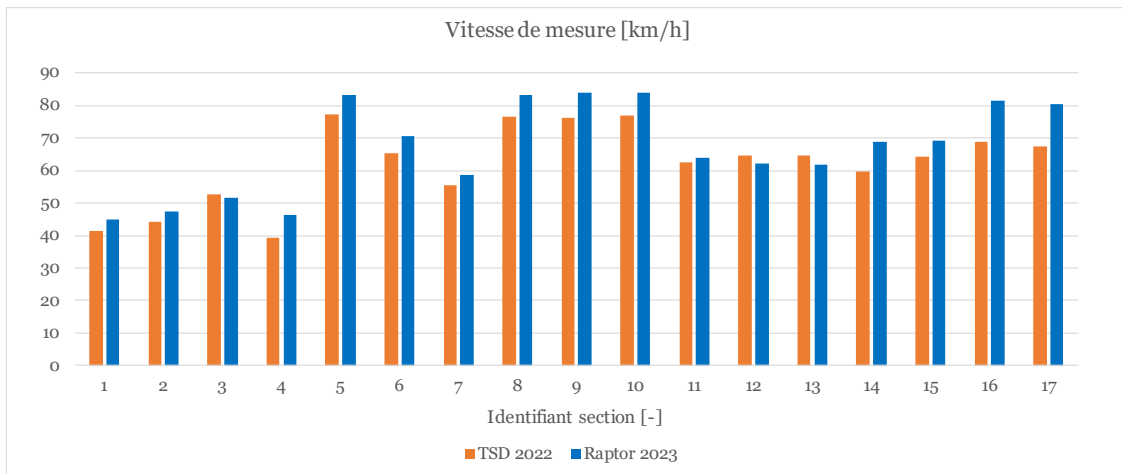


Figure 30 : Graphique des vitesses moyennes de mesures pour chaque appareil

De manière générale, les vitesses de mesure des appareils TSD et Raptor par section sont proches, avec toutefois une vitesse moyenne pour l'ensemble des tronçons supérieure pour le Raptor par rapport au TSD (67.1 km/h contre 62.2km/h, soit +4.9 km/h en moyenne).

4 Contrôle des livraisons des données

4.1 Données TSD

Lors du contrôle des mesures TSD livrées, une présence significative de valeurs aberrantes a été mise en évidence par une analyse approfondie des données collectées.

En pratique, il est largement admis que la déflexion la plus éloignée de la charge (déflexion à 1500 mm) présente une corrélation très fiable avec la rigidité de la couche la plus profonde (sol).

Des écarts notables entre les bassins de déflexion ont été constatés lors de l'examen des données fournies par l'appareil TSD. Deux typologies distinctes de bassins ont été identifiées : la première avec des déflexions élevées qui ne convergent pas vers zéro à une distance de 1500 mm de la charge, tandis que la seconde présente des déflexions plus faibles tendant vers zéro à la même distance. Cette variation de la déflexion à 1500 mm est observée sur des points de mesure contigus (écart de 10 m), ce qui n'est pas plausible du point de vue mécanique puisque la rigidité du sol ne devrait pas présenter des sauts aussi brusques.

Ce constat est illustré sur le graphique de la Figure 31, où des bassins de déflexions sur la RC 1003 (sens +) sont présentés, avec illustration de la distribution des déflexions pour les capteurs directement sous la charge, à 300 mm et à 1500 mm de la charge.

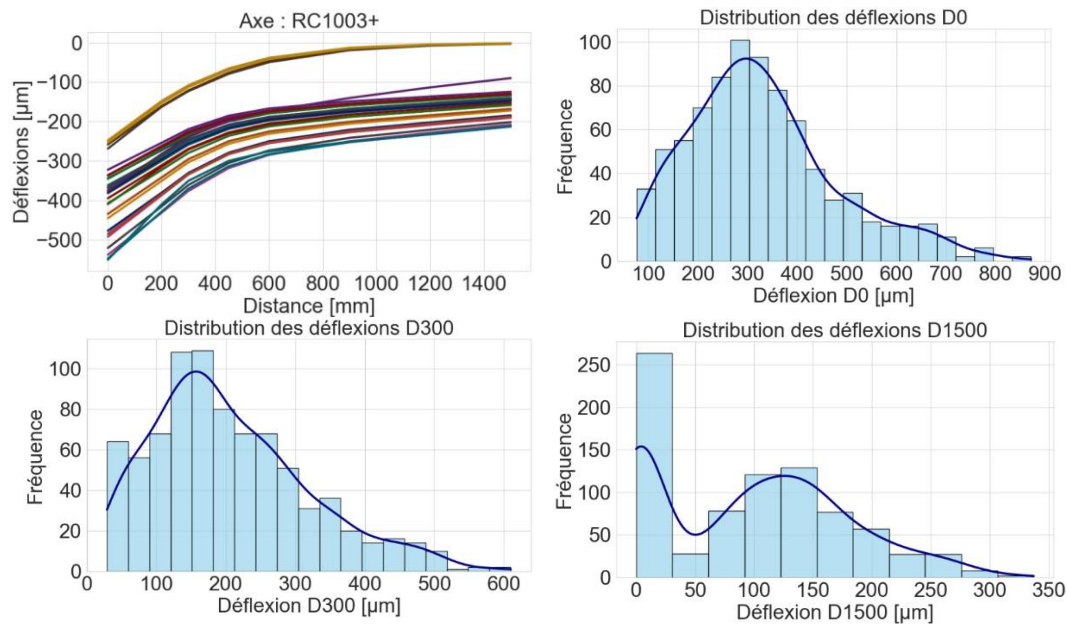


Figure 31 : Exemple de bassins de déflexions mesurés par le TSD - Distribution des données aux capteurs 0, 300 mm et 1500 mm

Afin d'identifier la source de l'anomalie observée sur les bassins de déflexion, une analyse approfondie a été menée sur les données mesurées par le TSD. Cet appareil utilise des lasers à effet Doppler pour mesurer des vitesses de déflexion. Comme mentionné dans le chapitre 2.1.2 afin d'intégrer l'effet de la vitesse du véhicule, une pente de déflexion est calculée selon l'équation (1) en prenant le ratio entre les vitesses de déflexion mesurées et la vitesse du véhicule.

Le processus d'intégration qui permet d'estimer les déflexions de la chaussée à partir des mesures de pentes, a été analysé en détail dans le but d'identifier la source de la différence de bassin de déflexions observée sur les données du TSD. Ce processus d'intégration pourrait être une source d'accumulation des erreurs, contribuant ainsi aux divergences constatées entre les bassins de déflexions.

Selon la littérature, la méthode Area Under The Curve (AUTC) peut être utilisée pour calculer les déflexions à partir des pentes mesurées par le TSD. Cette méthode exploite les vitesses de déflexion mesurées par plusieurs lasers pour déterminer les déflexions jusqu'à une distance spécifiée de la charge [16].

L'hypothèse suivante est prise en compte lors de l'implémentation de cette méthode : Pente nulle à une distance éloignée de la charge (3.08m).

Un modèle d'interpolation est ensuite employé pour établir une fonction continue à partir des pentes de déflexion mesurées. La méthode AUTC utilise une fonction PCHIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolator Polynomial) afin de réaliser une interpolation entre les différentes pentes capturées par le TSD. Les déflexions sont ensuite calculées par estimation de l'aire sous la courbe générée par cette fonction d'interpolation. Cette intégration est effectuée entre une position x et l'asymptote de la courbe à 3.08 m.

Les résultats de cette méthode comparée aux données reçues sont présentés dans la Figure 32.

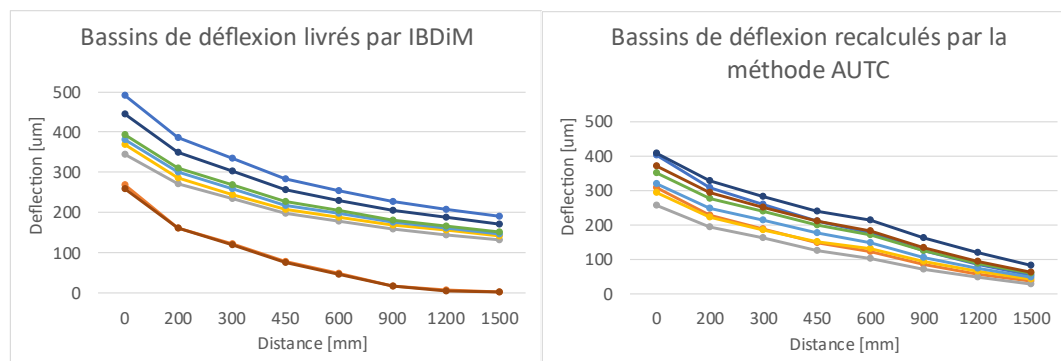


Figure 32 : Comparaison entre les bassins de déflexions estimés et reçues

Une amélioration de l'homogénéité des bassins de déflexions a été constatée grâce à l'implémentation de la méthode AUTC sur les données collectées en Suisse, comme le montre la Figure 32. Cependant, une proportion importante des données n'a pas pu être intégrée en raison de la présence de valeurs négatives de pentes qui ne sont pas plausibles du point de vue physique.

L'article publié en 2017 par le programme de recherche et d'innovation sur les routes de l'Australie occidentale (WARRIP) [52] a révélé certaines conditions sous lesquelles le TSD ne parvient pas à générer une vitesse de déflexion optimale pour l'analyse. Dans ces cas, un résultat de laser invalide est caractérisé par une valeur négative ou nulle, ce qui se produit généralement lorsque des chaussées rigides sont mesurées. Un logiciel de post-traitement est alors utilisé pour analyser ces données et pour produire un résultat valide lorsque trois lectures de vitesses successives positives sont présentes.

En effet, il est attendu que les vitesses de déflexion mesurées soient positives pour correspondre à un tassement de la chaussée sous l'effet de la charge. Toutefois, les données collectées en Suisse révèlent que la majorité des mesures de pentes de déflexion sont négatives pour les capteurs les plus éloignés de la charge. La Figure 33 présente le pourcentage de pentes de déflexion négatives détectées sur l'ensemble des zones auscultées.

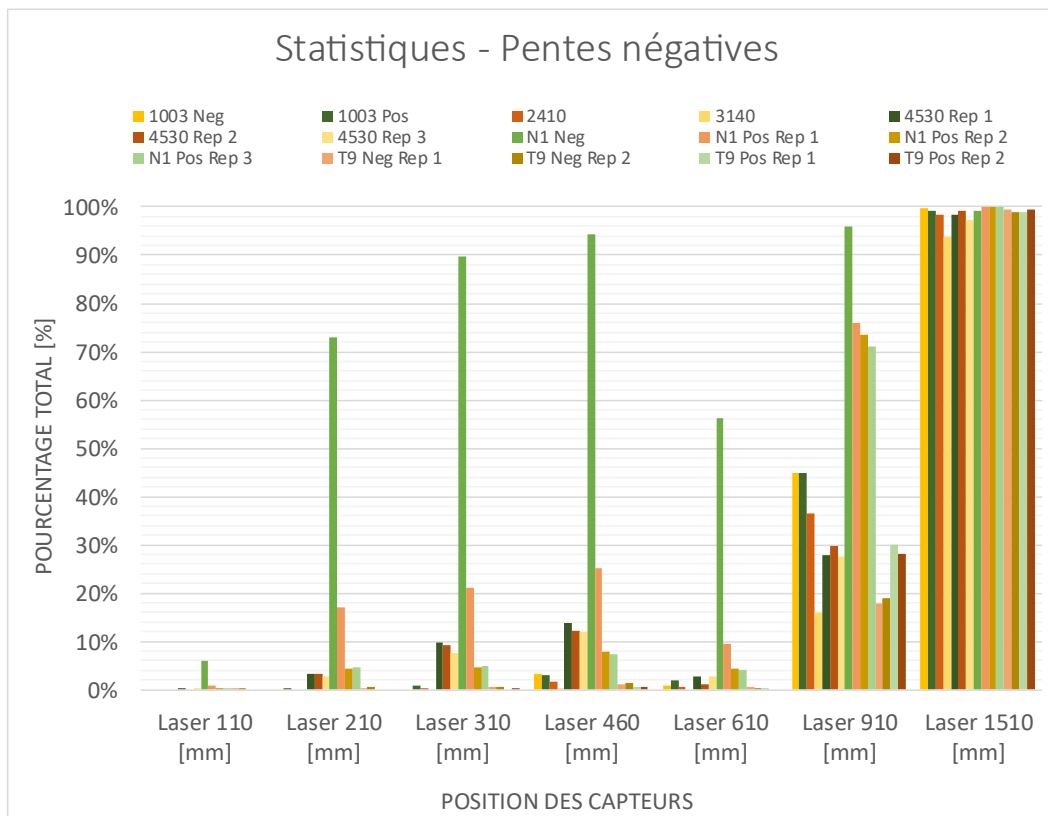


Figure 33 : Pourcentage total des pentés négatives détectées sur toutes les zones mesurées

Comme le montre cette figure, toutes les valeurs enregistrées par le laser positionné à 1510 mm de la charge sont négatives, de même qu'une grande proportion des valeurs mesurées par le laser à 910 mm.

Sur la N1- entre Essert-Pittet et Yverdon-les-Bains, la structure de la chaussée étant stabilisée, une grande proportion des données recueillies par l'ensemble des capteurs est négative. Cela suggère que ces valeurs de pentés négatives sont principalement enregistrées sur des structures rigides. Cela pourrait être expliqué par le fait que le capteur de référence, positionné à une distance éloignée de la charge, est toujours dans la zone d'influence de la charge des essieux arrière et avant. Ce capteur est censé enregistrer une pente de déflexion nulle à une distance éloignée de la charge. Cependant, ni les valeurs mesurées par ce capteur, ni sa position exacte ne sont documentées par le fabricant.

Un exemple de mesure sur une structure souple et une structure rigide est présenté dans les figures ci-dessous.

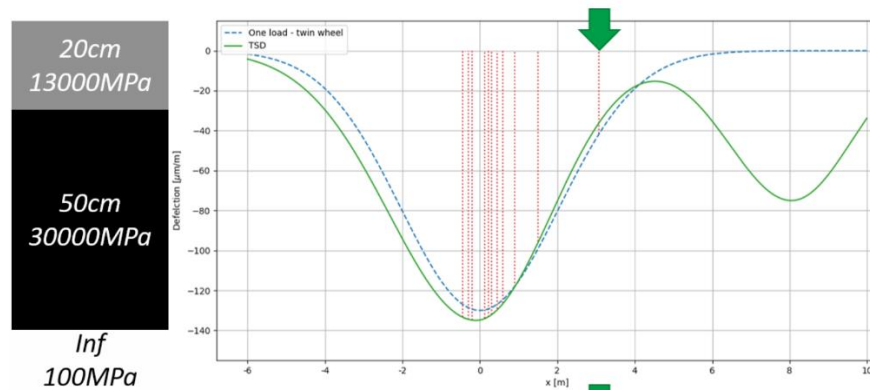


Figure 34 : Pentas de déflexions mesurées sur une structure rigide [53].

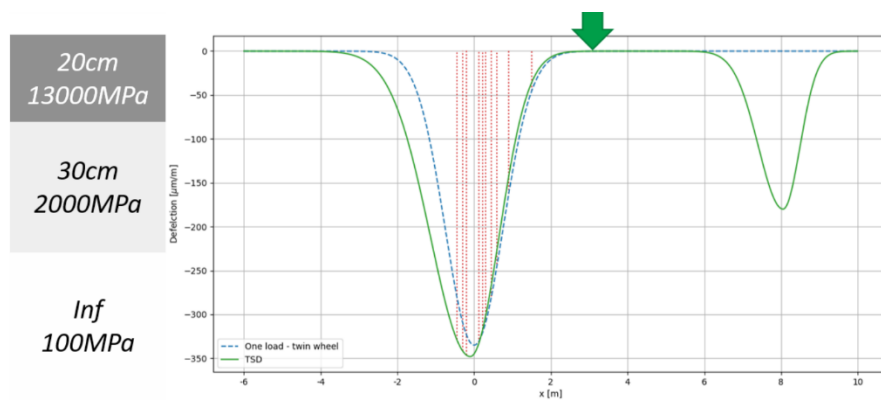


Figure 35 : Pentas de déflexions mesurées sur une structure souple [53].

Sur la Figure 34, il est observable que le capteur de référence, même à une distance éloignée de la charge, mesure une vitesse de déflexion qui n'est pas nulle. En revanche, sur une structure souple, une vitesse de déflexion nulle est mesurée par ce même capteur.

Dans les données de déflexion du TSD, un indicateur de la qualité de l'ajustement de la fonction d'interpolation, le Goodness of Fit (GoF), est fourni. Cet indicateur est utilisé pour filtrer une grande proportion de ces pentes négatives, en retenant uniquement les points de mesure où le GoF est supérieur à 0.85.

En analysant les données des vitesses de déflexion mesurées dans chaque zone du réseau routier suisse, il a été constaté que l'indicateur de performance (GoF) est généralement inférieur à 0.85 sur les zones rigides. Ces zones incluent la N1 (sens +) entre Nyon et Ecublens, où des dalles en béton font partie de la structure, ainsi que la N1 (sens -) entre Essert-Pittet et Yverdon, où la structure est stabilisée.

Concernant la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains), lorsque seuls les points de mesure présentant un GoF supérieur à 0.85 sont retenus, la majorité des mesures sont inexploitables. Sur 661 points de mesure, seulement 27 points isolés présentent un GoF > 0.85, représentant environ 4% des données mesurées.

Pour la N1+ (Nyon – Ecublens), en appliquant le même filtre, environ 77% des points ne seront pas filtrés et sont donc exploitables.

Comme il a été mentionné précédemment, une séquence de trois valeurs successives de vitesses de déflexion positives est nécessaire pour que le système de post-traitement puisse établir un bassin de déflexions. Sur la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains). La Figure 36 a) illustre la proportion du secteur où la condition de séquence de trois valeurs valables n'est pas respectée. La Figure 36 montre la proportion de bassins de déflexions qui sont définis et livrés bien que le critère de la séquence de trois valeurs valables ne soit pas respecté. La différence de proportion de validité des bassins entre les deux graphiques précédents indique que le système de post-traitement applique vraisemblablement une correction aux vitesses de déflexion brutes afin d'établir une séquence valable et définir un bassin de déflexions. Malheureusement, les détails de cette correction ne sont pas documentés et ne peuvent être analysés de manière critique.

Pour la suite de l'analyse et afin de comparer toutes les données recueillies à partir des trois appareils de mesure, aucun filtre n'a été appliqué.

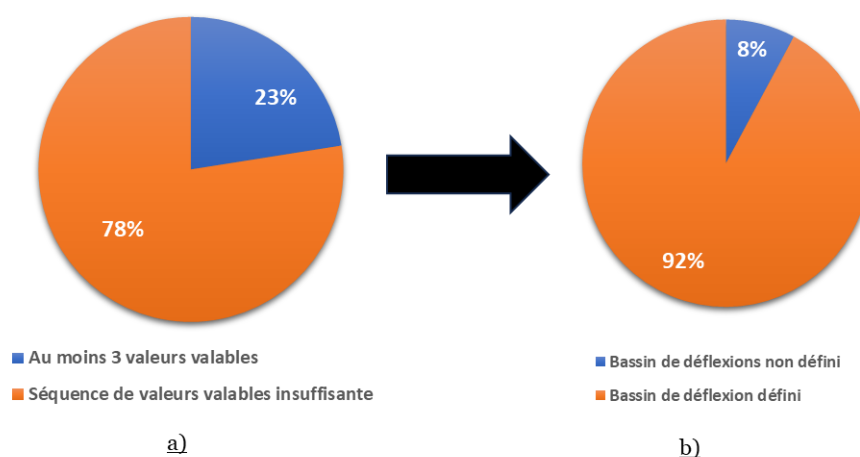


Figure 36 : a) Séquence de valeurs valables insuffisante. b) Proportion du secteur avec un bassin de déflexion défini

4.2 Données HWD

Les mesures récoltées à l'aide du HWD sont généralement réalisées en plusieurs drops (impacts) successifs sur le même point de mesure. Les premiers sont utilisés pour stabiliser l'appareil. Ainsi, afin d'éviter l'utilisation des données d'un drop de mise en place de la poutre de mesure, il est d'usage de mener l'étude en utilisant uniquement le 3ème et dernier drop.

4.3 Données RAPTOR

Les déflexions de la chaussée sous l'effet du poids du véhicule sont mesurées directement par le RAPTOR, et les données fournies par cet appareil ne nécessitent aucun

post-traitement. Seul l'alignement spatial des données des différents appareils a été contrôlé afin d'assurer que les mesures de déflexion correspondent à la même zone.

Les données livrées semblent a priori plausibles, puisque aucune incohérence particulière n'a été relevée sur les déflexions lors de leur analyse préliminaire.

5 Analyse de répétabilité des mesures

Dans ce chapitre, l'analyse de la répétabilité des mesures TSD et RAPTOR sera approfondie. La répétabilité représente une caractéristique importante afin de garantir la qualité et la fiabilité des mesures des deux appareils. Cette analyse permettra d'évaluer la consistance des mesures lorsqu'elles sont effectuées à plusieurs reprises sous les mêmes conditions. L'objectif sera de déterminer la variabilité des mesures et de vérifier si elles sont suffisamment fiables pour être utilisées à l'échelle d'un réseau routier. Des méthodes statistiques seront utilisées pour évaluer la répétabilité des mesures.

La répétabilité des mesures a été évaluée sur des zones homogènes spécifiques à chaque axe, sélectionnées pour garantir une cohérence dans les conditions de mesure. L'identification précise de ces zones est présentée au chapitre 6, où les critères de sélection et les localisations sont décrits en détail.

5.1 Répétabilité des mesures TSD

Lors de la campagne de mesure réalisée à l'aide du TSD, plusieurs passages ont été effectués par le véhicule pour relever la portance des structures dans les zones suivantes :

- Sur la N1+ (Nyon – Ecublens) entre le km 46 et le km 57, trois passages ont été réalisés entre 01:30 et 02:30 dans la nuit du 25.08.2022.
- Sur la RC 4530 (sens +) entre le km 7.6 et le km 9.6, trois passages ont été réalisés entre 04:00 et 04:15 dans la nuit du 25.08.2022.

Le véhicule TSD a réalisé trois passages sur la section T9 (sens -). Cependant, en raison de complications avec les coordonnées GPS sur cette section spécifique (Figure 22), il n'a pas été possible d'aligner les séries de données. En conséquence, une analyse de répétabilité pour cette partie du projet n'a pu être effectuée.

Ces passages répétés ont été effectués durant la nuit et à des intervalles de temps restreints pour s'assurer que les mesures soient réalisées dans des conditions très similaires.

5.1.1 Comparaison des mesures sous la charge

Une comparaison des déflexions sous la charge, notamment le Do, sera utilisée pour identifier les tendances et les similarités des relevés effectués sur chacune des sections (N1+ Nyon – Ecublens et RC4560+). Pour cela, une première étape consistant à aligner spatialement les données était nécessaire pour s'assurer que les déflexions mesurées

correspondent à la même zone. Les coordonnées GPS collectées par le véhicule ont permis d'ajuster les positions des déflexions, assurant ainsi calage précis entre les séries de données.

Mesures de la déflexion Do sur la RC4530 (sens+)

La Figure 37 et la Figure 38 présentent les déflexions Do mesurées lors des 3 passages sur la RC4530+. À partir de la Figure 37 (mesures brutes) et la Figure 38 (moyenne mobile de 20 points = 200 m), on peut remarquer que les déflexions mesurées sous la charge lors des trois passages du véhicule sur la RC4530+ présentent des profils très similaires y compris la coïncidence des pics de déflexion observés sur les trois séries.

Afin d'évaluer la répétabilité des mesures effectuées avec le TSD, il est utile de comparer les déflexions Do pour différents sous-secteurs lors de chaque répétition. Cette méthode permet d'évaluer la capacité du véhicule à identifier des zones de la chaussée avec une portance faible ou élevée avec une certaine fiabilité.

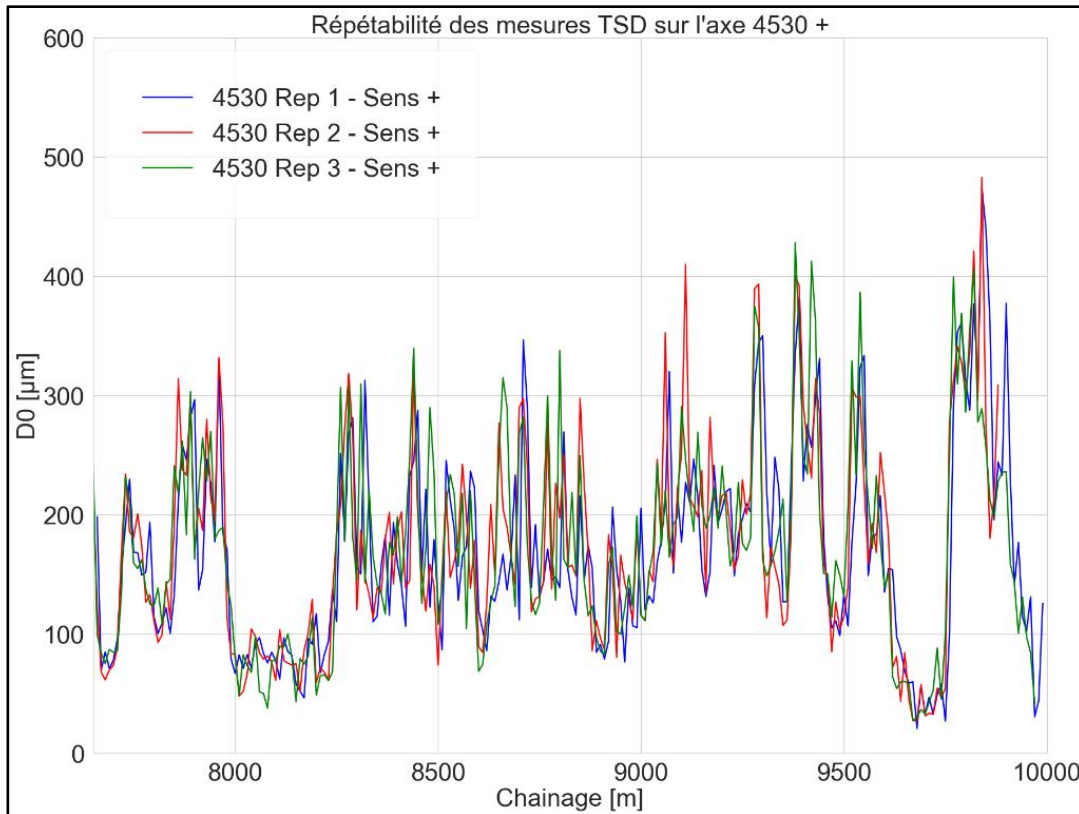


Figure 37 : Déflexions Do mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+)

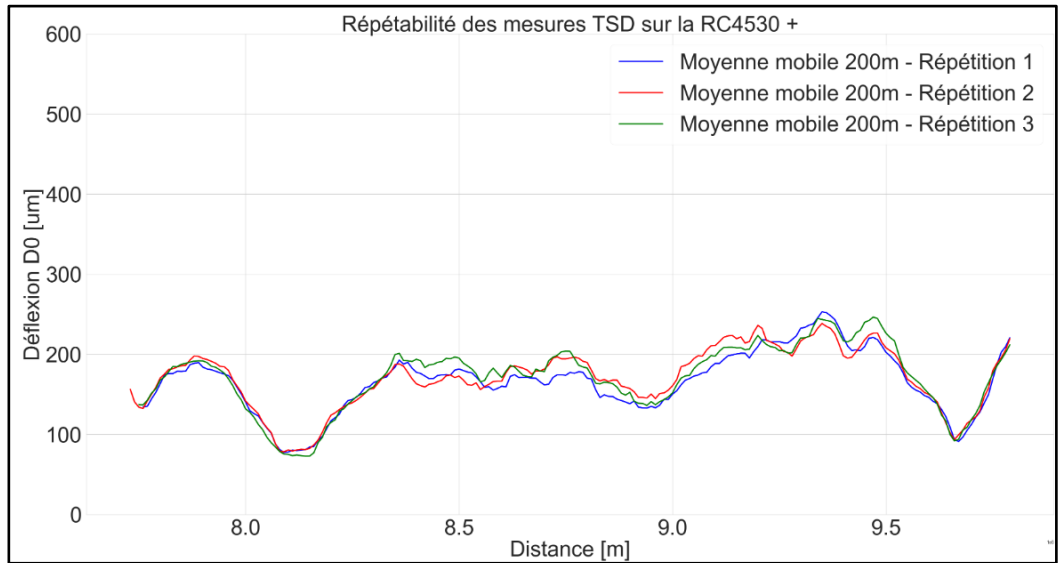


Figure 38 : Déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile

Les données de chaque répétition ont été groupées en trois zones homogènes afin de permettre une comparaison statistique des déflexions D0. Pour chaque répétition et chaque zone homogène, un diagramme en boîte (boxplot) a été utilisé pour représenter la médiane, les quartiles 25% et 75%, ainsi que la valeur minimale et maximale (voir Figure 39). Ceci permet d'identifier les similitudes entre les séries des trois passages du TSD. Cette figure met en évidence la stabilité de la médiane de déflexion D0 pour chaque zone homogène entre les différents passages du TSD. Bien que de légères différences de variabilité des données soient observées, cela démontre la capacité du TSD à produire des mesures répétables et à détecter de manière fiable un même état mécanique de la chaussée lors des différents passages.

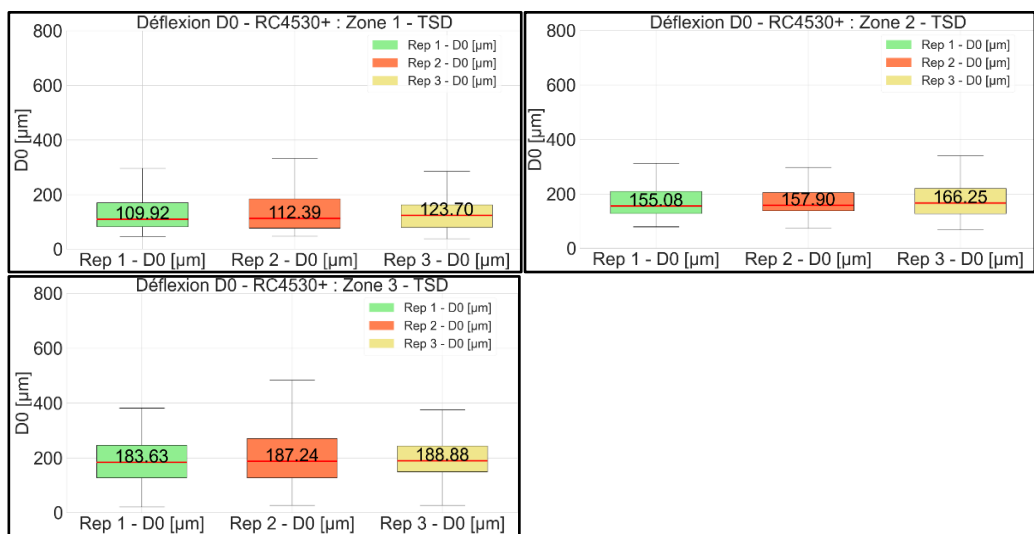


Figure 39 : Comparaison statistique des déflexions D0 mesurées sur les zones 1,2 et 3 lors de chaque passage du TSD sur la RC4530+

Mesures de la déflexion D_0 sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

La Figure 40 et la Figure 41 présentent les déflexions D_0 mesurées lors des 3 passages sur la N1+ (Nyon – Ecublens). À partir de la Figure 40 (mesures brutes) et la Figure 41 (moyenne mobile de 20 points = 200 m), on peut remarquer que les déflexions mesurées sous la charge lors des trois passages du véhicule sur la N1+ présentent des profils très similaires y compris la coïncidence des pics de déflexion observés sur les trois séries.

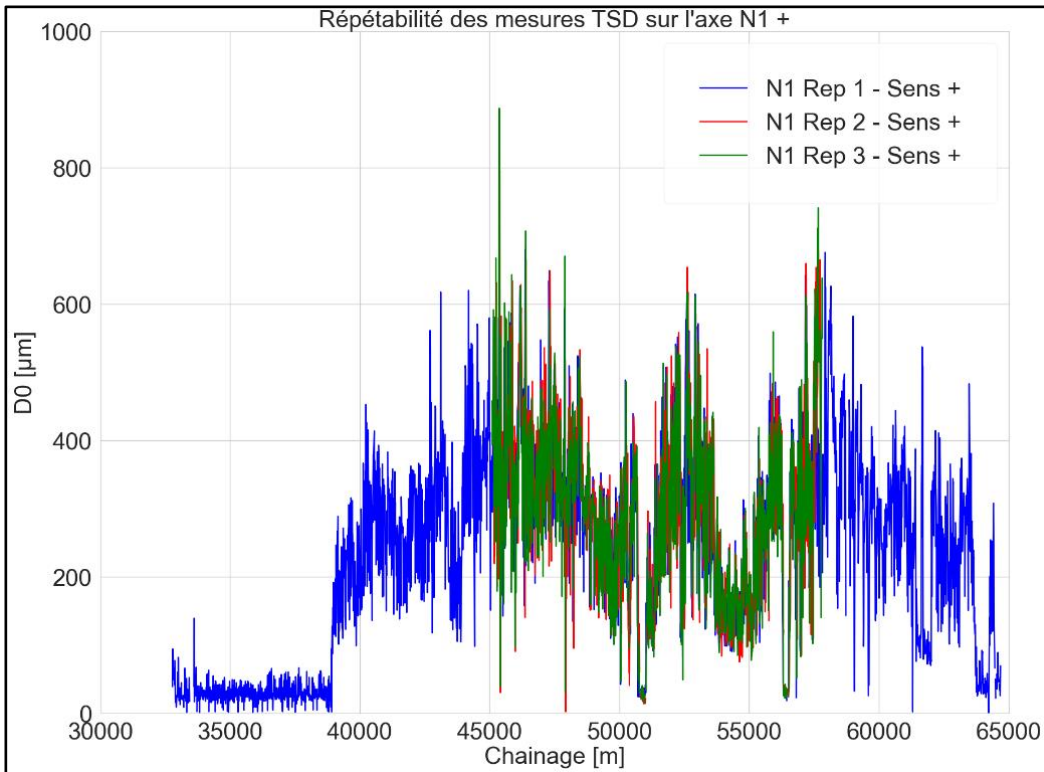


Figure 40 : Déflexions D_0 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

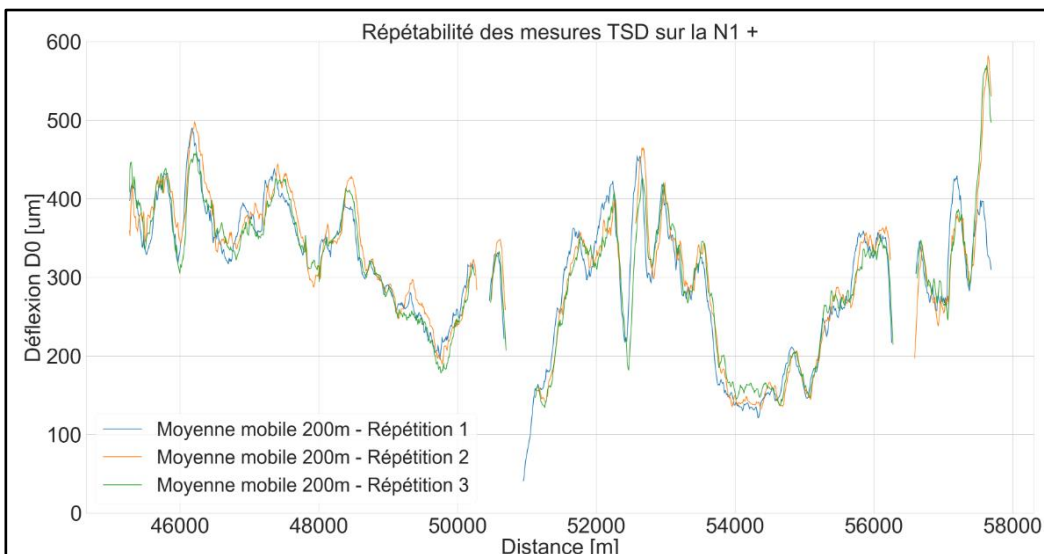


Figure 41 : Déflexions D_0 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens) – Moyenne mobile

Les données de chaque répétition sur la N1+ (Nyon – Ecublens) ont été divisées en quatre zones homogènes afin de permettre une comparaison statistique des déflexions. La comparaison des boxplots est présentée sur la Figure 42. Cette figure illustre la stabilité de la médiane de déflexion D_0 pour chaque zone homogène sur l'axe N1+ (Nyon – Ecublens) lors des différents passages du TSD. Bien que de très légères variabilités soient notées, ces observations confirment la capacité du TSD à fournir des mesures répétables et à détecter de manière fiable le même état mécanique de la chaussée, comme déjà observé précédemment pour l'axe RC4530+. Cette constance renforce la validité des données recueillies sur les deux axes, témoignant de la précision et de la fiabilité de l'instrumentation utilisée.

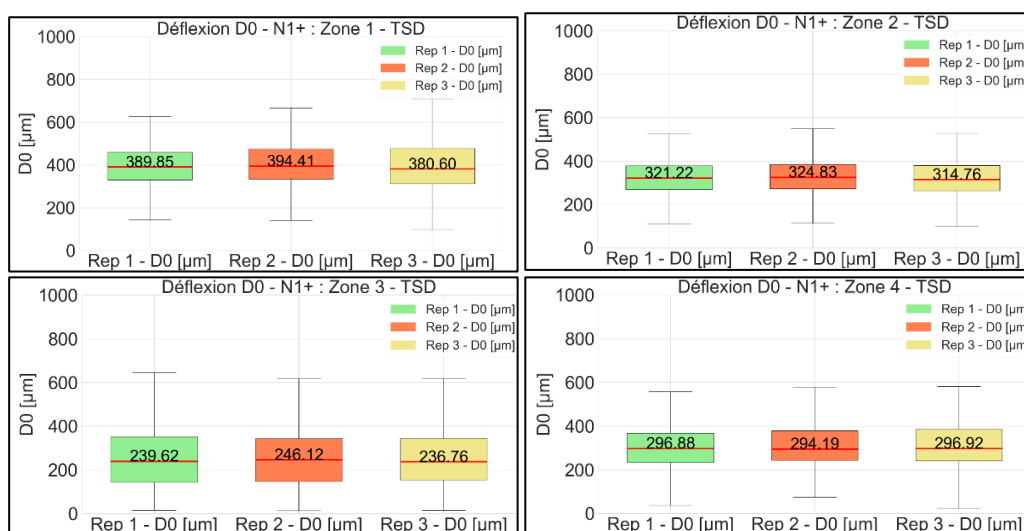


Figure 42 : Comparaison statistique des déflexions D_0 mesurées sur les zones 1, 2, 3 et 4 lors de chaque passage du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

5.1.2 Comparaison des mesures de la déflexion la plus éloignée de la charge

Lors de cette analyse de répétabilité, les déflexions les plus éloignées de la charge, en particulier le D_{1500} , seront utilisées comme second indicateur pour identifier les tendances et les similarités des relevés effectués sur chaque sections (N1+ Nyon – Ecublens et RC4560+) lors des différents passages. Cette approche permettra de déterminer la stabilité des mesures de déflexion dans des conditions de test similaires.

A noter que les statistiques sur la variation du capteur le plus éloigné sont à prendre avec beaucoup de précaution en raison de la nature de la distribution qui n'est pas normale. En effet, un part non négligeable des valeurs sont égales à la valeur exacte de zéro.

Mesures de la déflexion D_{1500} sur la RC4530 (sens+)

La Figure 43, Figure 37 et la Figure 44 présentent les déflexions D_0 mesurées lors des 3 passages sur la RC4530+. À partir de la Figure 43 (mesures brutes) et la Figure 44 (moyenne mobile de 200 m) on peut remarquer que les déflexions mesurées à 1500mm de la charge, lors des trois passages du véhicule, présentent des profils très similaires. Les pics de déflexion synchronisés sur les trois séries témoignent de cette cohérence.

Toutefois, des variations dans les amplitudes des déflexions sont visibles sur la Figure 44, indiquant quelques différences notables.

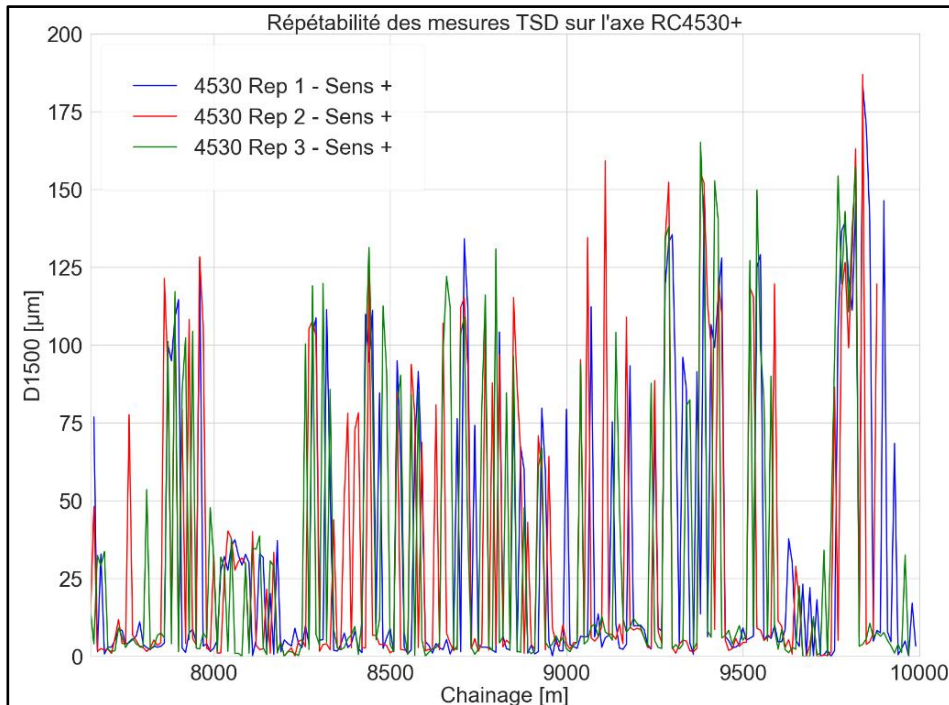


Figure 43 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+)

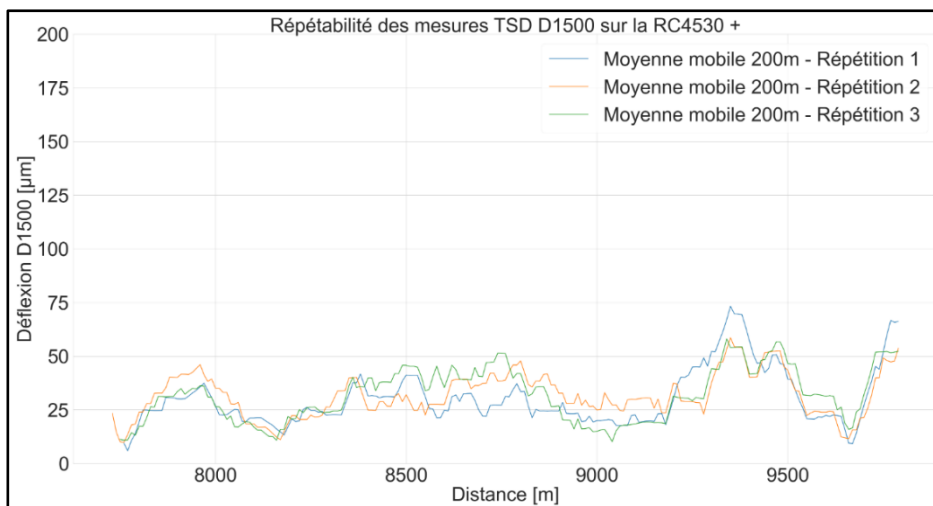


Figure 44 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile

La Figure 45 met en évidence la stabilité de la médiane de déflexion D1500 pour chaque zone homogène sur la RC4530+ lors des différents passages du TSD. Comme précédemment observé avec la déflexion D_0 , les médianes de D1500 restent très proches entre les passages. Toutefois, une variation dans la variabilité des mesures par zone homogène entre les passages est également perceptible.

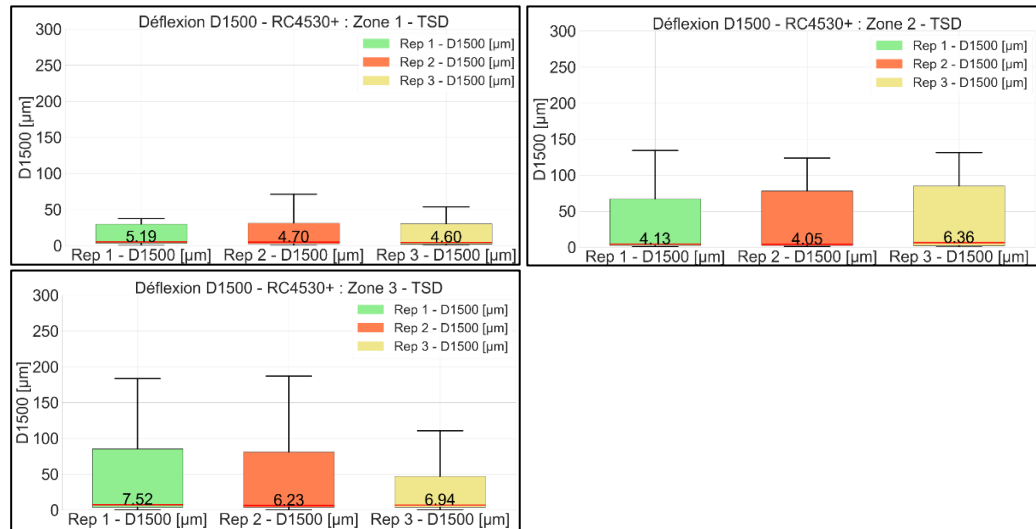


Figure 45 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du TSD sur la RC4530+

Mesures de la déflexion D1500 sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

La même analyse a également été réalisée sur la N1+ (Nyon – Ecublens). Les figures ci-dessous illustrent les mesures de la déflexion D1500 obtenues lors des trois passages du TSD.

L'analyse présentée sur la Figure 47 pour l'axe N1+ (Nyon – Ecublens) révèle une uniformité remarquable des déflexions à 1500mm de la charge lors des trois passages du véhicule, illustrant un comportement de la chaussée cohérent sur les séries mesurées. Bien que les profils des déflexions soient alignés, avec des pics qui coïncident parfaitement entre les passages, des variations dans l'intensité des déflexions sont également notées. Cette observation souligne une certaine constance dans la capacité du véhicule à identifier des états mécaniques de la chaussée similaires lors des différents passages.

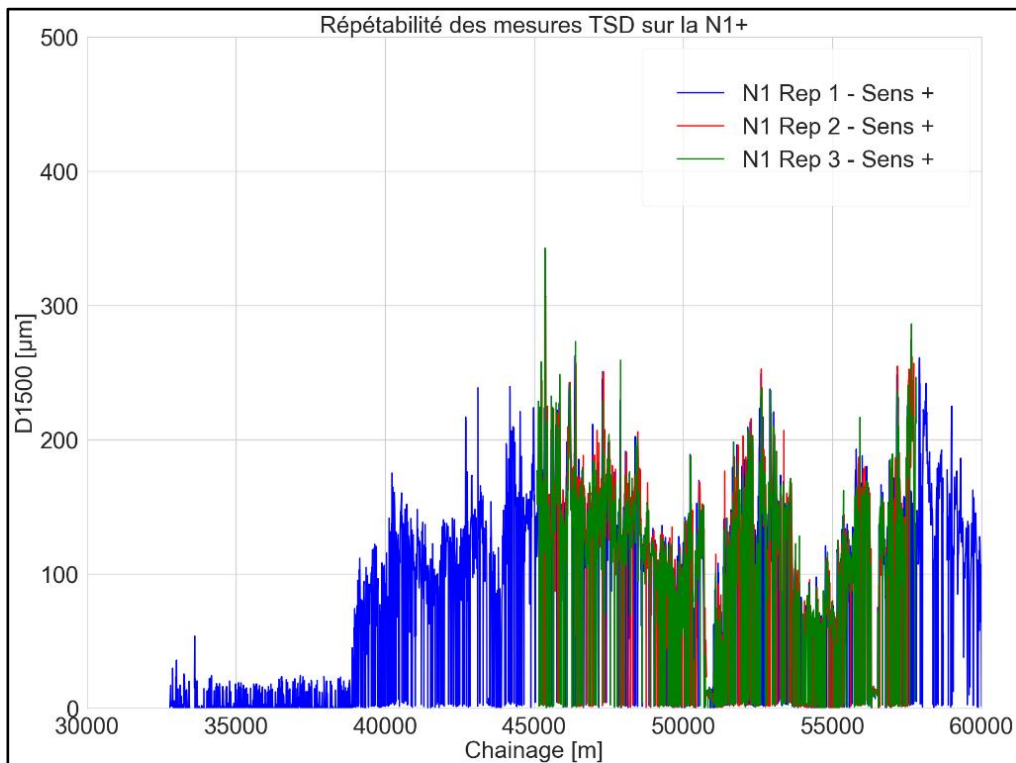


Figure 46 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

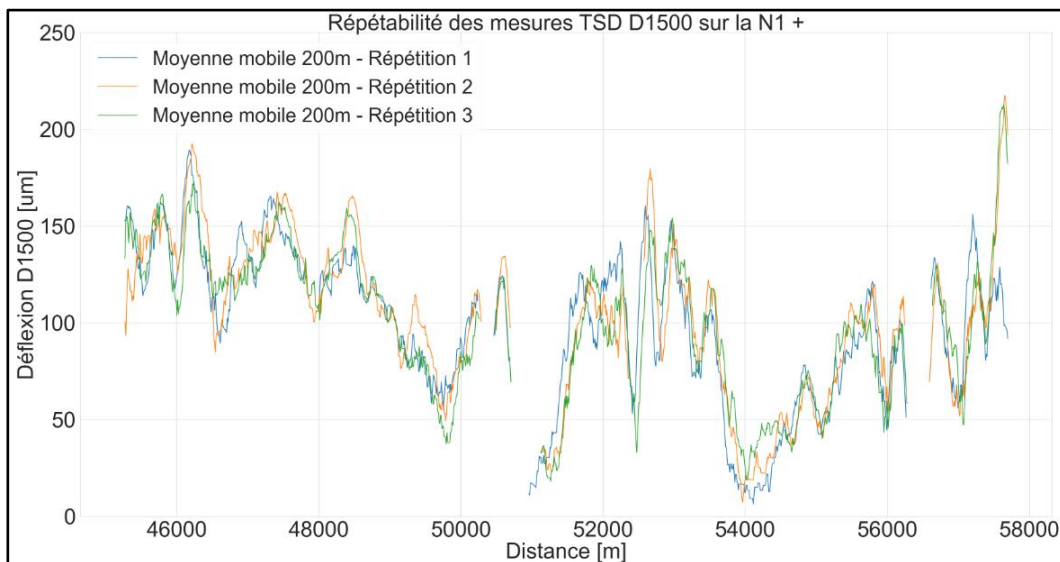


Figure 47 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens) – Moyenne mobile

Selon cette comparaison statistique, le TSD démontre une capacité à fournir des mesures de la déflexion D1500 remarquablement similaires lors des trois passages du véhicule. À l'instar de ce qui a été observé sur la RC4530+, les médianes des déflexions sont très proches, ce qui témoigne d'un comportement de la chaussée uniforme et consistant enregistré par l'appareil lors des trois passages. Toutefois, il est important de noter également la présence de quelques variations dans la variabilité des séries de données (Figure 48).

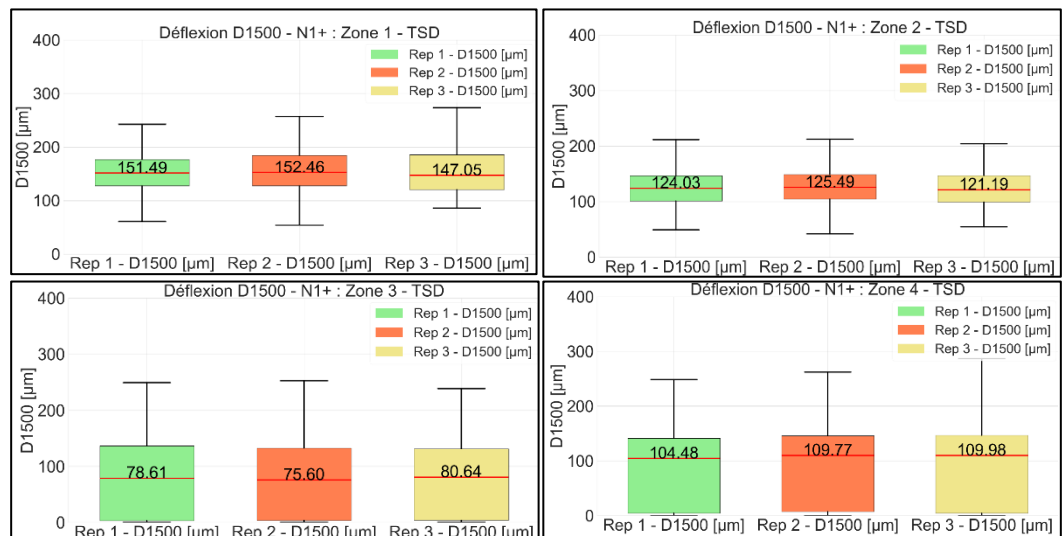


Figure 48 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du TSD sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

5.2 Répétabilité des mesures RAPTOR

Lors de la campagne de mesure réalisée à l'aide du RAPTOR, plusieurs passages ont été effectués par le véhicule pour relever la portance des structures dans les zones suivantes :

- Sur la N1+ (Nyon – Ecublens) entre le km 47 et le km 57, trois passages ont été réalisés entre 17:30 et 19:00.
- Sur la RC 4530 (sens +) entre le km 7.6 et le km 9.6, trois passages ont été réalisés entre 19:30 et 20:15.
- Sur la T9 (sens -) entre le km 61.0 et le km 68.6, trois passages ont été réalisés en 12:00 et 12:30

Ces passages répétés dans les mêmes secteurs ont été effectués durant des intervalles de temps restreints pour s'assurer que les mesures soient réalisées dans des conditions similaires, notamment en termes de température de la chaussée lors des mesures.

5.2.1 Comparaison des mesures sous la charge

Pour analyser la répétabilité des mesures du RAPTOR, une première étape consiste à comparer les déflexions mesurées directement sous la charge, le Do. Cette analyse nécessite l'identification des tendances et des similarités des relevés effectués sur chaque section lors des différents passages du véhicule.

Pour garantir la précision de cette comparaison, il a été essentiel d'aligner les données mesurées lors des différents passages afin de s'assurer que les déflexions correspondent à la zone d'étude. Cet alignement a pu être effectué à l'aide des coordonnées GPS enregistrées par le RAPTOR.

Mesures de la déflexion D0 sur la RC4530 (sens+)

La Figure 49 et la Figure 50 présentent les déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530+.

Les données obtenues à partir de la figure illustrent que les déflexions enregistrées sous charge, lors des trois passages du véhicule sur la RC4530+, présentent une grande similitude et suivent un profil cohérent. Cette observation démontre la capacité du RAPTOR à générer des mesures de portance répétables.

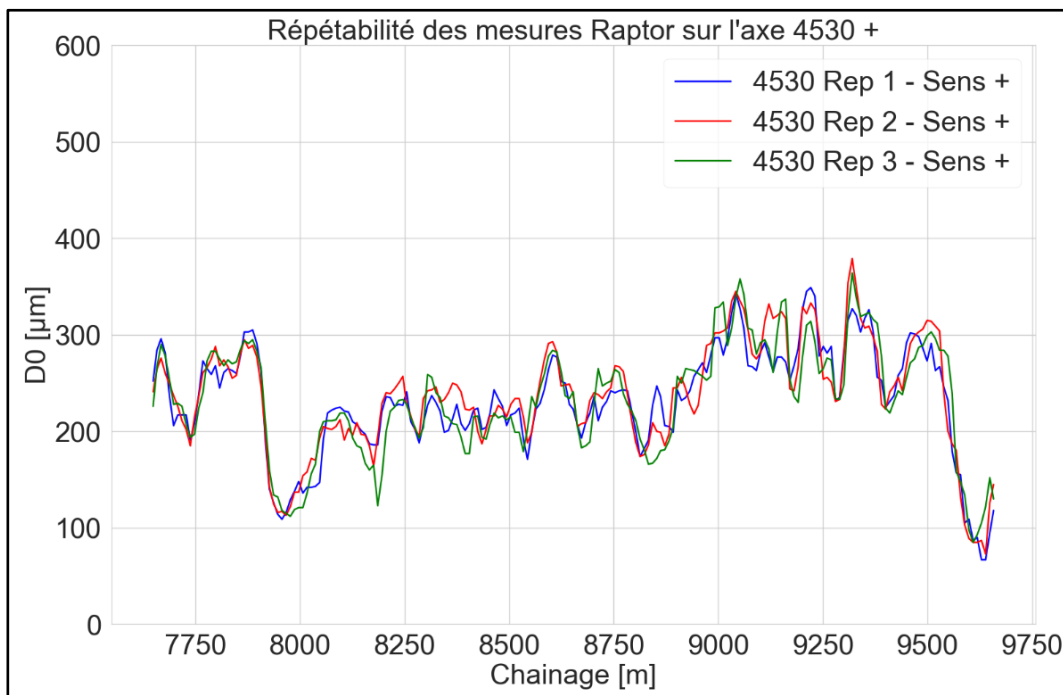


Figure 49 : Déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+)

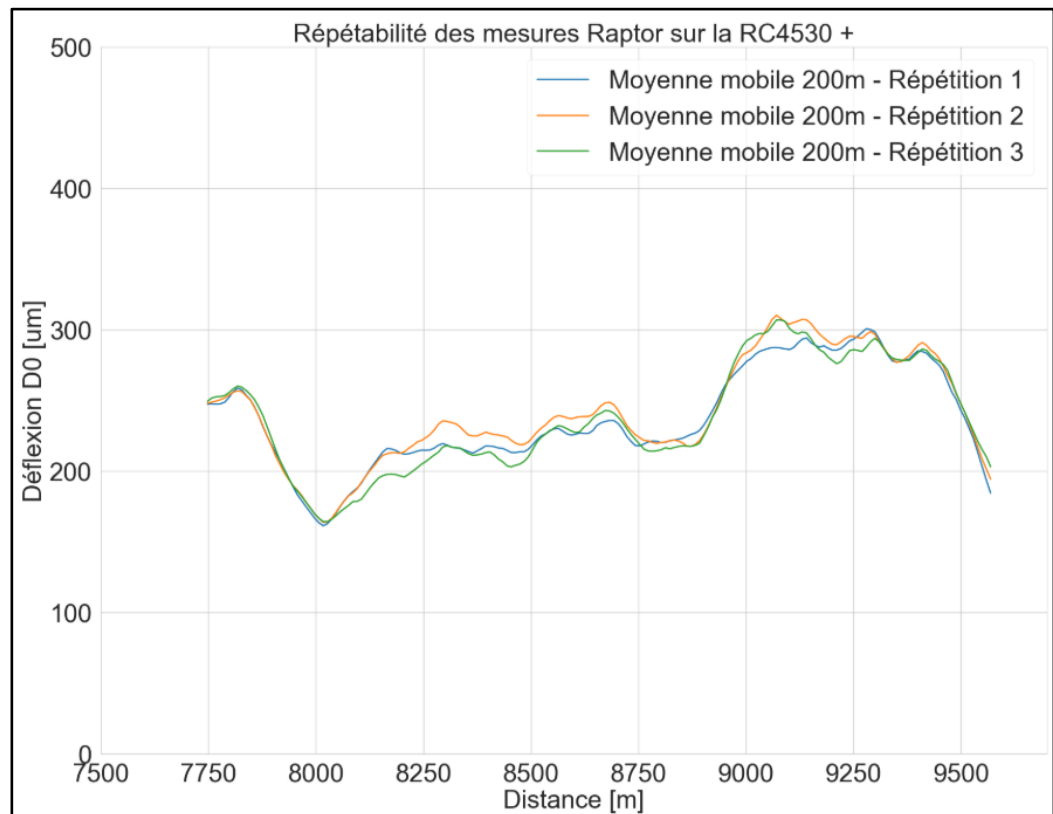


Figure 50 : Déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile

Pour évaluer la répétabilité des mesures obtenues avec le RAPTOR, une analyse comparative des déflexions D0 pour différentes zones homogènes a été effectuée lors de chaque passage du véhicule. Cette approche permet de déterminer la fiabilité du véhicule à détecter des variations de portance, qu'elles soient faibles ou élevées, au sein de la chaussée. À cette fin, la route RC4530+ a été subdivisée en trois zones homogènes. La Figure 51 illustre une analyse statistique des déflexions D0 enregistrées lors de trois passages consécutifs sur chaque zone, utilisant des boxplots pour une comparaison visuelle et quantitative.

Les résultats des trois séries de mesures réalisées par le RAPTOR sur la RC4530+ montrent que, pour chaque zone analysée, les médianes et la variabilité des mesures sont remarquablement similaires. Cette consistance confirme l'efficacité du RAPTOR à détecter de manière fiable les zones présentant des faiblesses en termes de portance sur les routes cantonales.

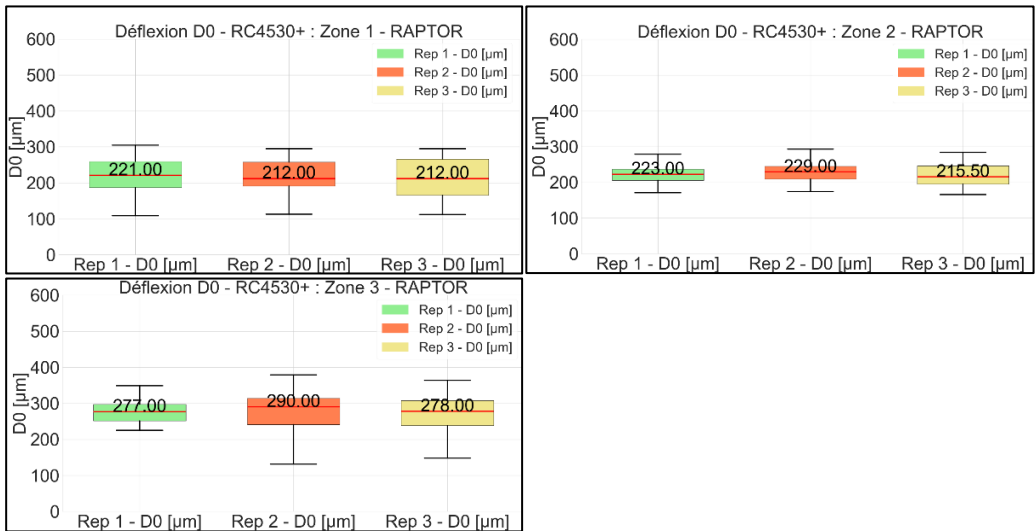


Figure 51 : Comparaison statistique des déflexions D0 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la RC4530+

Mesures de la déflexion D0 sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

La Figure 52 et la Figure 53 présentent les déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens).

Sur ce segment d'autoroute, les trois passages du RAPTOR ont produit des résultats globalement similaires, permettant une évaluation cohérente des zones à faible portance, caractérisées par des déflexions D0 élevées, ainsi que des zones plus rigides avec des déflexions D0 plus faibles. La similitude des profils de données obtenus lors de chaque série de mesures confirme la capacité du RAPTOR à fournir des mesures fiables sur les tronçons d'autoroutes.

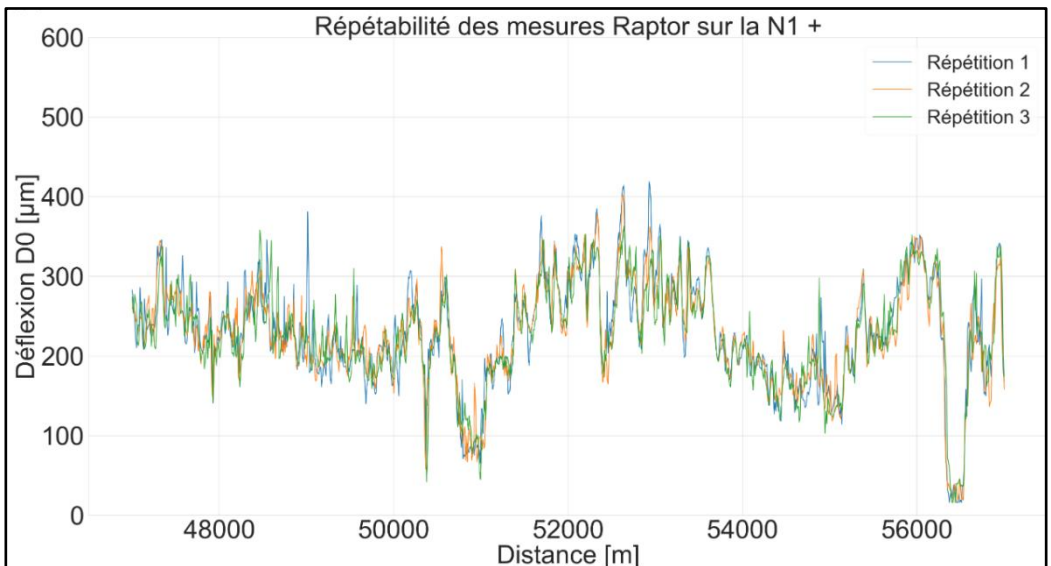


Figure 52 : Déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

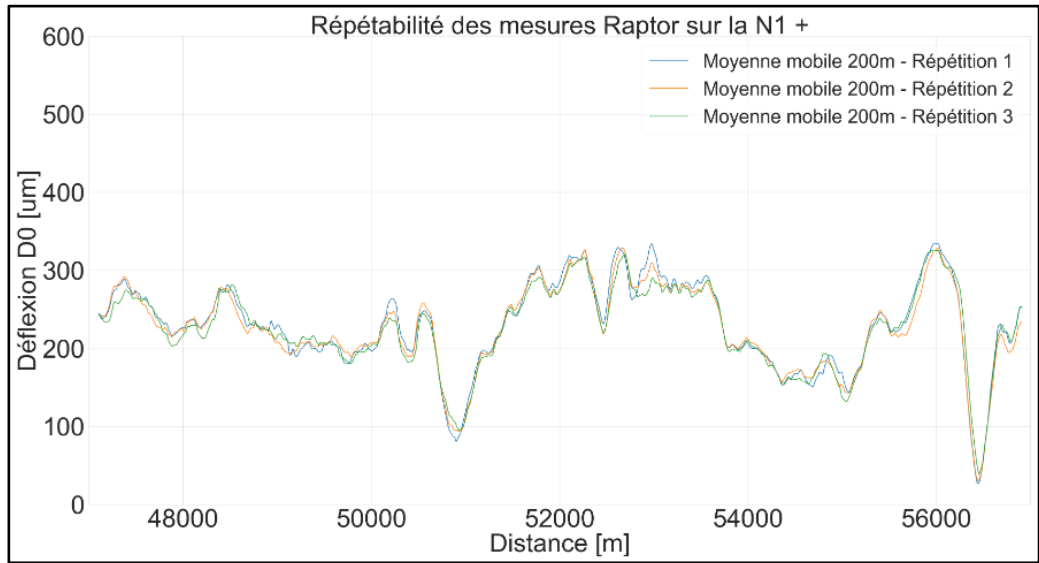


Figure 53 : Déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens) – Moyenne mobile

Cette observation est également appuyée par l'analyse statistique présentée dans la Figure 54, qui compare les déflexions D0 mesurées sur les zones homogènes identifiées sur la N1+ (Nyon – Ecublens). Cette comparaison statistique renforce la validité des résultats obtenus avec le RAPTOR, démontrant sa capacité à évaluer de manière fiable la portance sur les différents segments routiers.

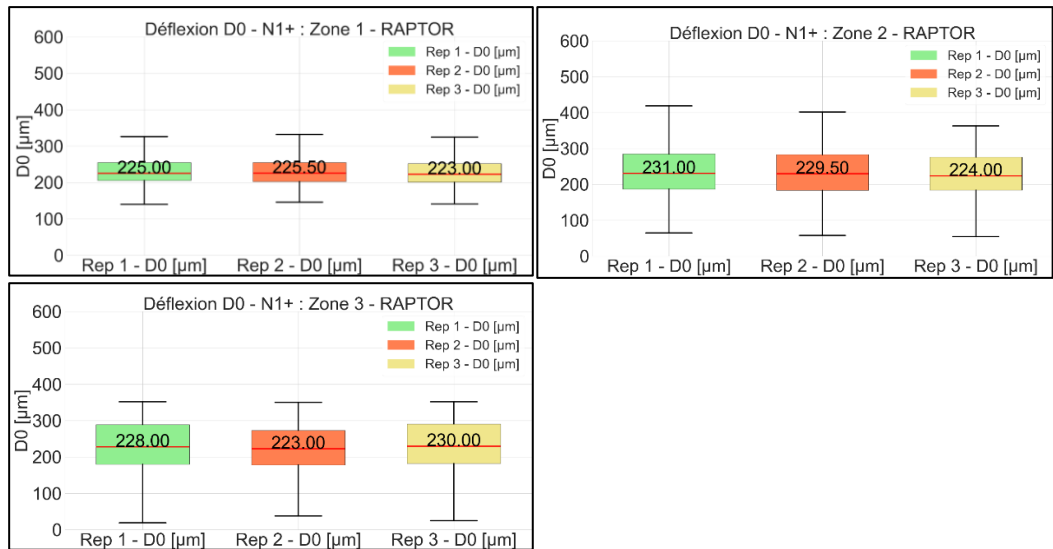


Figure 54 : Comparaison statistique des déflexions D0 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

Mesures de la déflexion D0 sur la T9 (sens-)

La Figure 55 présente les déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la T9-.

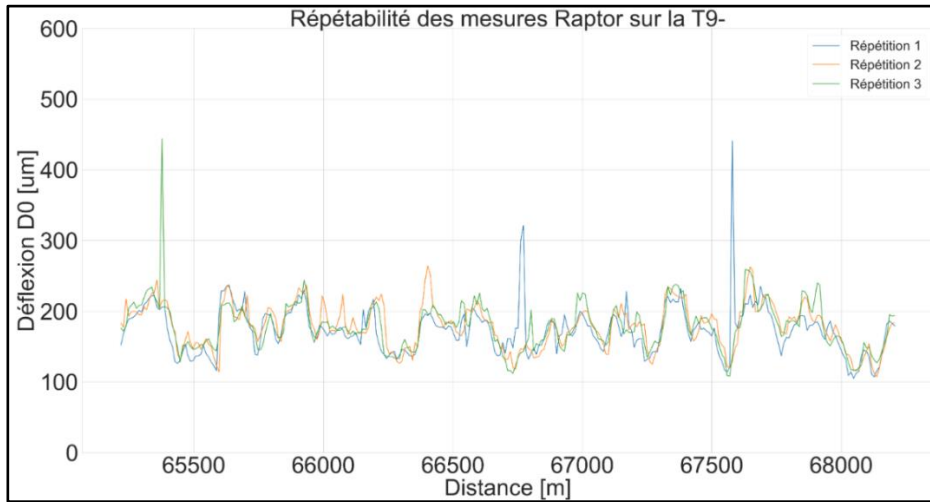


Figure 55 : Déflexions D0 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la T9 (sens-)

Sur ce segment d'autoroute, les trois passages du RAPTOR ont produit des résultats globalement similaires, offrant ainsi une évaluation cohérente des zones à faible portance, caractérisées par des déflexions D0 élevées, ainsi que des zones plus rigides où les déflexions D0 sont plus faibles. Cependant, certaines variations plus élevées observées lors de certaines répétitions pourraient résulter de mesures effectuées sur différentes traces de roues, entraînant localement des différences dans les déflexions D0 mesurées.

Cette observation est également vérifiée par l'analyse statistique présentée dans la Figure 56, qui compare les déflexions D0 mesurées sur les zones homogènes identifiées sur la T9-. Les médianes des trois mesures sur les deux zones homogènes sont très similaires. Toutefois, ces trois répétitions présentent quelques différences en termes de variabilité des mesures.

Cette comparaison statistique renforce la validité des résultats obtenus avec le RAPTOR, démontrant ainsi sa capacité à évaluer de manière fiable la portance des différents segments routiers.

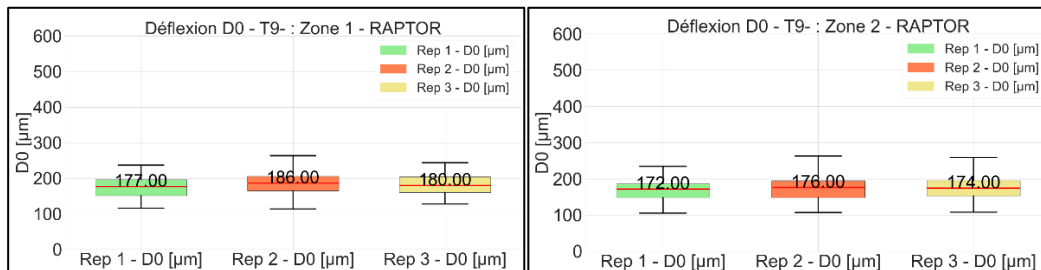


Figure 56 : Comparaison statistique des déflexions D0 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

5.2.2 Comparaison des mesures de la déflexion la plus éloignée de la charge

Dans cette étude de répétabilité, les déflexions mesurées à une distance considérable de la charge, spécifiquement le D1500, seront employées comme un deuxième indicateur pour identifier les tendances et les similitudes entre les relevés effectués sur les différentes sections (N1+ Nyon – Ecublens et RC4560+) lors de passages multiples. Cette méthode vise à évaluer la constance des mesures de déflexion sous des conditions de test homogènes.

Mesures de la déflexion D1500 sur la RC4530 (sens+)

La Figure 57 et la Figure 58 présentent les déflexions D0 mesurées lors des 3 passages sur la RC4530+.

Les graphiques analysés révèlent une répétabilité remarquable des mesures de déflexion D1500 effectuées par le Raptor sur l'axe RC4530+, mettant en évidence la capacité de l'appareil à générer des données cohérentes et fiables, même pour les mesures les plus éloignées de la charge. La Figure 57 illustre des profils de déflexion similaires à travers trois passages, avec des pics alignés, bien que des fluctuations d'amplitude soient observées. La Figure 58, qui applique une moyenne mobile de 20 points (200m), atténue ces variations et démontre une congruence accrue entre les passages, confirmant ainsi la constance et la précision des mesures du Raptor sur des échelles plus larges. Ces résultats confirment la fiabilité et la répétabilité de l'appareil pour des évaluations de la portance de la chaussée et la durabilité des infrastructures routières.

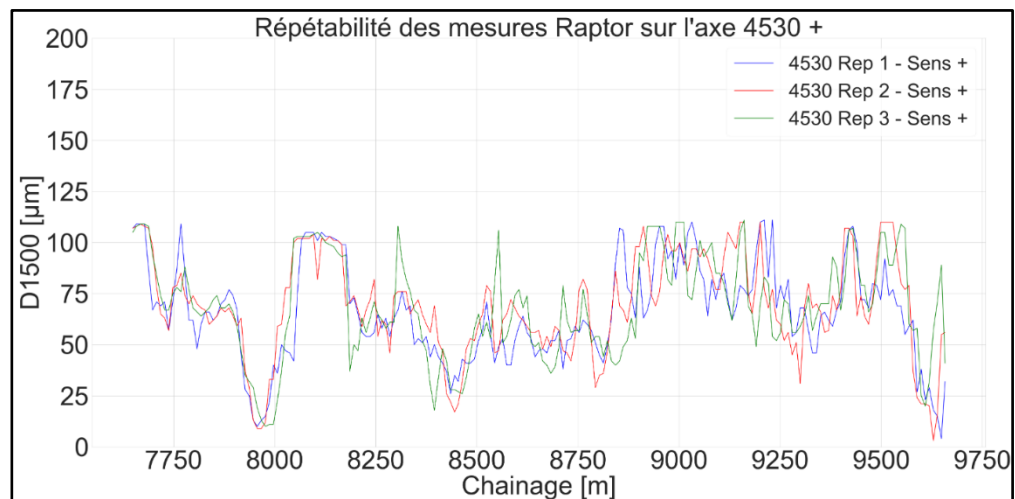


Figure 57 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+)

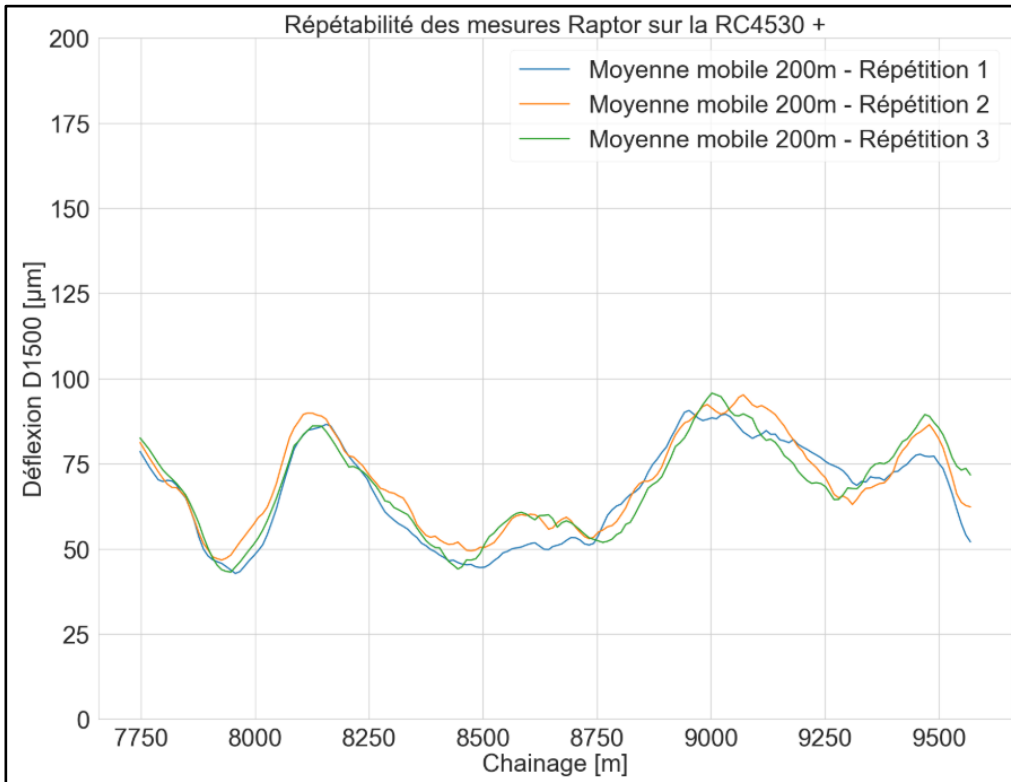


Figure 58 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la RC4530 (sens+) – Moyenne mobile

La Figure 59 illustre une répétabilité satisfaisante des mesures, caractérisée par des médianes relativement stables et une variabilité modérée entre les différents passages. Cette régularité indique que le RAPTOR produit des données fiables et cohérentes concernant les déflexions les plus éloignées de la charge, un élément crucial pour une évaluation précise de la portance de la chaussée.

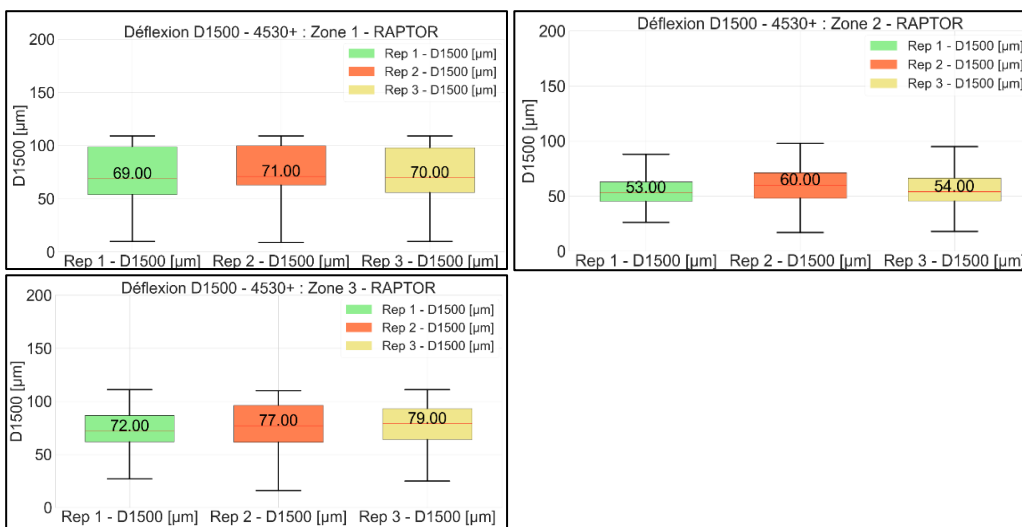


Figure 59 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la RC4530+

Mesures de la déflexion D1500 sur la N1+ (Nyon – Ecublens)

La Figure 60 et la Figure 61 présentent les déflexions DO mesurées lors des 3 passages sur la N1+ (Nyon – Ecublens).

Les graphiques présentés démontrent la répétabilité des mesures de déflexion D1500 effectuées par le Raptor sur l'axe N1+ (Nyon – Ecublens) lors de trois passages distincts. Bien que des fluctuations soient présentes, les données révèlent une remarquable constance des mesures, affichant des profils de déflexion similaires à travers les différents passages. Cette cohérence met en évidence l'efficacité du Raptor à produire des données fiables et répétables, qui sont cruciales pour l'évaluation précise de la durabilité et de la portance des infrastructures routières.

Ce constat est appuyé par la stabilité des médianes des déflexions D1500 observées pour chacune des zones homogènes, comme illustré dans la Figure 61. Les trois passages du RAPTOR produisent des mesures de la déflexion D1500 qui affichent une médiane stable dans chaque zone homogène, malgré une variabilité des mesures qui reste contenue. Ces résultats renforcent la fiabilité du dispositif à effectuer des mesures précises et constantes, essentielles pour une évaluation fiable de la structure de la chaussée.

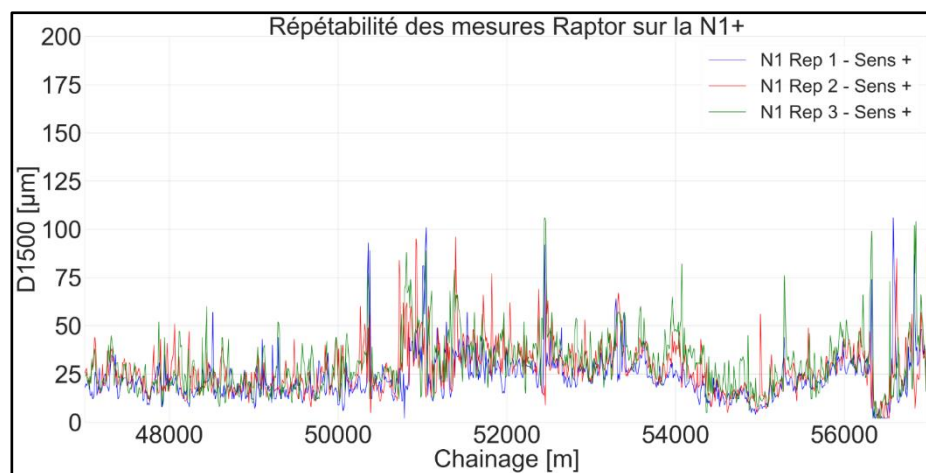


Figure 60 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N+ (sens+)

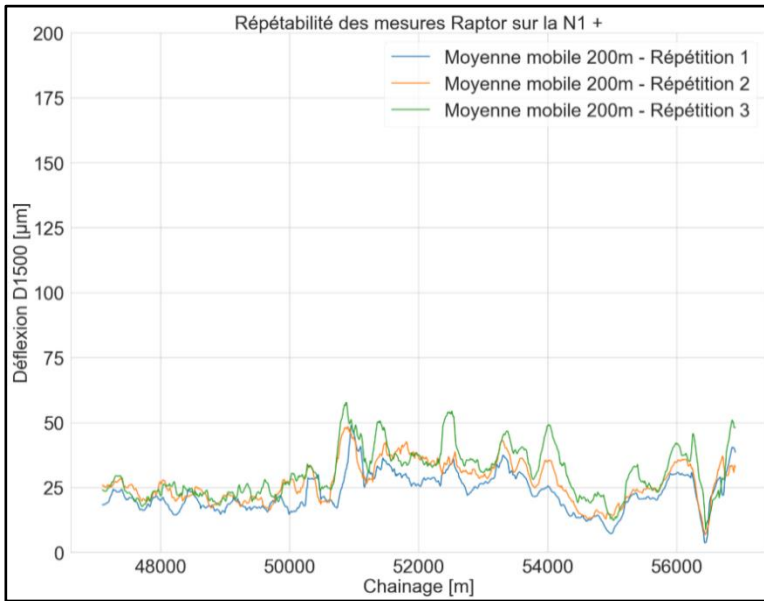


Figure 61 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du Raptor sur la N+ (sens+) – Moyenne mobile

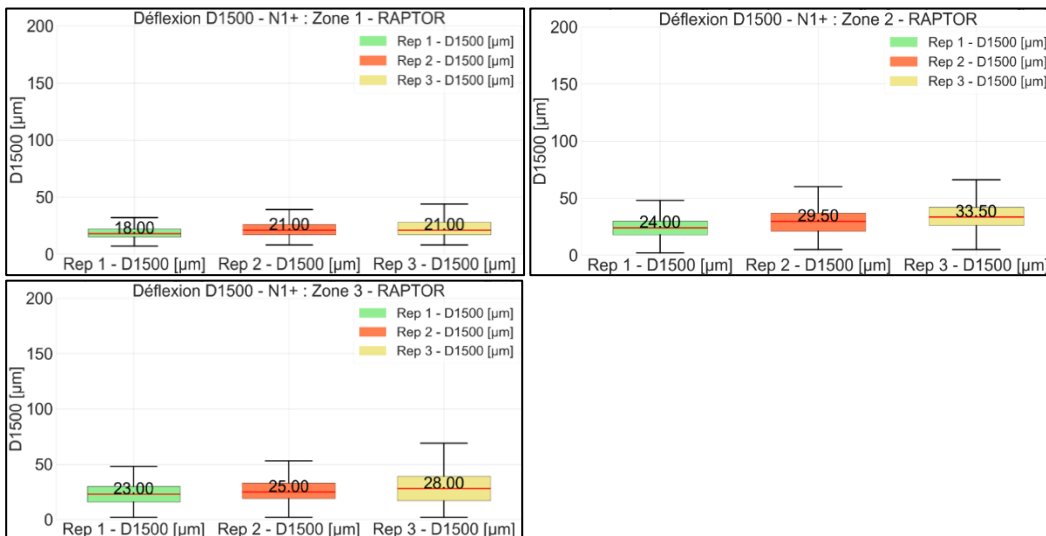


Figure 62 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du Raptor sur la N1+

Mesures de la déflexion D1500 sur la T9 (sens-)

La Figure 63 et la Figure 64 présentent les déflexions D_0 mesurées lors des 3 passages sur la T9-.

Les graphiques illustrés démontrent la répétabilité des mesures de déflexion D1500 réalisées par le Raptor sur l'axe T9- lors de trois passages distincts. Malgré la présence de légères fluctuations, les données montrent une constance notable, avec des profils de déflexion similaires à travers les différents passages. Cette cohérence souligne l'efficacité du Raptor à fournir des données fiables et répétables, essentielles pour une évaluation précise de la durabilité et de la portance des infrastructures routières.

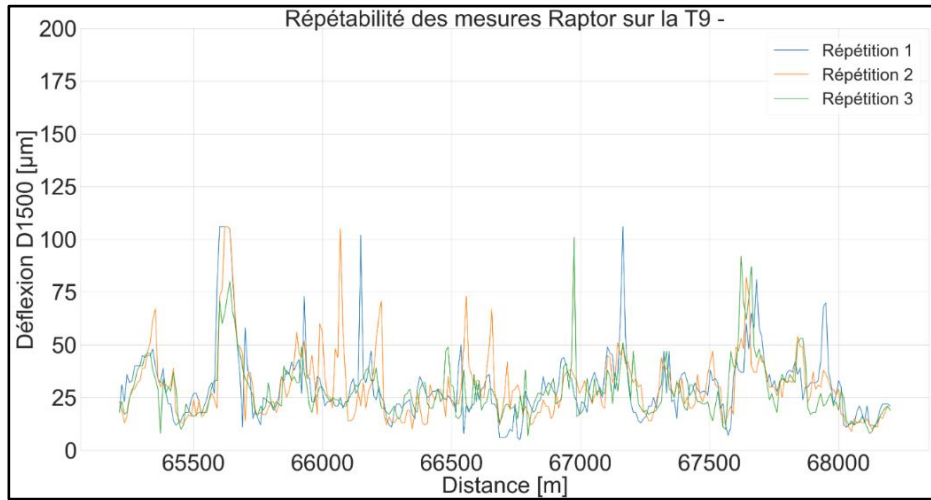


Figure 63 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N+ (sens+)

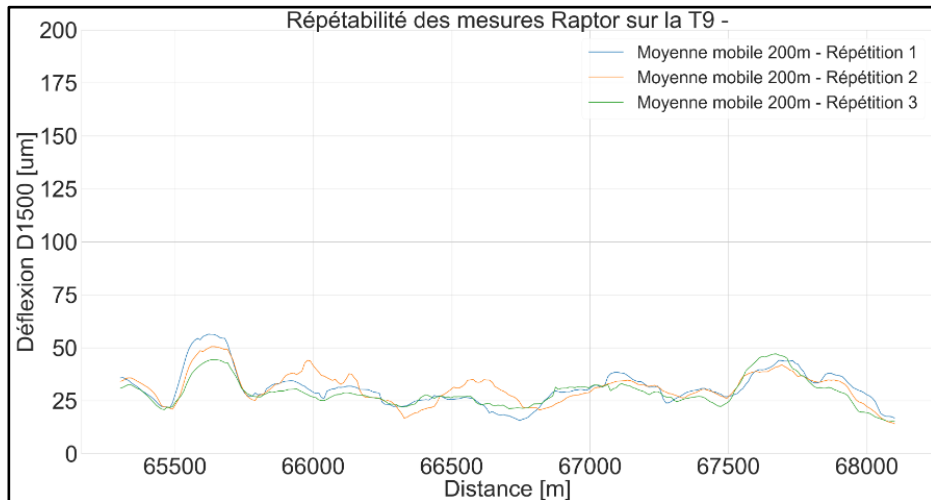


Figure 64 : Déflexions D1500 mesurées lors des 3 passages du RAPTOR sur la N+ (sens+) – Moyenne mobile

La comparaison statistique, présentée ci-dessous, permet de confirmer la capacité et la fiabilité de l'appareil à effectuer des mesures précises et constantes. Ces caractéristiques sont indispensables pour une évaluation fiable de la structure de la chaussée.

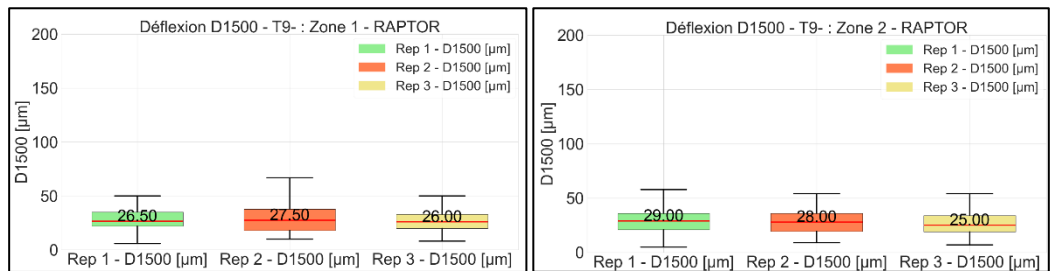


Figure 65 : Comparaison statistique des déflexions D1500 mesurées lors de chaque passage du RAPTOR sur la N1+

5.3 Discussion

À la suite de l'analyse des résultats présentés dans ce chapitre, il est conclu que les mesures réalisées par les appareils TSD et RAPTOR démontrent une excellente répétabilité, mettant en évidence une similarité notable dans les tendances observées sur divers types de chaussées. Ces instruments ont systématiquement identifié, lors des différents passages, des zones de faible portance avec des déflexions élevées et des zones plus rigides où les déflexions sont plus faibles.

Toutefois, certaines divergences d'amplitude entre les séries de données de chaque passage sont localement perceptibles. Ces variations pourraient être attribuées aux méthodes de calibration des positions de mesure qui s'appuient sur les coordonnées GPS du véhicule. Une imprécision de localisation pourrait ainsi provoquer un décalage dans les déflexions mesurées. De plus, la haute fréquence de mesure (tous les 1m) pourrait accentuer ce décalage, générant des écarts significatifs entre les séries de données.

Les variations observées lors des mesures peuvent également résulter de la position latérale du véhicule durant chaque passage, influençant ainsi les conditions de mesure. Par ailleurs, la dégradation de certaines zones de la chaussée peut aussi affecter les résultats. Bien que l'homogénéité de la structure routière puisse théoriquement réduire ces variations, en pratique, les chaussées présentent des inhomogénéités et peuvent varier selon l'emplacement latéral des mesures.

Les tableaux ci-dessous présentent une estimation statistique basée sur l'indicateur $1.96 \times Std(X)$, permettant d'évaluer et de comparer la répétabilité des mesures obtenues avec les appareils TSD et RAPTOR. Cet indicateur permet d'estimer l'intervalle de confiance à 95 % autour de la moyenne des répétitions, en supposant une distribution normale des valeurs. Il fournit une mesure de la dispersion des résultats et permet de comparer la stabilité des appareils (TSD et RAPTOR) pour un même tronçon.

Les résultats de répétabilité du TSD, exprimés à travers cet indicateur, mettent en évidence une variabilité modérée selon les répétitions. Pour l'indicateur D_0 , les valeurs de répétabilité varient entre 3 et 10 μm pour les trois zones homogènes l'axe RC4530+, et entre 1 et 16 μm sur les quatre zones homogènes de l'axe N1+ (Nyon – Ecublens). Concernant l'indicateur D_{1500} , les résultats sont plus stables avec des valeurs de répétabilité allant de 5 à 8 μm pour l'axe RC4530+ et de 1 à 9 μm pour l'axe N1+ (Nyon – Ecublens). Ces résultats montrent une bonne répétabilité du TSD.

Le RAPTOR présente une excellente stabilité de mesure, avec des écarts-types globalement plus faibles que ceux observés pour le TSD. Pour l'indicateur D_0 , les valeurs de répétabilité varient de 5 à 8 μm sur les différentes zones homogènes de l'axe RC4530+, de 3 à 9 μm sur l'axe N1+ (Nyon – Ecublens), et de 3 à 11 μm sur l'axe T9-. Les mesures de D_{1500} sont également très cohérentes, avec des valeurs comprises entre 3 et 5 μm sur l'axe RC4530+, entre 5 et 10 μm sur l'axe N1+ (Nyon – Ecublens), et entre 1 et 4 μm sur l'axe T9-. Ces résultats confirment la haute répétabilité du RAPTOR.

Répétabilité des mesures Do TSD pour la RC 4530

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	139	145	136	9
Zone 2	170	175	180	10
Zone 3	195	198	197	3

Tableau 9 : Indicateur de répétabilité des mesures D0 TSD pour la RC 4530

Répétabilité des mesures Do TSD pour la N1+ Nyon – Ecublens

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	394	404	396	11
Zone 2	322	327	318	9
Zone 3	249	249	248	1
Zone 4	284	297	299	16

Tableau 10 : Indicateur de répétabilité des mesures D0 TSD pour la N1+ (Nyon – Ecublens)

Répétabilité des mesures D1500 TSD pour la RC 4530

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	22	26	20	6
Zone 2	31	36	39	8
Zone 3	40	36	35	5

Tableau 11 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 TSD pour la RC 4530

Répétabilité des mesures D1500 TSD pour la N1+ Nyon – Ecublens

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	146	145	140	6
Zone 2	113	117	113	4
Zone 3	76	76	77	1
Zone 4	86	95	94	9

Tableau 12 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 TSD pour la N1+ (Nyon – Ecublens)

Répétabilité des mesures Do RAPTOR pour la RC 4530

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	215	216	212	5
Zone 2	222	228	221	8
Zone 3	258	264	264	7

Tableau 13 : Indicateur de répétabilité des mesures D0 RAPTOR pour la RC 4530

Répétabilité des mesures Do RAPTOR pour la N1+

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	231	230	229	3
Zone 2	233	230	226	7
Zone 3	220	213	222	9
Zone 1	231	230	229	3

Tableau 14 : Indicateur de répétabilité des mesures D0 RAPTOR pour la N1+ (Nyon – Ecublens)

Répétabilité des mesures Do RAPTOR pour la T9-

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité
Zone 1	175	185	183	11
Zone 2	172	174	176	3

Tableau 15 : Indicateur de répétabilité des mesures D0 RAPTOR pour la T9-

Répétabilité des mesures D1500 RAPTOR pour la RC 4530

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	69	73	71	4
Zone 2	56	60	59	3
Zone 3	73	76	78	5

Tableau 16 : Indicateur de répétabilité des mesures D0 RAPTOR pour la RC 4530

Répétabilité des mesures D1500 RAPTOR pour la N1+

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	19	23	23	5
Zone 2	25	30	35	10
Zone 3	24	26	30	6
Zone 1	19	23	23	5

Tableau 17 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 RAPTOR pour la N1+ (Nyon – Ecublens)

Répétabilité des mesures D1500 RAPTOR pour la T9-

Zone homogène	Répétition 1 Moyenne [μm]	Répétition 2 Moyenne [μm]	Répétition 3 Moyenne [μm]	Répétabilité [μm]
Zone 1	32	32	29	4
Zone 2	30	29	28	1

Tableau 18 : Indicateur de répétabilité des mesures D1500 RAPTOR pour la T9-

6 Comparaison des données brutes

Les méthodes de mesure des déflexions utilisées par les trois appareils — TSD, RAPTOR et HWD — se distinguent par des différences fondamentales de conception et de mise en œuvre. Ces distinctions ont des implications sur la nature des données recueillies, leur précision, et leur sensibilité. Une analyse comparative efficace des données brutes mesurées par ces équipements nécessite une prise en compte rigoureuse des conditions spécifiques de mesure et des modes de chargement propres à chaque dispositif.

Ce chapitre est dédié à une exploration approfondie de ces facteurs pour assurer une comparaison pertinente et utile des données collectées, éclairant ainsi les nuances techniques et les implications pour l'analyse du comportement des chaussées.

L'analyse comparative commence par l'identification et la considération de zones homogènes en termes de caractéristiques structurelles. Le chapitre présente les différentes étapes de travail et le découpage en zone homogène des différents secteurs étudiés.

6.1 Découpage en zones homogènes

Cette section décrit la méthodologie employée pour le découpage en zones homogènes, une étape déterminante qui vise à isoler et à analyser les segments de chaussée ayant des caractéristiques similaires. Cette segmentation, conforme à la norme VSS 40 733b, permet une évaluation plus représentative des propriétés structurelles et fonctionnelles des chaussées qui se distinguent par une variabilité plus ou moins importante. L'identification de ces tronçons homogènes permet de comparer efficacement les mesures de portance collectées par les trois appareils sur des sections aux caractéristiques structurelles uniformes, tout en minimisant l'effet de divers facteurs de variabilité (par exemple la position latérale du véhicule, les points durs ou mous, etc.).

La segmentation en zones homogène s'appuie pour commencer sur des informations relatives au revêtement et à l'année de pose, recueillies à partir des bases de données routières, notamment MISTRA TRA pour les routes nationales, LOGO pour le canton du Valais, et la base de données du canton de Neuchâtel.

Sur la base de ces informations structurelle et d'âge, un premier découpage des routes a été réalisé. L'objectif de ce découpage est de regrouper les segments de chaussée

ayant des caractéristiques théoriques similaires, permettant ainsi une analyse plus cohérente et ciblée dans les phases ultérieures de l'étude.

L'étape suivante implique l'utilisation des données de déflexions sous la charge Do mesurées par le HWD. L'analyse de ces déflexions a permis d'affiner davantage le découpage des routes en identifiant les variations subtiles dans la réponse mécanique de la chaussée qui n'étaient pas perceptibles uniquement à partir des données structurelles issues des bases de données routières. Ce niveau d'affinement a été déterminant pour isoler des zones homogènes qui présentent non seulement une uniformité structurelle mais aussi une similitude dans leur comportement sous charge.

Le graphique de la Figure 66 illustre le découpage final des zones homogènes affiné en fonction des données HWD.

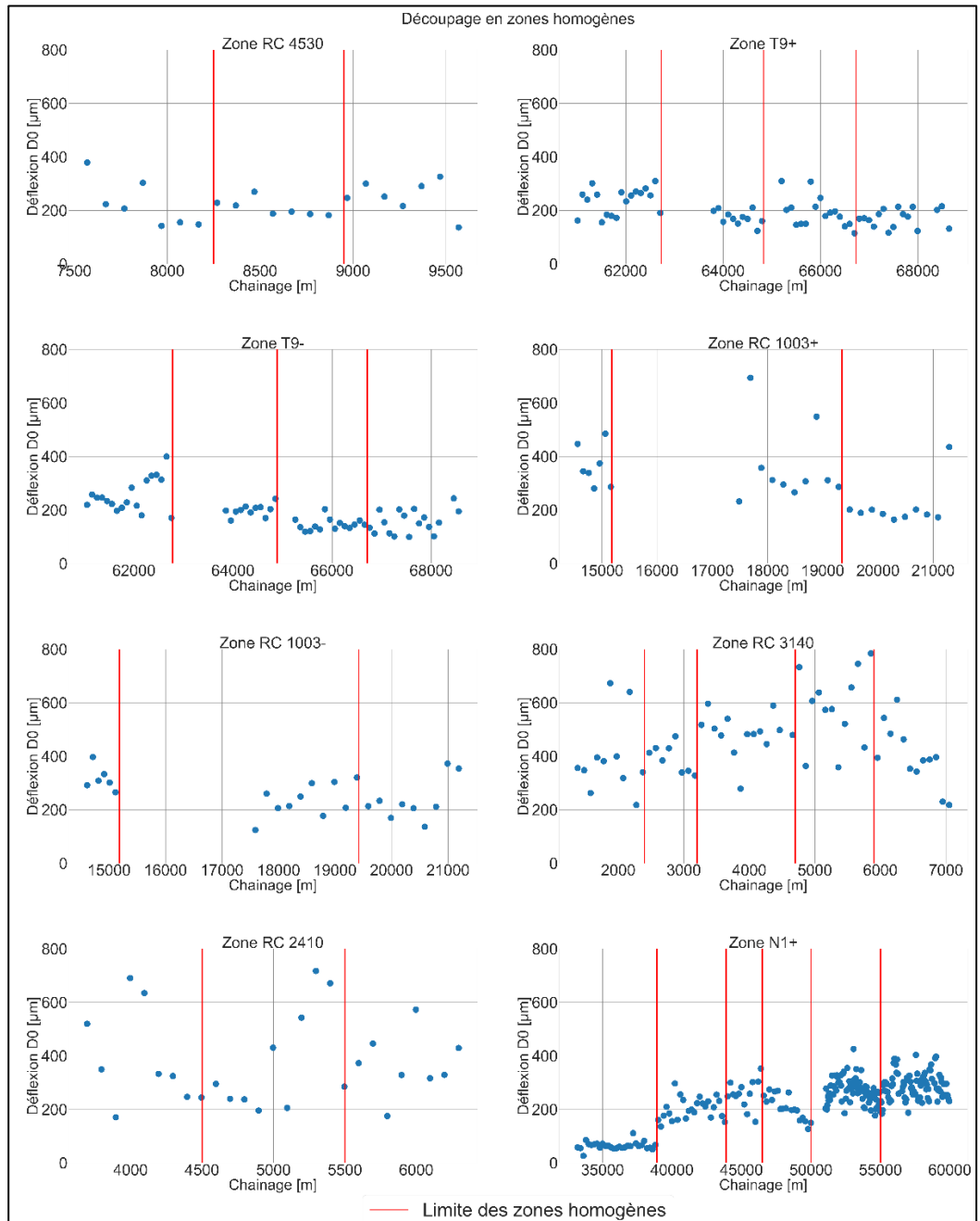


Figure 66 : Découpage en zone homogène des secteurs auscultés

À partir du découpage en zones homogènes établi précédemment, des statistiques ont été produites concernant la longueur des zones ainsi que les déflexions mesurées par le HWD. Ces statistiques permettent une analyse des variations structurelles et des caractéristiques de portance des différentes sections de la route.

Pour la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains), les données HWD n'étaient pas disponibles. Le découpage des zones homogènes a donc été réalisé exclusivement sur la base des informations structurelles disponibles. Les statistiques et l'analyse des zones ont été effectuées en utilisant les données relevées par l'appareil TSD, permettant ainsi de

classifier les segments de la route en fonction de leurs caractéristiques structurelles malgré l'absence de mesures HWD.

Les statistiques calculées pour chaque zone homogène sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Statistiques sur les zones homogènes								
Secteur	Zone hom.	Début [km]	Fin [km]	Longueur [m]	Moyenne Do [μm]	Ecart-type Do [μm]	CoV [%]	Dv [μm]
RC1003 +	Zone 1	14.6	15.2	600	366	77	21%	520
	Zone 2	17.5	19.3	1 800	361	145	40%	652
	Zone 3	19.5	21.3	1 800	211	80	38%	371
RC1003 -	Zone 1	14.6	15.1	500	316	45	14%	407
	Zone 2	17.6	19.4	1 800	236	62	26%	360
	Zone 3	19.6	21.2	1 600	235	78	33%	392
RC3140 +	Zone 1	1.4	2.4	995	394	141	36%	676
	Zone 2	2.5	3.2	696	393	52	13%	498
	Zone 3	3.3	4.7	1 393	508	114	22%	735
	Zone 4	4.8	5.9	1 094	583	142	24%	867
	Zone 5	6.0	7.0	1 094	401	114	29%	630
RC2410 +	Zone 1	3.7	4.5	800	391	182	47%	755
	Zone 2	4.6	5.5	900	382	197	52%	776
	Zone 3	5.6	6.3	700	371	116	31%	604
RC4530 +	Zone 1	7.6	8.2	600	222	89	40%	401
	Zone 2	8.3	8.9	600	210	32	15%	273
	Zone 3	9.0	9.6	600	253	63	25%	379
T9 +	Zone 1	61.0	62.7	1 696	236	49	21%	334
	Zone 2	63.8	64.8	997	173	26	15%	226
	Zone 3	65.2	66.7	1 496	193	56	29%	305
	Zone 4	66.8	68.6	1 845	172	34	20%	240
T9 -	Zone 1	61.1	62.8	1 700	255	61	24%	377
	Zone 2	63.9	64.9	1 000	199	22	11%	243
	Zone 3	65.3	66.7	1 400	145	21	15%	188
	Zone 4	66.8	68.6	1 800	156	44	28%	243
N1+ (Nyon – Ecublens)	Zone 1	33.2	38.8	5 600	64	14	22%	92
	Zone 2	39.0	43.8	4 800	202	39	20%	281
	Zone 3	44.0	46.4	2 400	259	53	20%	365
	Zone 4	46.6	50.0	3 400	208	45	22%	299
	Zone 5	51.0	55.0	3 916	269	46	17%	361
	Zone 6	55.0	59.9	4 938	287	49	17%	385
N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-B.)	Zone 1	87.1	87.7	599	29	11	36%	50
	Zone 2	87.71	91.09	3379	30	9	31%	49
	Zone 3	91.1	91.7	599	27	12	45%	51
	Zone 4	91.71	93.7	1989	51	55	107%	161

Tableau 19 : Statistiques sur les zones homogènes

Les statistiques relatives aux zones homogènes révèlent une stabilité marquée dans les mesures de déflexion Do, comme l'illustrent les Coefficients de Variation (CoV) généralement bas. Cette constatation confirme l'efficacité du découpage en zones homogènes, qui a produit des segments où, malgré la présence de variations, ces dernières sont proportionnelles et maîtrisées par rapport aux valeurs moyennes observées.

Dans la majorité des zones, les CoV sont inférieurs à 40%, mettant en évidence une homogénéité relative dans les propriétés mécaniques de la chaussée au sein de chaque zone délimitée. Cependant, une exception notable concerne la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains), où le découpage des zones a été réalisé exclusivement sur la base des informations structurelles disponibles dans la base de données MISTRA. Ceci atteste non seulement de l'adéquation de la segmentation des données pour l'analyse, mais aussi du fait que les variations constatées sont probablement attribuables aux caractéristiques intrinsèques des matériaux utilisés.

Par conséquent, cette méthode systématique de découpage en zones homogènes permet une comparaison plus précise des mesures de portance effectuées par chaque appareil de mesure sur des secteurs présentant un état homogène.

6.2 Comparaison des méthodes de mesure

Dans le cadre de cette étude, des données de déflexions ont été collectées à des intervalles variables sur chacune des zones auscultées, comme détaillé dans le chapitre 0.

Le HWD applique une impulsion sur la surface de la chaussée et mesure la déflexion à l'aide de 15 capteurs sous une charge d'environ 50 kN. Cependant, sur la N1+ (Nyon – Ecublens) entre le km 51 et le km 60, une charge d'environ 70 kN a été appliquée pour obtenir les mesures.

En ce qui concerne le TSD, les données de déflexion ont été collectées à intervalles réguliers de 10 m sur les différentes zones auscultées. Cet appareil est équipé de sept lasers positionnés avant la charge et de trois lasers après la charge. Les lasers sont montés sur une poutre située à droite de l'appareil, ce qui permet la mesure des vitesses de déflexion symétriquement par rapport aux deux roues jumelées de l'essieu arrière. Les données ont été enregistrées à la vitesse du trafic, avec une charge transmise à la chaussée par l'essieu arrière du véhicule. Les charges maximales appliquées par l'essieu arrière droit atteignaient environ 54 kN. Les déflexions sont estimées à partir des vitesses de déflexion enregistrées par le TSD à des emplacements spécifiques.

A l'aide du RAPTOR, les données de déflexion ont été collectées à des intervalles de 10 mètres sur les zones auscultées. Cet équipement est muni de dix capteurs disposés avant la charge. Les capteurs sont installés sur une poutre positionnée à la droite de l'appareil, facilitant ainsi la mesure des déflexions. Les données ont été capturées à la vitesse normale du trafic, avec une charge imposée à la chaussée par l'essieu arrière du véhicule. L'essieu arrière droit a appliqué des charges maximales d'environ 50 kN.

La répartition des capteurs, utilisés pour mesurer les déflexions pour chacun des appareils, est détaillée dans le tableau suivant :

Position des capteurs par rapport à la charge en millimètres

HWD	TSD	RAPTOR
-400	-450	0
-300	-300	100
0	-200	200
200	110	300
300	210	450
400	310	600
500	460	900
600	610	1200
750	910	1500
900	1510	1800
1050		
1200		
1500		
1800		
2100		

Tableau 20 : Position des capteurs rapport à la charge et par appareil

Le Tableau 21 met en évidence les différences entre les trois méthodes de mesure, notamment en ce qui concerne le mode de chargement appliqué, l'amplitude de la charge exercée sur la chaussée, ainsi que le positionnement des capteurs de mesure.

Modes de chargements par appareil

	TSD	HWD	RAPTOR
Mode de chargement	Charge roulante	Impulsion	Charge roulante
Amplitude de la charge	~ 50 kN	~ 50 kN	~ 50 kN
Position des capteurs	Entre les roues jumelées de l'essieu arrière	Sur la même ligne de chargement	Sur une largeur de 20 cm

Tableau 21 : Modes de chargements par appareil

6.3 Comparaison des déflexions sous la charge

Afin de permettre une comparaison des déflexions mesurées par les trois appareils, une correction linéaire est appliquée en fonction de la charge imposée par chaque dispositif de mesure. Cette correction est jugée valide étant donné que les déplacements mesurés sont faibles, et que le comportement des matériaux peut être admis comme linéaire dans ce contexte.

Une correction linéaire des déflexions à une charge de référence de 50 kN est réalisée avec la formule suivante :

$$D_{corr} = D0 \cdot \frac{50 \text{ kN}}{\text{Charge}} \tag{5}$$

Avec :

D_{corr} : la déflexion corrigée à la charge de 50 kN [μm]

D : la déflexion mesurée par l'appareil [μm]

Charge : la force nominale appliquée par l'appareil [kN]

La figure suivante présente la comparaison des déflexions entre les trois appareils et pour chaque zone.



Figure 67 : Comparaison des déflexions D0 corrigées en fonction la charge appliquée

Les mesures de déflexion effectuées par les trois appareils montrent une grande similitude. Ces instruments ont permis d'identifier les zones de faible portance de la chaussée, où les déflexions sont élevées, ainsi que les zones les plus rigides caractérisées par des déflexions plus faibles. Il est à noter que, de manière générale, les déflexions D_0 mesurées par le RAPTOR sont plus proches de celles mesurées par le HWD, tandis que les mesures du TSD présentent une variabilité plus marquée.

En ce qui concerne la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains), dont la structure est stabilisée, les mesures indiquent les déflexions les plus faibles par rapport aux autres zones. Par conséquent, il est attendu que les modules de rigidité estimés à partir des données des trois appareils soient les plus élevés dans cette zone. À l'inverse, les déflexions les plus élevées sont enregistrées sur la RC3140+, suggérant des modules de rigidité plus faibles.

Pour approfondir l'analyse statistique des déflexions D_0 mesurées par chaque appareil, l'utilisation de boxplots pour chaque zone homogène s'est révélée avantageuse. Cette méthode a permis l'examen et la visualisation de la variabilité des données collectées par les différents appareils, ainsi que leur concordance dans l'évaluation du comportement des diverses structures de chaussée. Cette approche a non seulement permis de quantifier les écarts entre les mesures, mais aussi de mettre en lumière les consistances ou les divergences significatives dans les résultats obtenus.

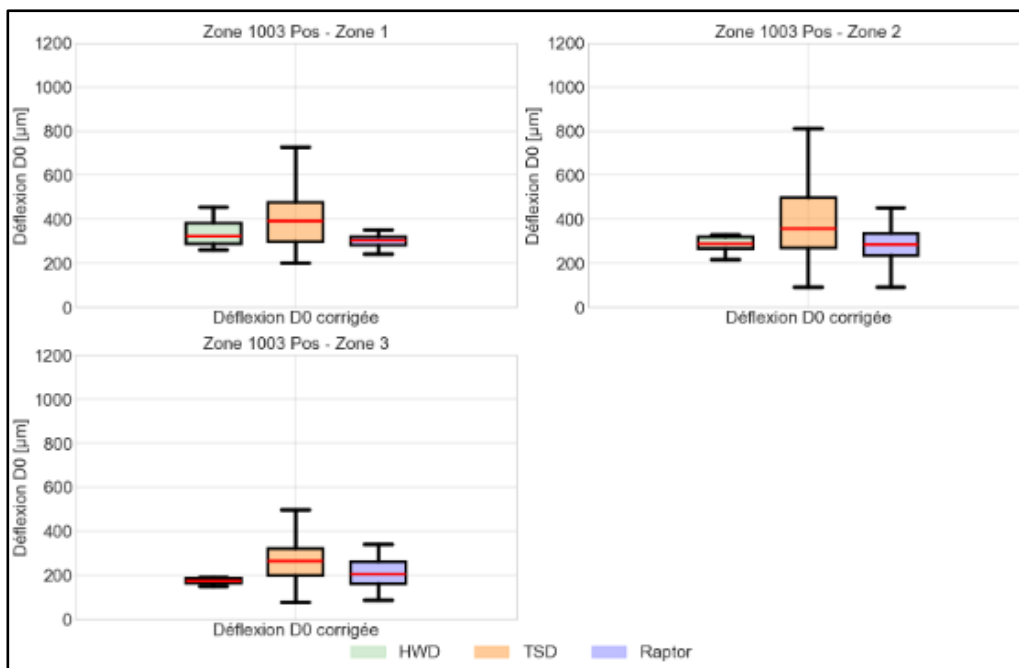


Figure 68 : Comparaison des déflexions D_0 corrigée en fonction de la charge - RC1003+

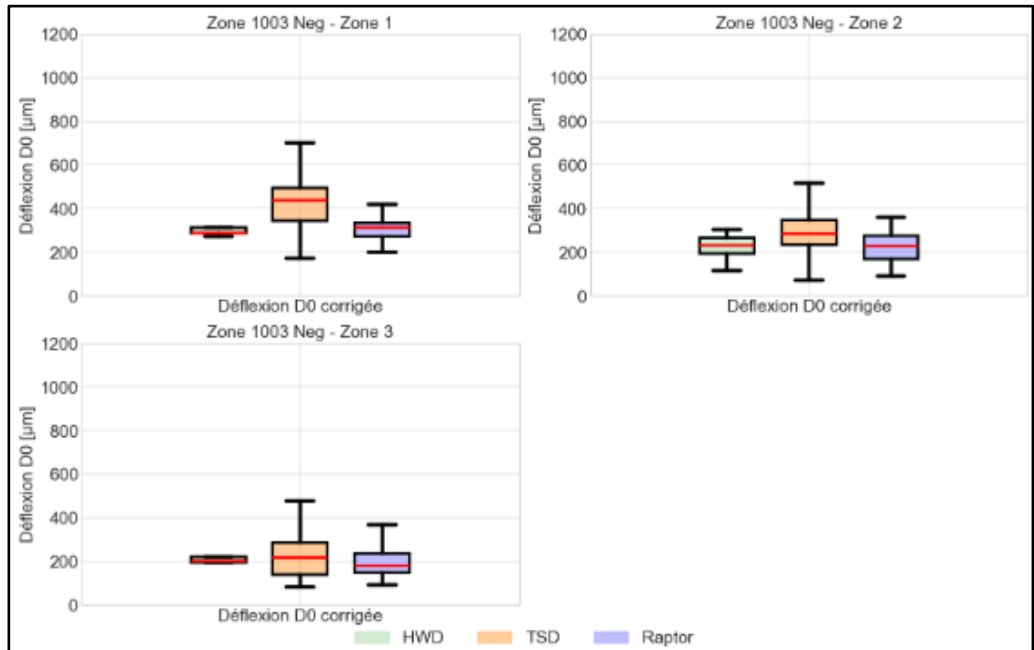


Figure 69 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge - RC1003-

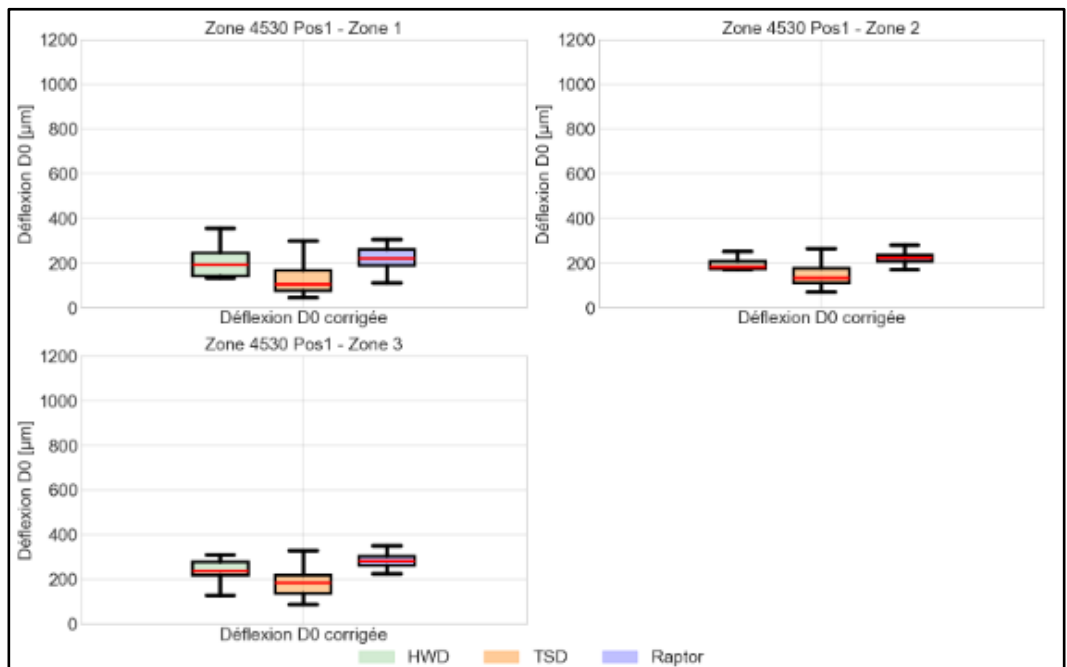


Figure 70 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge – RC4530+

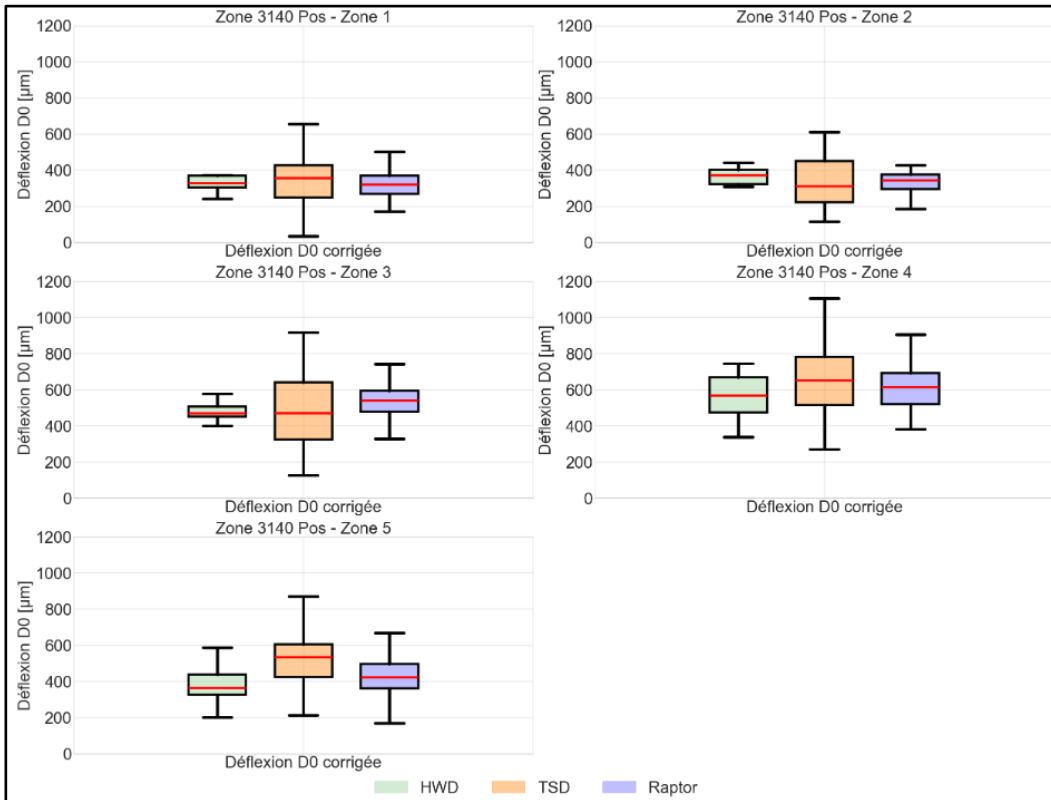


Figure 71 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge – RC3140+

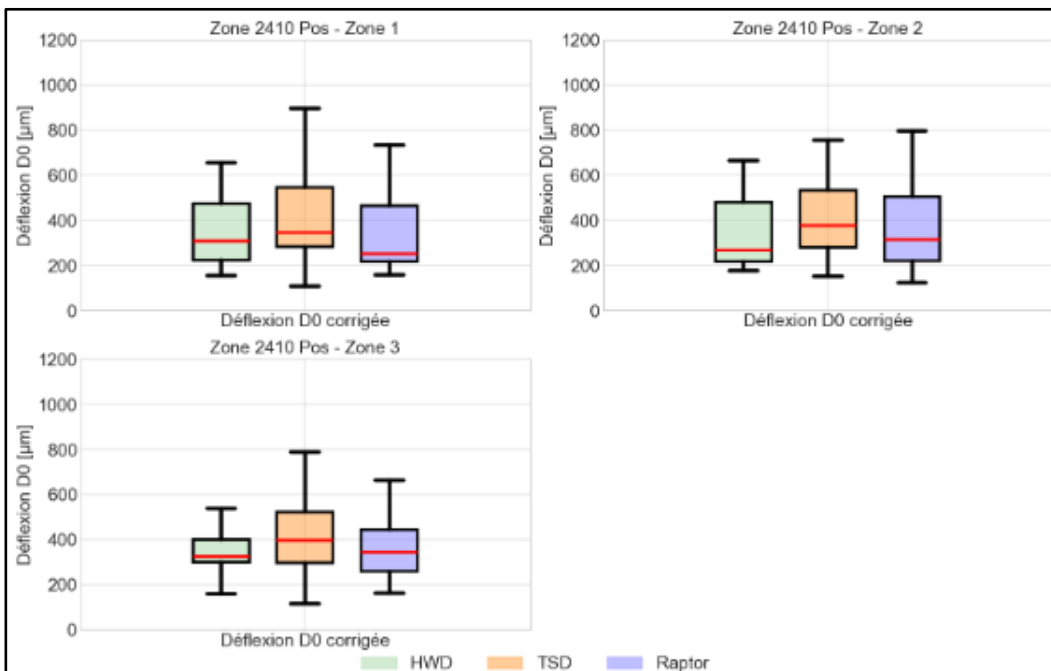


Figure 72 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge – RC2410+

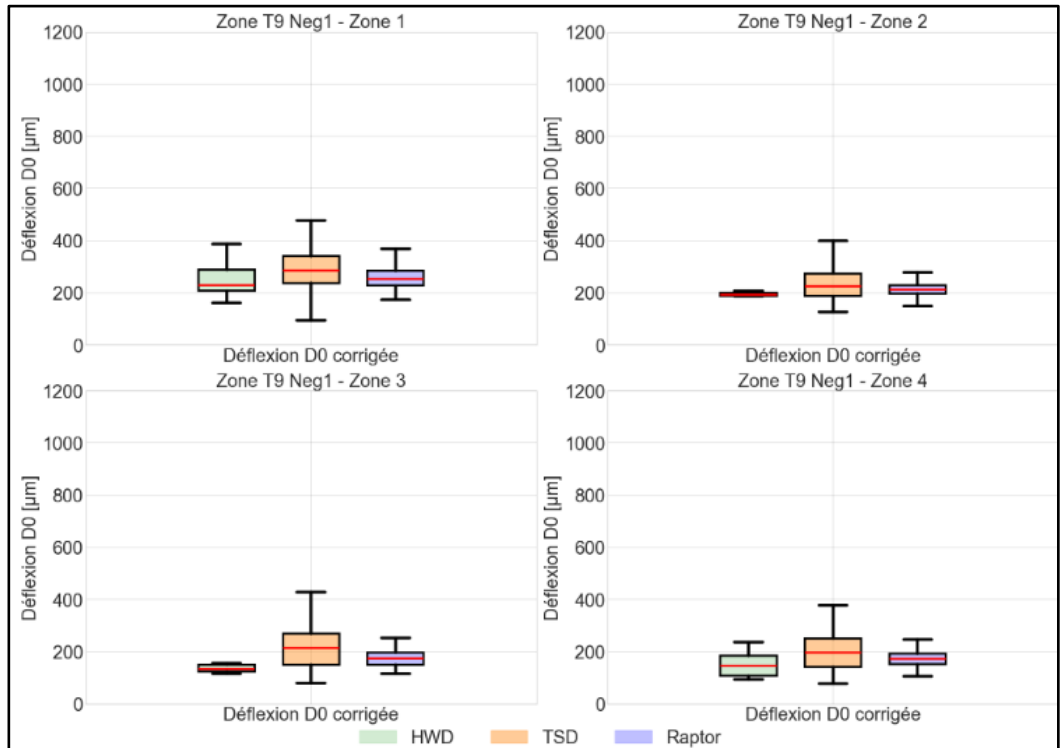


Figure 73 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge – T9-

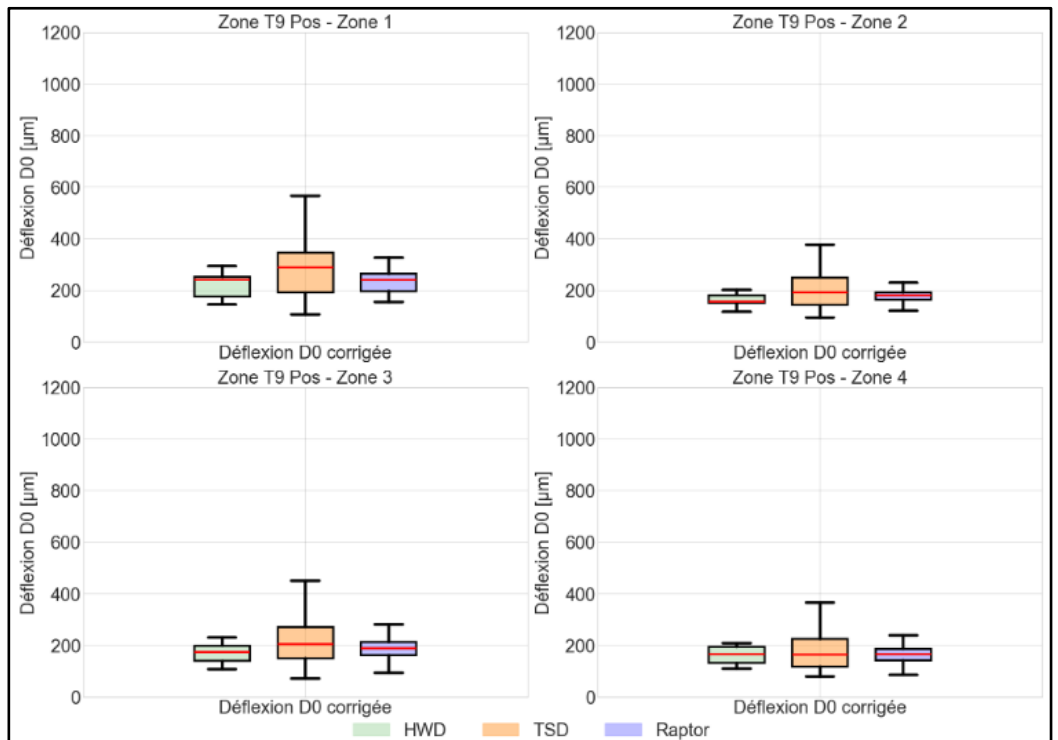


Figure 74 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge – T9+

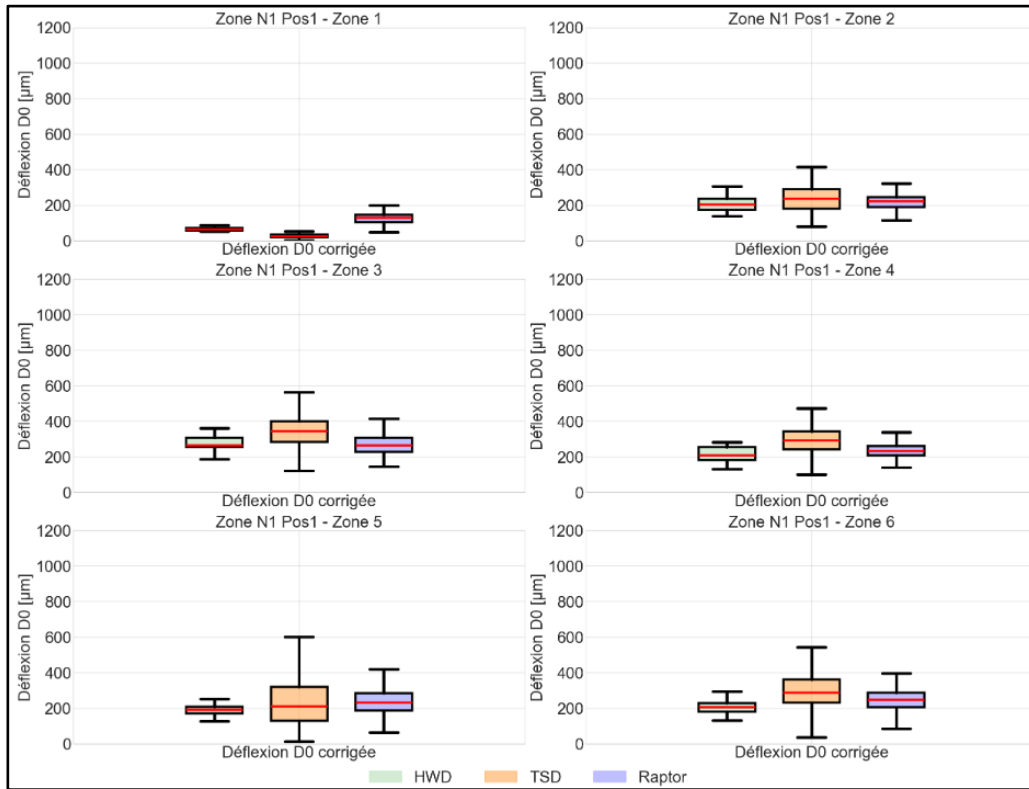


Figure 75 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge – N1+ (Nyon – Ecublens)

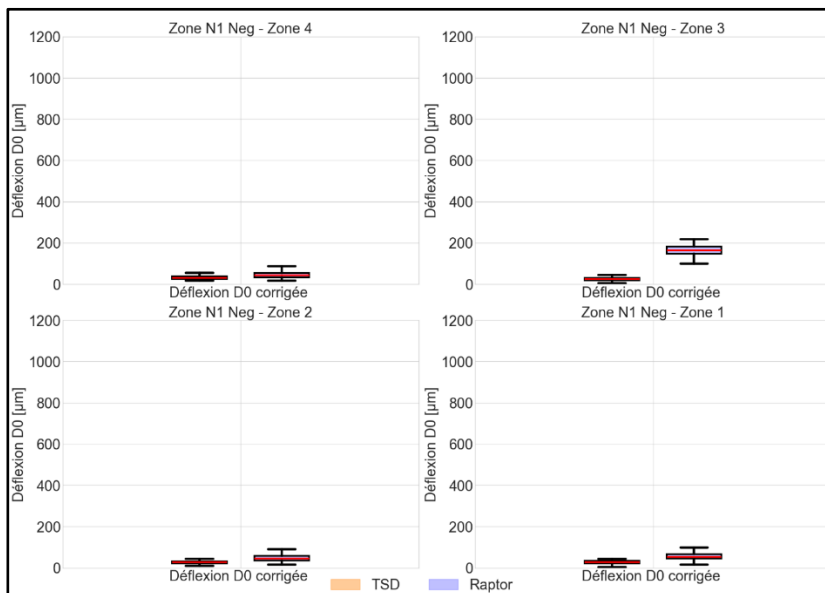


Figure 76 : Comparaison des déflexions D0 corrigée en fonction de la charge – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

Afin de réaliser une comparaison quantitative des déflexions mesurées par chaque appareil sur les différentes zones homogènes identifiées, la déflexion caractéristique pour chaque zone a été estimée selon la formule suivante :

$$D_v = D0_{moy} + 1.96 \cdot D0_{std} \quad [\mu m] \quad (6)$$

$D0_{moy}$: moyenne des déflexions maximales pour chaque zone homogène

$D0_{std}$: écart-type des déflexions maximales pour chaque zone homogène

Le calcul de la déflexion caractéristique s'inspire de la formule de la norme VSS 40 733b pour le calcul de la déflexion déterminante mais sans appliquer des facteurs de correction de la température ou de la saison. Le tableau et la figure ci-dessous résument la comparaison des déflexions caractéristiques estimées pour les différentes zones étudiées. Ces écarts suggèrent que les déflexions caractéristiques mesurées par le TSD ou le RAPTOR sont respectivement soit plus élevées soit plus faibles que celles enregistrées par le HWD.

Synthèse des déflexions caractéristiques

Secteur	Zone hom.	Dv TSD [μm]	Dv HWD [μm]	Dv RAP- TOR [μm]	% Diff (Dv_HWD - Dv_TSD)	% Diff (Dv_HWD - Dv_RAP)
RC1003 +	Zone 1	661	482	353	-37%	27%
	Zone 2	685	606	470	-13%	22%
	Zone 3	483	349	385	-38%	-10%
RC1003 -	Zone 1	675	387	402	-75%	-4%
	Zone 2	479	336	363	-43%	-8%
	Zone 3	426	370	439	-15%	-19%
RC3140 +	Zone 1	597	637	524	6%	18%
	Zone 2	590	462	436	-28%	6%
	Zone 3	851	705	701	-21%	1%
	Zone 4	1 018	836	846	-22%	-1%
	Zone 5	851	593	756	-43%	-27%
RC2410 +	Zone 1	785	699	674	-12%	4%
	Zone 2	723	718	700	-1%	2%
	Zone 3	710	560	594	-27%	-6%
RC4530 +	Zone 1	258	370	320	30%	14%
	Zone 2	245	253	265	3%	-5%
	Zone 3	317	355	347	11%	2%
T9 +	Zone 1	473	314	316	-51%	0%
	Zone 2	356	214	226	-67%	-6%
	Zone 3	372	287	281	-30%	2%
	Zone 4	330	229	310	-44%	-35%
T9 -	Zone 1	477	360	336	-32%	7%
	Zone 2	360	232	279	-55%	-20%
	Zone 3	363	179	233	-103%	-30%
	Zone 4	332	231	249	-44%	-8%
N1+ (Nyon – Ecu- blens)	Zone 1	51	94	193	46%	-104%
	Zone 2	382	286	305	-33%	-6%
	Zone 3	523	372	378	-40%	-2%
	Zone 4	448	306	316	-46%	-3%
	Zone 5	462	257	372	-80%	-45%
	Zone 6	511	278	389	-84%	-40%
N1- (Essert-Pittet – Yverdon- les-B.)	Zone 1	46	-	96	-	-
	Zone 2	44	-	102	-	-
	Zone 3	46	-	205	-	-
	Zone 4	143	-	92	-	-

Tableau 22 : Synthèse des déflexions caractéristiques mesurées par les trois appareils sur les différentes zones

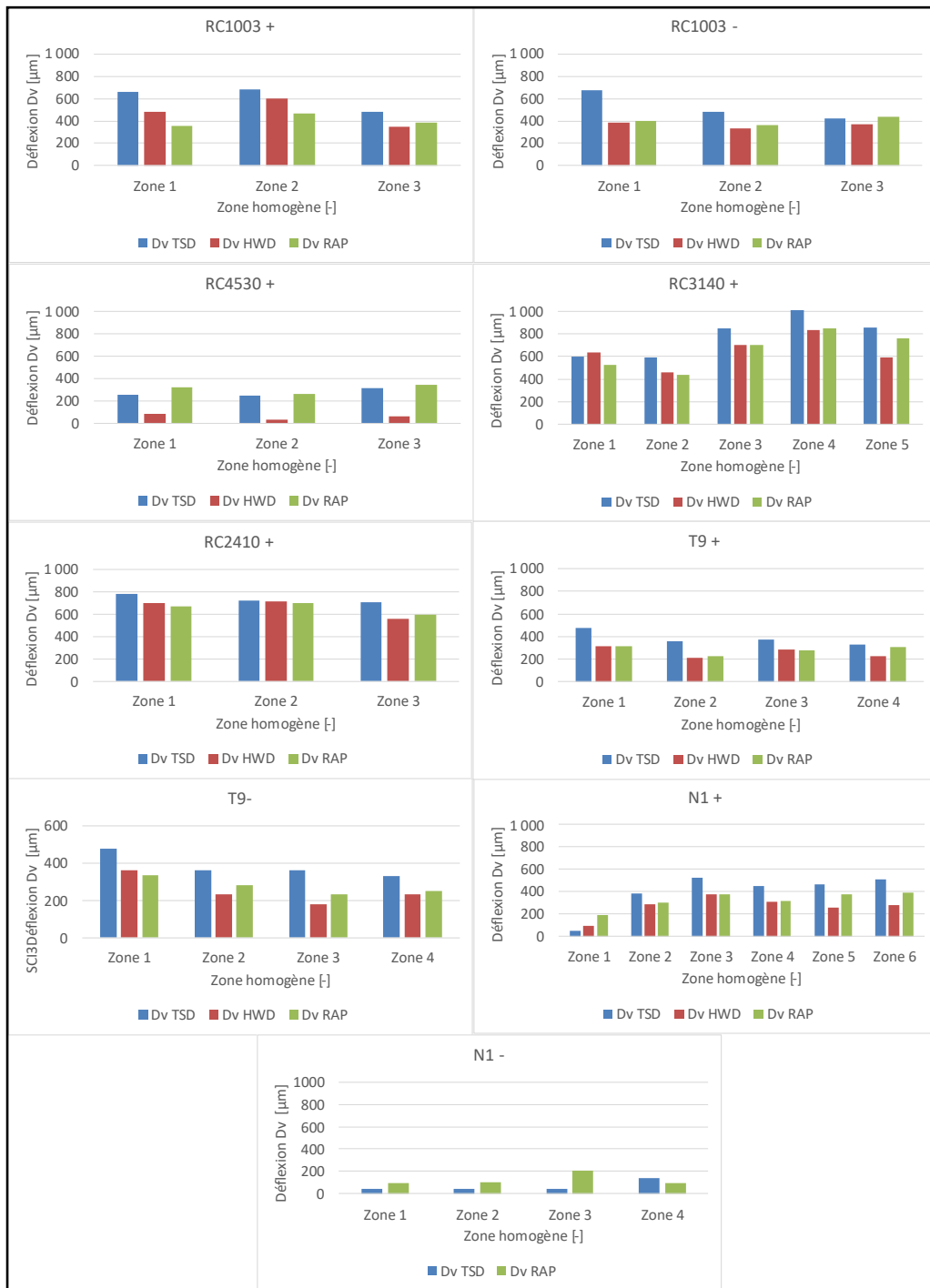


Figure 77 : Comparaison des déflexions caractéristiques

Les boxplots présentés dans les figures ci-dessus pour chaque zone homogène montrent que les mesures de déflexion réalisées avec les trois appareils affichent une similitude globale dans chaque zone examinée. Plus spécifiquement, les médianes des déflexions D_0 , ajustées en fonction de la charge appliquée par chaque appareil, sont généralement proches, avec celles du RAPTOR qui tendent à se rapprocher davantage de celles du HWD. Toutefois, il est important de souligner que les données issues du TSD

présentent une variabilité plus prononcée, caractérisée par des déflexions D_0 très dispersées dans certaines zones.

Particulièrement sur la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains), où la structure est stabilisée, et sur la N1+ (Nyon – Ecublens) (Zone 1), où des dalles en béton font partie de la structure, les déflexions D_0 enregistrées sont extrêmement proches de zéro. En revanche, les appareils RAPTOR et HWD ont enregistré des déflexions un peu plus élevées dans ces mêmes zones. Cette observation suggère que le HWD et le RAPTOR pourraient être plus sensibles aux petites déformations par rapport au TSD. Cette différence de sensibilité pourrait résulter des principes de mesure et des modes de chargement appliqués par les appareils. De plus, la position latérale des mesures pourrait influencer les déflexions relevées par les appareils. Cet effet pourrait également être attribuable au processus d'intégration utilisé par le TSD, qui pourrait introduire des erreurs dans les mesures de déflexion, particulièrement lors des mesures sur des structures plus épaisses.

La comparaison des déflexions caractéristiques des trois appareils, le RAPTOR, le TSD et le HWD, révèle des différences quantitatives significatives entre leurs mesures. De manière générale, les mesures produites par le RAPTOR sont plus proches de celles du HWD que celles obtenues par le TSD, qui tendent à afficher des valeurs plus élevées. Sur l'ensemble des zones analysées, les différences entre les mesures du RAPTOR et du HWD varient de -33% à +13%, avec une différence moyenne d'environ -1%, notamment observée sur les zones RC2410+ et RC3140. En comparaison, le TSD affiche des variations allant de -44% à +15%.

6.4 Comparaison des déflexions maximales

L'analyse des données de déflexion obtenues par le TSD a révélé que la déflexion maximale est mesurée légèrement en retrait de la charge, reflétant le comportement viscoélastique de la chaussée. Cependant, étant donné la vitesse élevée de relevé, supérieure à 50 km/h, cet effet est atténué, et la déflexion maximale est détectée très proche de la charge.

Pour déterminer avec précision la position où la déflexion atteint son maximum, une interpolation entre les différentes vitesses de déflexion pour chaque point de mesure a été effectuée. Cette analyse a permis de détecter la position exacte où la vitesse de déflexion est nulle, indiquant ainsi le point où la déflexion est maximale.

La figure présentée ci-dessous illustre la distribution des positions où la valeur maximale de déflexion a été observée pour chacune des zones auscultées.

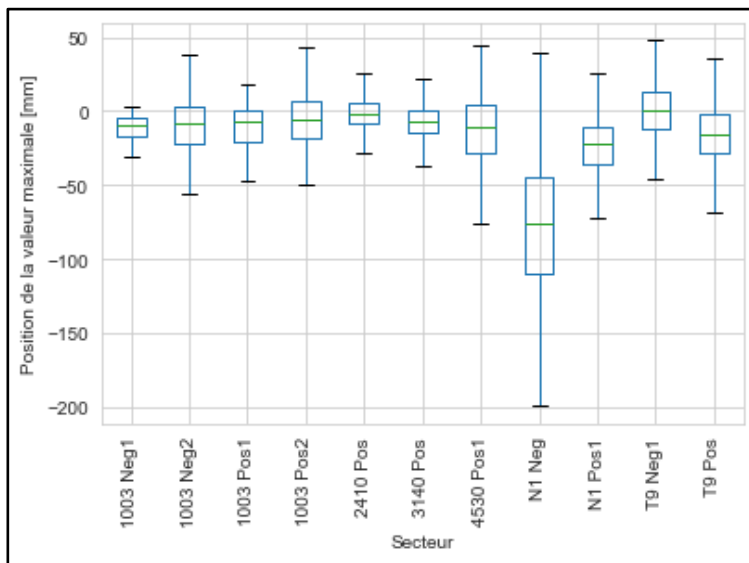


Figure 78 : Distribution des positions où la valeur maximale de déflexion a été observée

La figure illustre que, de manière générale, la position où la déflexion maximale est observée se situe très proche de zéro, à savoir directement sous la charge. Toutefois, sur la N1+ (Nyon – Ecublens) et N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains), où la structure de la chaussée est plus rigide, la position de la déflexion maximale est détectée plus éloignée. De plus, les données montrent une grande variabilité dans toutes les zones auscultées, avec une variabilité particulièrement accentuée sur la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains).

Pour estimer la déflexion maximale enregistrée par le TSD, une courbe d'interpolation du bassin de déflexion est ajustée en utilisant les données de tous les capteurs du véhicule. Cette approche permet de déterminer que la valeur maximale de déflexion se positionne légèrement après la charge, localisée précisément entre le capteur situé à -200 mm de la charge et celui à +110 mm. Sur l'ensemble des secteurs étudiés, l'analyse des données a révélé que la déflexion maximale estimée est généralement supérieure à la déflexion Do directement mesurée par les appareils. La différence moyenne entre ces deux mesures varie de 0.8 μm à 8.9 μm .

Cette méthodologie a ainsi permis la comparaison des déflexions maximales enregistrées par les trois appareils de mesure utilisés dans l'étude. Pour le HWD et le RAPTOR, la déflexion maximale correspond à la déflexion Do, qui est directement mesurée sous la charge par ces appareils.

La figure ci-dessous illustre une comparaison des déflexions maximales mesurées par chaque appareil, mettant en évidence les nuances dans les résultats obtenus par les différents équipements.

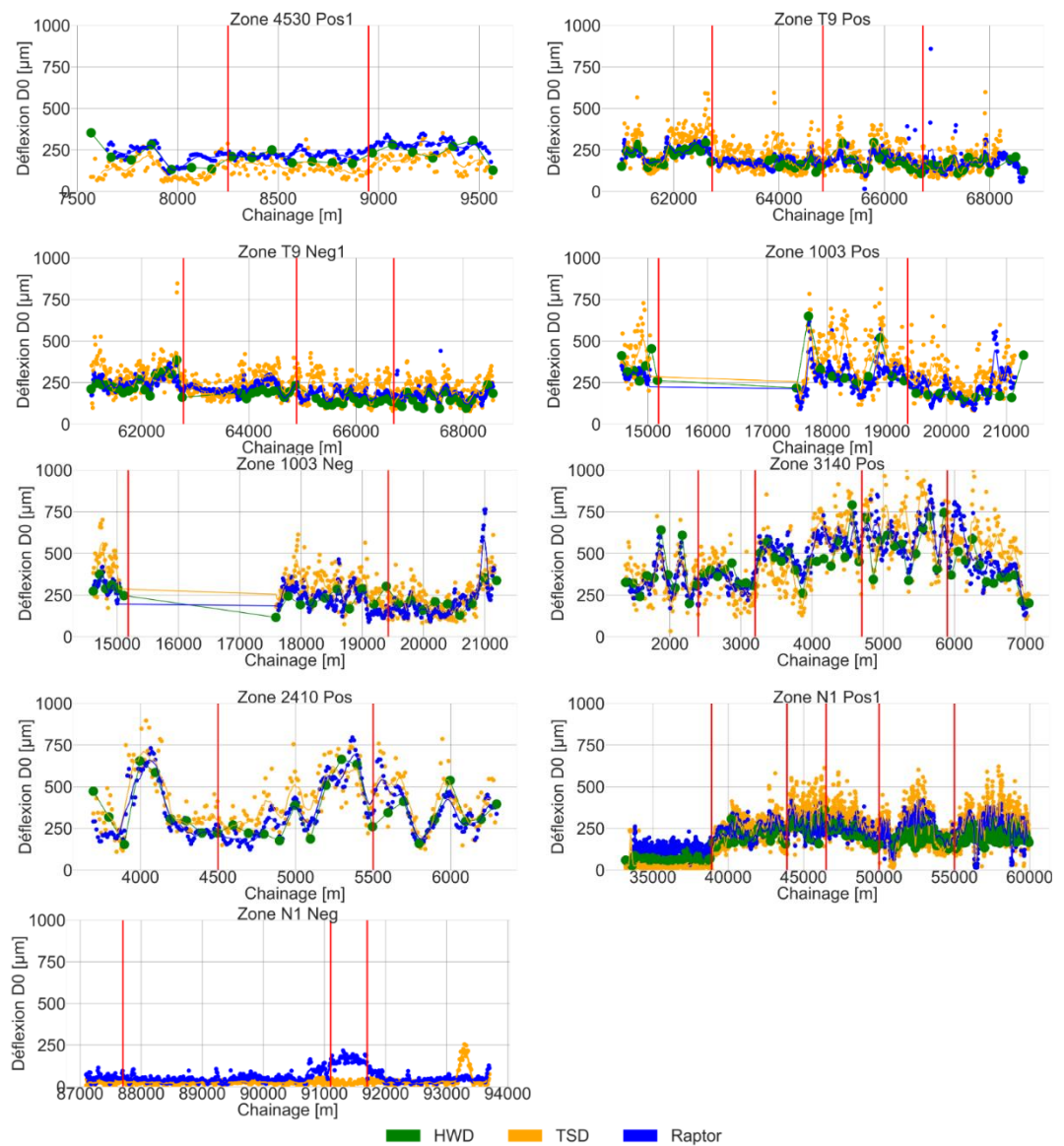


Figure 79 : Comparaison des déflexions maximales enregistrées par appareil

Les déflexions maximales enregistrées par les trois appareils de mesure présentent une grande similarité, comme le montrent les comparaisons des déflexions DO ajustées en fonction de la charge appliquée. Les résultats montrent que les déflexions maximales sur toutes les zones examinées affichent un profil globalement similaire pour chacun des trois appareils. Cependant, il est également important de noter que les données obtenues avec le TSD présentent une variabilité significativement plus élevée par rapport à celles recueillies par le HWD et le RAPTOR.

La comparaison statistique des mesures de déflexion maximale enregistrées par les trois appareils dans chaque zone homogène est présentée dans l'annexe A. Cette analyse révèle une convergence des résultats, similaire à celle observée pour les déflexions DO discutée au chapitre 6.3. Notamment, il est important de souligner que les déflexions maximales mesurées par le TSD sont très proches des valeurs de déflexions DO. Ceci

peut être attribué au fonctionnement du TSD à des vitesses similaires à celles du trafic routier, permettant ainsi à la chaussée de réagir de manière plus élastique aux sollicitations. Cette particularité souligne l'importance de la vitesse de l'appareil dans la réponse mécanique de la chaussée et la fiabilité des données enregistrées.

Ainsi, pour les analyses ultérieures, la déflexion D_0 mesurée par le TSD sera utilisée comme référence principale.

6.5 Comparaison des déflexions D_0 à une température de référence

Cette section est consacré à l'analyse comparative des déflexions D_0 enregistrées par trois appareils de mesure, avec une normalisation des données à une température de référence de 15 °C afin de garantir la cohérence des comparaisons entre elles. Cette normalisation est essentielle, car la température influence de manière significative les propriétés mécaniques des matériaux de chaussée, notamment l'enrobé bitumineux. Pour estimer la température à mi-profondeur de la couche d'enrobé, le modèle BELLS3 est employé. La correction des déflexions D_0 à une température de référence de 15 °C, expliquée en détail dans le chapitre 2, permet d'harmoniser les mesures réalisées sous diverses conditions climatiques.

La figure ci-dessous présente une comparaison des déflexions D_0 , ajustées à une température de référence de 15 °C et une charge de 50 kN, telles que mesurées par les trois appareils pour chaque secteur analysé.



Figure 80 : Comparaison des déflexions D0 corrigées à 15°C et 50 kN enregistrées par les trois appareils

En ajustant les déflexions D0 aux conditions de température de référence, les comparaisons entre les données obtenues par le TSD, le HWD, et le RAPTOR montrent une cohérence entre appareils améliorée. Sous ces conditions normalisées, qui considèrent une température de référence de 15°C et une charge de référence de 50 kN, les profils de déflexion sont presque identiques à travers toutes les zones examinées. Cela démontre une uniformité remarquable dans les mesures effectuées par les trois appareils. Toutefois, il est important de noter que les données obtenues avec le TSD montrent une variabilité supérieure par rapport à celles collectées par le HWD et le RAPTOR.

Les figures suivantes fournissent une analyse statistique détaillée des déflexions D0 ajustées à une température de 15°C et une charge de 50 kN, mettant en évidence la

similitude accrue entre les mesures des différents appareils dans diverses zones homogènes de chaque secteur.

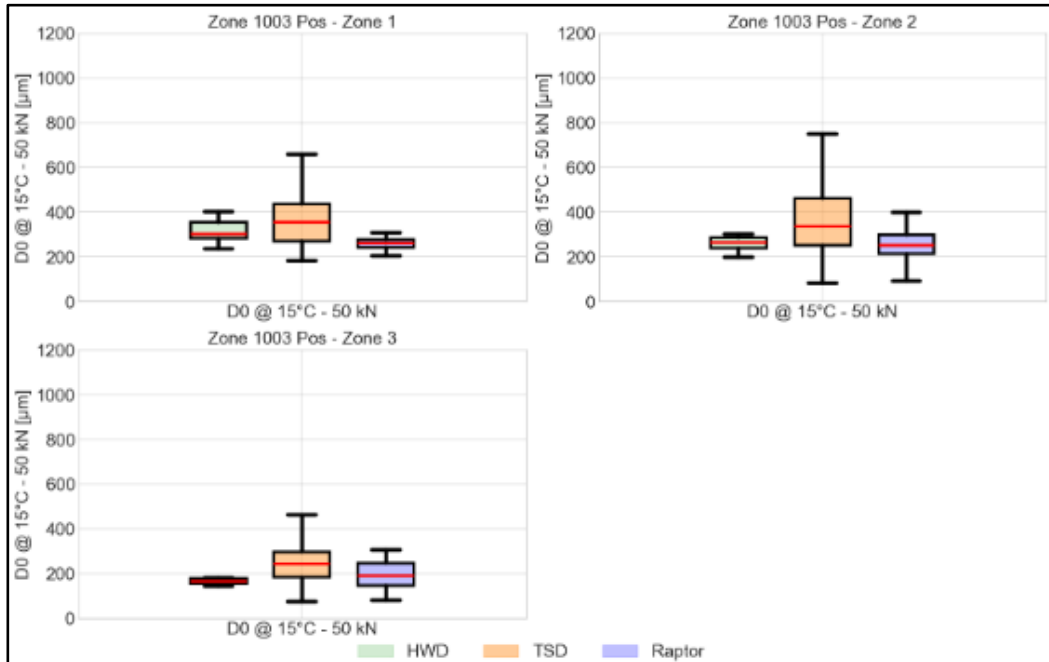


Figure 81 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C – 50 kN – RC1003+

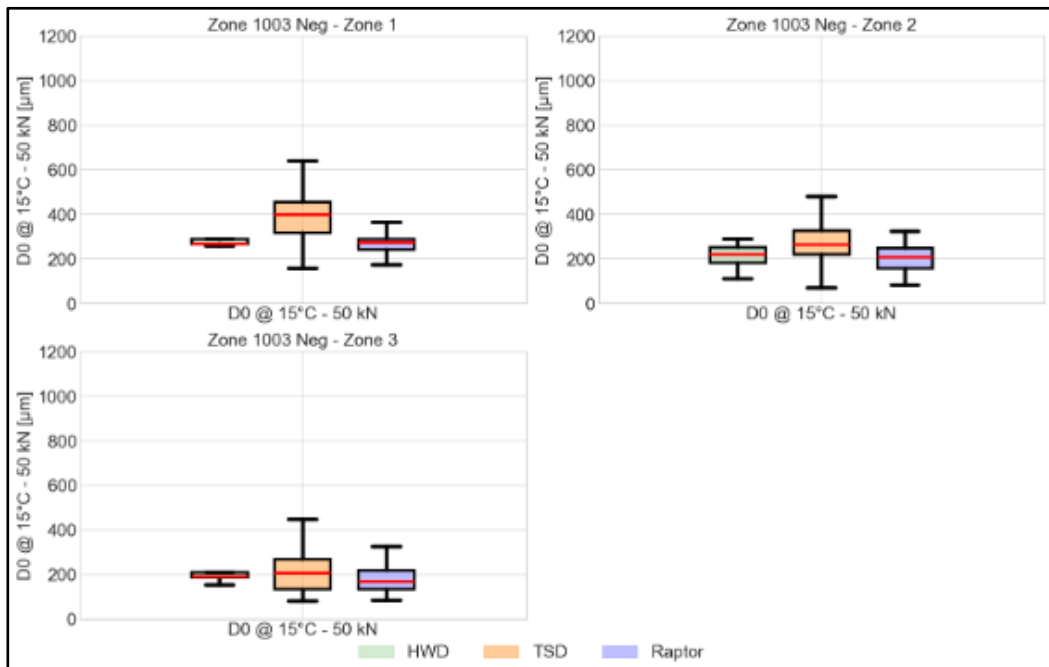


Figure 82 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C – 50 kN – RC1003-

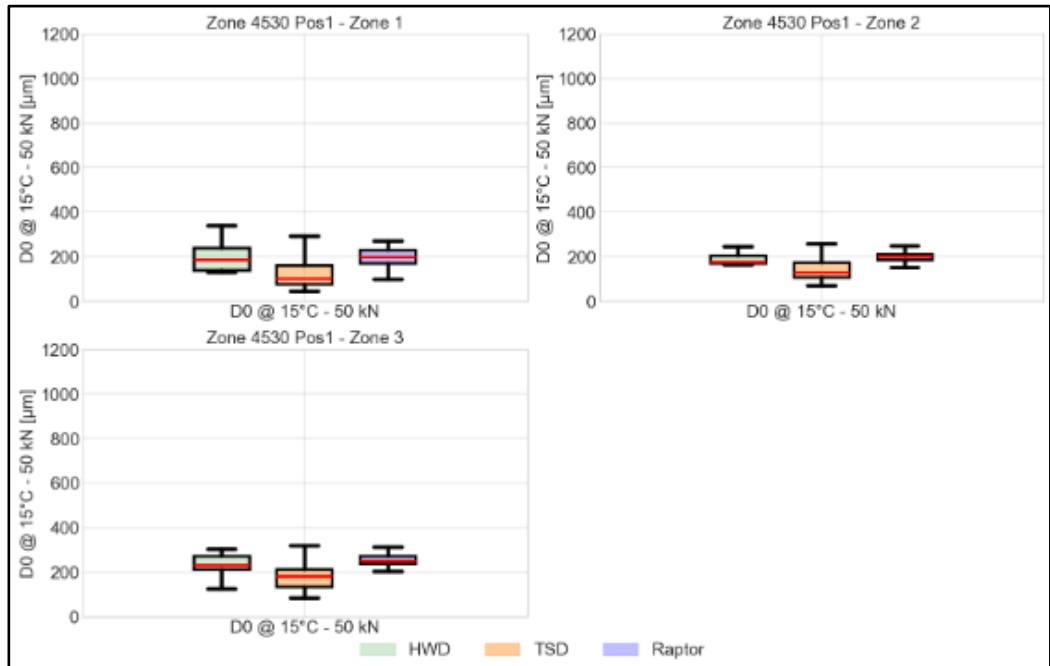


Figure 83 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C – 50 kN – RC4530+

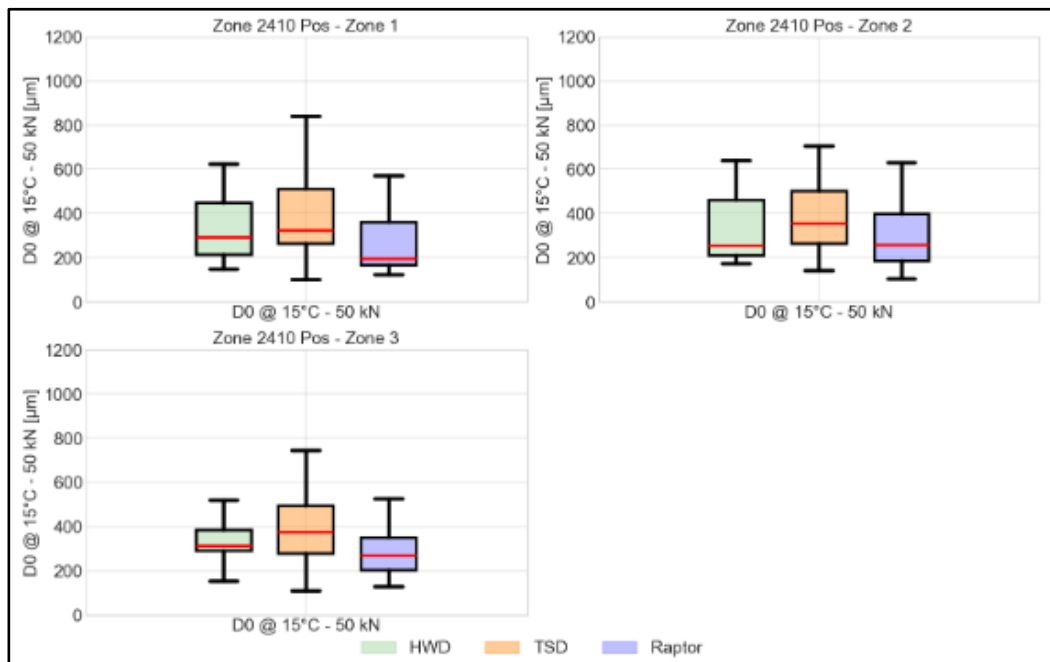


Figure 84 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C – 50 kN – RC2410+

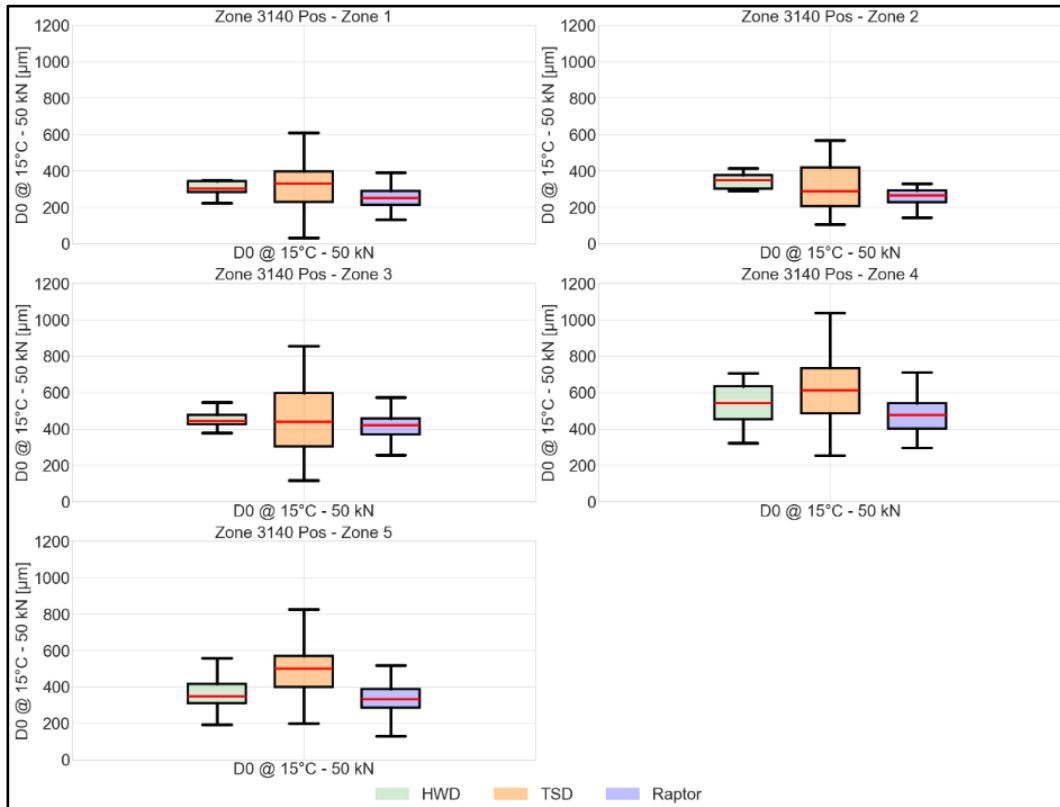


Figure 85 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C - 50 kN – RC3140+

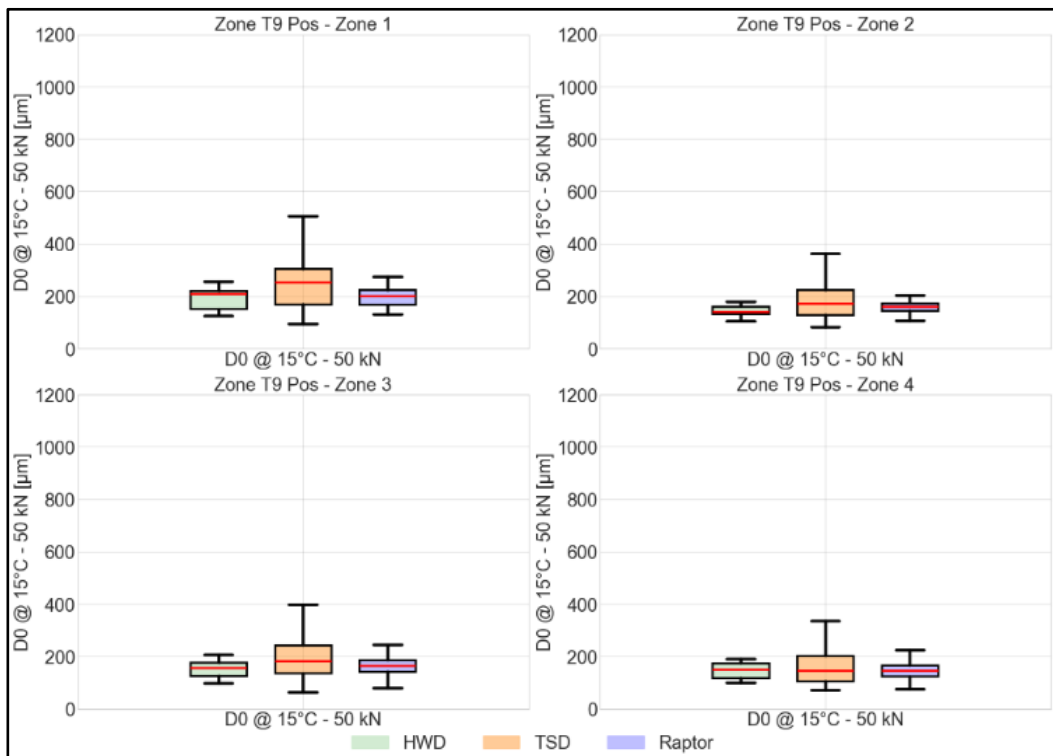


Figure 86 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C - 50 kN – T9+

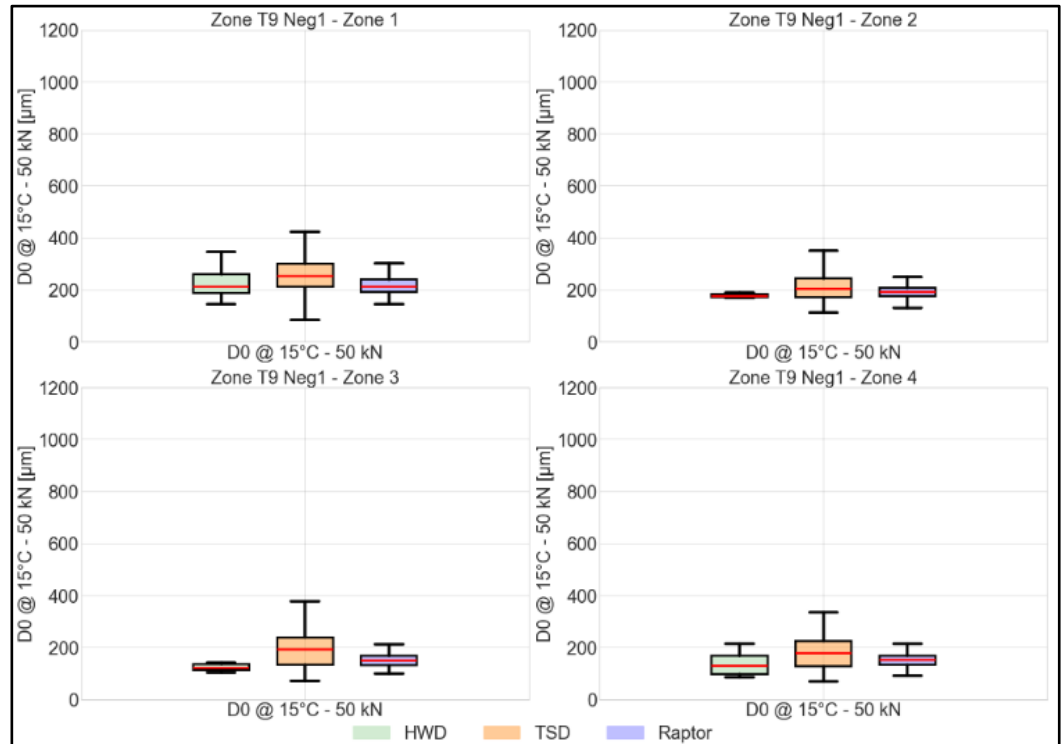


Figure 87 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C – 50 kN – T9-

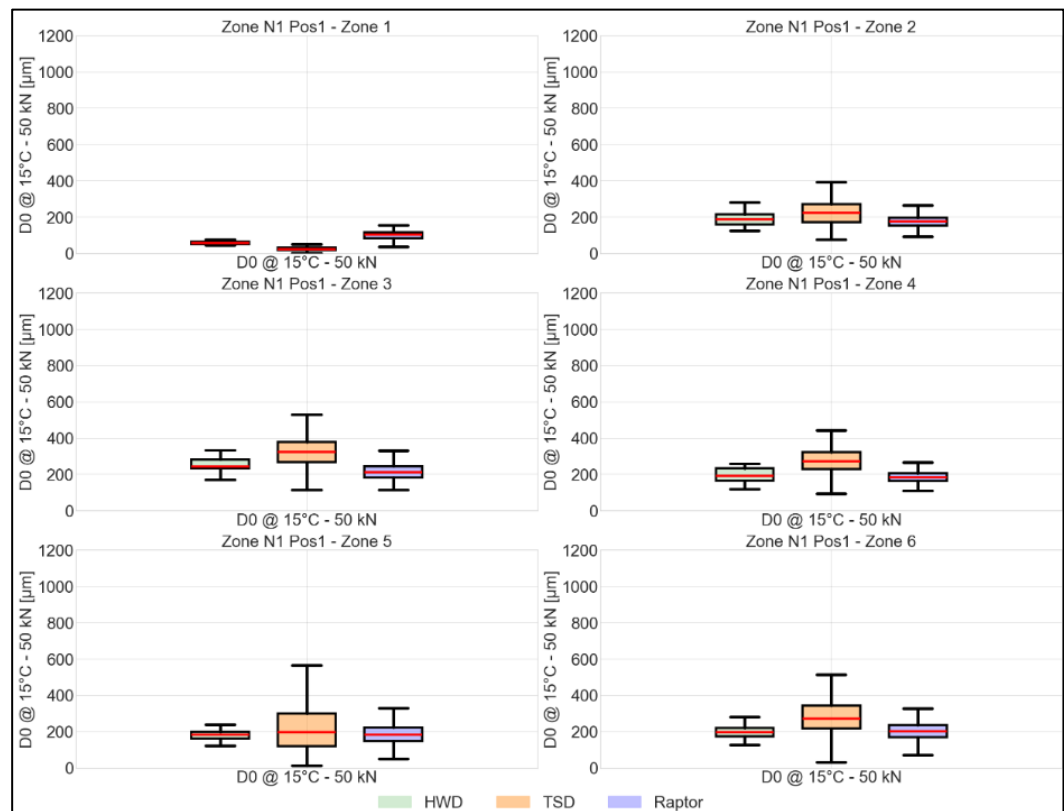


Figure 88 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C – 50 kN – N1+ (Nyon – Ecublens)

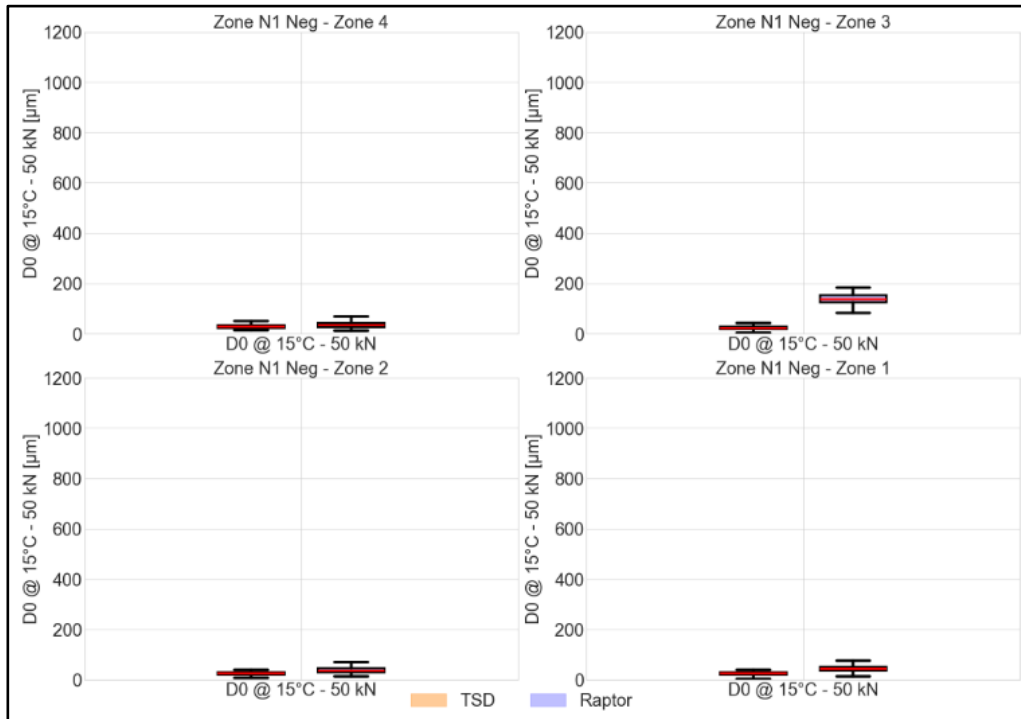


Figure 89 : Comparaison des déflexions D0 @ 15°C – 50 kN – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

La comparaison des déflexions caractéristiques, ajustées à une température de référence de 15 °C et à une charge de 50 kN, est illustrée dans le tableau ci-joint et la figure ci-dessous.

Synthèse des déflexions caractéristiques

Secteur	Zone hom.	Dv TSD [μm]	Dv HWD [μm]	Dv RAP-TOR [μm]	% Diff (Dv_HWD - Dv_TSD)	% Diff (Dv_HWD - Dv_RAP)
RC1003 +	Zone 1	599	435	306	-38%	30%
	Zone 2	629	544	416	-16%	23%
	Zone 3	443	330	353	-34%	-7%
RC1003 -	Zone 1	617	357	348	-73%	3%
	Zone 2	446	317	327	-41%	-3%
	Zone 3	399	346	393	-16%	-14%
RC3140 +	Zone 1	556	597	411	7%	31%
	Zone 2	550	432	340	-27%	21%
	Zone 3	796	667	541	-19%	19%
	Zone 4	956	795	659	-20%	17%
	Zone 5	800	565	590		
RC2410 +	Zone 1	736	664	528	-11%	21%
	Zone 2	681	689	552	1%	20%
	Zone 3	672	539	468	-25%	13%
RC4530 +	Zone 1	251	356	281	29%	21%
	Zone 2	239	246	237	3%	4%
	Zone 3	309	347	310	11%	11%
T9 +	Zone 1	417	274	266	-52%	3%
	Zone 2	317	189	201	-67%	-6%
	Zone 3	331	255	245	-30%	4%
	Zone 4	297	207	275	-43%	-33%
T9 -	Zone 1	423	324	280	-30%	14%
	Zone 2	319	211	243	-51%	-15%
	Zone 3	323	162	198	-99%	-22%
	Zone 4	298	210	219	-42%	-4%
N1+ (Nyon – Ecublens)	Zone 1	48	84	153	43%	-82%
	Zone 2	361	263	245	-37%	7%
	Zone 3	492	342	302	-44%	12%
	Zone 4	421	282	249	-49%	11%
	Zone 5	435	243	292	-79%	-20%
	Zone 6	484	267	320	-81%	-20%
N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-B.)	Zone 1	42	-	76	-	-
	Zone 2	40	-	80	-	-
	Zone 3	44	-	173	-	-
	Zone 4	131	-	73	-	-

Tableau 23 : Synthèse des déflexions caractéristiques mesurées par les trois appareils sur les différentes zones



Figure 90 : Comparaison des déflexions caractéristiques @ 15°C – 50 kN

La variabilité persistante du TSD, même après normalisation de l'effet de la température, peut indiquer une réactivité distincte de cet appareil aux particularités structurelles ou matérielles des chaussées. Cette différence souligne l'importance de considérer les caractéristiques propres à chaque technologie de mesure lors de l'évaluation de l'état des infrastructures routières, surtout lorsque les mesures sont standardisées pour la température et la charge.

L'évaluation comparative des déflexions ajustées, enregistrées par le RAPTOR, le TSD, et le HWD, montre des écarts significatifs dans les résultats obtenus par chaque appareil. Les données du RAPTOR s'alignent plus étroitement avec celles du HWD,

affichant une divergence de -15% à +17%, ce qui indique une similitude plus marquée dans leurs mesures de la rigidité de la chaussée sous charge standardisée. En l'absence de correction de l'effet de la température, la différence entre le HWD et le RAPTOR s'étend de -33 % à +13 %. En revanche, le TSD révèle une gamme de variation plus large, de -56% à +14%, par rapport au HWD, signalant des estimations généralement plus élevées ou significativement plus basses des déflexions caractéristiques et de 44 % à +15 % sans correction de l'effet de la température.

6.6 Comparaison des SCI300

L'indicateur SCI300, défini ci-dessous, évalue la qualité mécanique de la superstructure (couches liées cf. Chapitre 2.4). Un indice SCI300 élevé peut être interprété comme le signe d'une chaussée dégradée, révélant potentiellement des zones de faiblesse structurelle. Cette métrique est utile pour évaluer l'état de la chaussée et pour planifier les interventions de maintenance nécessaires.

$$\text{SCI300} = D_0 - D_{300} \quad [\mu\text{m}] \quad (7)$$

Avec :

D_0 : déflexion sous la charge [μm]

D_{300} : déflexion à 300 mm de la charge [μm]

Afin de comparer les zones de faiblesse détectées par les trois appareils de mesure, la correction pour normaliser les mesures à une charge de référence de 50 kN et à une température de 15 °C n'a pas été effectuée. Cette approche permet d'évaluer la capacité intrinsèque de chaque appareil à identifier les zones d'endommagement en fonction de sa propre technique de mesure, sans l'influence de procédures de normalisations.

La figure ci-dessous illustre une comparaison des indicateurs SCI300, tels qu'identifiés par les trois appareils pour chaque secteur analysé.

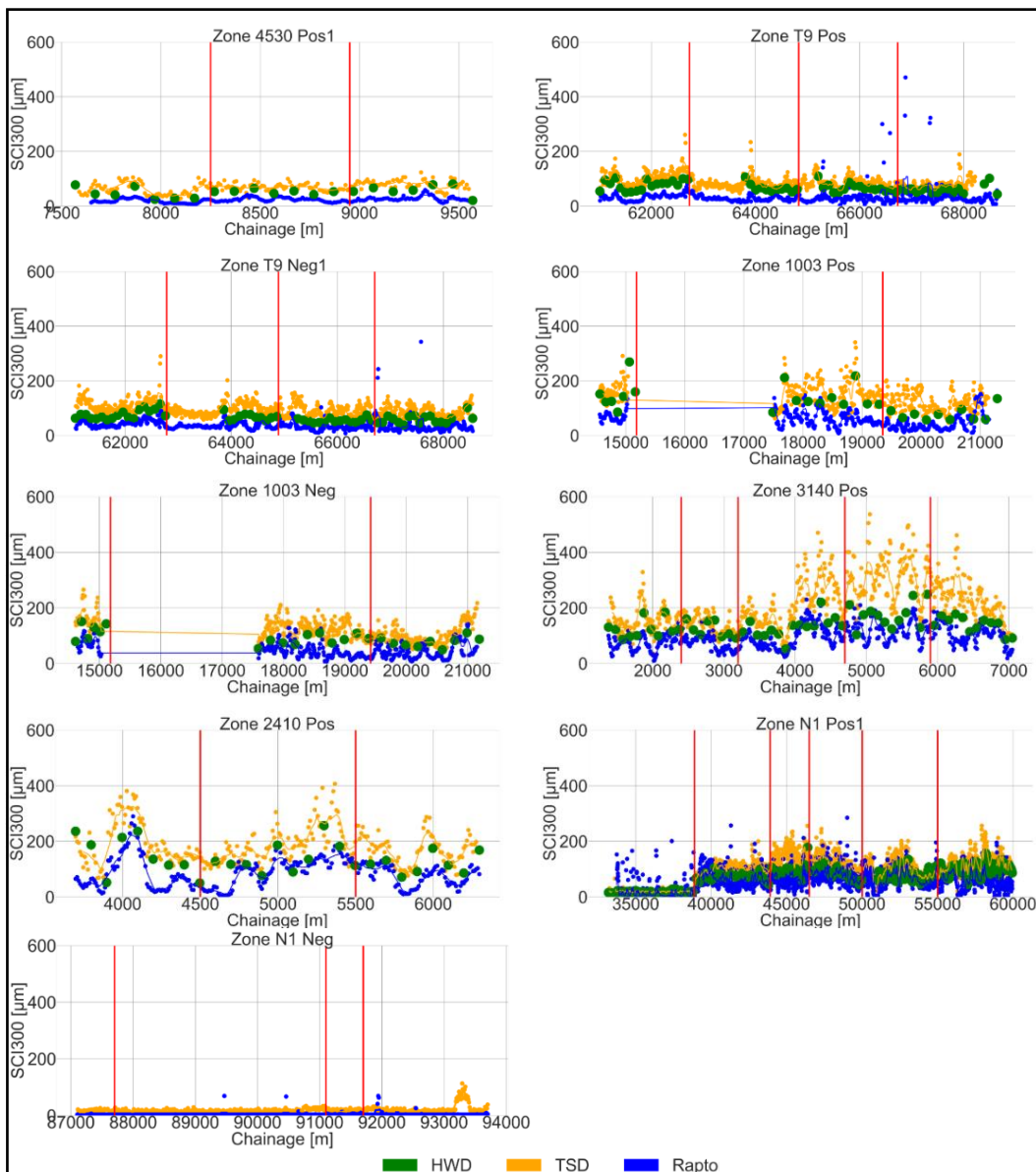


Figure 91 : Comparaison des SCI300 mesurés par les trois appareils

Les analyses ont révélé que les valeurs de l'indicateur SCI300 mesurées par le TSD sont généralement plus proches de celles obtenues avec le HWD, comparativement à celles enregistrées par le RAPTOR, qui tendent à afficher des valeurs globalement plus faibles.

Grâce à leur fréquence de mesure élevée, le TSD et le RAPTOR sont capables de détecter localement les faiblesses de la chaussée avec plus de précision. Les données sur la Figure 91 révèlent que les estimations du SCI300 par le TSD et le RAPTOR montrent une variabilité accrue, ce qui contribue à mieux identifier la localisation des zones potentiellement dégradées de la structure routière.

Il est important de noter que lors de l'utilisation du RAPTOR sur des zones rigide, telles que sur la N1+ (Nyon – Ecublens) entre le km 32 et le km 38 et la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains), l'indicateur SCI300 montre une invariabilité notable. Cette constance dans les mesures pourrait indiquer une limite dans la capacité du RAPTOR à

détecter des variations dans les zones rigides, particulièrement en ce qui concerne l'indicateur SCI300.

Les figures ci-dessous illustrent la comparaison statistique des indices SCI300 enregistrés par chaque appareil de mesure pour les différentes zones homogènes identifiées dans chaque secteur analysé.

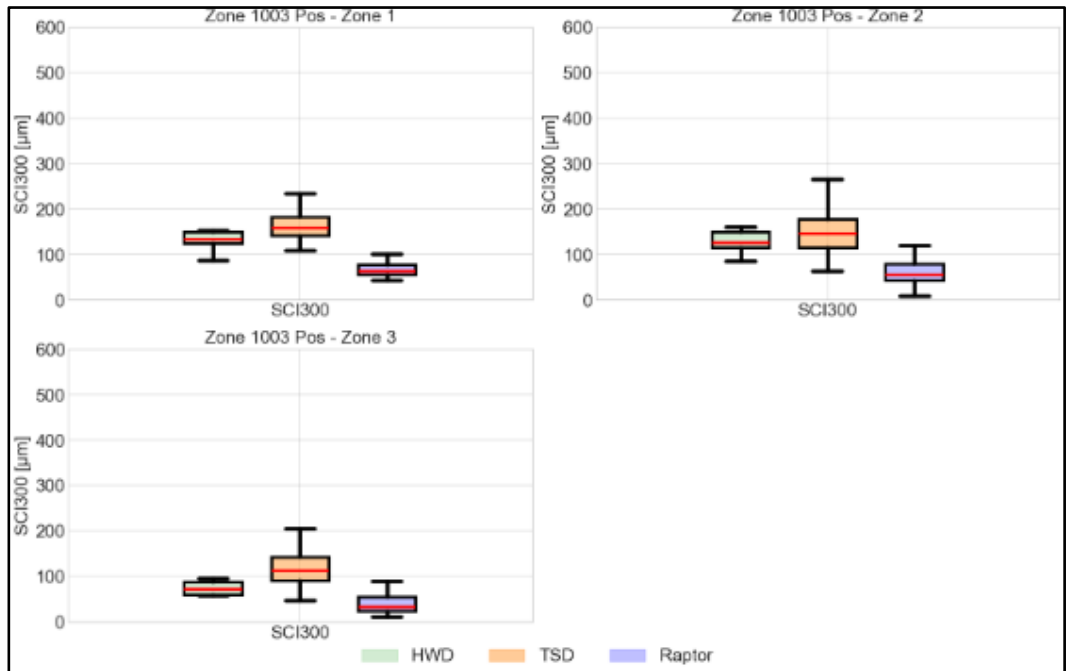


Figure 92 Comparaison des SCI300 – RC1003+

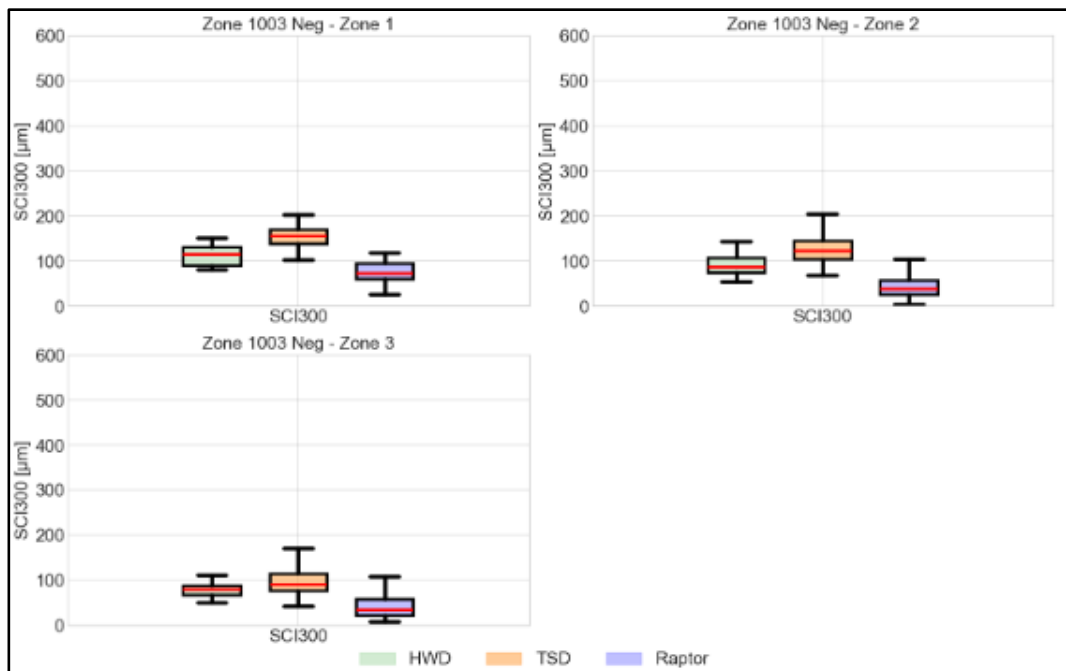


Figure 93 : Comparaison des SCI300 – RC1003-

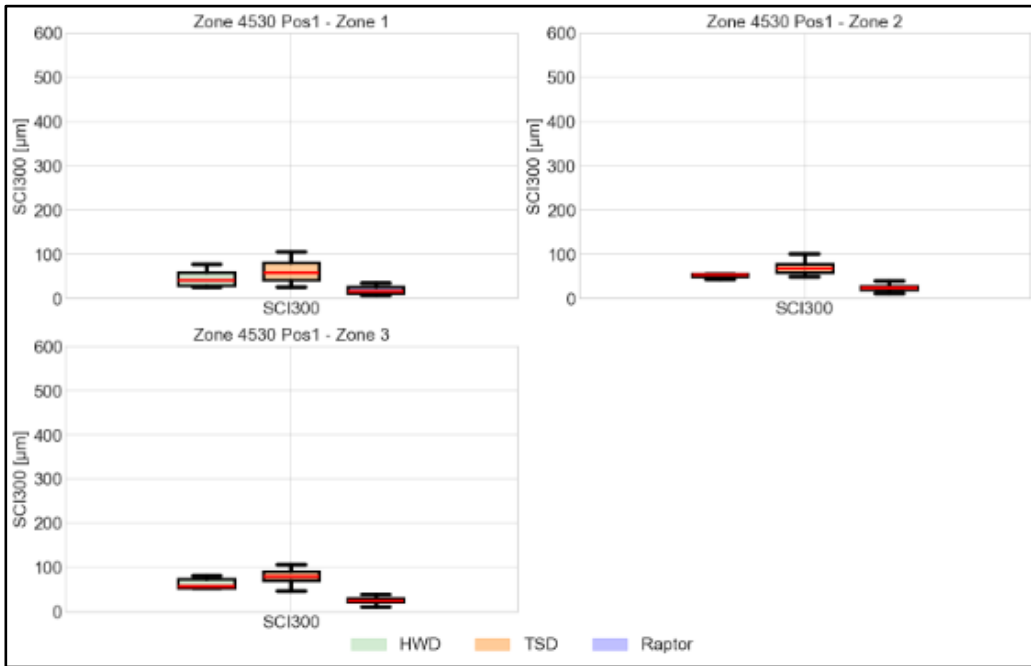


Figure 94 : Comparaison des SCI300 – RC4530+

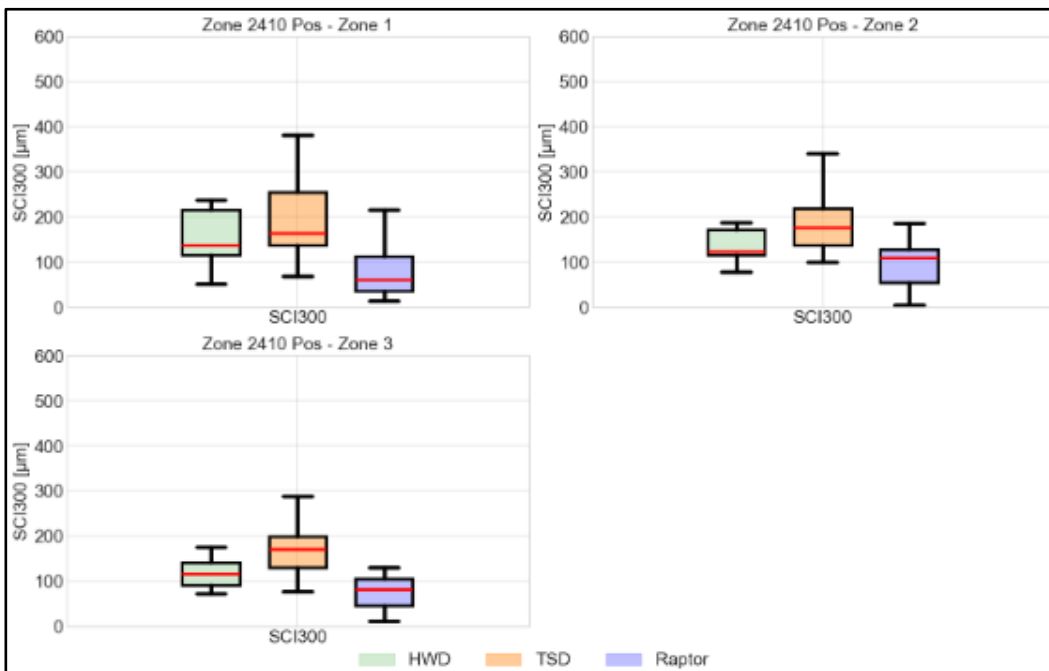


Figure 95 : Comparaison des SCI300 – RC2410+

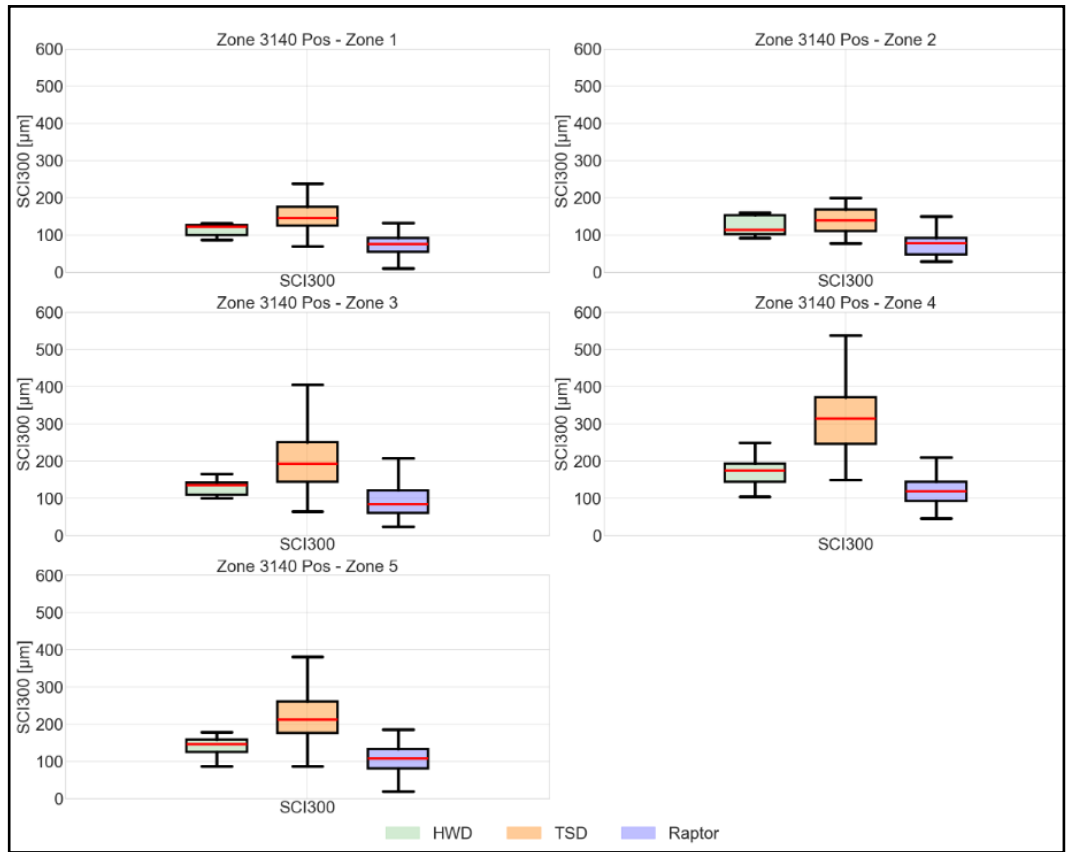


Figure 96 : Comparaison des SCI300 – RC3140+

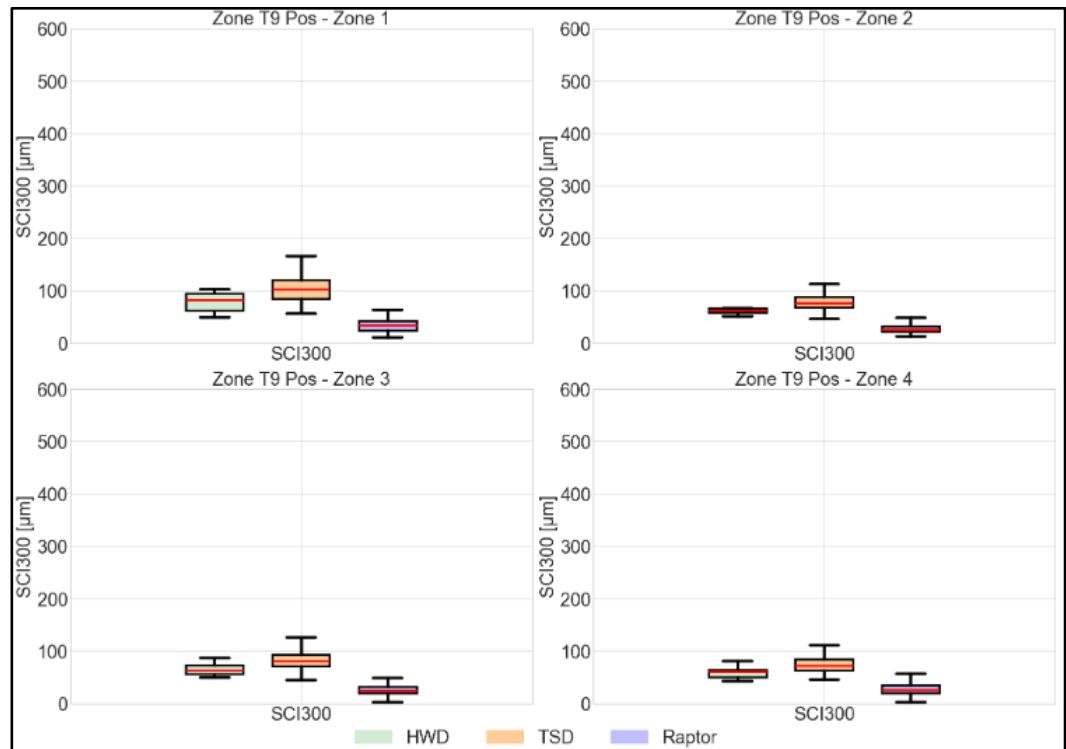


Figure 97 : Comparaison des SCI300 – T9+

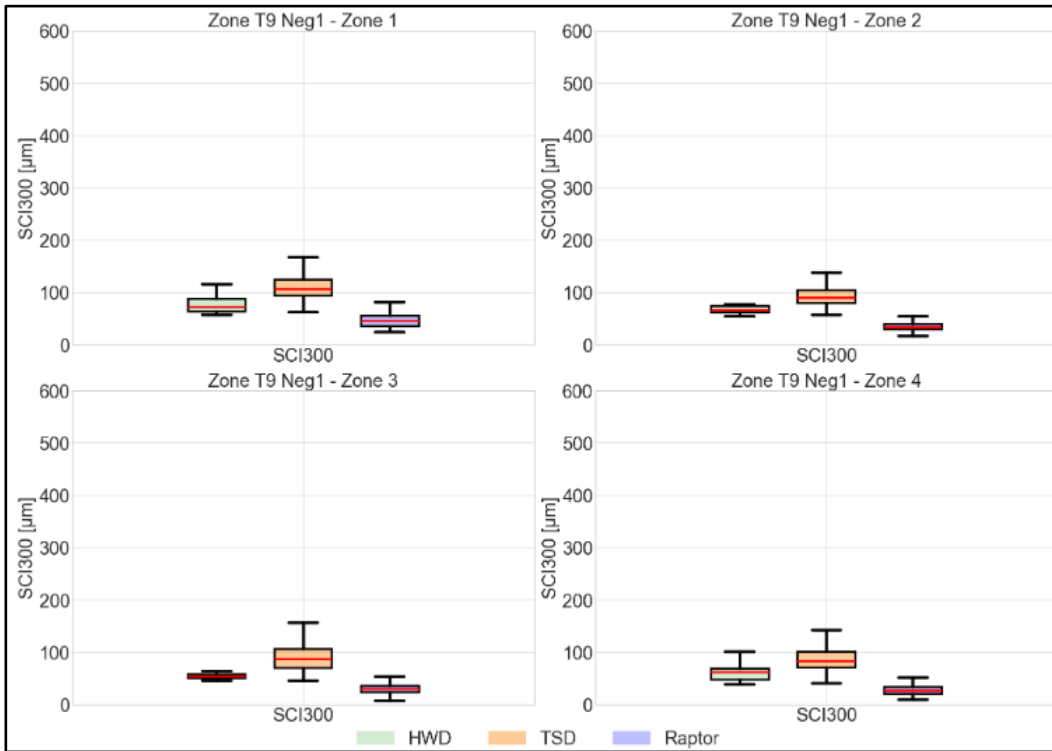


Figure 98 : Comparaison des SCI300 – T9-

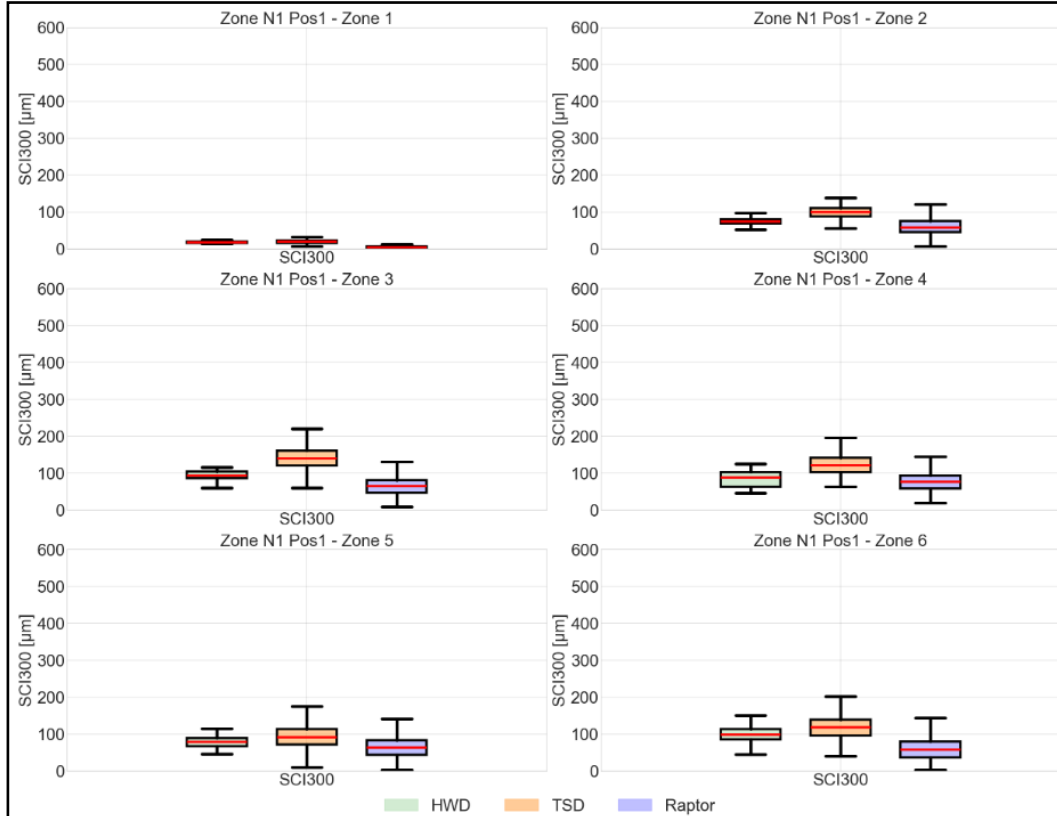


Figure 99 : Comparaison des SCI300 – N1+ (Nyon – Ecublens)

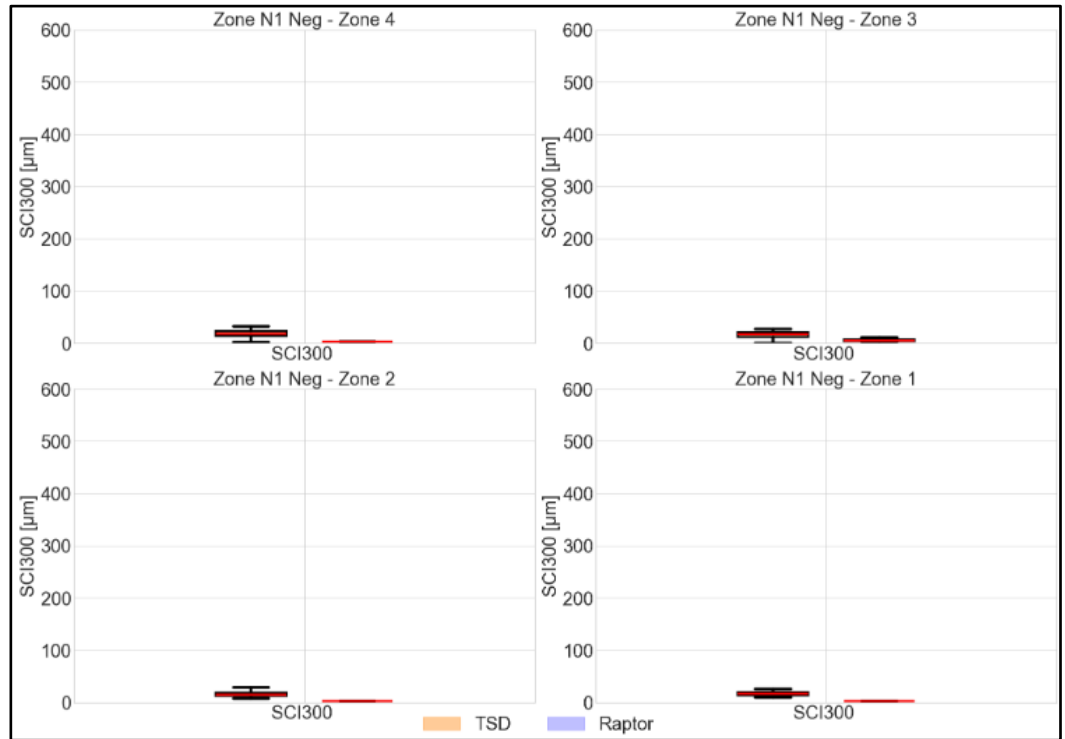


Figure 100 : Comparaison des SCI300 – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

La comparaison des SCI300 moyens sur chacune des zones homogènes, est illustrée dans le tableau et la figure suivants.

Synthèse des SCI300 moyens

Secteur	Zone hom.	SCI300 TSD [μm]	SC300 HWD [μm]	SCI300 RAP-TOR [μm]	% Diff (SCI_HWD - SCI_TSD)	% Diff (SCI_HWD - SCI_RAP)
RC1003 +	Zone 1	164	150	67	-10%	55%
	Zone 2	151	139	62	-8%	55%
	Zone 3	117	78	43	-51%	44%
RC1003 -	Zone 1	161	113	74	-43%	35%
	Zone 2	124	91	44	-37%	51%
	Zone 3	101	78	43	-29%	45%
RC3140 +	Zone 1	154	124	73	-24%	41%
	Zone 2	140	124	73	-13%	41%
	Zone 3	207	130	94	-58%	28%
	Zone 4	307	174	120	-77%	31%
	Zone 5	220	140	106	-58%	24%
RC2410 +	Zone 1	192	149	83	-29%	44%
	Zone 2	188	140	96	-34%	31%
	Zone 3	167	119	74	-40%	38%
RC4530 +	Zone 1	61	45	19	-35%	59%
	Zone 2	68	53	24	-30%	55%
	Zone 3	79	59	26	-35%	55%
T9 +	Zone 1	104	78	33	-34%	57%
	Zone 2	80	66	29	-22%	56%
	Zone 3	84	66	31	-27%	53%
	Zone 4	76	61	35	-25%	42%
T9 -	Zone 1	112	77	46	-45%	40%
	Zone 2	95	69	36	-38%	48%
	Zone 3	90	55	32	-63%	41%
	Zone 4	87	60	33	-46%	45%
N1+ (Nyon – Ecublens)	Zone 1	19	18	13	-4%	29%
	Zone 2	99	74	63	-34%	15%
	Zone 3	142	100	65	-42%	34%
	Zone 4	123	86	79	-43%	8%
	Zone 5	93	79	64	-18%	19%
	Zone 6	116	99	60	-17%	39%
N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-B.)	Zone 1	15	-	3	-	-
	Zone 2	16	-	3	-	-
	Zone 3	16	-	6	-	-
	Zone 4	24	-	4	-	-

Tableau 24 : Synthèse des SCI300 moyens mesurées par les trois appareils sur les différentes zones



Figure 101 : Comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur SCI300

Les boxplots représentant les mesures de l'indicateur SCI300 pour les trois appareils de mesure dans chaque zone homogène démontrent une distribution des valeurs globalement similaire, révélant des tendances comparables dans l'évaluation de la qualité de la couche de roulement. Les valeurs de SCI300 obtenues par le TSD sont typiquement légèrement plus élevées que celles enregistrées par le HWD, suggérant que le TSD peut détecter plus fréquemment des zones de faiblesse de la chaussée. Cette tendance indique une interprétation potentiellement plus pessimiste de l'état de la couche de surface par le TSD, qui pourrait être attribuée à sa sensibilité ou à sa calibration. En revanche, les valeurs mesurées par le RAPTOR tendent à être légèrement inférieures,

ce qui pourrait indiquer une sensibilité moindre, résultant en une appréciation plus optimiste de la couche de surface.

Il est important de souligner que, malgré une fréquence de mesure similaire, le TSD présente une variabilité plus marquée dans les valeurs de SCI300 par rapport au RAPTOR, ce qui indique une plus grande dispersion des résultats. Cette variabilité accrue peut être attribuée aux spécificités de la méthode de mesure ou à la calibration du TSD, qui peut capter davantage de nuances ou de variations dans l'état de la chaussée, produisant des résultats en contraste avec ceux plus homogènes obtenus par le RAPTOR.

L'analyse comparative des valeurs moyennes de l'indicateur SCI300 à travers les différentes zones étudiées révèle des nuances notables entre les appareils de mesure. Globalement, les valeurs SCI300 obtenues avec le TSD sont plus proches de celles du HWD, bien qu'elles tendent à être légèrement supérieures. En revanche, les valeurs SCI300 mesurées par le RAPTOR sont plus faibles, avec des écarts de +24% à +56% entre HWD et RAPTOR. Cela indique que les SCI300 du RAPTOR sont systématiquement inférieurs à ceux du HWD. Quant au TSD, les différences varient entre -46% et -23%, soulignant que bien que les SCI300 du TSD soient légèrement supérieurs, ils restent plus proches des valeurs du HWD que ceux du RAPTOR.

6.7 Comparaison des MLI

L'indicateur MLI défini ci-dessous, fournit une évaluation préliminaire de la qualité de la couche de fondation (cf. Chapitre 2.4). Un indice MLI élevé peut indiquer une détérioration de cette couche, mettant en lumière des zones susceptibles de présenter des faiblesses structurelles.

$$\text{MLI} = D300 - D600 \quad [\mu\text{m}] \quad (8)$$

Avec :

D300 : déflexion à 300 mm de la charge [μm]

D600 : déflexion à 600 mm de la charge [μm]

Il est donc pertinent d'évaluer la capacité du TSD et du RAPTOR à identifier les zones de faiblesse de la chaussée et de les comparer aux zones détectées par le HWD. La correction pour normaliser les mesures à une charge de référence de 50 kN et à une température de 15 °C n'a pas été effectuée. Cette comparaison peut révéler des variations dans la sensibilité et l'efficacité des différents appareils à diagnostiquer les dégradations structurelles des couches de base.

La figure ci-dessous présente une comparaison des indicateurs MLI, tels que mesurés par les trois appareils pour chaque secteur analysé. Cette visualisation permet de discerner les divergences et les correspondances entre les résultats obtenus par chaque technologie de mesure.

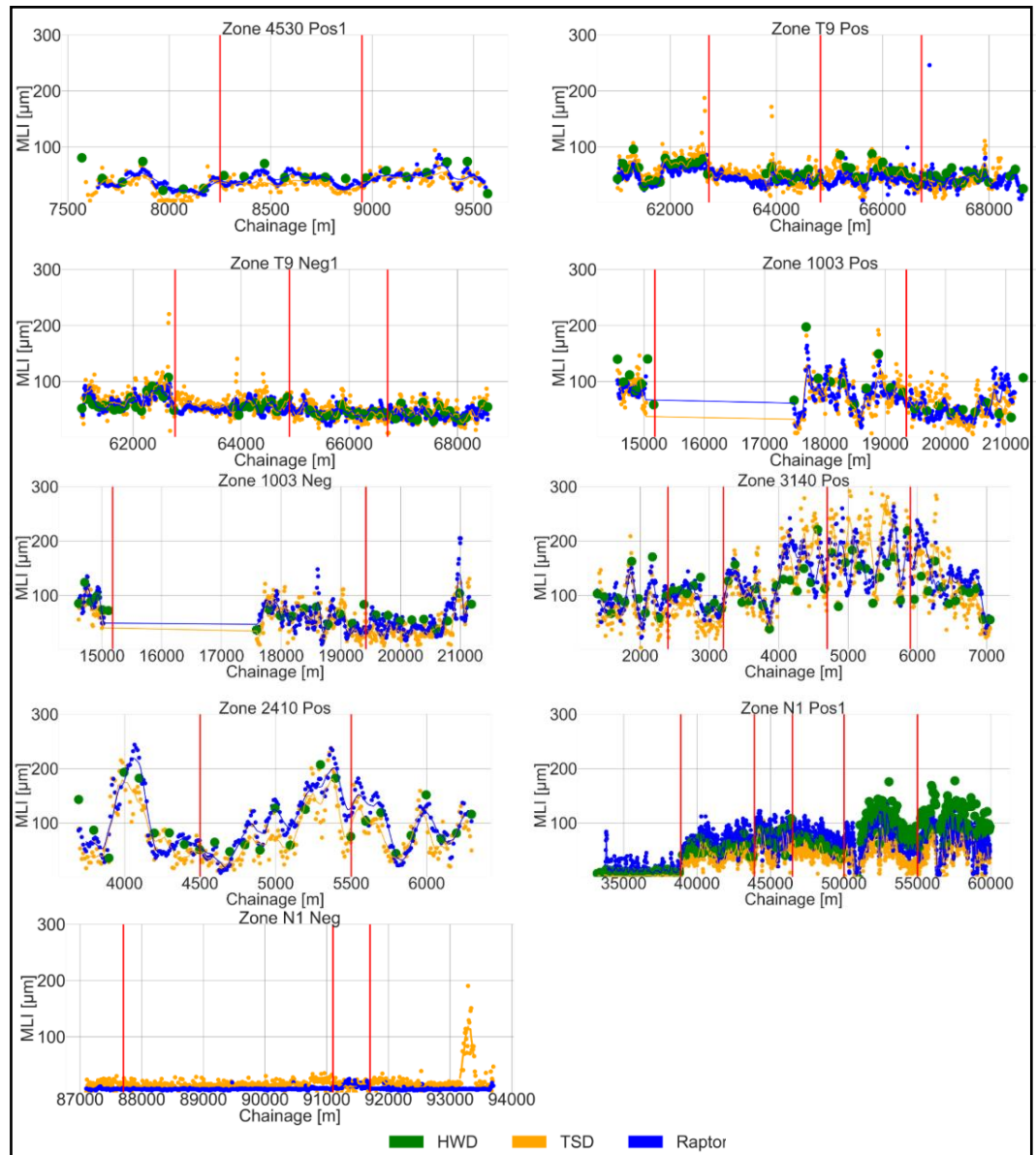


Figure 102 : Comparaison des MLI mesurés par les trois appareils

L'analyse des indices MLI mesurés par les trois appareils de mesure, révèle des tendances comparables à travers toutes les zones étudiées. Cette uniformité démontre la capacité des appareils à évaluer de manière cohérente l'état de la chaussée. Cependant, une exception notable est observée sur la N1+ (Nyon – Ecublens) dans la zone 1, où les dalles en béton sont présentes. Dans cette zone spécifique, les valeurs MLI enregistrées par le TSD sont singulièrement plus basses comparées à celles du HWD et du RAPTOR. Cette divergence reflète des limitations dans la capacité de l'appareil à évaluer correctement les zones rigides.

De plus, le TSD, comme le RAPTOR, grâce à leur fréquence de mesure élevée, montre une grande efficacité dans la détection des faiblesses locales de la chaussée. La variabilité accrue des estimations du MLI par ces appareils, tel qu'illustré dans les résultats,

permet une identification plus précise et détaillée des zones potentiellement dégradées.

Les figures suivantes illustrent la comparaison statistique des indices MLI enregistrés par chaque appareil de mesure pour les différentes zones homogènes identifiées dans chaque secteur analysé.

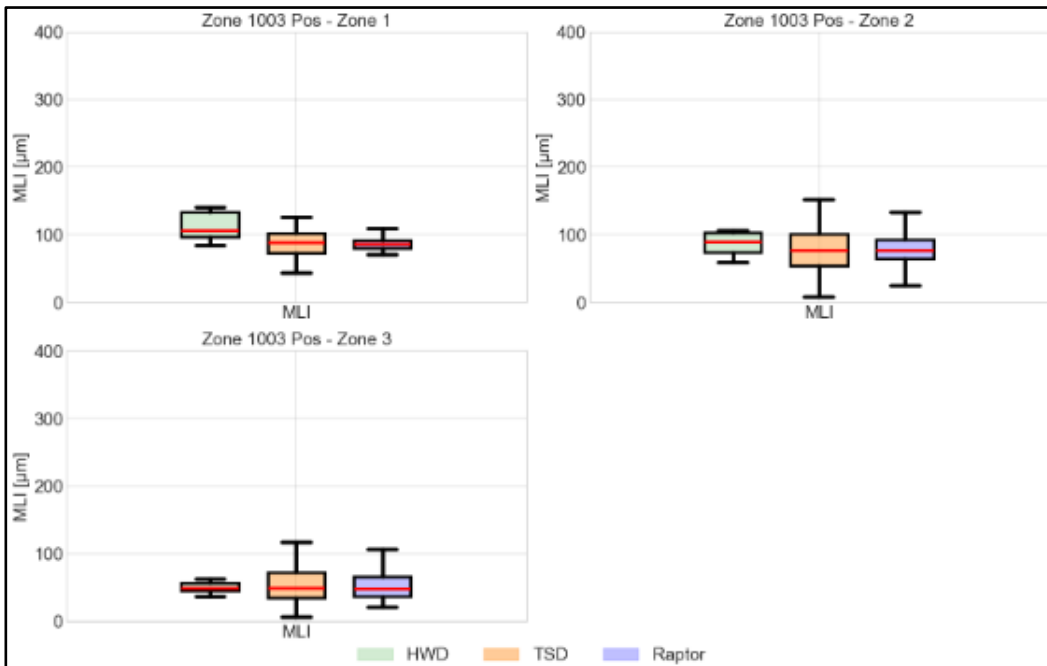


Figure 103 : Comparaison des MLI – RC1003+

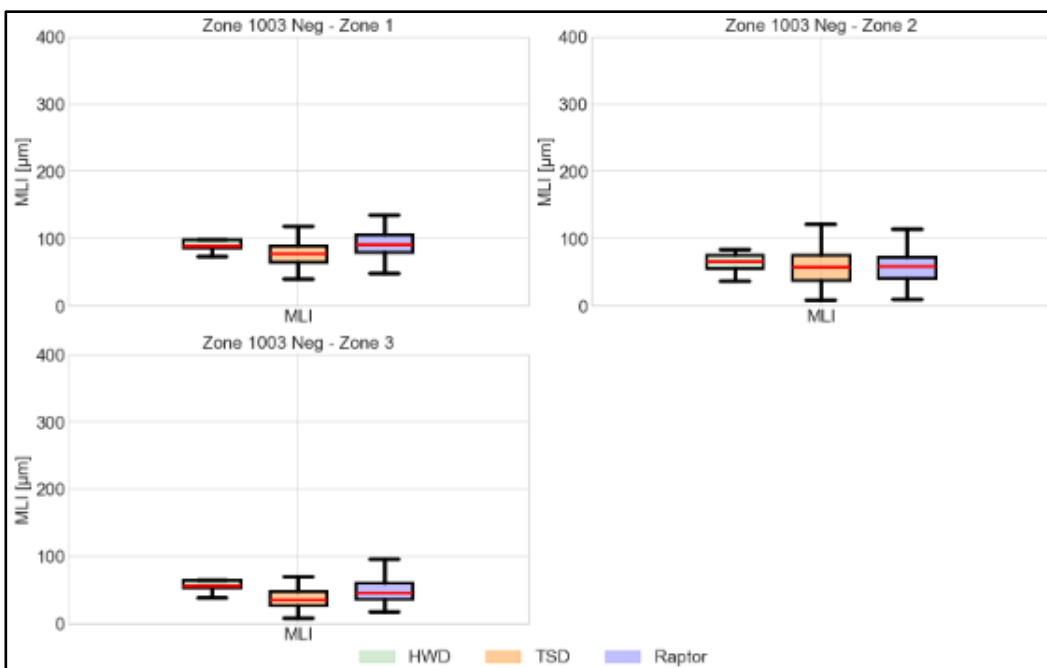


Figure 104 : Comparaison des MLI – RC1003-

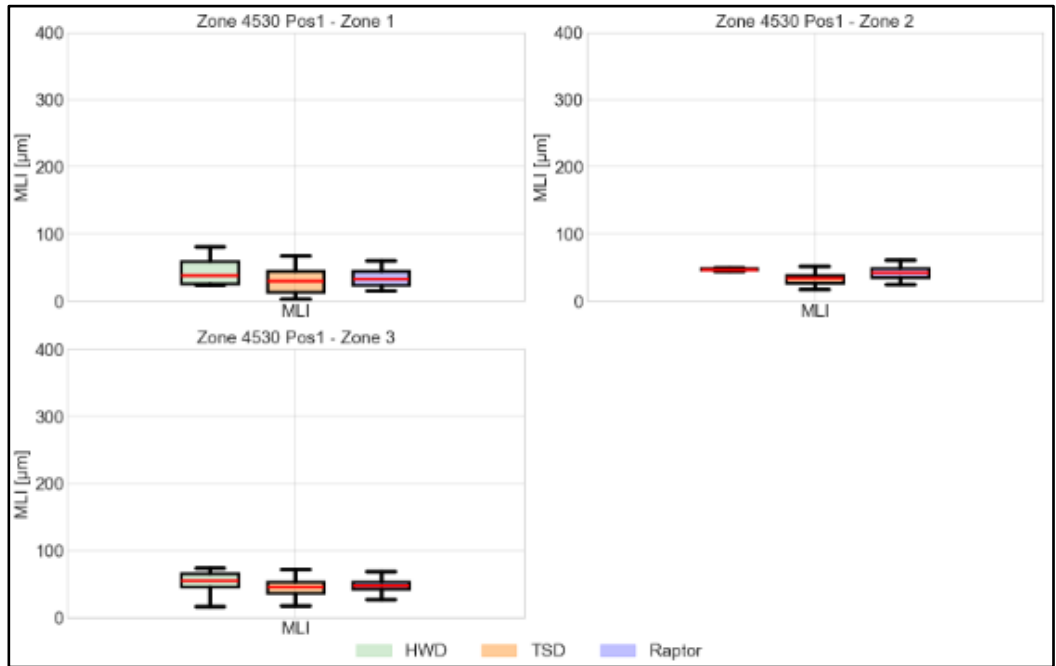


Figure 105 : Comparaison des MLI – RC4530+

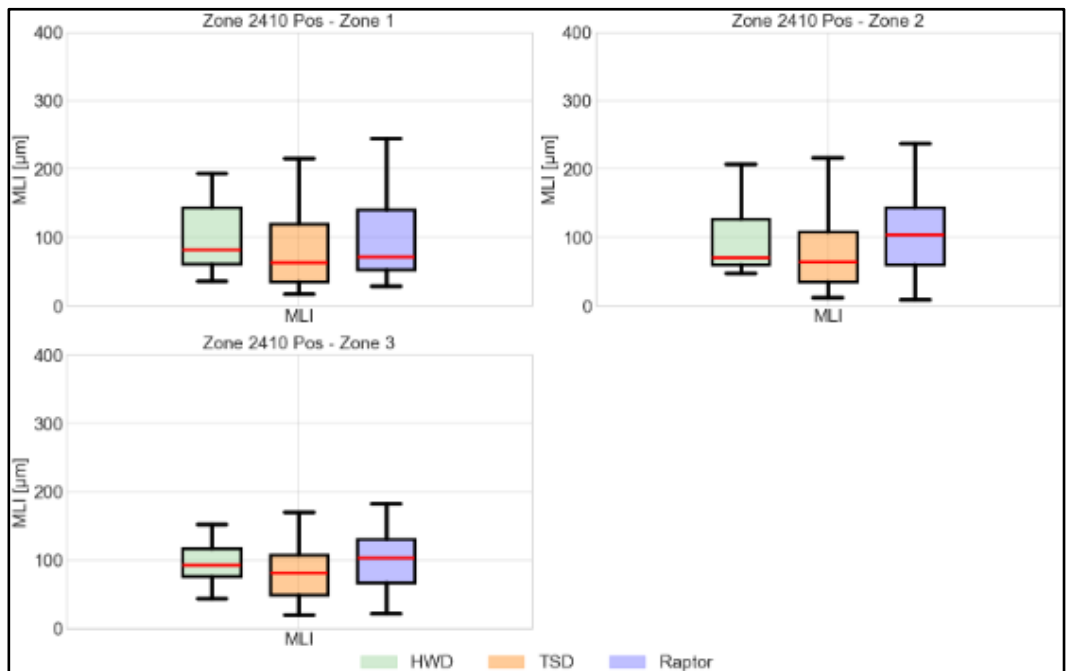


Figure 106 : Comparaison des MLI – RC2410+

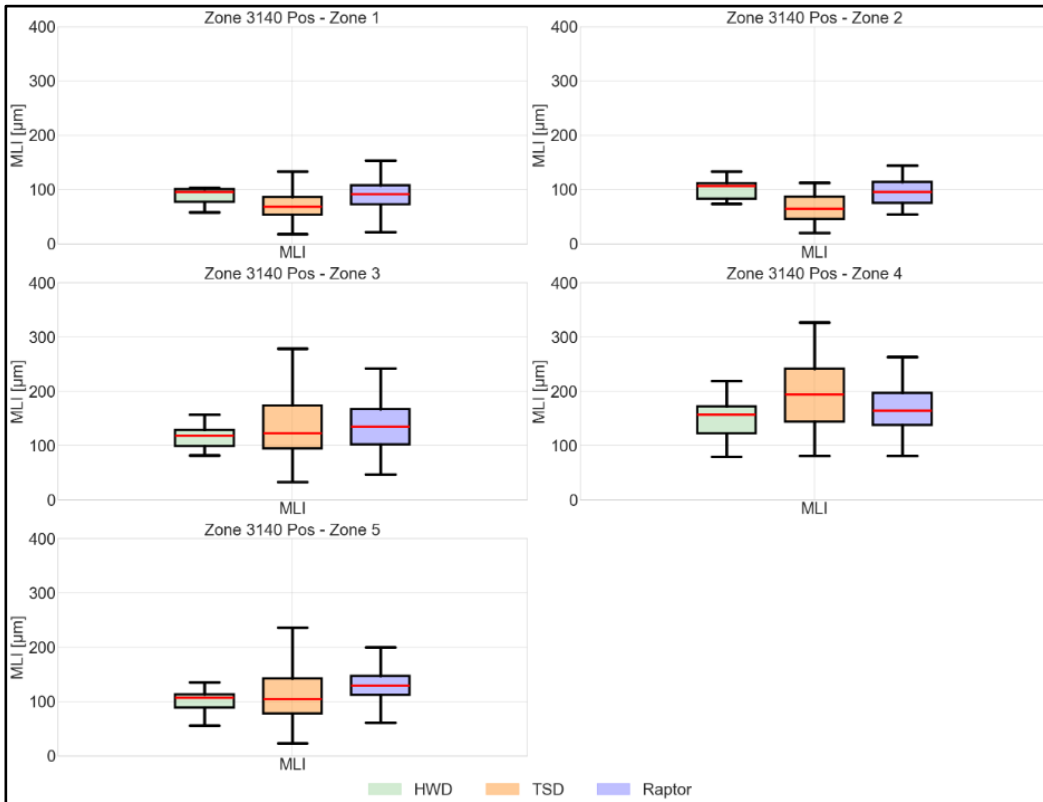


Figure 107 : Comparaison des MLI – RC3140+

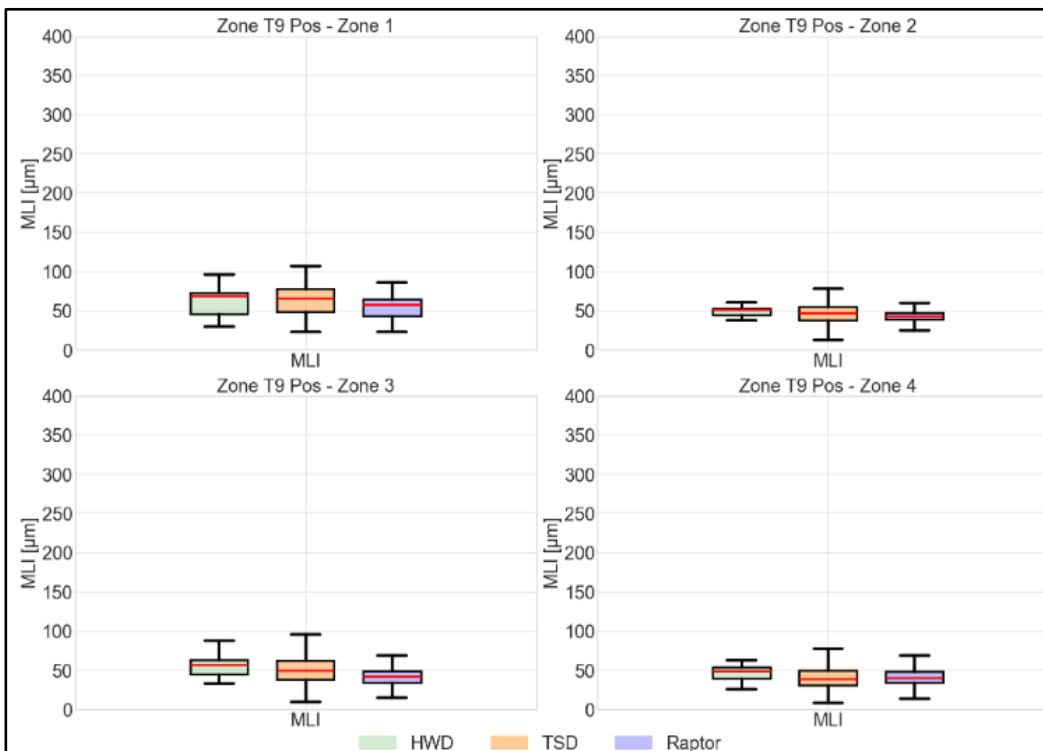


Figure 108 : Comparaison des MLI – T9+

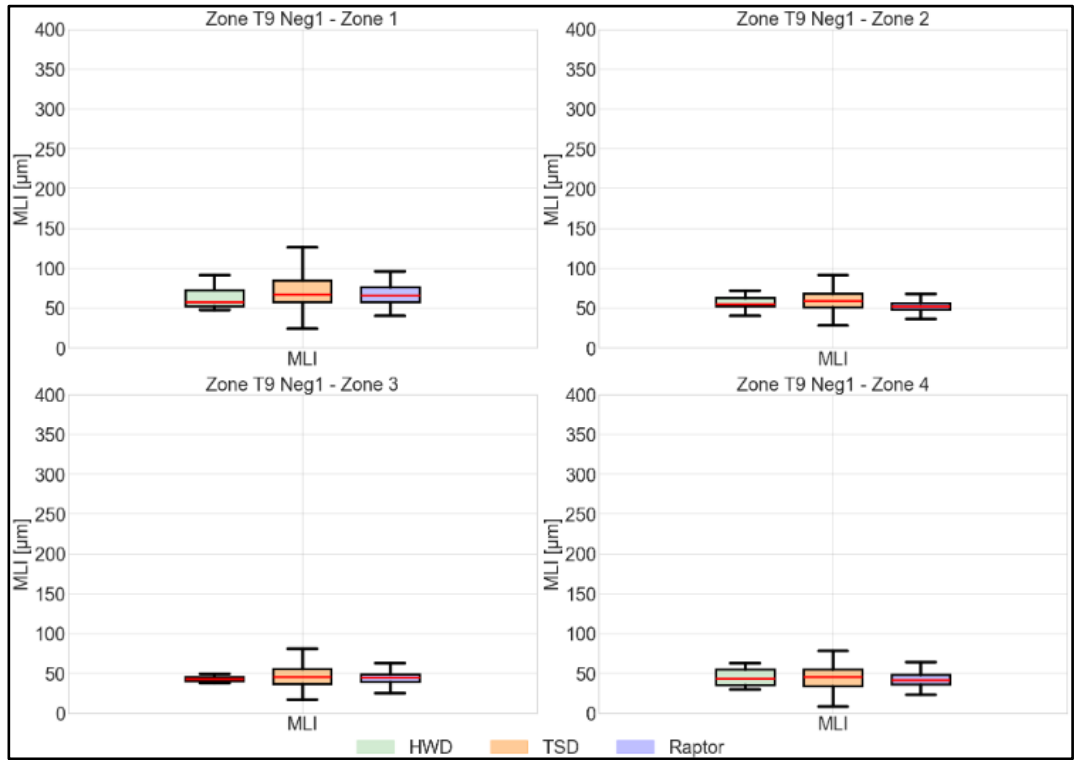


Figure 109 : Comparaison des MLI – T9-

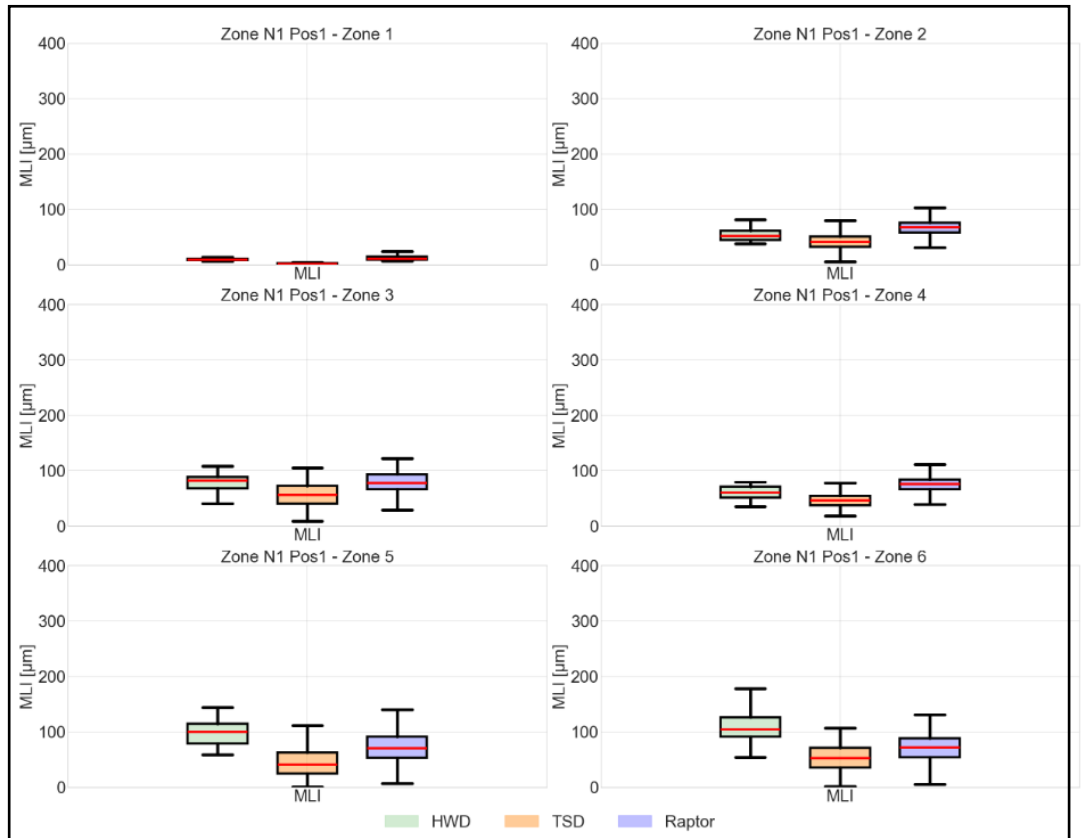


Figure 110 : Comparaison des MLI – N1+ (Nyon – Ecublens)

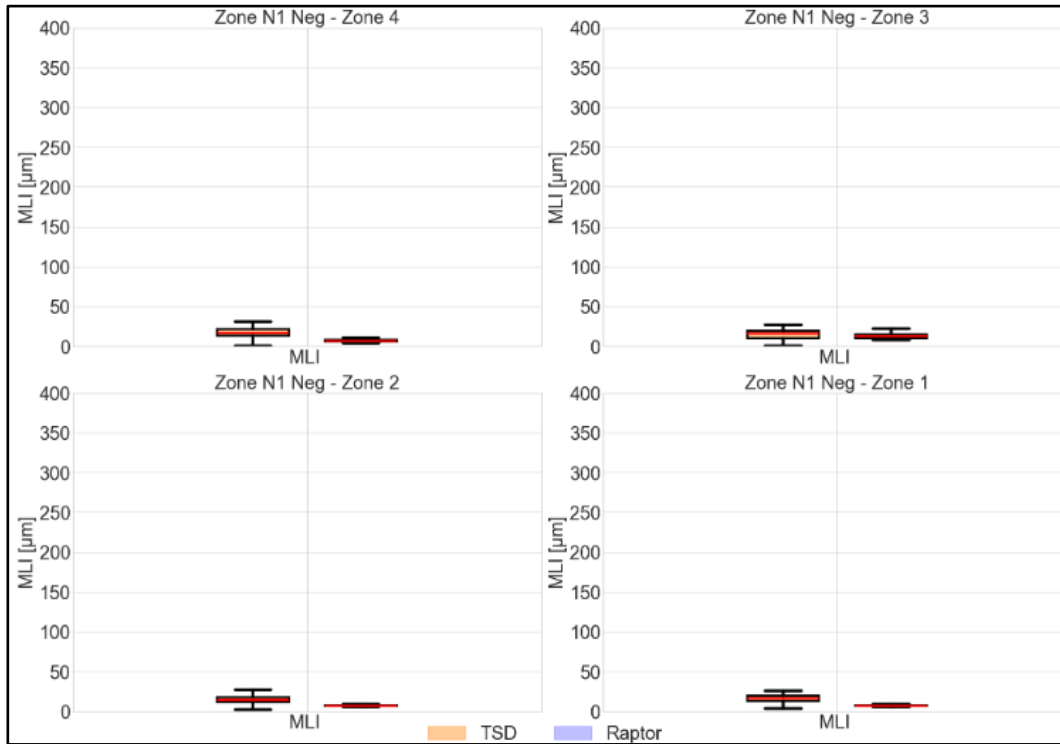


Figure 111 : Comparaison des MLI – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

La comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur MLI sur chacune des zones homogènes, est illustrée dans le tableau et la figure suivants.

Synthèse des valeurs moyennes de l'indicateur MLI						
Secteur	Zone hom.	MLI TSD [μm]	MLI HWD [μm]	MLI RAPTOR [μm]	% Diff (MLI_HWD - MLI_TSD)	% Diff (MLI_HWD - MLI_RAP)
RC1003 +	Zone 1	87	112	86	22%	23%
	Zone 2	78	99	78	22%	21%
	Zone 3	53	54	54	2%	0%
RC1003 -	Zone 1	78	94	91	17%	3%
	Zone 2	57	64	58	11%	10%
	Zone 3	43	63	54	32%	15%
RC3140 +	Zone 1	76	100	93	24%	7%
	Zone 2	66	101	93	35%	7%
	Zone 3	132	119	135	-11%	-14%
	Zone 4	191	147	167	-30%	-14%
	Zone 5	113	102	131	-11%	-28%
RC2410 +	Zone 1	81	102	97	20%	4%
	Zone 2	79	100	105	21%	-5%
	Zone 3	82	95	98	15%	-3%
RC4530 +	Zone 1	28	44	34	37%	22%
	Zone 2	33	50	42	33%	15%
	Zone 3	45	53	49	14%	7%
T9 +	Zone 1	66	62	53	-6%	14%
	Zone 2	47	50	43	5%	13%
	Zone 3	50	57	42	13%	26%
	Zone 4	42	47	41	11%	12%
T9 -	Zone 1	72	65	67	-11%	-4%
	Zone 2	60	57	53	-6%	7%
	Zone 3	46	44	45	-7%	-3%
	Zone 4	46	44	42	-4%	4%
N1+ (Nyon – Ecublens)	Zone 1	3	10	14	70%	-50%
	Zone 2	42	54	67	22%	-24%
	Zone 3	56	76	78	26%	-2%
	Zone 4	47	60	75	22%	-25%
	Zone 5	43	98	71	56%	28%
	Zone 6	52	108	69	52%	36%
N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-B.)	Zone 1	16	-	7	-	-
	Zone 2	15	-	7	-	-
	Zone 3	14	-	13	-	-
	Zone 4	26	-	7	-	-

Tableau 25 : Synthèse des MLI moyens mesurées par les trois appareils sur les différentes zones



Figure 112 : Comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur MLI

Les boxplots illustrant les mesures de l'indicateur MLI par les trois appareils de mesure dans chaque zone homogène montrent une distribution des valeurs globalement similaire, révélant des tendances comparables dans l'évaluation de la qualité de la couche de base. Les valeurs de MLI obtenues par le TSD et le RAPTOR sont généralement très proches de celles enregistrées par le HWD en termes de médianes, ce qui indique une capacité homogène des trois appareils à détecter les zones de faiblesse de la couche de base.

Il est important de noter que, malgré une fréquence de mesure similaire entre les appareils, le TSD présente une variabilité légèrement plus marquée dans les valeurs de MLI par rapport au RAPTOR. Cette dispersion accrue des résultats du TSD peut être attribuée aux particularités de sa méthode de mesure, qui capte une gamme plus étendue de nuances ou de variations dans l'état de la couche de base. Cette sensibilité accrue permet potentiellement une identification plus précise et localisée des zones de faiblesse de la chaussée, ce qui contraste avec les résultats plus homogènes obtenus par le RAPTOR. Cependant, il est à noter que le RAPTOR présente également une certaine variabilité, qui, bien que moins prononcée que celle du TSD, contribue aussi à la détection des défauts localisés dans la structure de la chaussée.

L'analyse comparative des valeurs moyennes de l'indicateur MLI, collectées à travers les différentes zones étudiées, révèle une convergence notable entre les mesures obtenues par les appareils TSD, RAPTOR, et HWD. De manière spécifique, les valeurs MLI mesurées par le RAPTOR présentent des écarts variant de -8% à +16% par rapport à celles du HWD, démontrant ainsi que les mesures du RAPTOR sont relativement proches de celles obtenues par le HWD. D'un autre côté, les valeurs enregistrées par le TSD affichent des variations de -7% à +41% par rapport au HWD, indiquant que bien que les MLI du TSD soient généralement proches, ils peuvent parfois présenter des écarts plus significatifs.

6.8 Comparaison des LLI

L'indicateur LLI, défini ci-dessous, permet de fournir une évaluation préliminaire de la qualité du sol (cf. Chapitre 2.4). Un indice LLI élevé peut révéler une détérioration de cette couche, soulignant ainsi les zones qui pourraient présenter des faiblesses structurelles. Cette métrique est donc essentielle pour apprécier l'état de la couche de fondation et guider les décisions relatives aux interventions de maintenance requises.

$$LLI = D600 - D900 \quad [\mu m] \quad (9)$$

Avec :

D600 : déflexion à 600 mm de la charge [μm]

D900 : déflexion à 900 mm de la charge [μm]

Il est pertinent d'évaluer la capacité du TSD et du RAPTOR à identifier les zones de faiblesse de la couche de fondation et de les comparer à celles détectées par le HWD. La correction pour normaliser les mesures à une charge de référence de 50 kN et à une température de 15 °C n'a pas été effectuée. Cette analyse comparative peut mettre en lumière les différences de sensibilité et d'efficacité entre les appareils dans le diagnostic des dégradations structurelles des couches de fondation.

La figure ci-dessous illustre une comparaison des indicateurs LLI, tels que mesurés par les trois appareils pour chaque secteur analysé. Cette visualisation aide à discerner les divergences et les correspondances entre les résultats obtenus par chaque technologie de mesure.

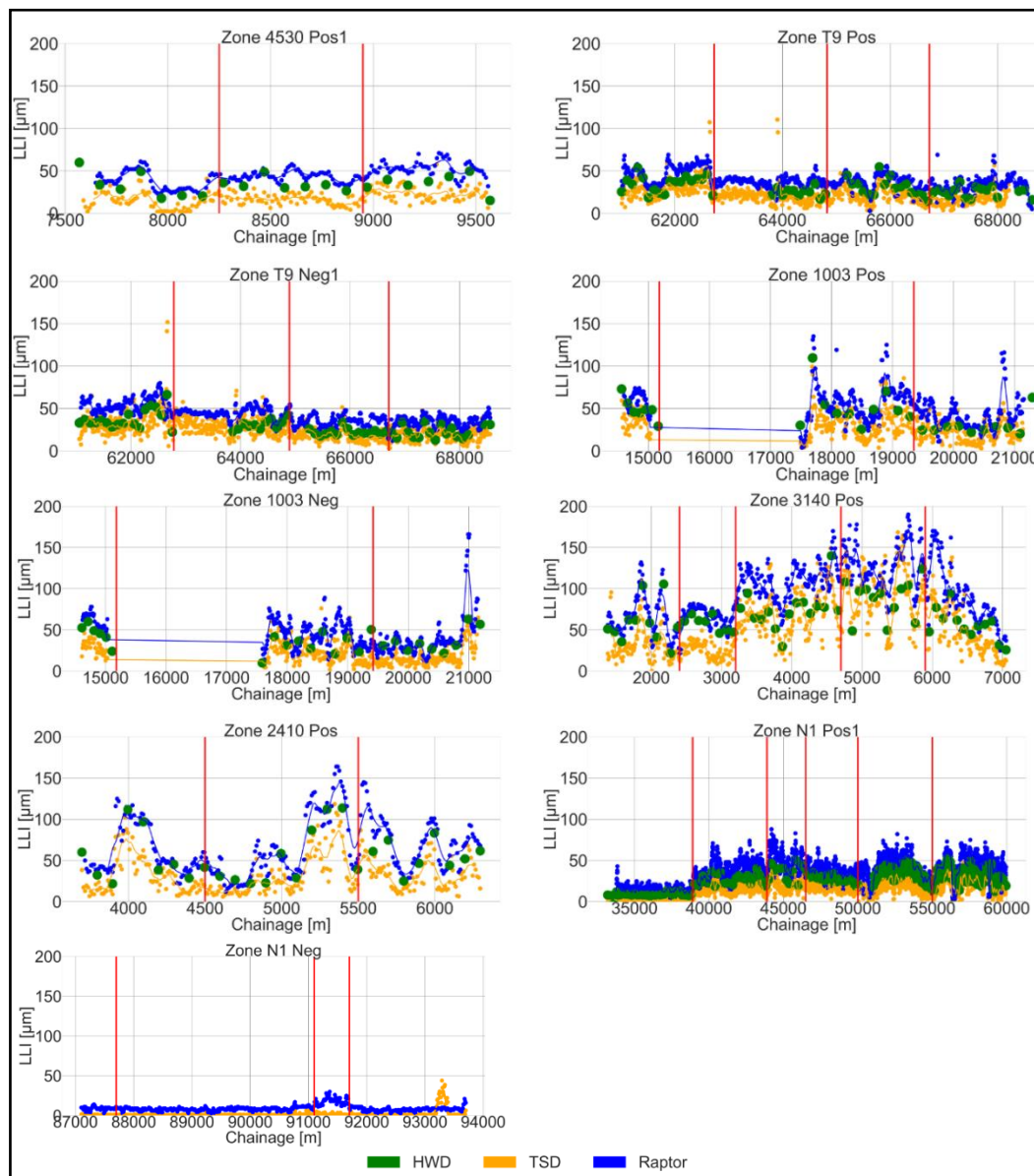


Figure 113 : Comparaison des LLI mesurés par les trois appareils

L'analyse des résultats présentée dans la figure montre que les indices LLI mesurés par les trois appareils présentent des similitudes et suivent des tendances comparables à travers toutes les zones analysées. Les données figurant dans la Figure 113 indiquent que les estimations du LLI par le TSD et le RAPTOR présentent une variabilité plus élevée, ce qui facilite l'identification précise des zones potentiellement dégradées de la structure routière.

Il est important de souligner que les valeurs de l'indicateur LLI mesurées par le TSD sur la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains) sont particulièrement faibles. Cette observation suggère une limitation potentielle du TSD dans l'évaluation de zones considérées comme rigides, comme c'est le cas de la N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

où la structure de la chaussée est stabilisée. Comparativement, le TSD enregistre des valeurs généralement inférieures à celles obtenues par le HWD et le RAPTOR.

Les figures suivantes illustrent la comparaison statistique des indices LLI enregistrés par chaque appareil de mesure pour les différentes zones homogènes identifiées dans chaque secteur analysé.

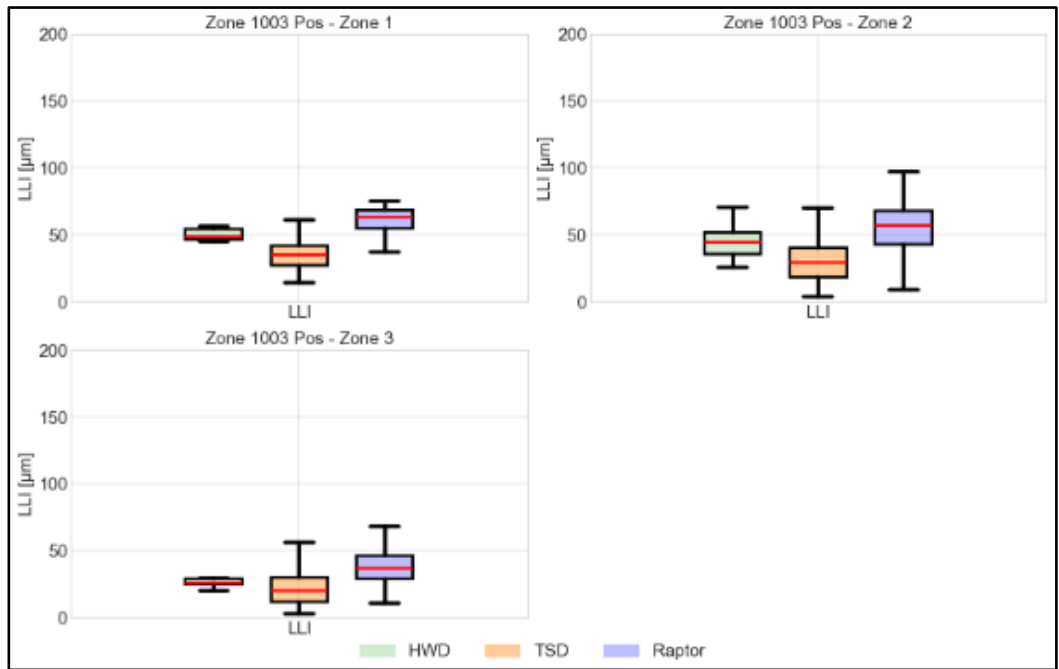


Figure 114 : Comparaison des LLI – RC1003+

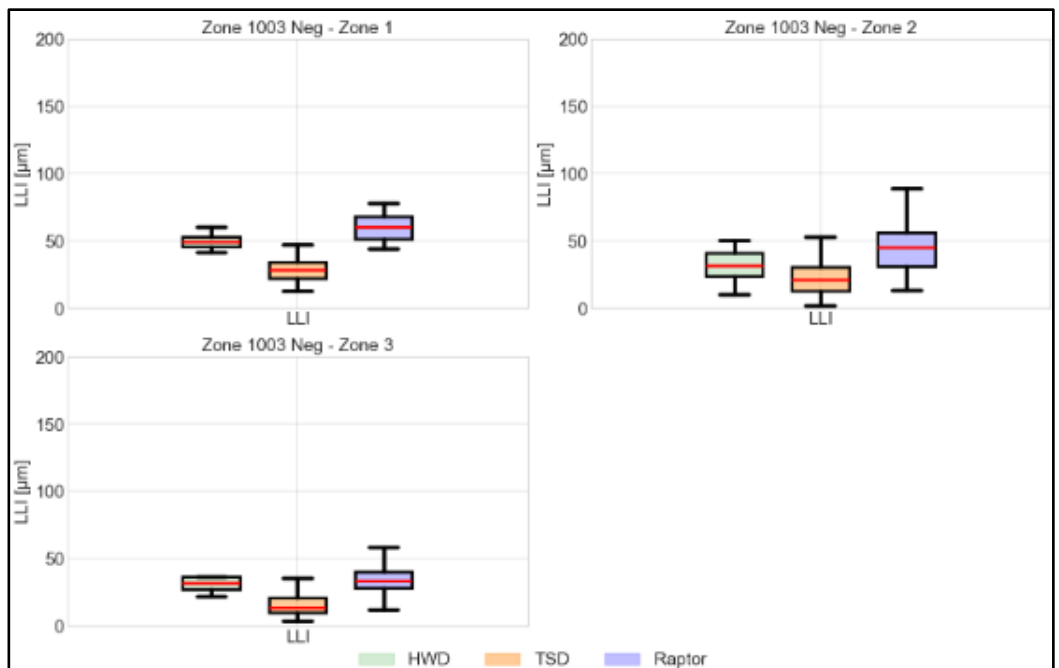


Figure 115 : Comparaison des LLI – RC1003-

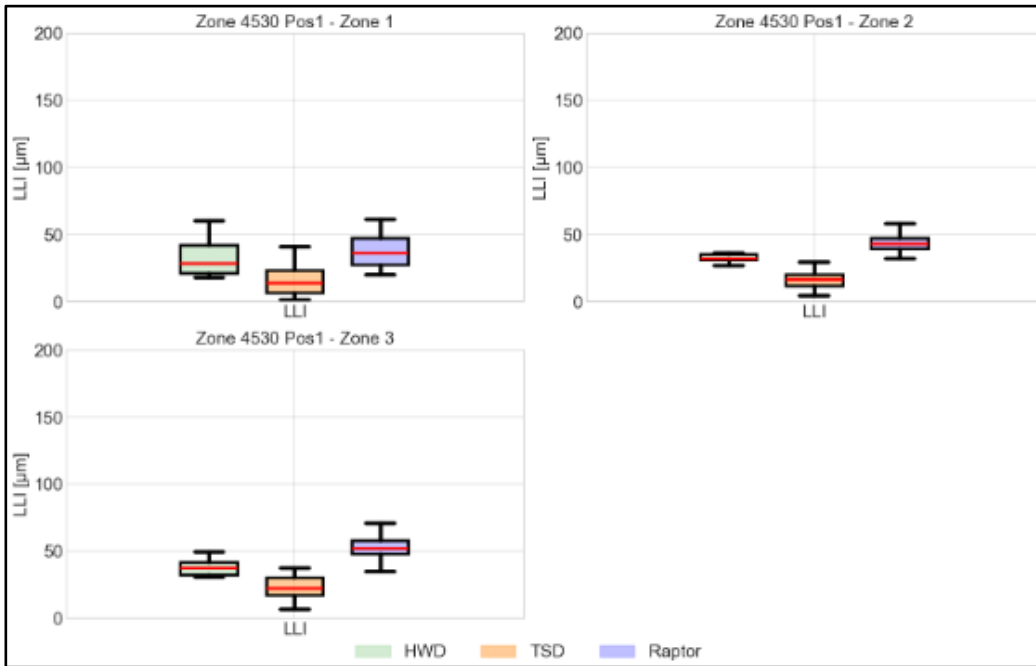


Figure 116 : Comparaison des LLI – RC4530+

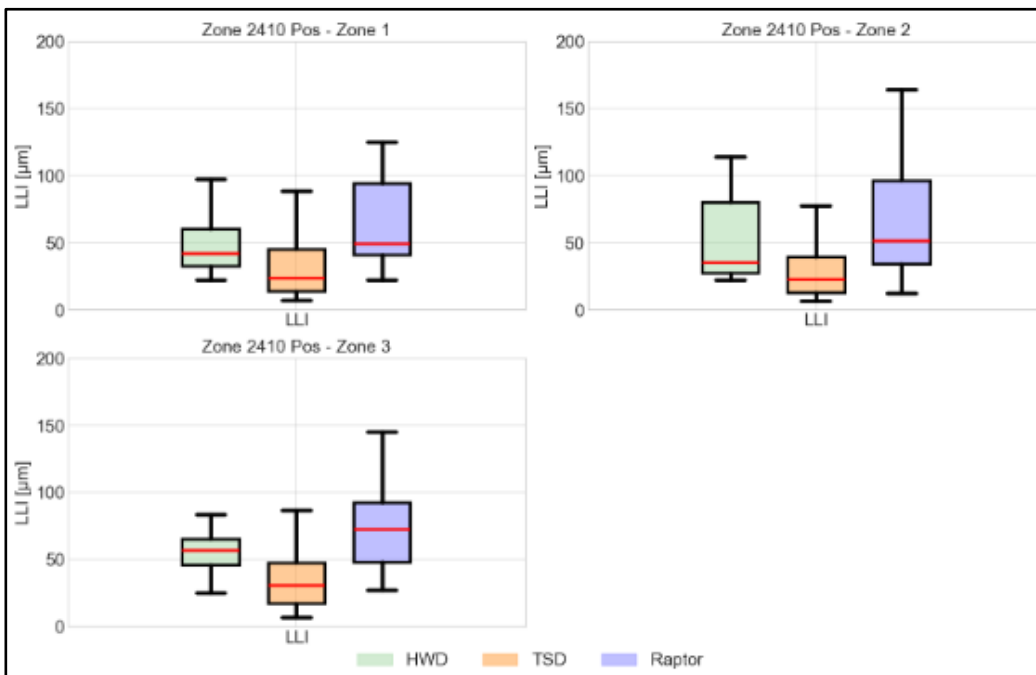


Figure 117 : Comparaison des LLI – RC2410+

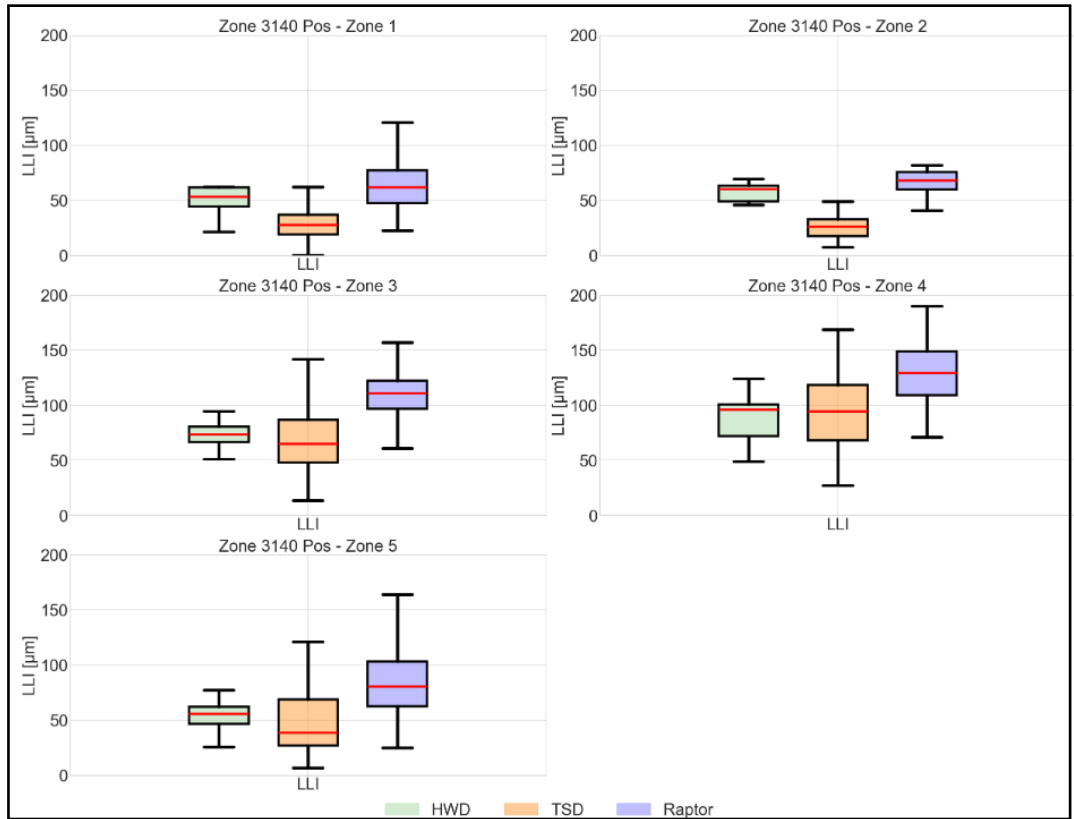


Figure 118 : Comparaison des LLI – RC3140+

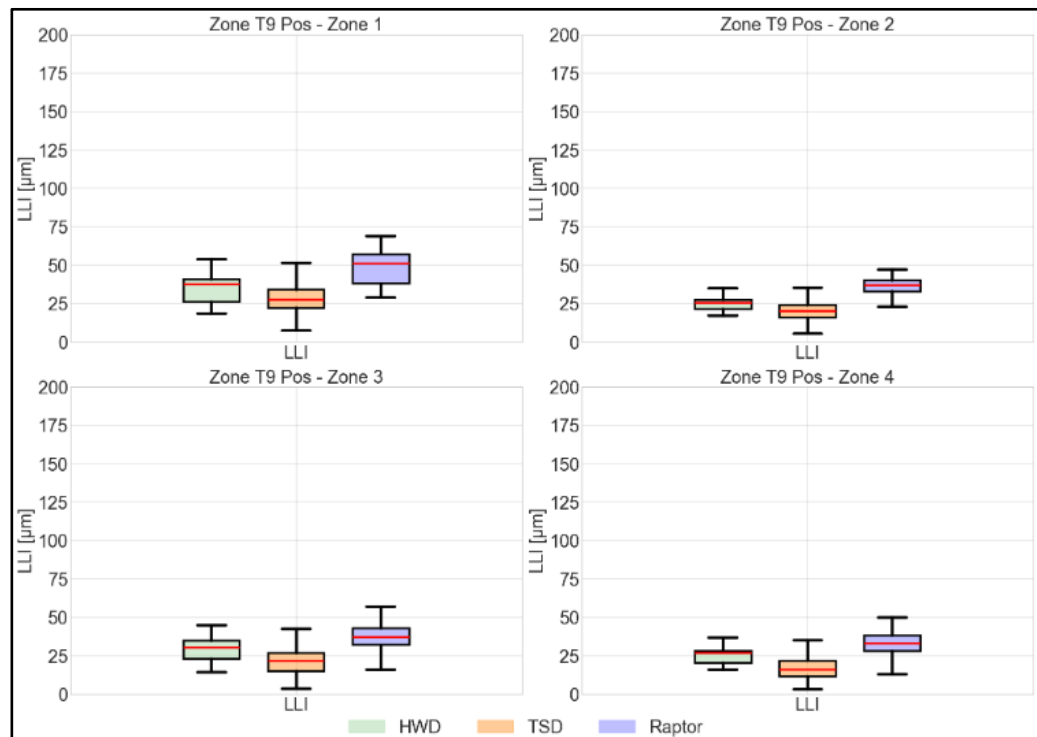


Figure 119 : Comparaison des LLI – T9+

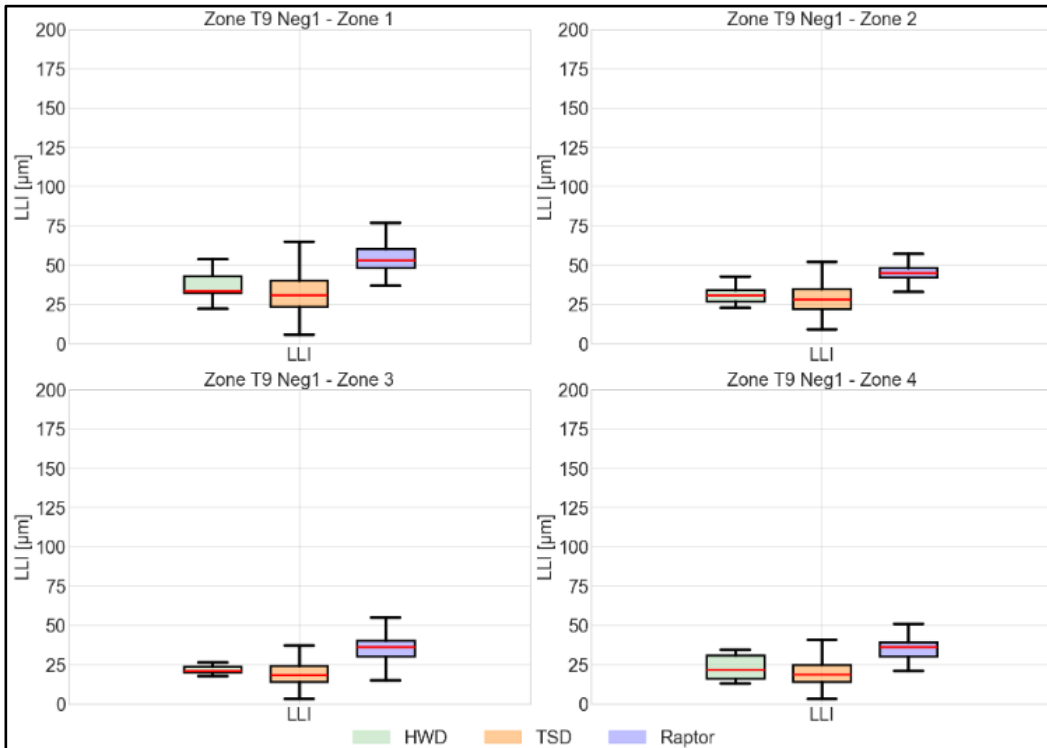


Figure 120 : Comparaison des LLI – T9-

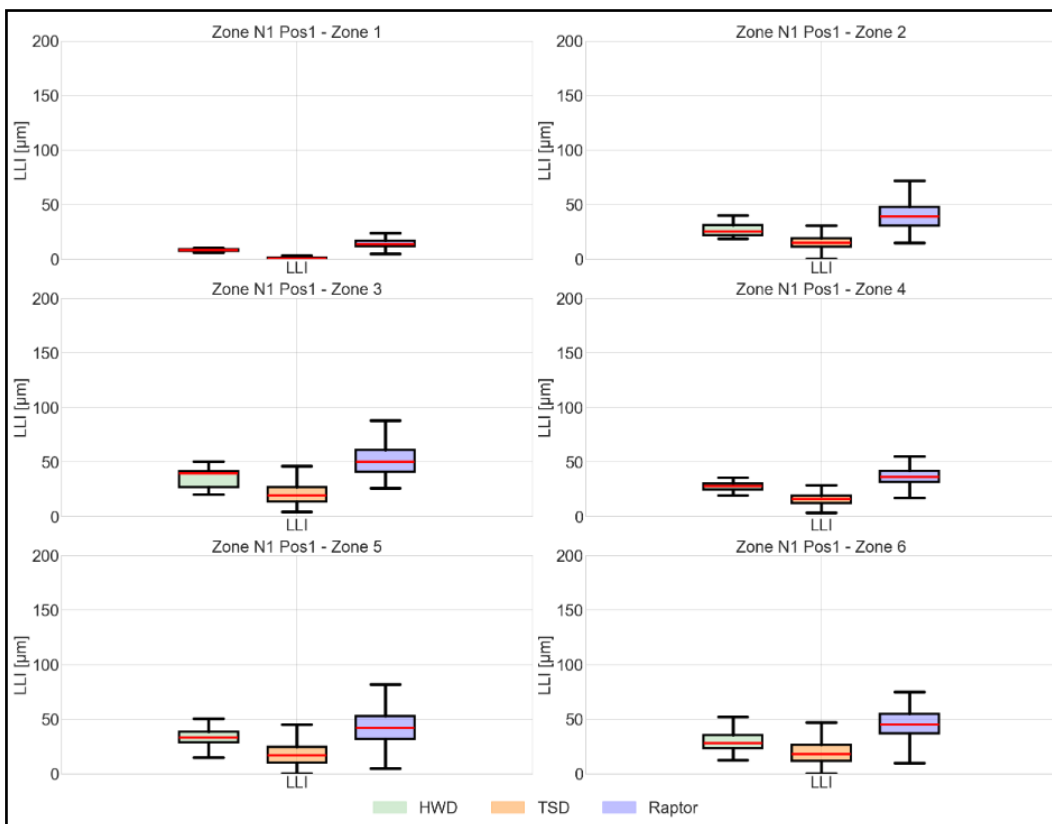


Figure 121 : Comparaison des LLI – N1+ (Nyon – Ecublens)

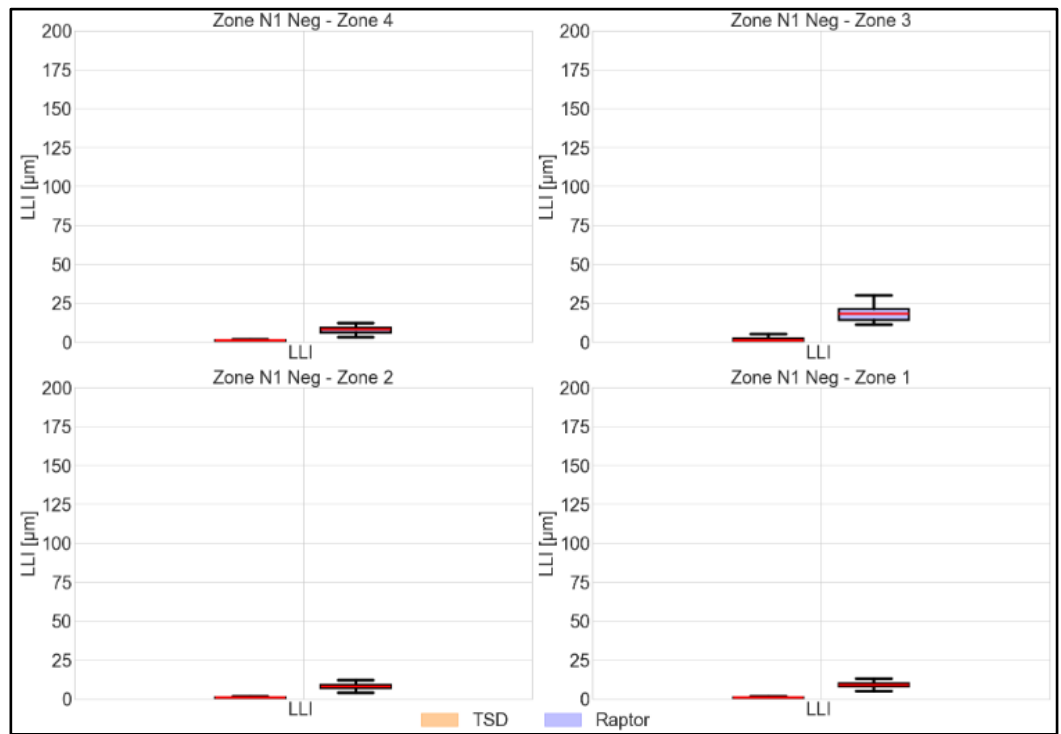


Figure 122 : Comparaison des LLI – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

La comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur LLI sur chacune des zones homogènes, est illustrée dans le tableau et la figure suivants.

Synthèse des valeurs moyennes de l'indicateur LLI						
Secteur	Zone hom.	LLI TSD [μm]	LLI HWD [μm]	LLI RAPTOR [μm]	% Diff (LLI_HWD - LLI_TSD)	% Diff (LLI_HWD - LLI_RAP)
RC1003 +	Zone 1	35	53	60	35%	-14%
	Zone 2	31	49	57	38%	-14%
	Zone 3	22	29	41	25%	-38%
RC1003 -	Zone 1	29	50	60	42%	-20%
	Zone 2	23	32	44	29%	-38%
	Zone 3	18	36	39	51%	-9%
RC3140 +	Zone 1	33	58	65	44%	-12%
	Zone 2	26	58	66	56%	-14%
	Zone 3	69	75	109	9%	-46%
	Zone 4	92	87	129	-6%	-47%
	Zone 5	47	56	88	16%	-57%
RC2410 +	Zone 1	32	53	61	40%	-16%
	Zone 2	32	54	64	41%	-18%
	Zone 3	34	56	72	39%	-28%
RC4530 +	Zone 1	15	33	37	55%	-13%
	Zone 2	16	34	43	53%	-27%
	Zone 3	24	36	53	34%	-48%
T9 +	Zone 1	29	35	48	16%	-38%
	Zone 2	21	25	36	18%	-45%
	Zone 3	22	31	37	30%	-18%
	Zone 4	18	25	33	31%	-30%
T9 -	Zone 1	34	38	54	11%	-43%
	Zone 2	29	31	44	8%	-42%
	Zone 3	19	22	35	15%	-57%
	Zone 4	20	23	34	13%	-51%
N1+ (Nyon – Ecublens)	Zone 1	1	9	15	86%	-68%
	Zone 2	16	27	39	40%	-47%
	Zone 3	21	36	51	43%	-40%
	Zone 4	16	28	37	41%	-33%
	Zone 5	18	33	41	47%	-25%
	Zone 6	20	30	44	35%	-45%
N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-B.)	Zone 1	1	-	9	-	-
	Zone 2	1	-	8	-	-
	Zone 3	1	-	18	-	-
	Zone 4	3	-	8	-	-

Tableau 26 : Synthèse des LLI moyens mesurées par les trois appareils sur les différentes zones



Figure 123 : Comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur LLI

Les boxplots illustrant les mesures de l'indicateur LLI par les trois appareils de mesure pour chaque zone homogène montrent une distribution des valeurs globalement homogène, révélant des tendances comparables dans l'évaluation de la qualité de la couche de fondation. Cependant, les valeurs de LLI obtenues par le RAPTOR sont légèrement supérieures. Cette tendance peut être interprétée comme une appréciation plus pessimiste de l'état de la couche de fondation par le RAPTOR, soulignant sa sensibilité à identifier les anomalies structurales. À l'inverse, les valeurs mesurées par le TSD sont légèrement inférieures, ce qui pourrait indiquer une capacité réduite à détecter les dégradations, ou une sensibilité différente aux caractéristiques de la chaussée.

Cette situation pourrait conduire à une appréciation plus optimiste de l'état de la couche de fondation par le TSD.

L'analyse des valeurs moyennes de l'indicateur LLI obtenues par les trois appareils de mesure révèle des variations significatives dans les résultats. Les valeurs LLI enregistrées par le RAPTOR sont généralement supérieures à celles du HWD, avec des écarts allant de -48% à -20%. Cette tendance indique que le RAPTOR pourrait être plus sensible à la détection de faiblesses dans la couche de fondation. En revanche, les valeurs LLI mesurées par le TSD sont légèrement inférieures à celles du HWD, avec des variations entre +24% et +49%. Cette observation suggère que le TSD, bien qu'efficace, tend à fournir des estimations plus conservatrices de la condition de la couche de fondation par rapport au HWD.

6.9 Comparaison des déflexions D1500

Ce chapitre est dédié à l'analyse comparative des déflexions D1500, mesurées à une distance de 1500 mm de la charge appliquée. Cet indicateur est utile pour évaluer la rigidité de la couche structurelle la plus profonde de la chaussée, offrant ainsi une première approximation de ses propriétés mécaniques. La comparaison des déflexions D1500 enregistrées par différents appareils de mesure permet d'examiner la cohérence avec laquelle ces instruments évaluent le comportement des couches inférieures de la chaussée.

L'objectif de cette analyse est de déterminer dans quelle mesure les diverses technologies de mesure reflètent de manière similaire ou divergente les caractéristiques de rigidité de la fondation.

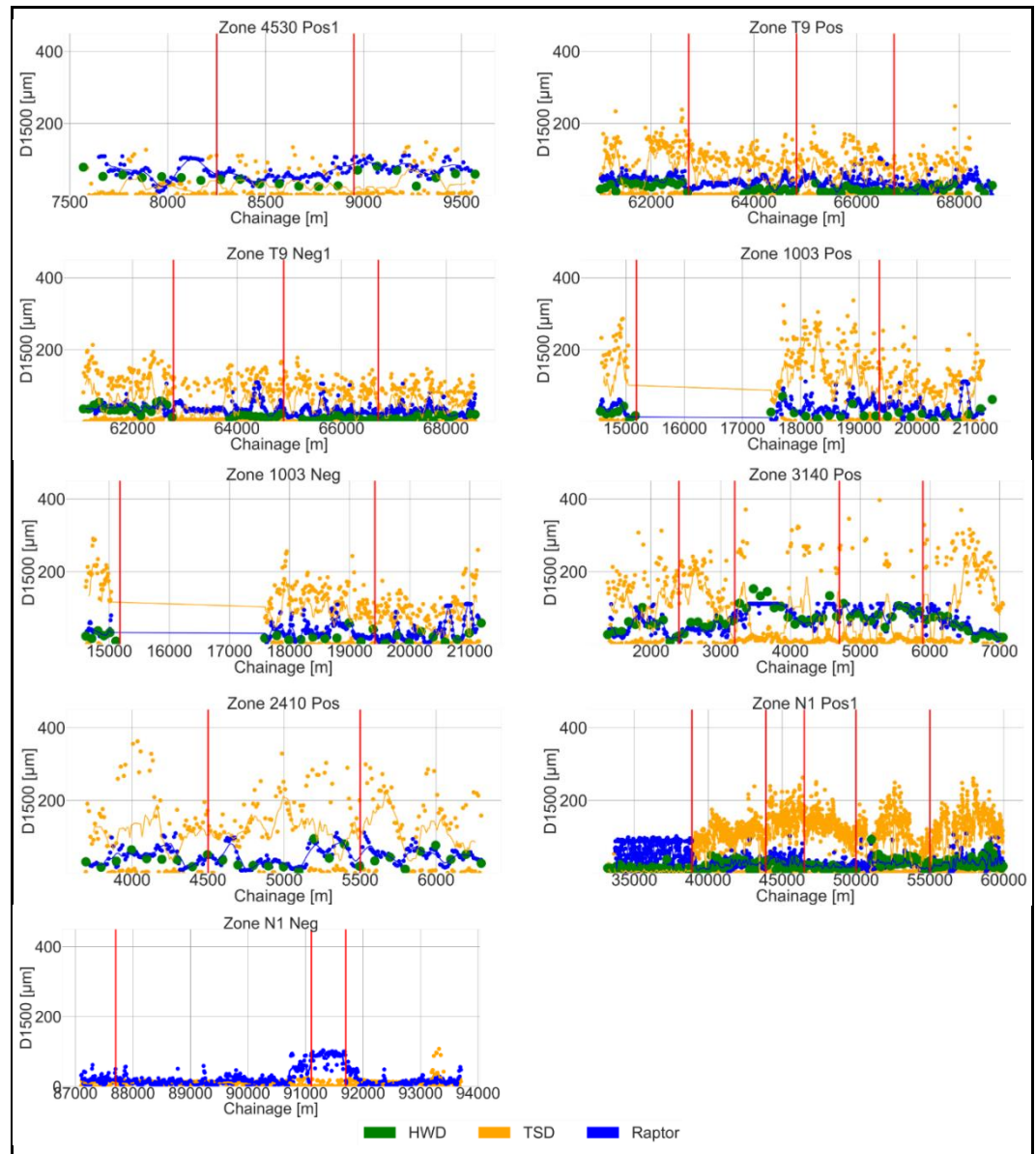


Figure 124 : Comparaison des déflexions D1500 mesurés par les trois appareils

L'analyse des résultats présentée dans la

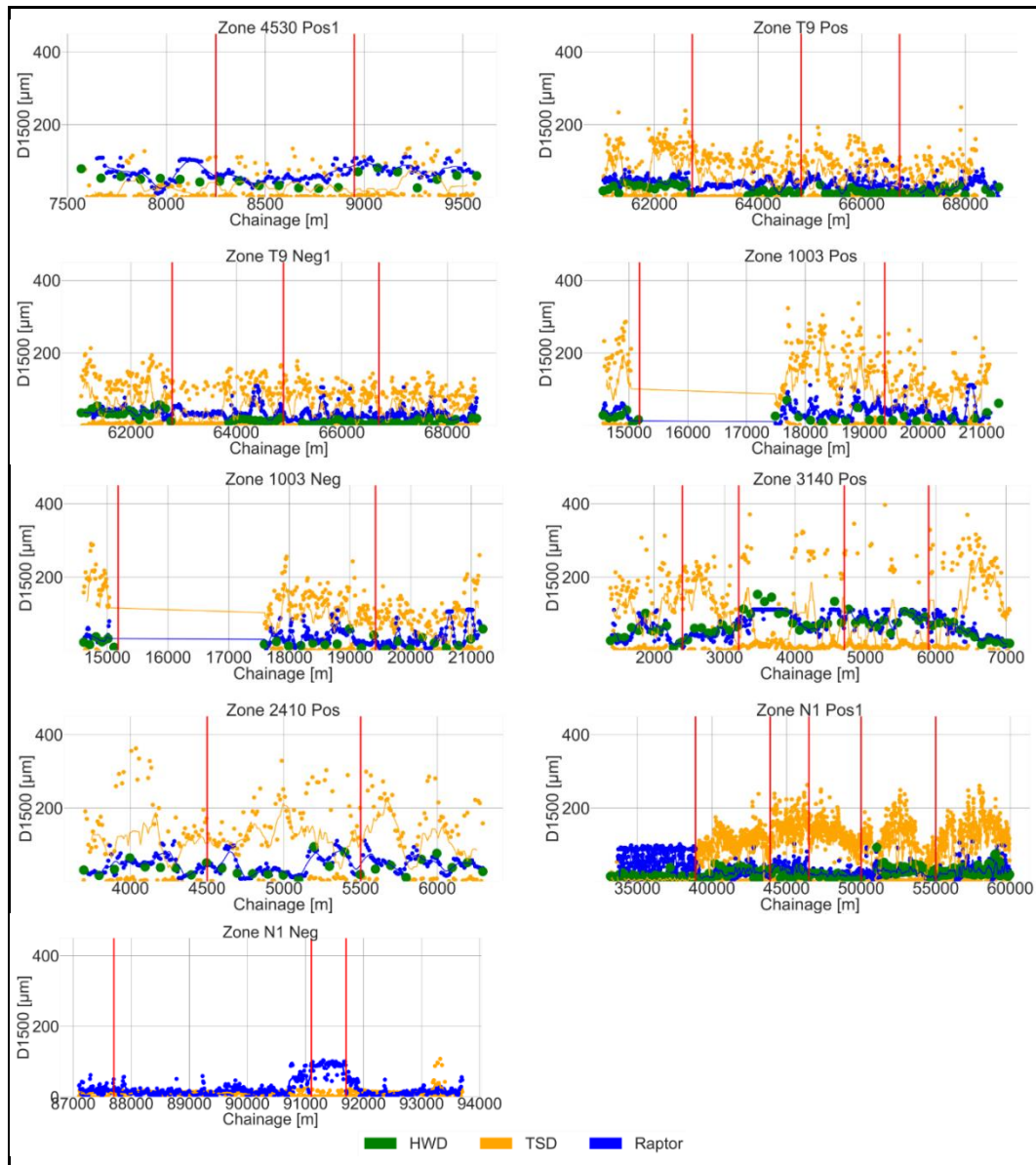


Figure 124 illustre que les mesures de déflexion D1500 réalisées par les trois appareils montrent des disparités notables, en particulier entre le TSD et les deux autres appareils, le RAPTOR et le HWD. Tandis que le RAPTOR et le HWD fournissent des résultats comparables et uniformes à travers toutes les zones examinées, le TSD affiche une variabilité significativement plus élevée. Cette variabilité accrue est particulièrement marquée dans les zones plus rigides, où le TSD enregistre des valeurs extrêmement basses qui alternent avec des pics élevés sur de courtes distances, mettant en évidence les différences dans la sensibilité et la précision des appareils en fonction des caractéristiques structurales de la chaussée.

Les figures ci-dessous illustrent la comparaison statistique des déflexions les plus éloignées (D1500), enregistrées par chaque appareil de mesure, pour les différentes zones homogènes identifiées au sein de chaque secteur analysé.

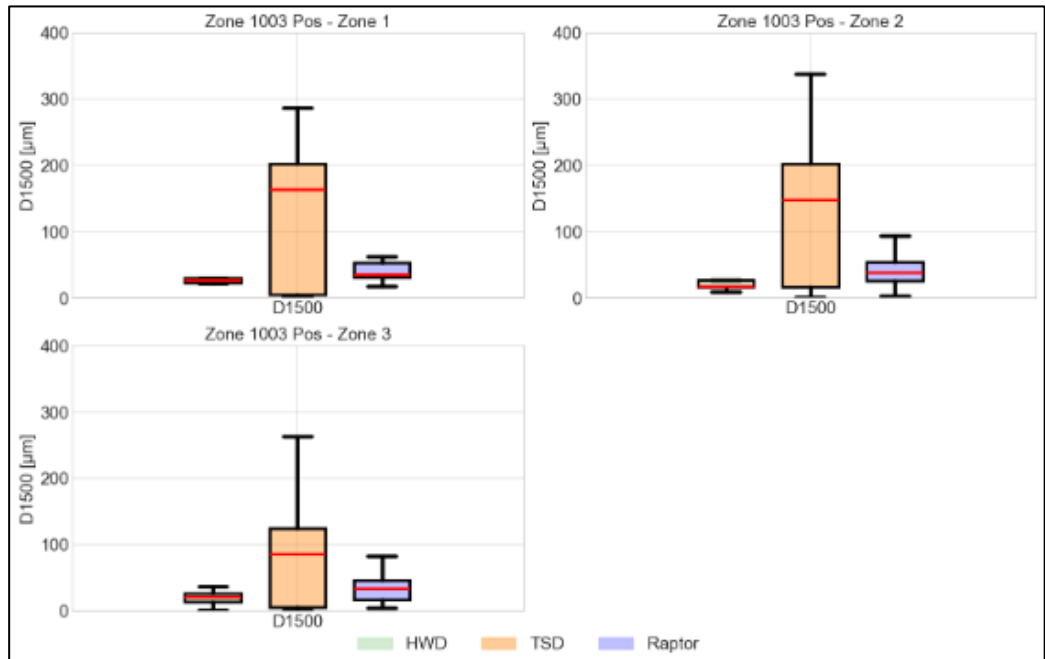


Figure 125 : Comparaison des SCI300 – RC1003+

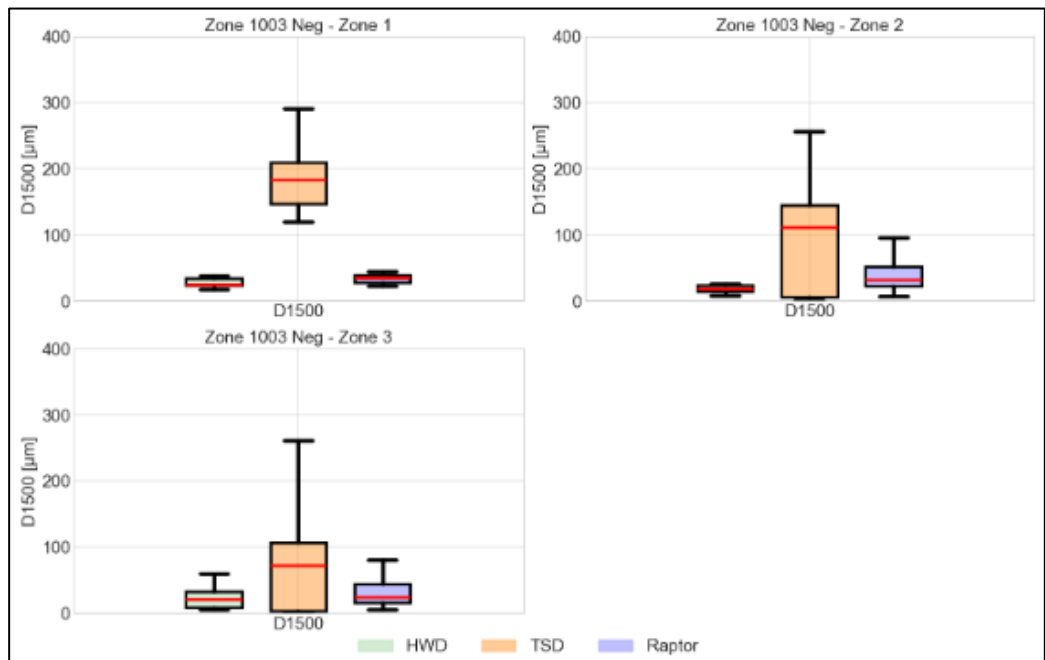


Figure 126 : Comparaison des SCI300 – RC1003-

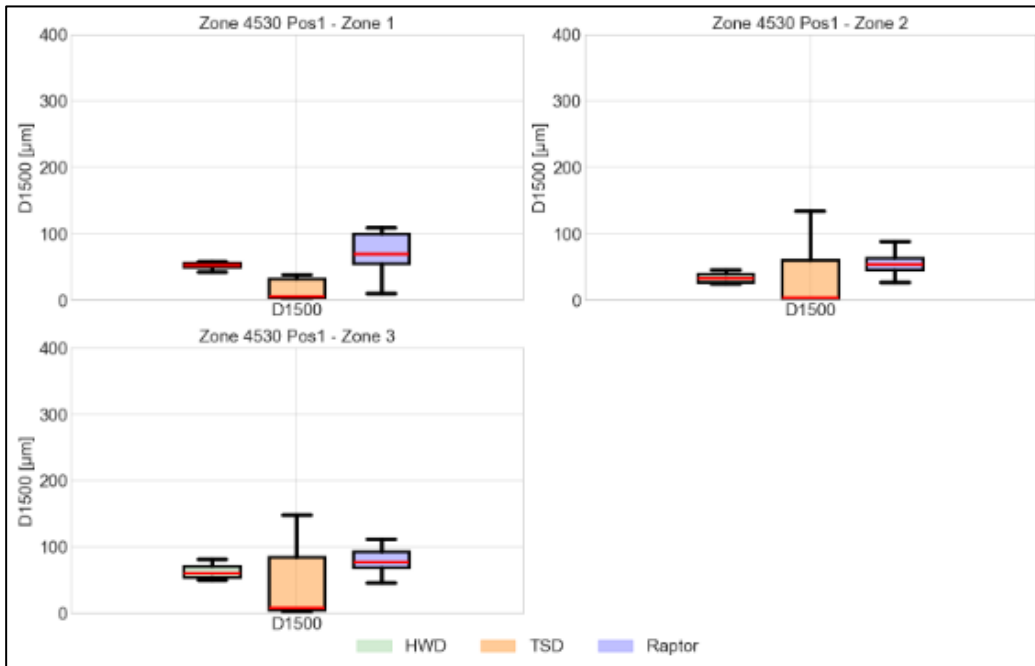


Figure 127 : Comparaison des SCI300 – RC4530+

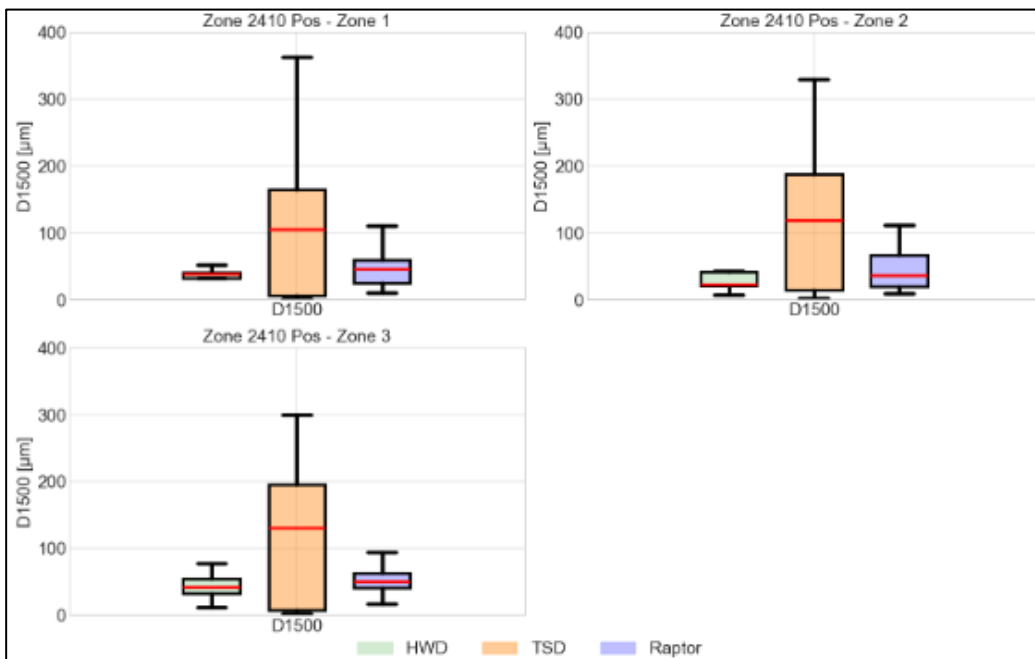


Figure 128 : Comparaison des SCI300 – RC2410+

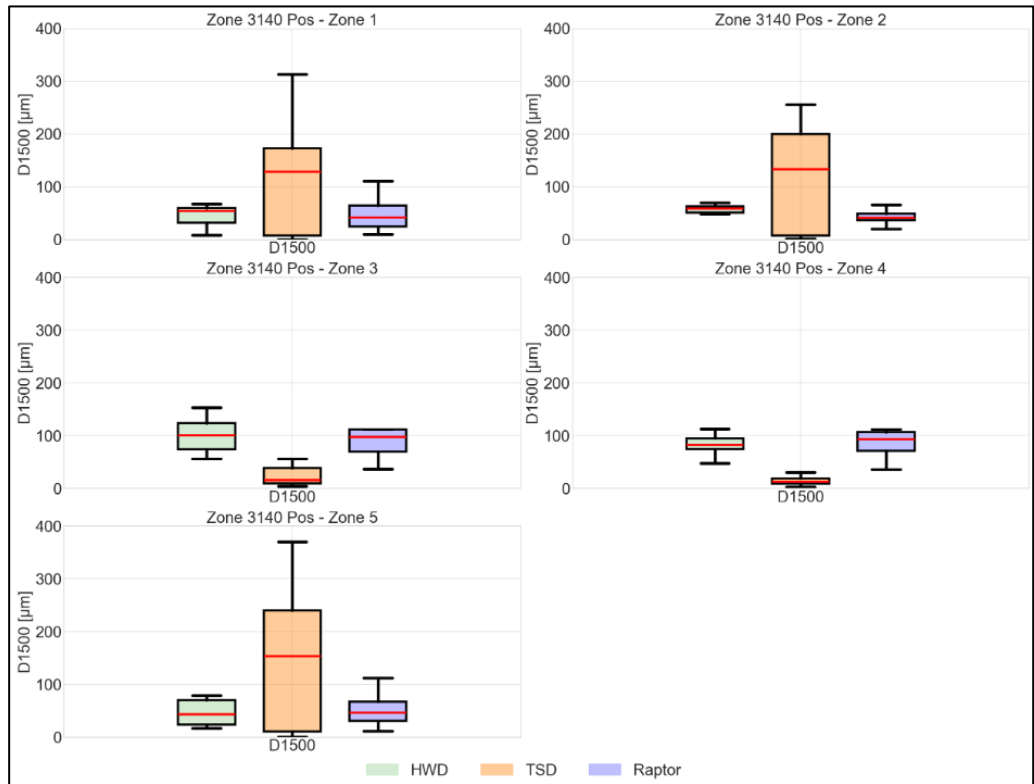


Figure 129 : Comparaison des SCI300 – RC3140+

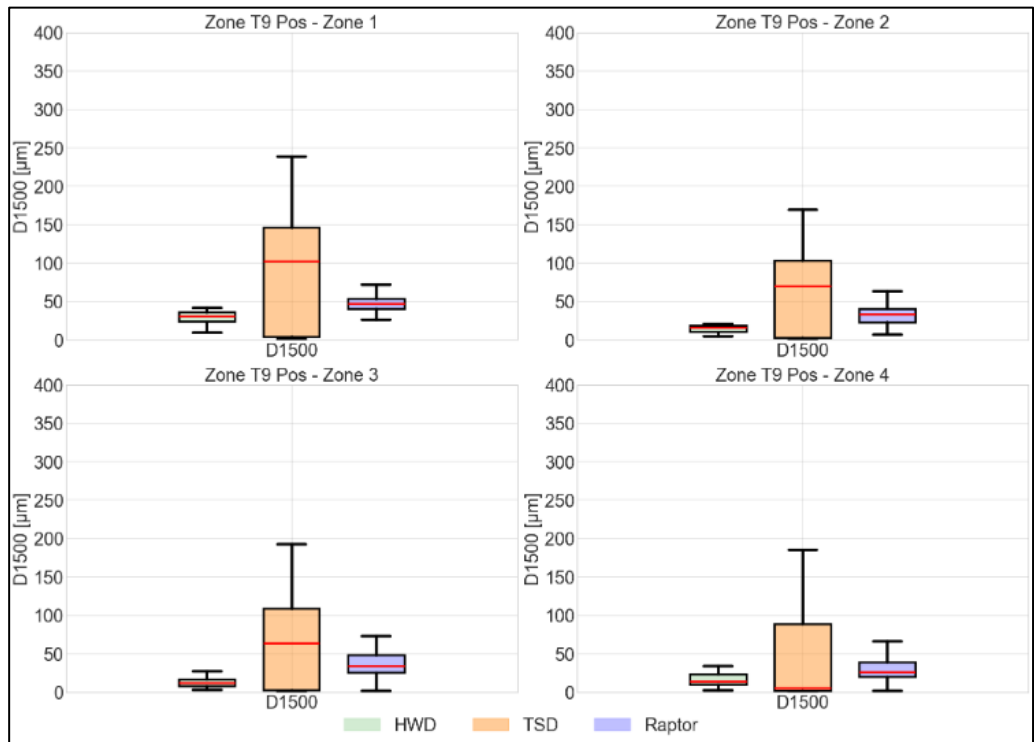


Figure 130 : Comparaison des SCI300 – T9+

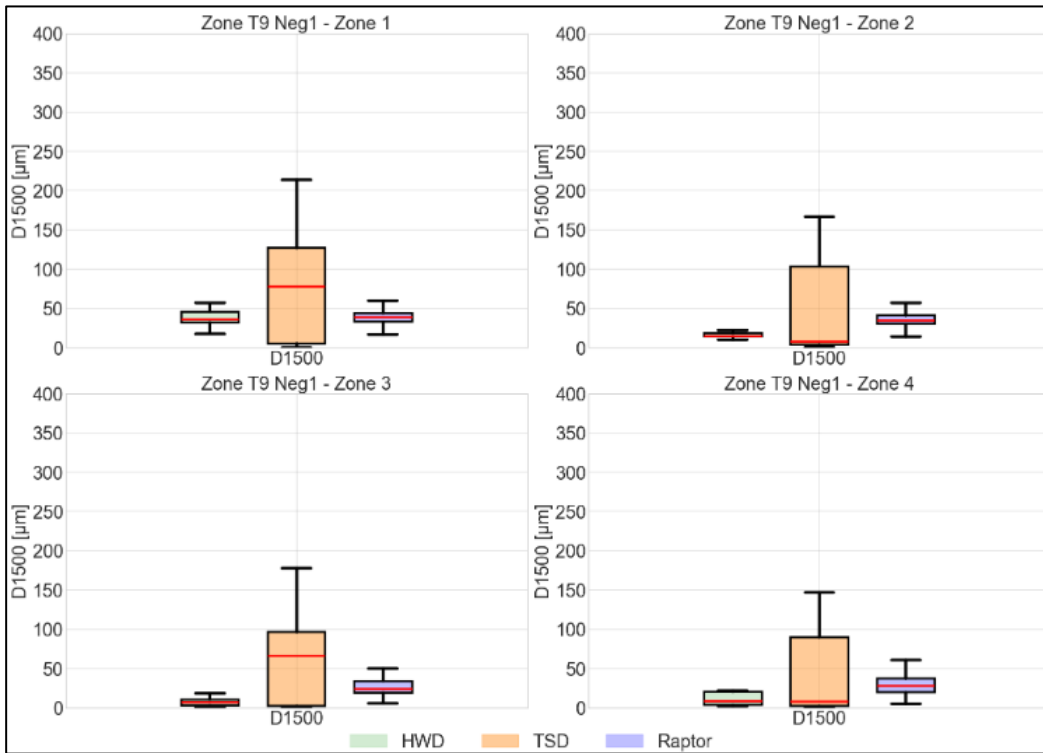


Figure 131 : Comparaison des SCI300 – T9-

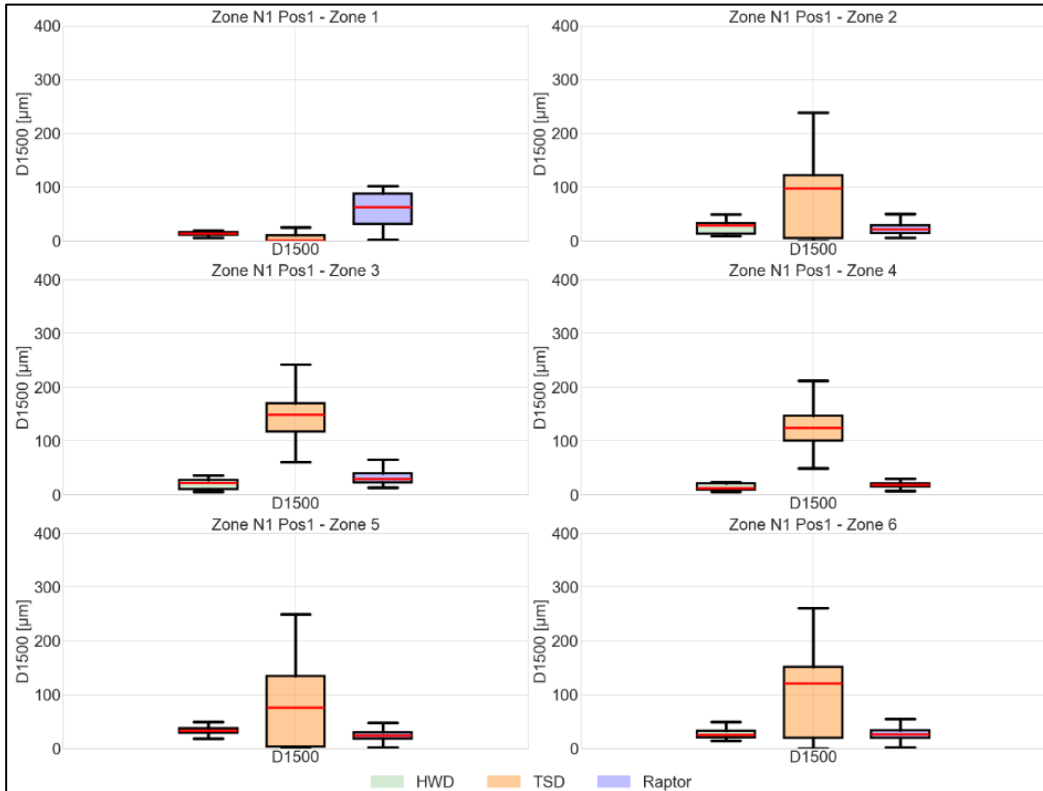


Figure 132 : Comparaison des SCI300 – N1+ (Nyon – Ecublens)

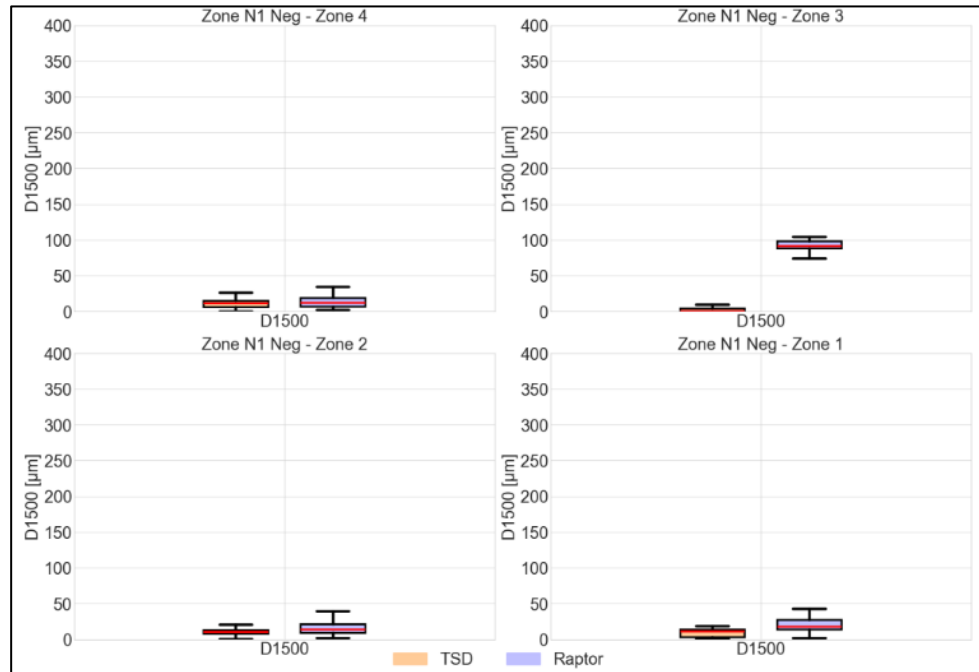


Figure 133 : Comparaison des SCI300 – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

La comparaison des valeurs moyennes de l'indicateur LLI sur chacune des zones homogènes, est illustrée dans le tableau et la figure suivants.

Synthèse des valeurs moyennes de la déflexion D1500						
Secteur	Zone hom.	D1500 TSD [μm]	D1500 HWD [μm]	D1500 RAPTOR [μm]	% Diff (D1500_HWD - TSD)	% Diff (D1500_HWD - RAP)
RC1003 +	Zone 1	127	25	39	-401%	-52%
	Zone 2	132	25	41	-420%	-62%
	Zone 3	78	22	37	-253%	-67%
RC1003 -	Zone 1	165	27	37	-511%	-35%
	Zone 2	92	22	37	-314%	-68%
	Zone 3	64	23	37	-181%	-61%
RC3140 +	Zone 1	107	48	47	-122%	2%
	Zone 2	124	56	44	-122%	21%
	Zone 3	67	98	90	32%	8%
	Zone 4	44	83	88	47%	-6%
	Zone 5	138	46	52	-198%	-13%
RC2410 +	Zone 1	110	37	45	-200%	-21%
	Zone 2	122	36	44	-237%	-22%
	Zone 3	117	43	51	-171%	-19%
RC4530 +	Zone 1	24	55	69	57%	-26%
	Zone 2	27	33	56	17%	-71%
	Zone 3	37	60	80	38%	-34%
T9 +	Zone 1	80	29	46	-175%	-59%
	Zone 2	58	14	32	-316%	-132%
	Zone 3	59	13	38	-346%	-183%
	Zone 4	45	17	30	-168%	-75%
T9 -	Zone 1	71	37	40	-91%	-7%
	Zone 2	47	16	38	-199%	-146%
	Zone 3	56	8	29	-641%	-286%
	Zone 4	46	11	30	-306%	-164%
N1+ (Nyon – Ecublens)	Zone 1	5	15	58	67%	-297%
	Zone 2	82	26	24	-219%	9%
	Zone 3	136	21	32	-547%	-54%
	Zone 4	113	14	19	-684%	-32%
	Zone 5	76	33	25	-129%	23%
	Zone 6	104	28	29	-272%	-4%
N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-B.)	Zone 1	9	-	21	21	9
	Zone 2	10	-	19	19	10
	Zone 3	4	-	88	88	4
	Zone 4	13	-	16	16	13

Tableau 27 : Synthèse des D1500 moyennes mesurées par les trois appareils sur les différentes zones

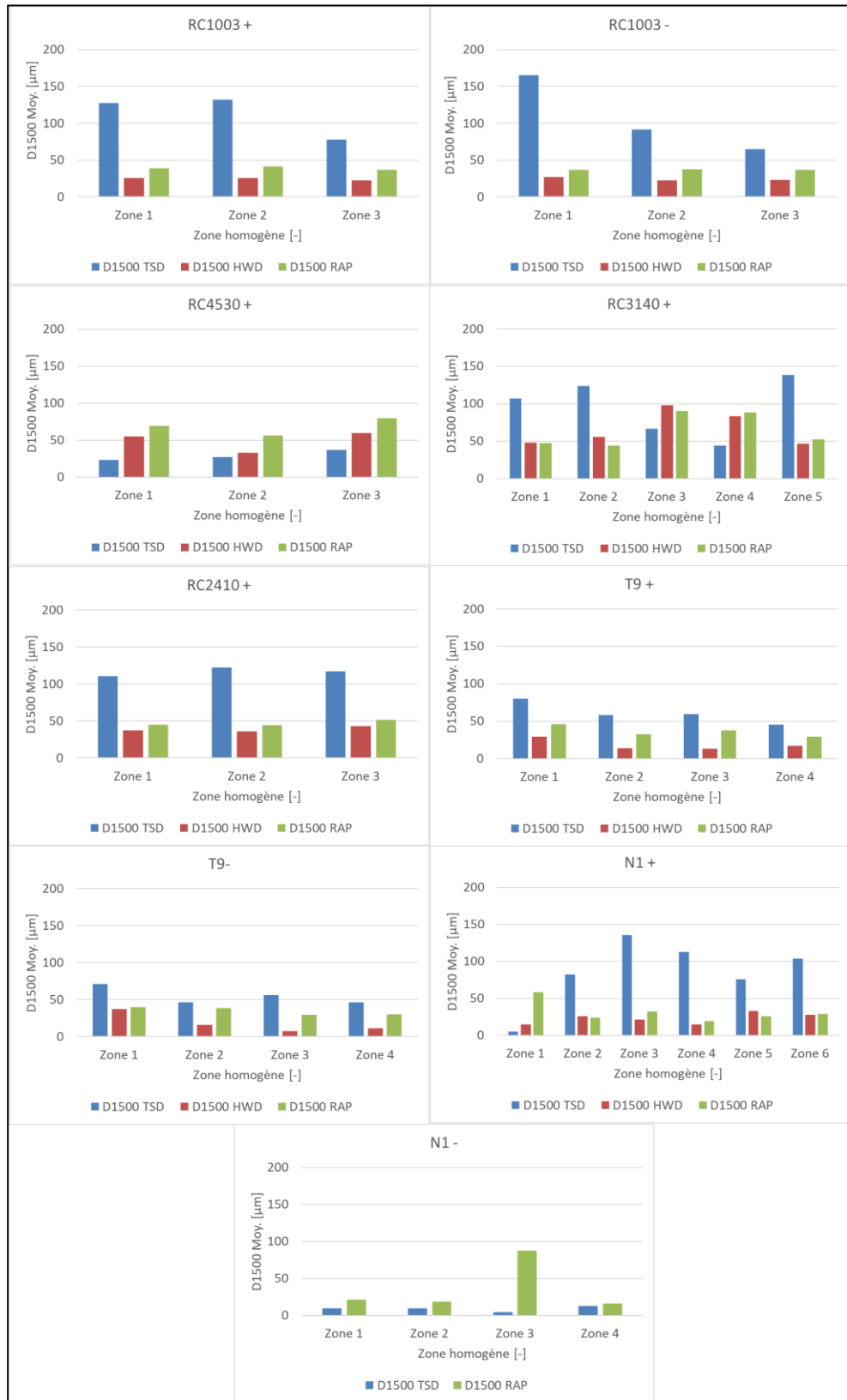


Figure 134 : Comparaison des valeurs moyennes des déflexions D1500

Les boxplots illustrant les mesures de déflexion D1500 effectuées par les trois appareils de mesure dans chaque zone homogène démontrent des tendances significatives en ce

qui concerne l'évaluation de la rigidité des couches de fondation de la chaussée. Les valeurs de D1500 mesurées par le RAPTOR et le HWD montrent une proximité remarquable, suggérant une grande cohérence entre ces appareils pour la détection des caractéristiques structurelles de la chaussée. Toutefois, bien que les médianes de ces deux appareils soient similaires, illustrant une cohérence dans leurs mesures, la moyenne des valeurs de D1500 du RAPTOR est généralement plus élevée que celle du HWD. Cette divergence pourrait s'expliquer par la plus grande variabilité des mesures du RAPTOR, qui peut influencer la moyenne plus sensiblement que la médiane.

En contraste, les mesures effectuées par le TSD montrent une divergence notable par rapport à celles du HWD, caractérisée par une variabilité considérablement plus élevée et des moyennes plus faibles. Cette grande dispersion des résultats du TSD, particulièrement marquée dans les zones considérées comme plus rigides, se manifeste par la fréquence de valeurs extrêmement basses qui alternent avec des pics isolés de valeurs élevées sur de courtes distances. Cette variabilité pourrait illustrer les spécificités techniques du TSD, qui le rendent particulièrement sensible aux caractéristiques des chaussées rigides.

6.10 Discussion – Comparaison des données brutes

La comparaison des données brutes collectées par le TSD, le RAPTOR et le HWD a mis en lumière des différences conceptuelles entre ces appareils. Malgré ces distinctions, les déflexions mesurées présentent des similitudes significatives, reflétant une évaluation cohérente de la portance des structures routières.

L'analyse des mesures de déflexion effectuées par les trois appareils a révélé une correspondance dans les valeurs de déflexion à travers les zones étudiées. Cependant, il a été constaté que le TSD pourrait sous-estimer les déflexions, particulièrement sur les chaussées rigides, enregistrant des valeurs inférieures à celles mesurées par le HWD. Parallèlement, le RAPTOR a enregistré des déflexions qui sont globalement proches de celles du HWD, facilitant ainsi une évaluation similaire du comportement de la chaussée.

L'analyse comparative des déflexions D1500 a mis en évidence une grande variabilité dans les mesures réalisées par le TSD. En effet, les données de déflexion D1500 enregistrées montrent des valeurs souvent très proches de zéro ou nulles, mais également des pics élevés sur de courtes distances.

La comparaison des indicateurs SCI300, MLI et LLI a révélé la capacité des deux appareils, le TSD et le RAPTOR, à identifier les zones de faiblesses de la structure routière. Grâce à leur fréquence de mesure élevée, ces appareils offrent une détection spatiale améliorée des zones dégradées. Les données recueillies par le TSD et le RAPTOR montrent une variabilité significative, facilitant ainsi une évaluation plus précise de la qualité de la chaussée notamment des zones de faiblesse très localisées.

La comparaison de la classification des indicateurs de déflexion MLI et LLI a révélé des divergences dans l'évaluation de l'état mécanique des structures routières à travers les

données recueillies par les trois appareils de mesure. Ces variations pourraient principalement découler de la fréquence de mesure plus élevée utilisée par le TSD et le RAPTOR par rapport au HWD. Cette fréquence accrue facilite la collecte d'un volume plus important de données pour chaque zone homogène, enrichissant ainsi l'analyse des caractéristiques spécifiques de chaque secteur examiné.

Le tableau suivant synthétise la comparaison entre le TSD, le RAPTOR et le HWD, basée sur les divers paramètres analysés dans les chapitres précédents. Cette synthèse illustre comment chaque appareil de mesure se compare au HWD en fonction des différents indicateurs évalués durant l'étude.

Synthèse des comparaisons des différents appareils

Indicateur	Appareil le plus proche du HWD	Commentaire
Do (corrigé à 50 kN)	RAPTOR	Les déflexions Do du RAPTOR sont généralement plus proches du HWD. Le TSD montre des valeurs plus élevées avec une variabilité significative.
Do (corrigé à 15°C et 50 kN)	RAPTOR	Les déflexions Do à 15 °C et 50 kN montrent que le RAPTOR est très proche du HWD. Le TSD, cependant, présente une variabilité plus large.
SCI300	TSD	Les valeurs du TSD sont légèrement plus élevées mais proches du HWD. Le RAPTOR présente des valeurs plus faibles que celles du HWD.
MLI	RAPTOR	Les valeurs du RAPTOR sont légèrement plus élevées mais plus proches que celles du TSD.
LLI	TSD - RAPTOR	Les valeurs du TSD sont légèrement plus faibles. A l'inverse, les valeurs RAPTOR sont légèrement plus élevées.
D1500	RAPTOR	Les valeurs du RAPTOR et du HWD montrent une grande cohérence. Les valeurs TSD présentent une variabilité significativement élevée.

Tableau 28 : Synthèse des comparaisons des différents appareils

La position latérale du véhicule durant les mesures influence de manière significative la détection des dégradations de la chaussée par des indicateurs qui se basent sur les valeurs brutes des déflexions. Des variations dans l'emplacement des capteurs entre les appareils peuvent également jouer un rôle dans les divergences observées dans les évaluations des conditions des chaussées.

7 Estimation des propriétés mécaniques des structures

7.1 Approche élastique linéaire

7.1.1 Hypothèses mécaniques générales

L'estimation des propriétés mécaniques des matériaux constituant les structures routières, notamment au travers des modules de rigidité, est une démarche pertinente pour évaluer la capacité portante et la durabilité des chaussées

La procédure de calcul inverse, ou backcalculation, est employée pour déterminer les modules élastiques des différentes couches de la chaussée en utilisant les données de déflexion mesurées conjointement avec une modélisation de la structure de chaussée en couches de caractéristiques mécaniques homogènes.

Cette approche est basée sur une modélisation mécanique qui permet de calculer les déflexions de la chaussée sous l'effet d'une charge appliquée. À cet effet, un modèle de réponse des structures routières, tel que le modèle de Burmister ou le modèle MET (Method of Equivalent Thickness), est employé pour calculer les déflexions de la chaussée sous l'effet de la charge de l'appareil de mesure. Les calculs prennent en compte les épaisseurs et les modules élastiques présumés des différentes couches de la structure. Les déflexions mesurées sont ensuite comparées aux déflexions calculées, et l'écart observé est minimisé par un ajustement itératif des modules élastiques des couches.

Les paramètres nécessaires pour estimer les modules élastiques comprennent :

- Les épaisseurs des couches
- La charge appliquée par le véhicule d'auscultation
- Le coefficient de Poisson, admis égal à une valeur par défaut de 0.35

Le coefficient de Poisson est défini comme le rapport entre la déformation transversale (perpendiculaire à l'effort appliqué) et la déformation longitudinale (dans le sens de l'effort) d'un solide élastique soumis à une charge de traction [54].

En raison des distinctions conceptuelles entre les appareils de mesure, en particulier concernant le mode de chargement, une modélisation précise de la charge appliquée est cruciale pour l'estimation correcte des modules élastiques des différentes couches de la chaussée. Les détails de cette modélisation seront approfondis dans les chapitres ultérieurs.

Concernant le coefficient de Poisson, il est couramment admis à une valeur par défaut de 0,35. En effet, les calculs des déflexions utilisant un modèle de réponse, tel que le modèle de Burmister ou le modèle MET, sont très faiblement influencés par les variations de cette valeur comparativement à d'autres caractéristiques comme les paramètres de modélisation de la charge [55]

L'épaisseur des couches est un paramètre crucial dans le calcul de la rigidité des structures routières. La rigidité d'une couche est influencée non seulement par le module d'élasticité des matériaux mais aussi par l'épaisseur de la couche, cette dernière étant proportionnelle au cube de l'épaisseur. Par conséquent, une variation de 10 % de l'épaisseur d'une couche peut induire une variation de plus de 30 % de sa rigidité. Il est donc impératif de disposer de mesures précises de l'épaisseur des couches pour garantir une estimation fiable de la rigidité.

Les épaisseurs des couches ont été évaluées avec un relevé au géoradar, ainsi qu'une consultation des bases de données routière lorsque la qualité du relevé n'est pas suffisante, en particulier pour l'évaluation de l'épaisseur de la couche de fondation (interface fondation/sol non détectée). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Synthèse des épaisseurs des couches						
Secteur	Zone hom.	Début [km]	Fin [km]	Longueur [m]	h1 – Enrobé bitumineux [mm]	h2 - Fondation en grave [mm]
RC1003 +	Zone 1	14.6	15.2	600	150	400
	Zone 2	17.5	19.3	1 800	150	400
	Zone 3	19.5	21.3	1 800	190	400
RC1003 -	Zone 1	14.6	15.1	500	140	400
	Zone 2	17.6	19.4	1 800	160	400
	Zone 3	19.6	21.2	1 600	200	400
RC3140 +	Zone 1	1.4	2.4	995	170	400
	Zone 2	2.5	3.2	696	190	400
	Zone 3	3.3	4.7	1 393	190	400
	Zone 4	4.8	5.9	1 094	170	400
	Zone 5	6.0	7.0	1 094	150	400
RC2410 +	Zone 1	3.7	4.5	800	200	400
	Zone 2	4.6	5.5	900	180	400
	Zone 3	5.6	6.3	700	150	400
RC4530 +	Zone 1	7.6	8.2	600	260	400
	Zone 2	8.3	8.9	600	240	400
	Zone 3	9.0	9.6	600	230	400
T9 +	Zone 1	61.0	62.7	1 696	180	400
	Zone 2	63.8	64.8	997	170	370
	Zone 3	65.2	66.7	1 496	190	350
	Zone 4	66.8	68.6	1 845	180	350
T9 -	Zone 1	61.1	62.8	1 700	180	400
	Zone 2	63.9	64.9	1 000	170	370
	Zone 3	65.3	66.7	1 400	190	350
	Zone 4	66.8	68.6	1 800	190	350
N1+ (Nyon – Ecu- blens)	Zone 1	33.2	38.8	5 600	220	550
	Zone 2	39.0	43.8	4 800	160	570
	Zone 3	44.0	46.4	2 400	170	570

	Zone 4	46.6	50.0	3 400	180	570
	Zone 5	51.0	55.0	3 916	180	570
	Zone 6	55.0	59.9	4 938	150	570
N1- (Essert-Pittet – Yverdon- les-B.)	Zone 1	87.1	87.7	599	240	430
	Zone 2	87.71	91.09	3379	240	430
	Zone 3	91.1	91.7	599	130	570
	Zone 4	91.71	93.7	1989	250	420

Tableau 29 : Synthèse des épaisseurs des couches utilisées pour le calcul inverse

Dans le cadre de la modélisation de la structure pour les calculs inverses, un sol de fondation de 6 mètres est considéré dans le modèle de calcul. De plus, pour atténuer l'effet de non-linéarité des matériaux granulaires non liés, tels que le sol et la couche de fondation, un fond rigide d'épaisseur infinie a été admis.

Le tableau ci-dessous présente la structure totale considérée dans cette analyse :

Structure totale pour la modélisation pour le calcul inverse		
Couche	Epaisseur [mm]	Module élastique E [MPa]
Enrobé	h1	E1 (à calculer)
Fondation	h2	E2 (à calculer)
Sol	6'000	E3 (à calculer)
Fond rigide	∞	50'000

Tableau 30 : Structure totale pour la modélisation pour le calcul inverse

Dans l'optique de procéder à un calcul inverse des modules élastiques des structures routières, deux étapes essentielles doivent être prises en compte : la sélection d'un modèle de réponse approprié et le choix de la méthode d'optimisation qui permettra de faire correspondre au mieux les déflexions mesurées avec celles calculées. Il est judicieux de combiner différentes méthodes disponibles pour ces deux étapes afin de construire un modèle de calcul inverse efficace et précis. Cette approche intégrée permet d'exploiter les avantages spécifiques de chaque méthode, optimisant ainsi la fiabilité et l'exactitude des résultats obtenus.

Dans le cadre de cette analyse, après avoir réalisé plusieurs séries de tests et de validations, le modèle retenu est composé d'un modèle de réponse élastique linéaire MET (Method of Equivalent Thickness), d'un optimisateur ADAM, et d'une fonction de perte Mean Absolute Error (MAE). Cette combinaison permet d'estimer de manière itérative les modules élastiques des différentes couches, afin de produire des déflexions qui correspondent précisément aux déflexions mesurées.

Pour initier les calculs de déflexion dans le processus d'optimisation, il est essentiel de définir des valeurs initiales judicieuses pour les modules élastiques pour éviter la convergence vers un minimum local non représentatif lors du processus d'optimisation. Cette approche méthodique permet d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus et de garantir l'efficacité de l'analyse des propriétés structurales des chaussées.

Il est important de noter que la solution estimée à partir de ce problème d'optimisation n'est pas nécessairement unique et que le modèle pourrait, malgré les précautions prises, converger vers un minimum local. Par conséquent, il est déterminant d'examiner attentivement les résultats pour s'assurer qu'ils sont cohérents avec les valeurs physiquement admissibles et en accord avec l'expérience acquise sur ces familles de matériaux. Une telle vérification permet de garantir que les conclusions tirées sont robustes et fiables.

7.1.2 Correction de l'effet de la température

Pour garantir une comparaison valide des résultats obtenus par les différents appareils de mesure, l'effet de la température sur les modules élastiques de la couche en enrobé bitumineux est corrigé. Par conséquent, il est nécessaire d'ajuster les modules élastiques de la couche en enrobé bitumineux à une température de référence afin de permettre une comparaison fiable des résultats issus des différents appareils.

Pour effectuer ces ajustements de manière appropriée, il est essentiel de connaître la température interne des couches en enrobé bitumineux. Bien que la mesure directe de cette température par perçage de la chaussée soit possible, il est généralement plus pratique de l'estimer à partir de variables externes mesurables.

À cet effet, le modèle BELLS3 a été développé spécifiquement pour estimer la température à mi-profondeur de la couche bitumineuse lors des essais de routine avec le HWD. L'utilisation de ce modèle nécessite la connaissance de plusieurs paramètres : l'épaisseur de la couche en enrobé bitumineux, la température de surface, la température moyenne de l'air enregistrée la veille, ainsi que l'heure de la journée où les mesures ont été effectuées [56]

L'équation du modèle BELLS3 permettant d'estimer la température à mi-profondeur de l'enrobé est la suivante [56]:

$$T_d = 0.95 + 0.892T_s + (\log d - 1.25) \left[1.83 \sin\left(2\pi \frac{A}{18}\right) - 0.448T_s + 0.621T_{\text{avg}} \right] + 0.042T_s \sin\left(2\pi \frac{B}{18}\right) \quad (10)$$

Avec :

T_d : température à mi-profondeur de la couche en enrobé [°C]

T_s : température de la surface de la couche [°C]

T_{avg} : température moyenne de l'air enregistrée le jour précédant l'essai [°C]

d : mi-épaisseur de la couche en enrobé bitumineux [mm]

Les paramètres A et B du modèle sont estimés de la manière suivante, où t_d représente l'heure à laquelle les mesures ont été effectuées, exprimée en heure décimale :

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{cases} t_d + 9.5 & \text{if } 0 \leq t_d < 5 \\ -4.5 & \text{if } 5 \leq t_d < 11 \\ t_d - 15.5 & \text{if } 11 \leq t_d < 24 \end{cases} \\
 B &= \begin{cases} t_d + 9.5 & \text{if } 0 \leq t_d < 3 \\ -4.5 & \text{if } 3 \leq t_d < 9 \\ t_d - 13.5 & \text{if } 9 \leq t_d < 24 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{11}$$

La formule ci-dessous est couramment utilisée pour corriger le module élastique des matériaux bitumineux en fonction de la température. Elle a été vérifiée à l'aide de résultats d'essais de mesure de module complexe sur des enrobés bitumineux réalisés au Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) à l'EPFL.

$$E_{\text{corr}} = \frac{E_1}{1 - 3 \cdot \log_{10} \left(\frac{T_d}{T_{\text{corr}}} \right)} \tag{12}$$

En tenant compte des températures de l'air enregistrées au moment des mesures ainsi que de la température moyenne du jour précédent, les modules élastiques de la première couche de la chaussée ont été ajustés à une température de référence de 15 °C.

7.1.3 Calcul des modules élastiques

Pour chacune des zones étudiées, le processus de backcalculation a été appliqué à chaque point de mesure afin d'estimer les modules élastiques des différentes couches de la chaussée.

Les résultats de l'analyse des données obtenues par le HWD sont illustrés dans la figure ci-dessous.

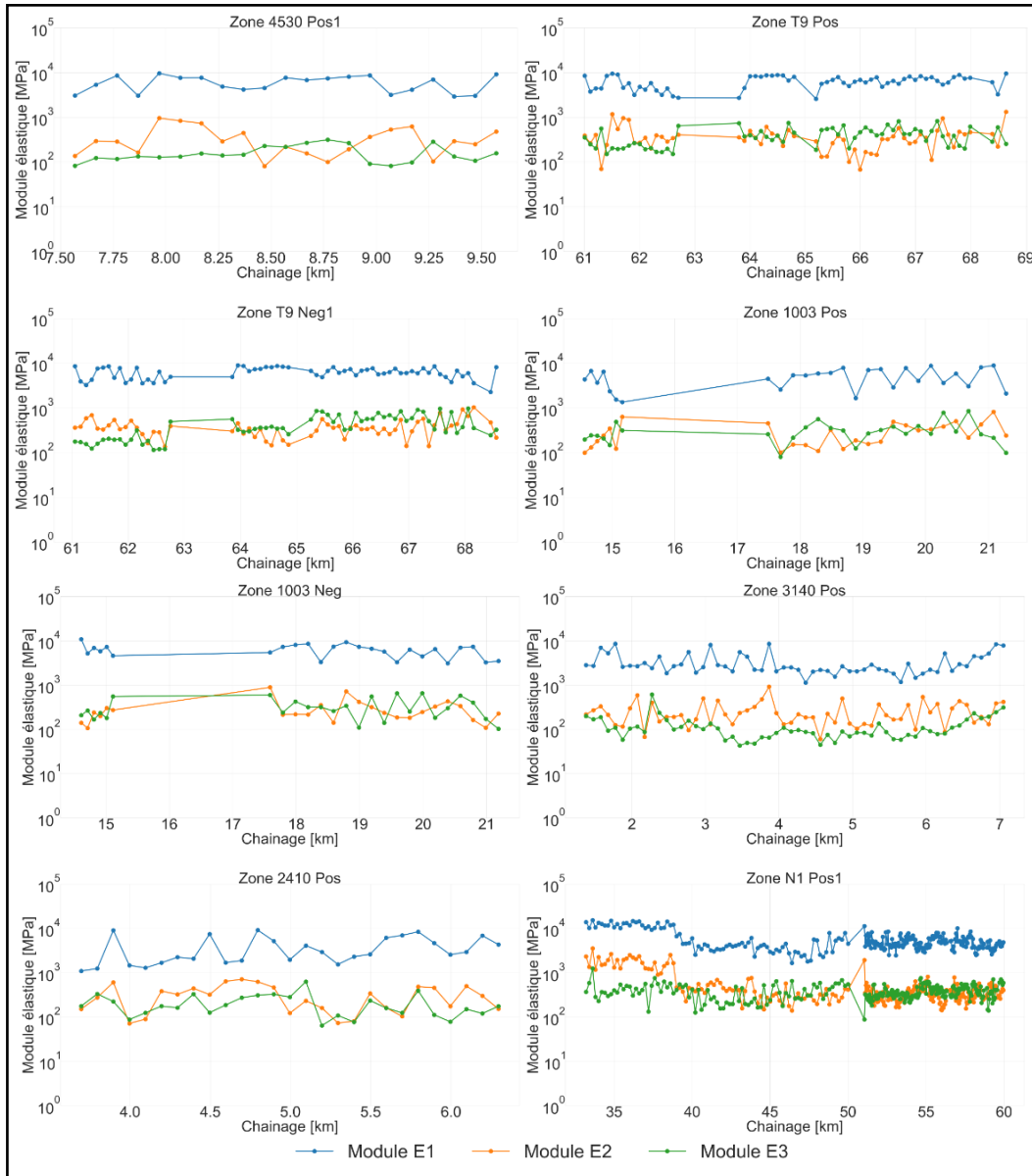


Figure 135 : Résultats du calcul inverse sur toutes les zones étudiées – HWD

Les résultats de l'analyse des données obtenues par le TSD sont illustrés dans la figure ci-dessous.

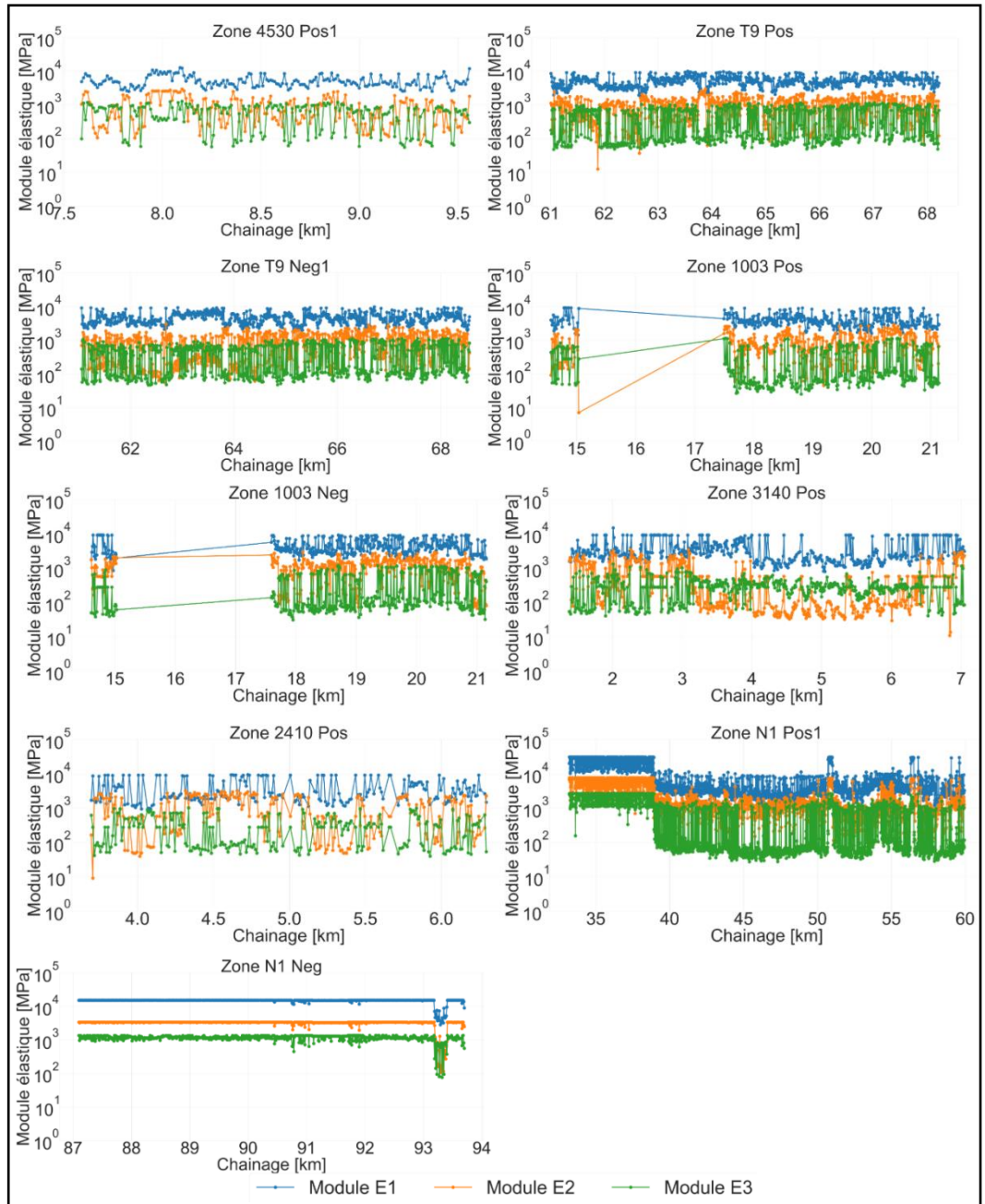


Figure 136 : Résultats du calcul inverse sur toutes les zones étudiées – TSD

Les résultats de l'analyse des données obtenues par le RAPTOR sont illustrés dans la figure ci-dessous.

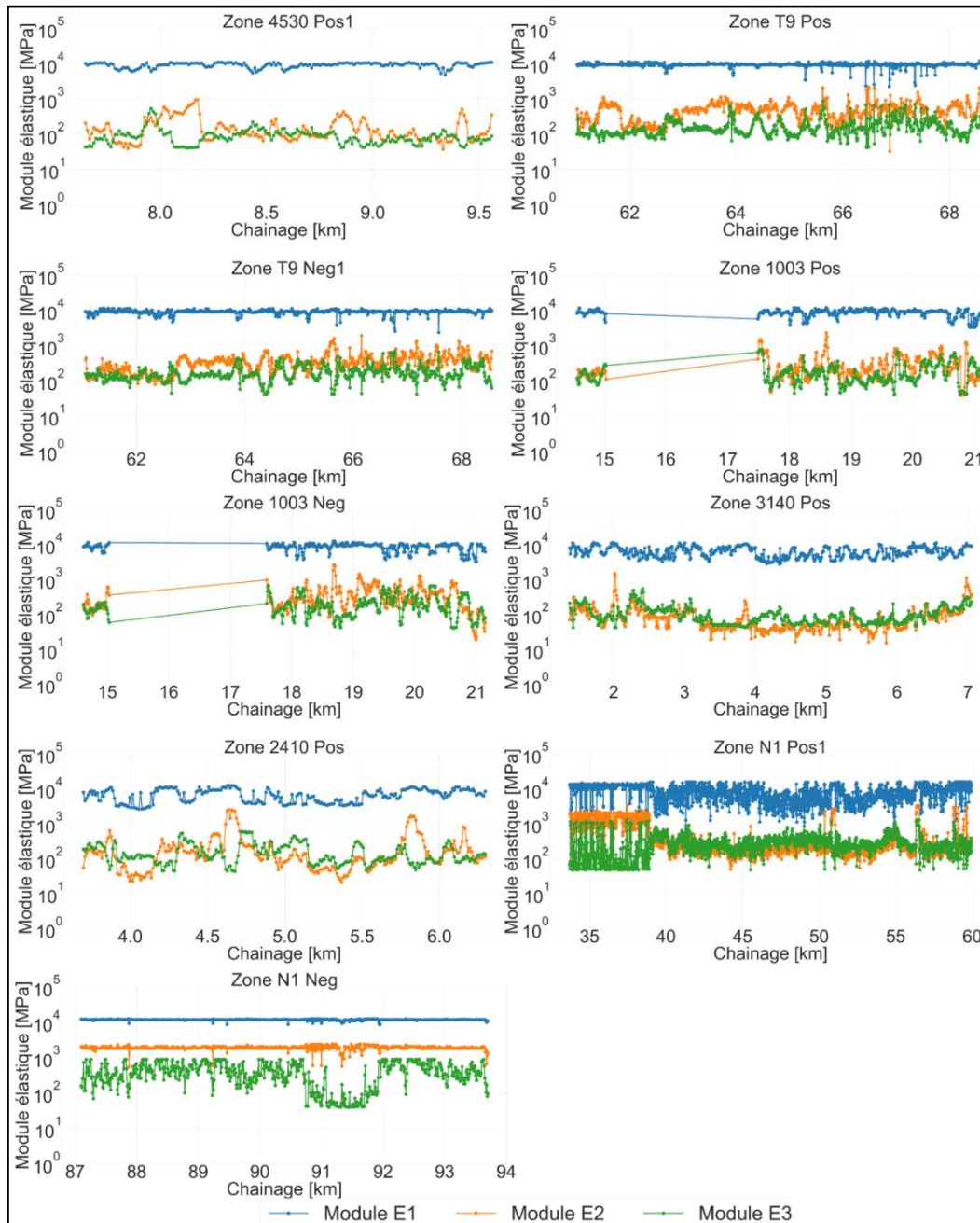


Figure 137 : Résultats du calcul inverse sur toutes les zones étudiées – RAPTOR

7.1.4 Comparaison statistique des modules élastiques

Après avoir estimé les modules élastiques à partir des données recueillies par les trois appareils, il est possible de procéder à une comparaison statistique. Cette analyse permet d'identifier les similitudes et les différences entre les résultats obtenus par les différents appareils de mesure à travers toutes les zones étudiées.

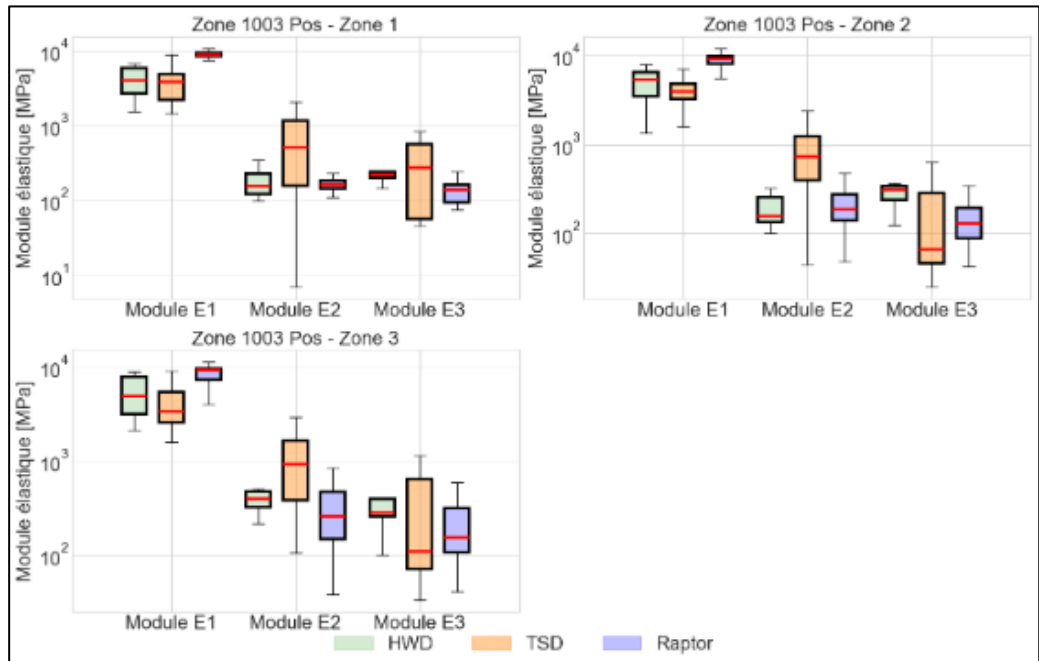


Figure 138 Comparaison des modules élastiques – RC1003+

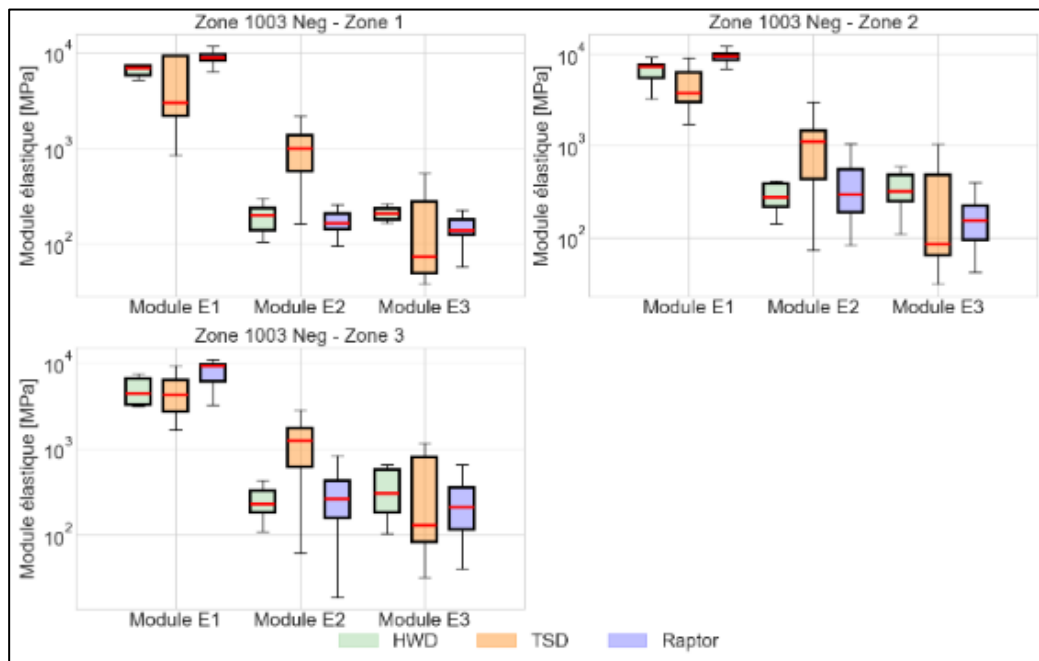


Figure 139 : Comparaison des modules élastiques – RC1003-

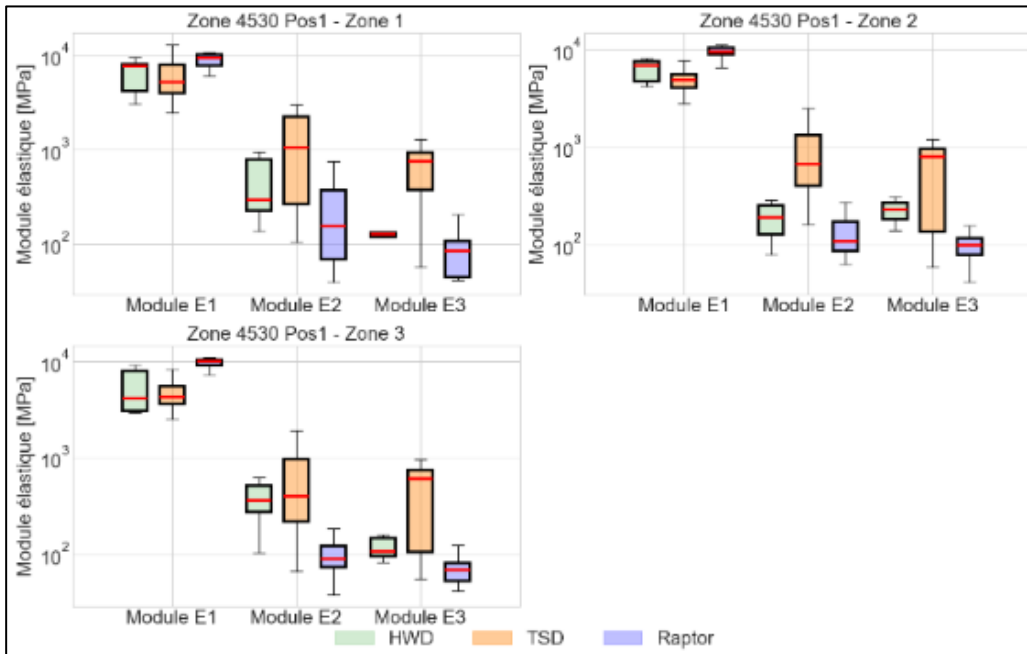


Figure 140 : Comparaison des modules élastiques – RC4530+

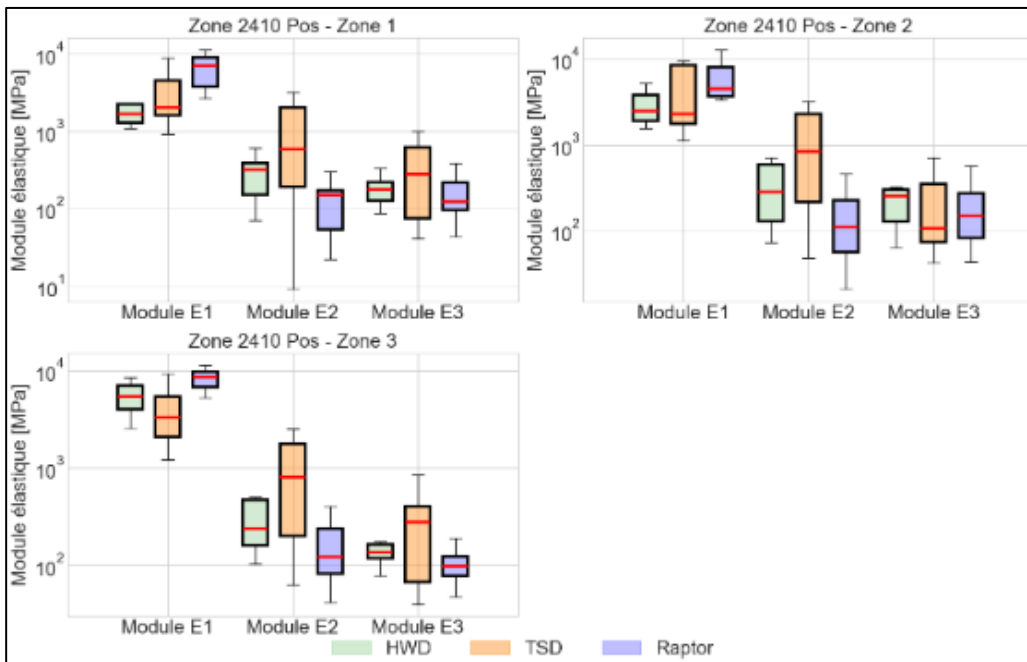


Figure 141 : Comparaison des modules élastiques – RC2410+

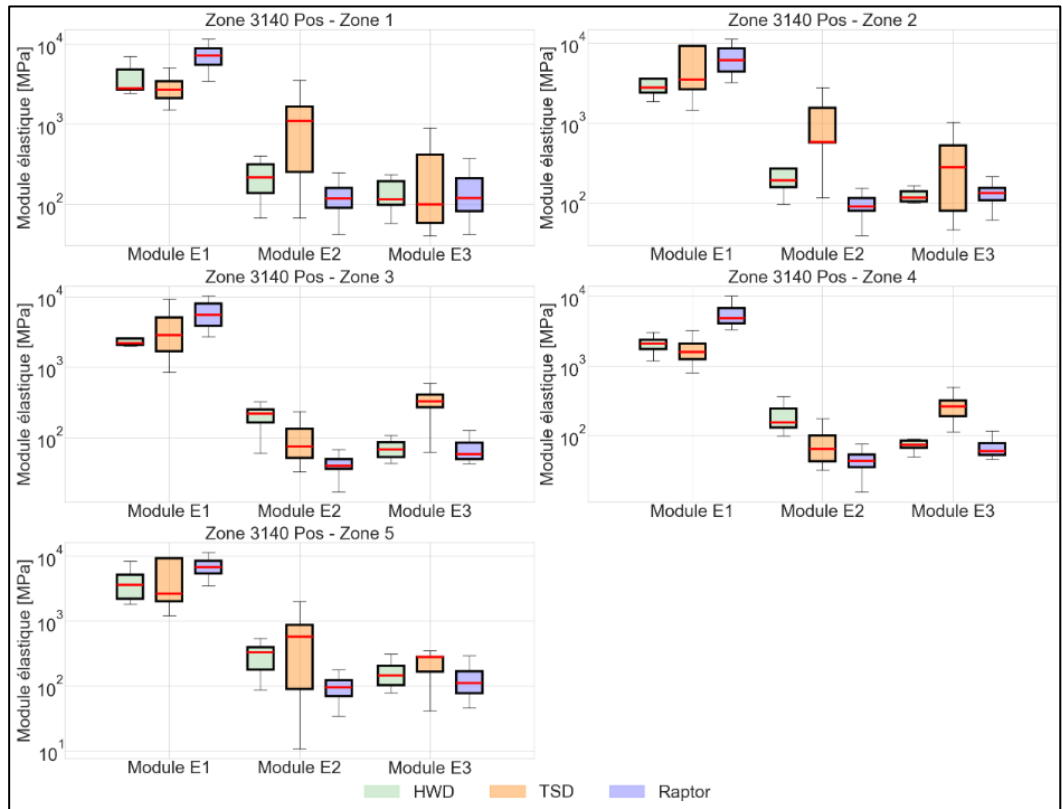


Figure 142 : Comparaison des modules élastiques – RC3140+

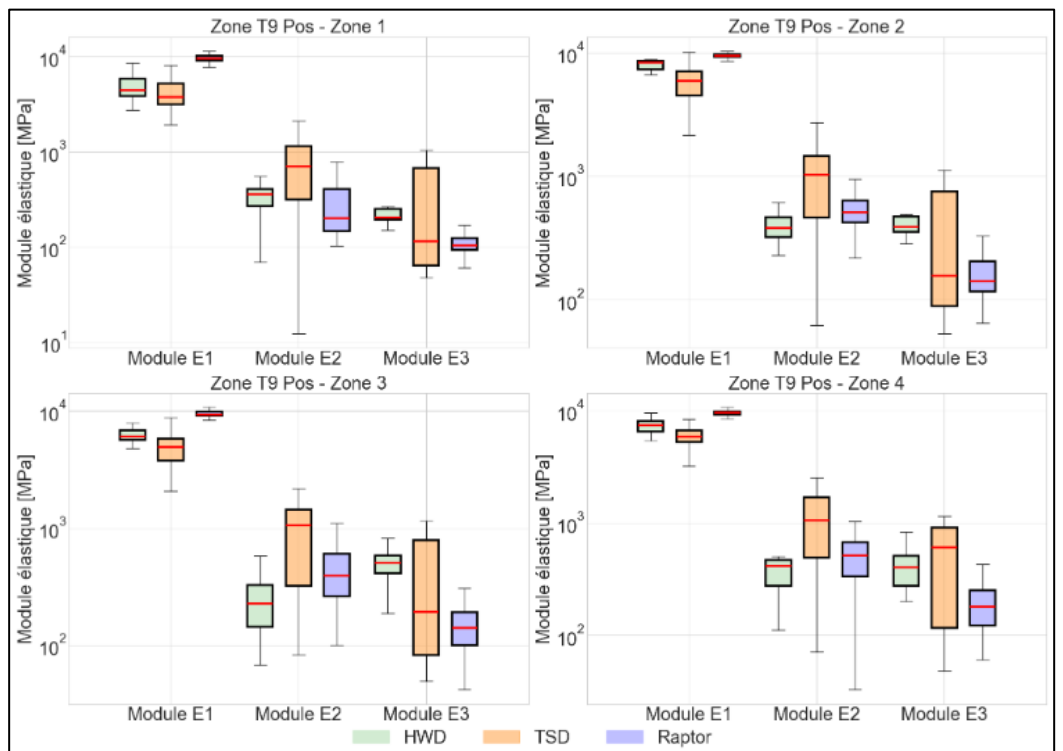


Figure 143 : Comparaison des modules élastiques – T9+

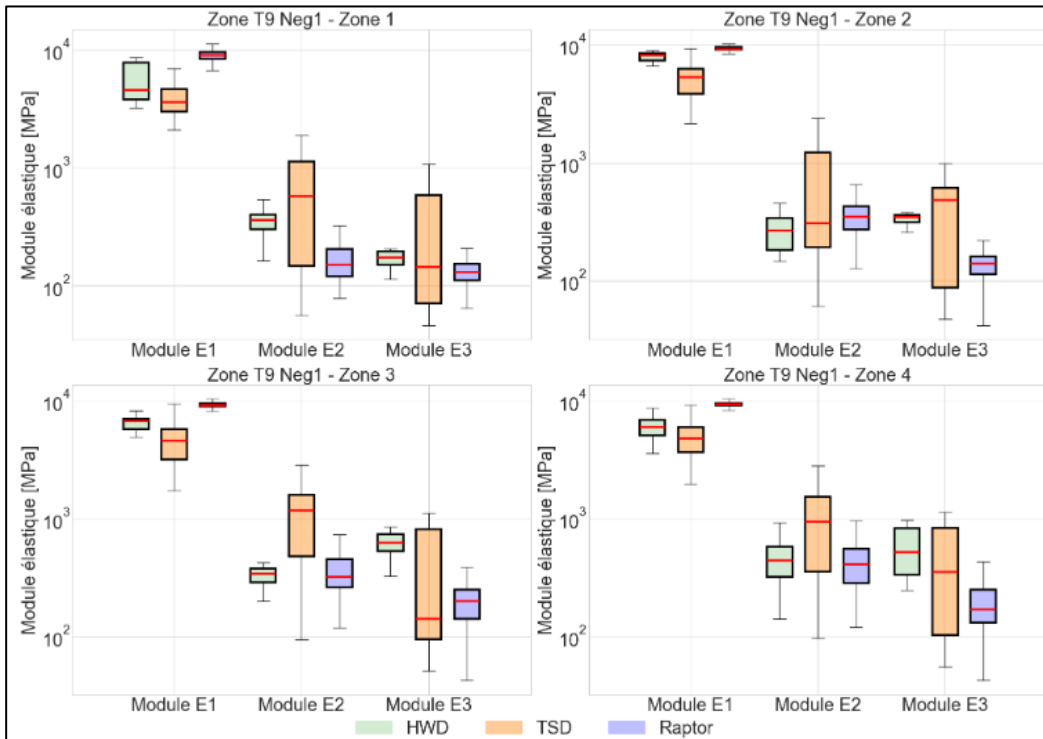


Figure 144 : Comparaison des modules élastiques – T9-

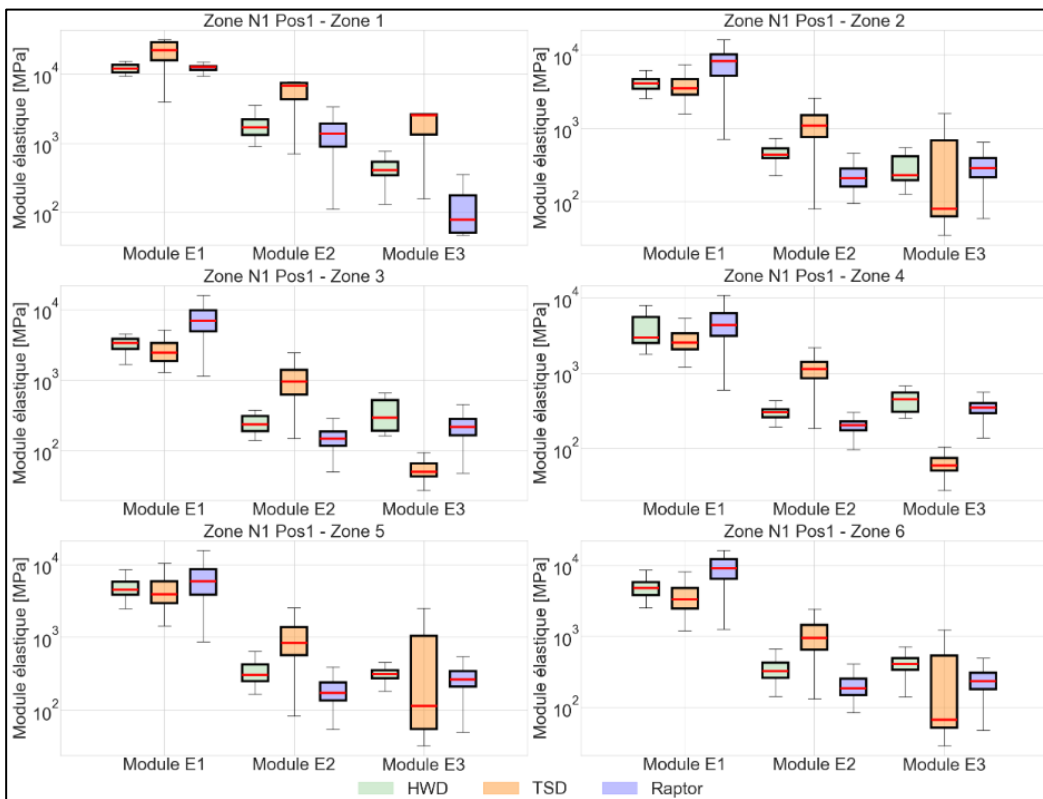


Figure 145 : Comparaison des modules élastiques – N1+ (Nyon – Ecublens)

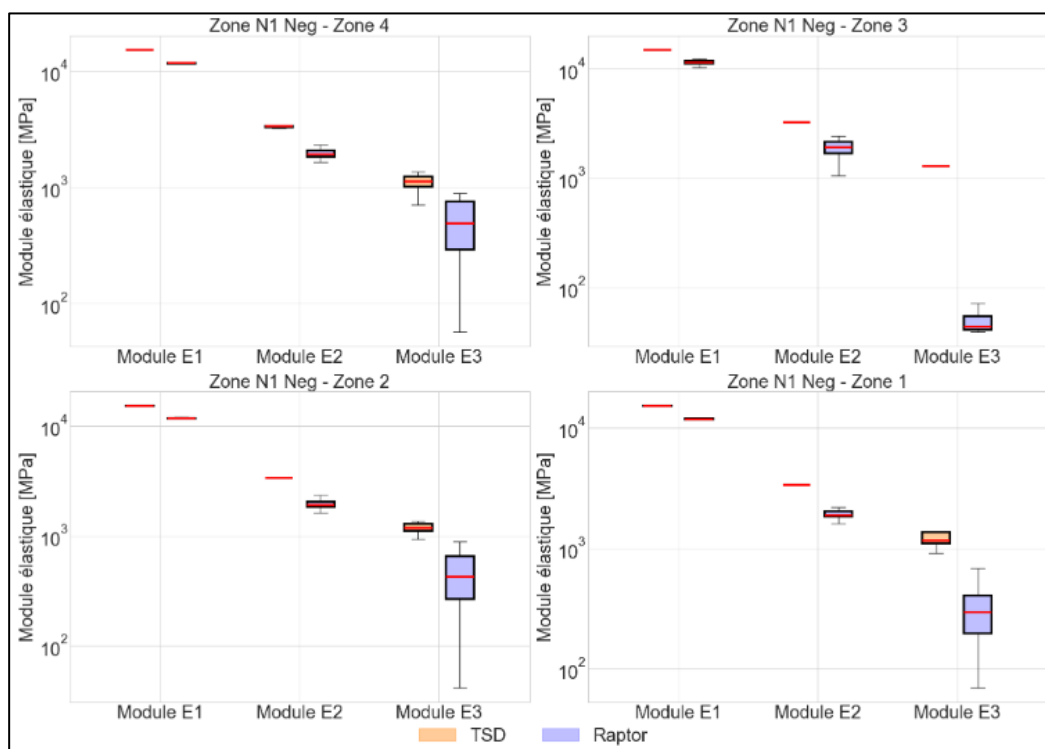


Figure 146 : Comparaison des modules élastiques – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

Les figures ci-dessus présentent la comparaison des résultats bruts, à savoir sans correction du module E1 en fonction de la température.

La comparaison des boxplots illustrant les modules élastiques de la couche bitumineuse révèle une grande similarité entre Correcte. En revanche, bien que les médianes des modules E1 obtenues par le TSD soient proches de celles du HWD, elles affichent une variabilité significativement plus élevée. Cette différence pourrait indiquer des sensibilités distinctes des appareils face aux conditions spécifiques de la chaussée ou à leurs calibrations internes.

En ce qui concerne les modules élastiques des deuxième E2 et troisième E3 couches, les résultats obtenus à partir du TSD sont généralement supérieurs à ceux issus du HWD et montrent une variabilité plus importante, particulièrement marquée sur les tronçons d'autoroutes tels que la N1+ (Nyon – Ecublens), N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains) et la T9 dans les deux sens de circulation. En revanche, les estimations réalisées par le RAPTOR se montrent plus cohérentes avec celles du HWD, affichant des médianes globalement proches et une variabilité modérée. Cette consistance indique que le RAPTOR, comparativement au TSD, pourrait offrir une meilleure stabilité dans la mesure des propriétés élastiques, surtout dans des conditions de circulation variées.

La correction des modules E1 en fonction des températures lors des mesures permet une comparaison plus précise entre les résultats obtenus à partir des deux appareils.

La figure présentée ci-dessous montre les modules E1 corrigés à une température de référence à 15 °C à partir des données des trois appareils.

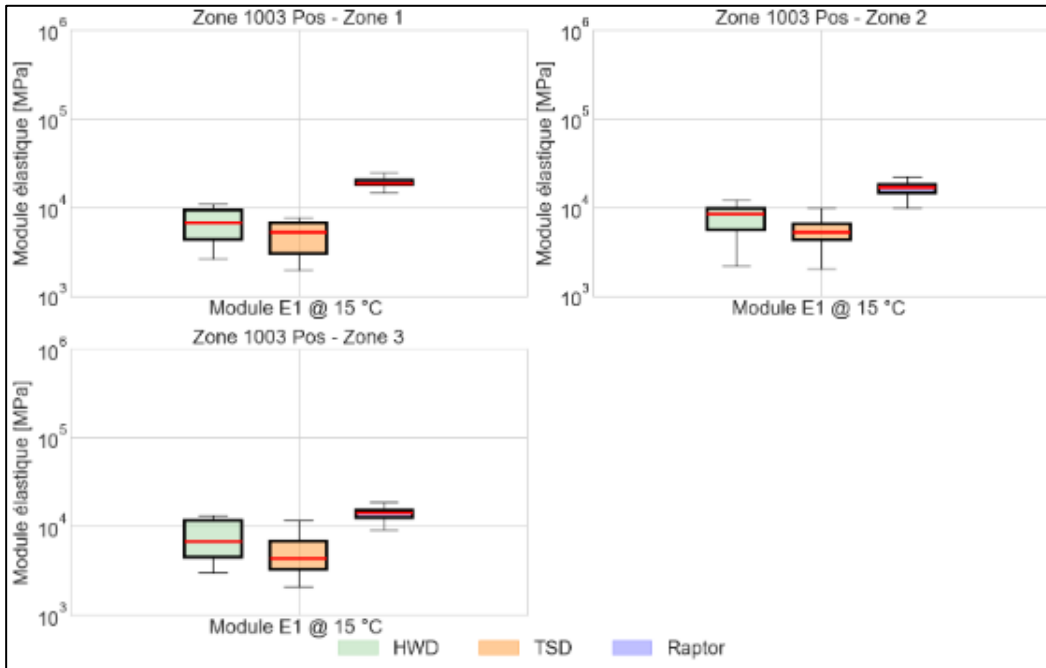


Figure 147 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC1003+

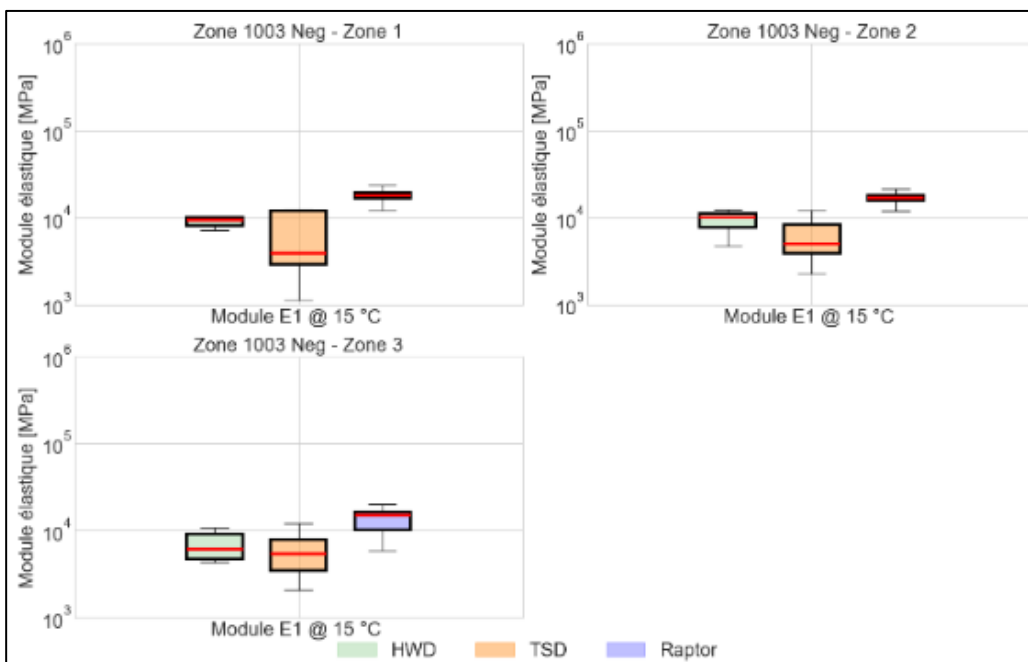


Figure 148 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC1003-

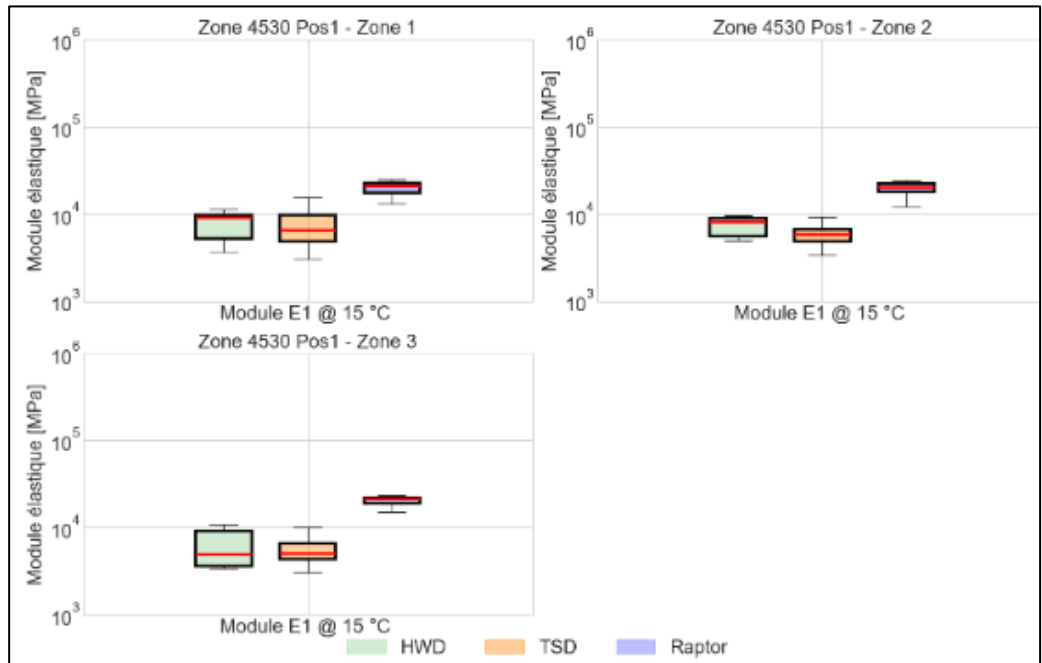


Figure 149 : Comparaison des modules élastiques E_1 corrigés en fonction de la température – RC4530+

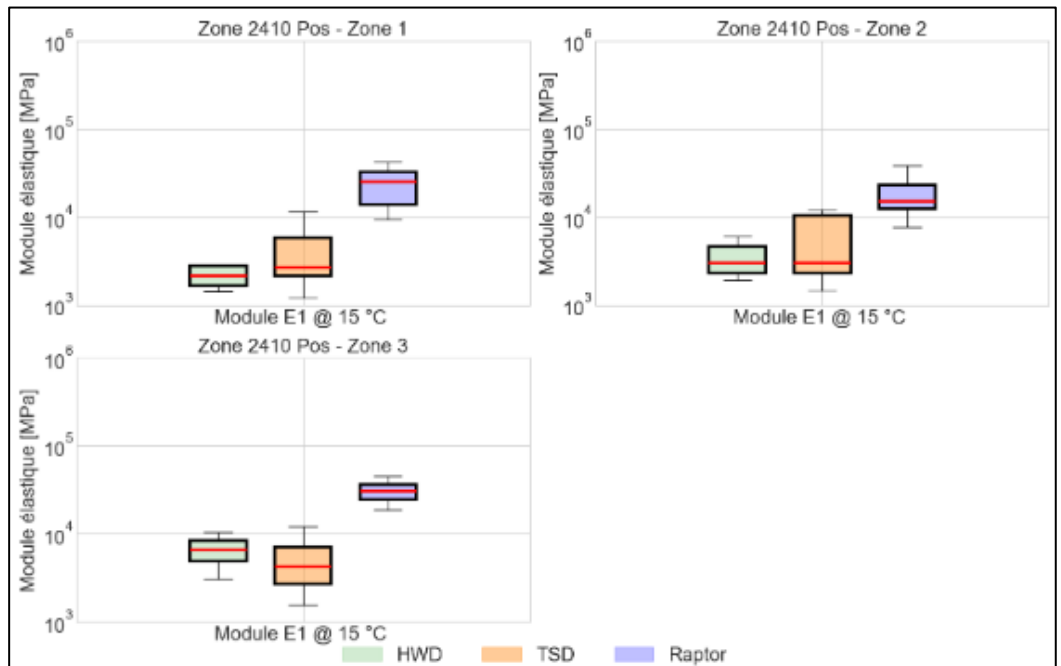


Figure 150 : Comparaison des modules élastiques E_1 corrigés en fonction de la température – RC2410+

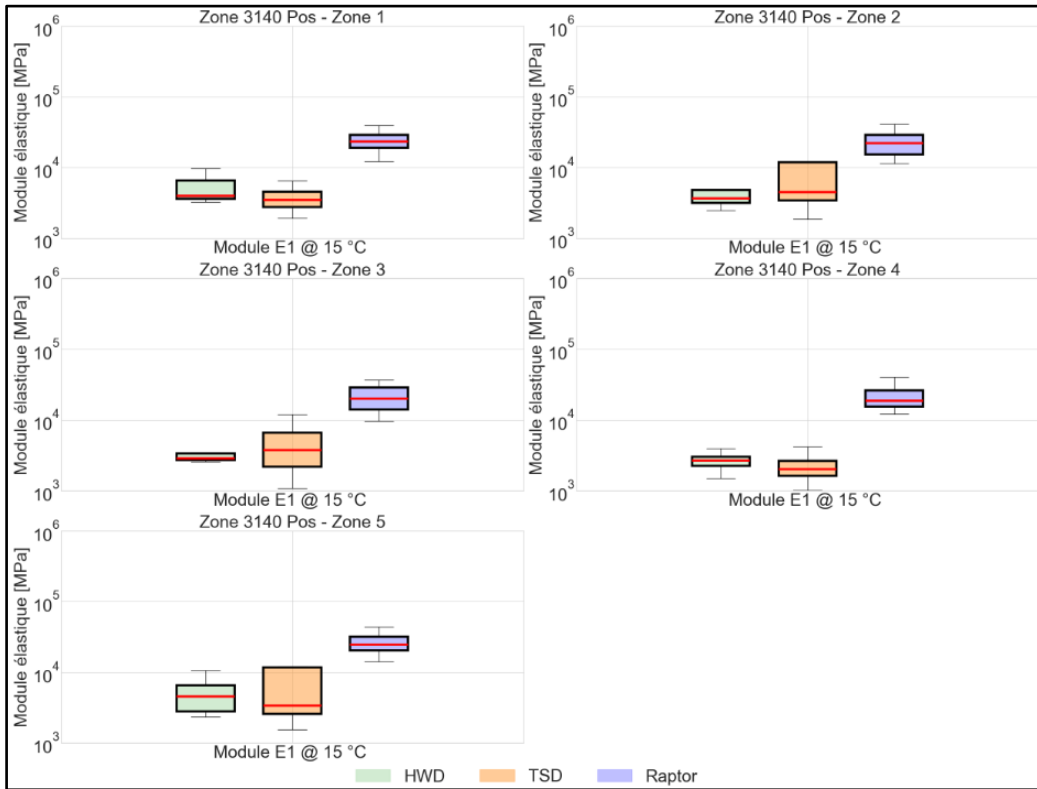


Figure 151 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – RC3140+

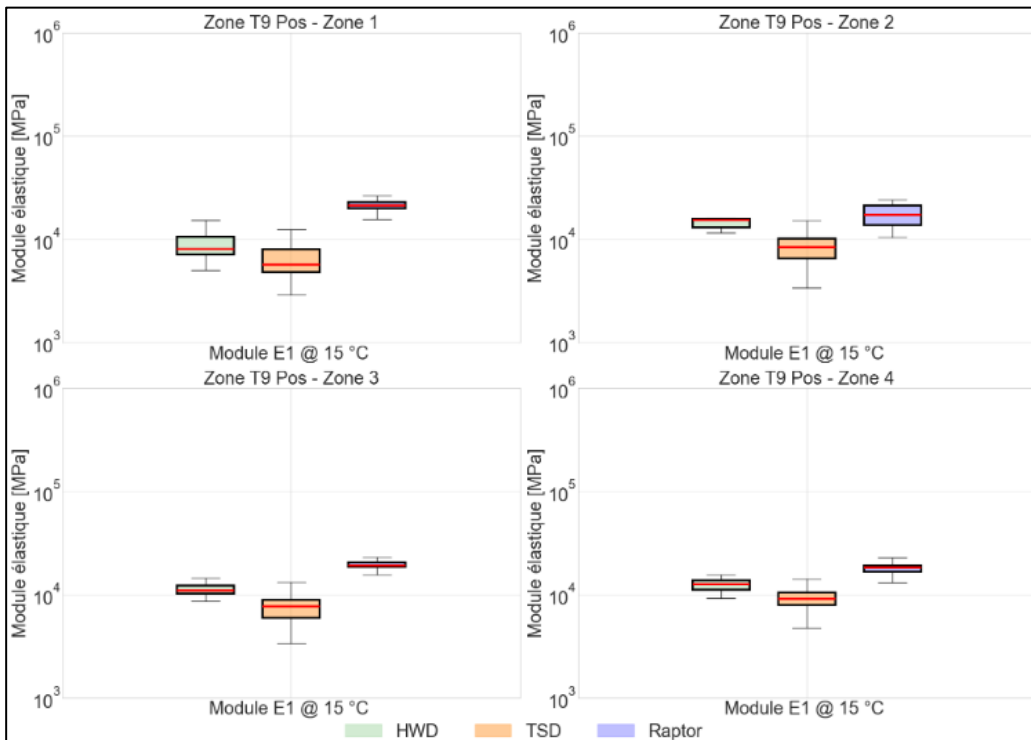


Figure 152 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – T9+

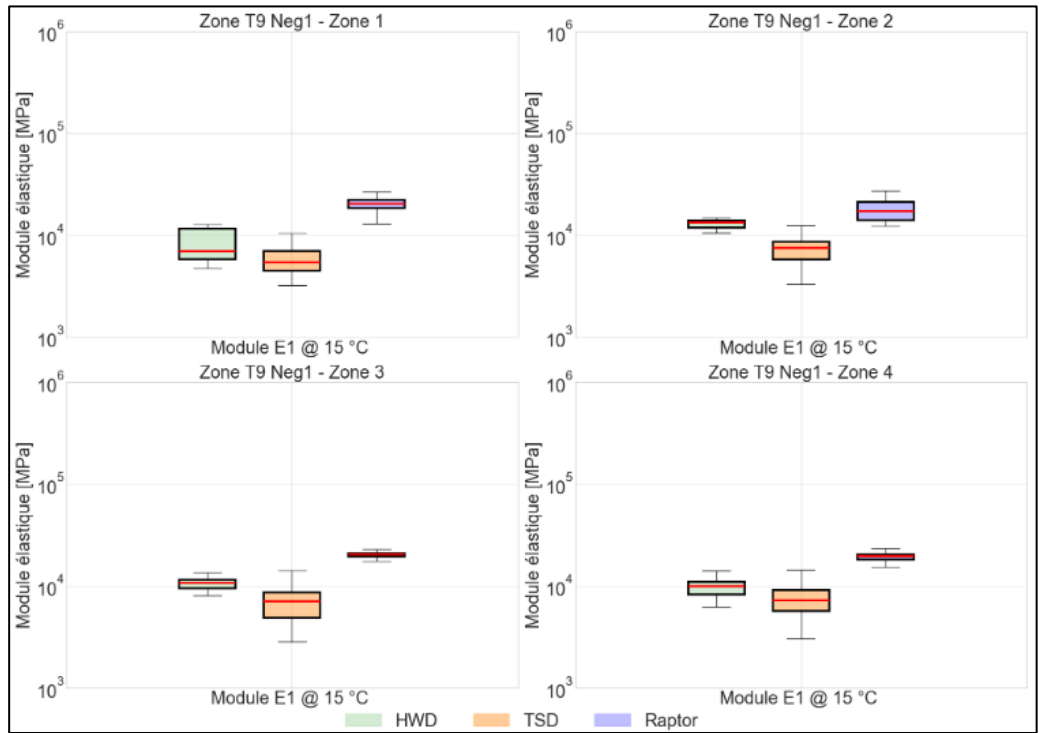


Figure 153 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – T9-

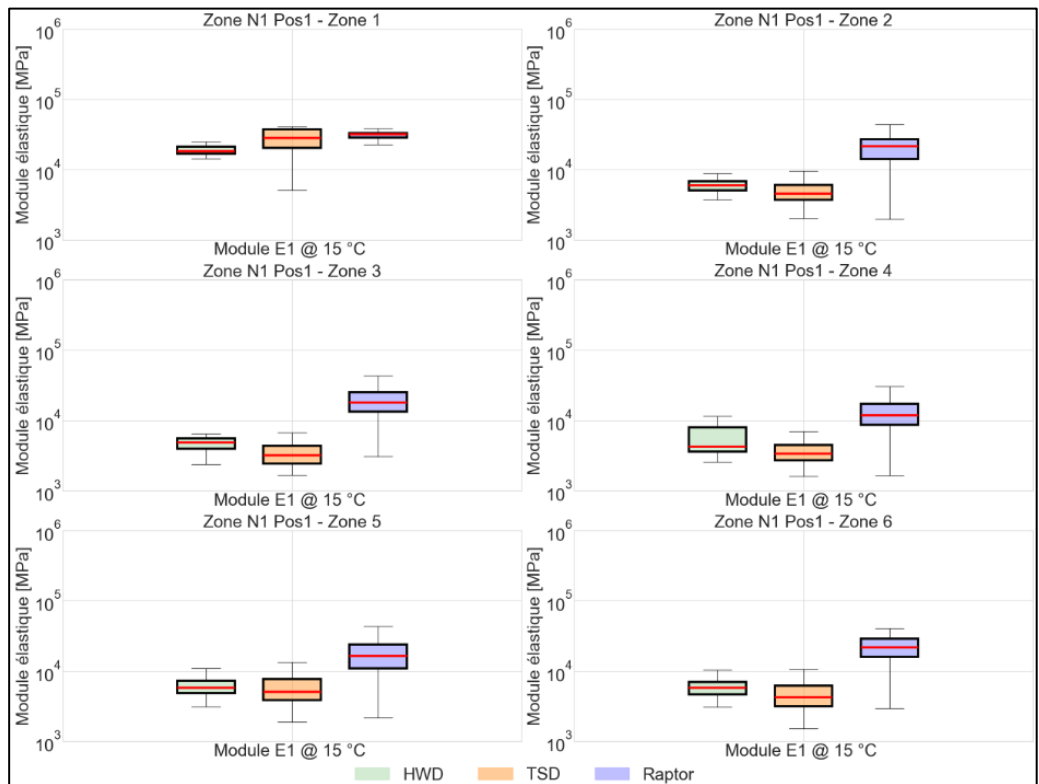


Figure 154 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – N1+ (Nyon – Ecublens)

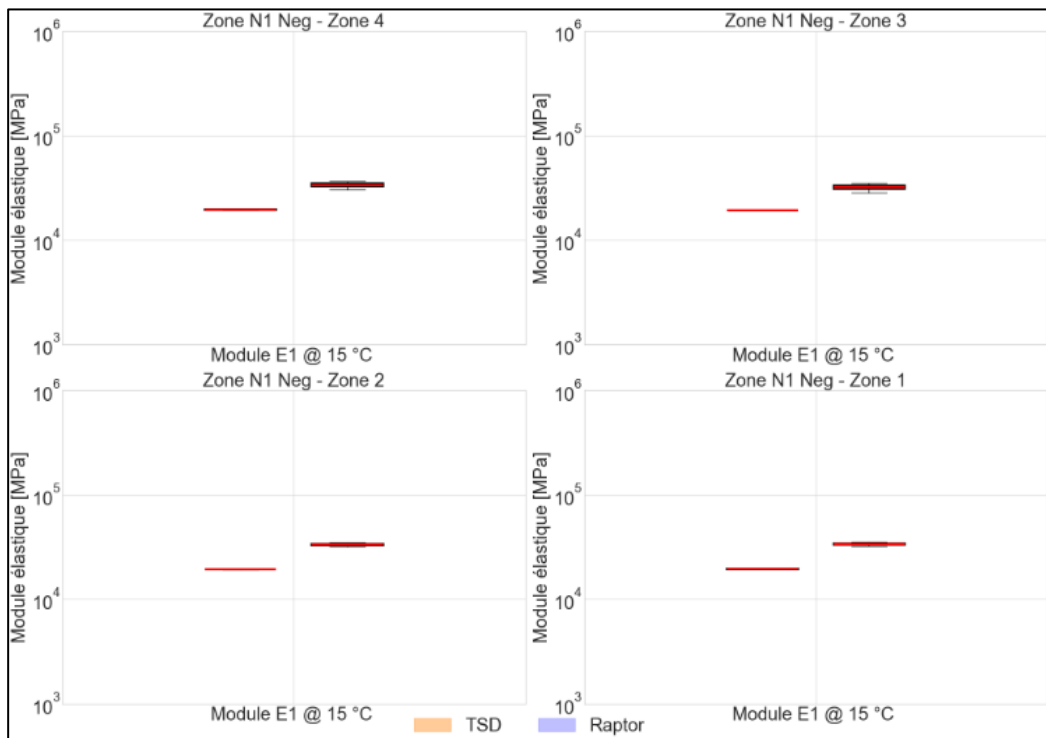


Figure 155 : Comparaison des modules élastiques E1 corrigés en fonction de la température – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

Dans l'analyse des figures comparatives des modules élastiques E1 corrigés à une température de référence de 15 °C, il apparaît que les modules obtenus par le TSD sont très similaires à ceux mesurés par le HWD, avec des médianes proches mais présentant une variabilité accrue, probablement due à la fréquence de mesure plus élevée du TSD. En revanche, les modules E1 mesurés par le RAPTOR, une fois corrigés à 15 °C, s'avèrent significativement plus élevés que ceux du HWD. Cette divergence pourrait s'expliquer par les conditions de température différentes lors des mesures. Les essais RAPTOR ont été effectués en journée, lorsque les températures de surface étaient nettement plus élevées, contrairement aux mesures HWD réalisées de nuit, où les températures étaient plus basses.

Comme illustré dans la Figure 28, les températures de surface durant les essais du RAPTOR étaient sensiblement supérieures à celles enregistrées lors des essais du TSD et du HWD. Cette situation est particulièrement marquée sur les segments RC3140+, RC2410+ et N1+ (Nyon – Ecublens), où les températures de surface atteignent 35 °C à 40 °C. Par conséquent, la correction des modules à 15 °C dans ces conditions pourrait ne plus être très fiables car se situant à la limite de validité du modèle de correction utilisé.

Pour obtenir des données comparables, il aurait été plus approprié de réaliser les essais du RAPTOR durant la nuit, ce qui n'a pas pu être garanti dans le cadre de ce projet.

7.2 Approche viscoélastique

Le fournisseur du TSD a développé un outil de calcul inverse en ligne, mis à disposition de l'équipe de projet. La procédure consiste en la modélisation du comportement viscoélastique de la chaussée pour faire les calculs inverses et ainsi estimer les modules élastiques des différentes couches.

Le module de calcul inverse est basé sur le modèle de Huet-Sayegh pour décrire le comportement viscoélastique de la couche bitumineuse, et permet d'estimer son module complexe [57]. Celui-ci est défini par les équations suivantes :

$$E(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (13)$$

$$\tau = e^{A+B \cdot T + C \cdot T^2} \quad (14)$$

Avec :

ω : la fréquence angulaire

E_0 : module élastique à une fréquence nulle

E_∞ : module élastique à une fréquence infinie

δ, k et h : paramètres du modèle

T : la température

τ : le temps caractéristique dont la valeur varie uniquement en fonction de la température

Pour les couches granulaires (non bitumineuses), l'effet d'amortissement lié aux mouvements de ces couches est considéré [57]. Le module complexe associé est estimé de la manière suivante :

$$E(\omega) = E_0 + i \cdot \text{sign}(\omega) \cdot \eta \quad (15)$$

Avec :

ω : la fréquence angulaire

E_0 : module élastique à une fréquence nulle

η : coefficient d'amortissement

La méthode de calcul utilise ce modèle viscoélastique afin d'estimer les vitesses de déflexion des structures routières qui sont ensuite comparées aux vitesses mesurées par le TSD. Tous les paramètres du modèle viscoélastique sont pris en compte, permettant ainsi d'estimer les modules des différentes couches de la chaussée [57].

Le processus d'optimisation du modèle viscoélastique n'étant pas en accès public, il est difficile de juger de sa fiabilité de manière indépendante.

Les résultats du modèle viscoélastique sont comparés avec ceux du modèle élastique obtenus aux chapitres 7.1.4 afin d'évaluer le potentiel bénéfique d'une modélisation viscoélastique par rapport à la variante élastique classique.

Les figures présentées ci-dessous permet de comparer les modules élastiques obtenus à partir des données de mesures TSD, HWD et RAPTOR, calculés avec une approche élastique (EL), et ceux obtenus par l'outil de calcul en ligne du fournisseur du TSD, utilisant une approche viscoélastique (VE).

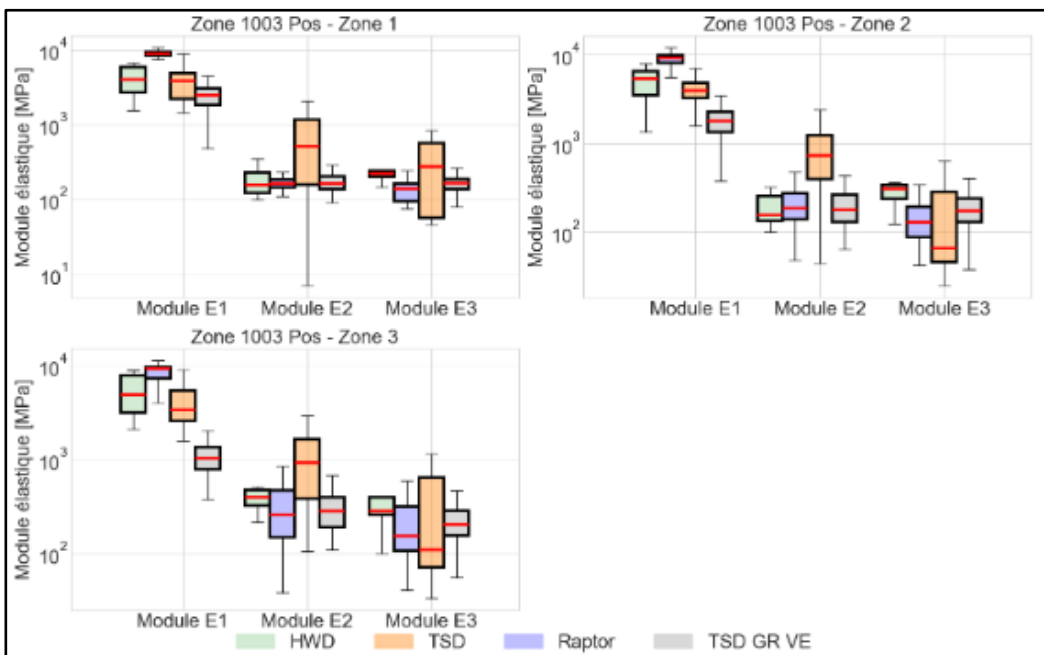


Figure 156 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC1003+

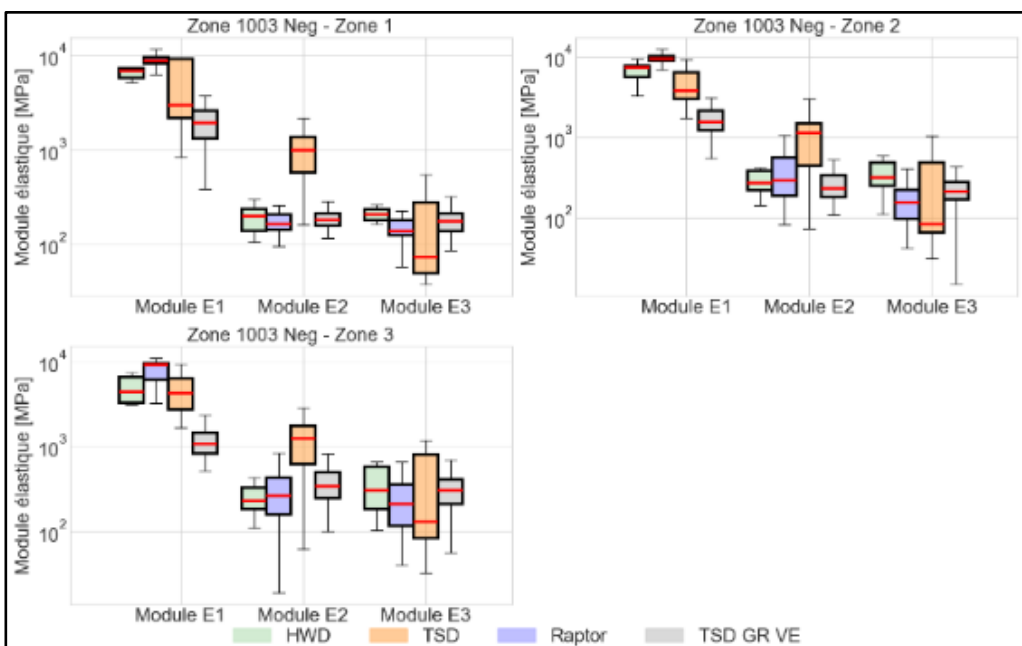


Figure 157 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC1003-

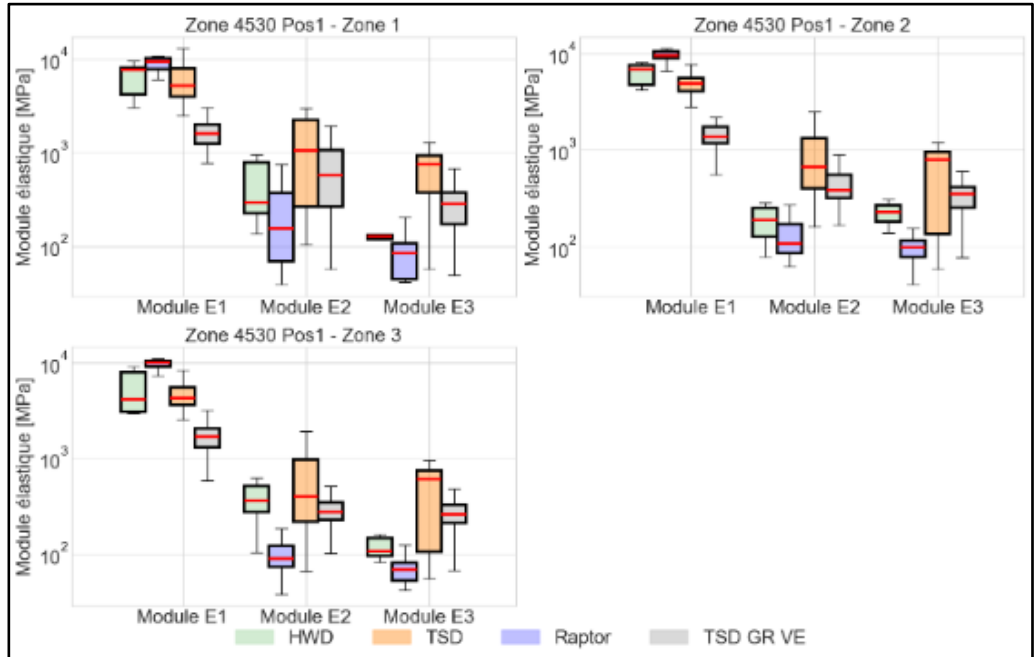


Figure 158 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC4530+

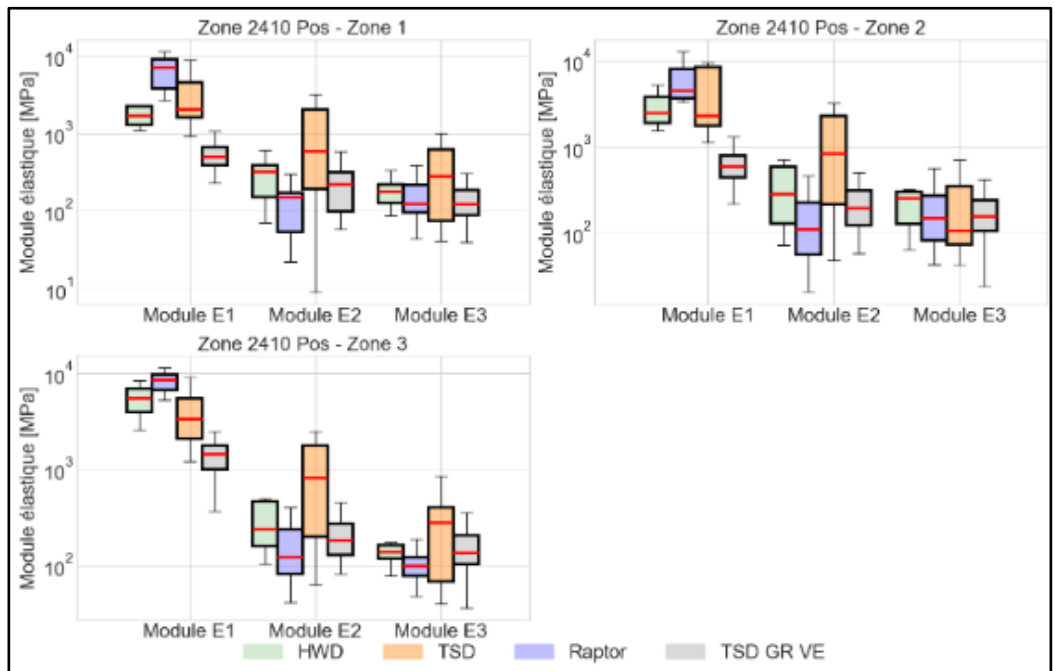


Figure 159 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC2410+

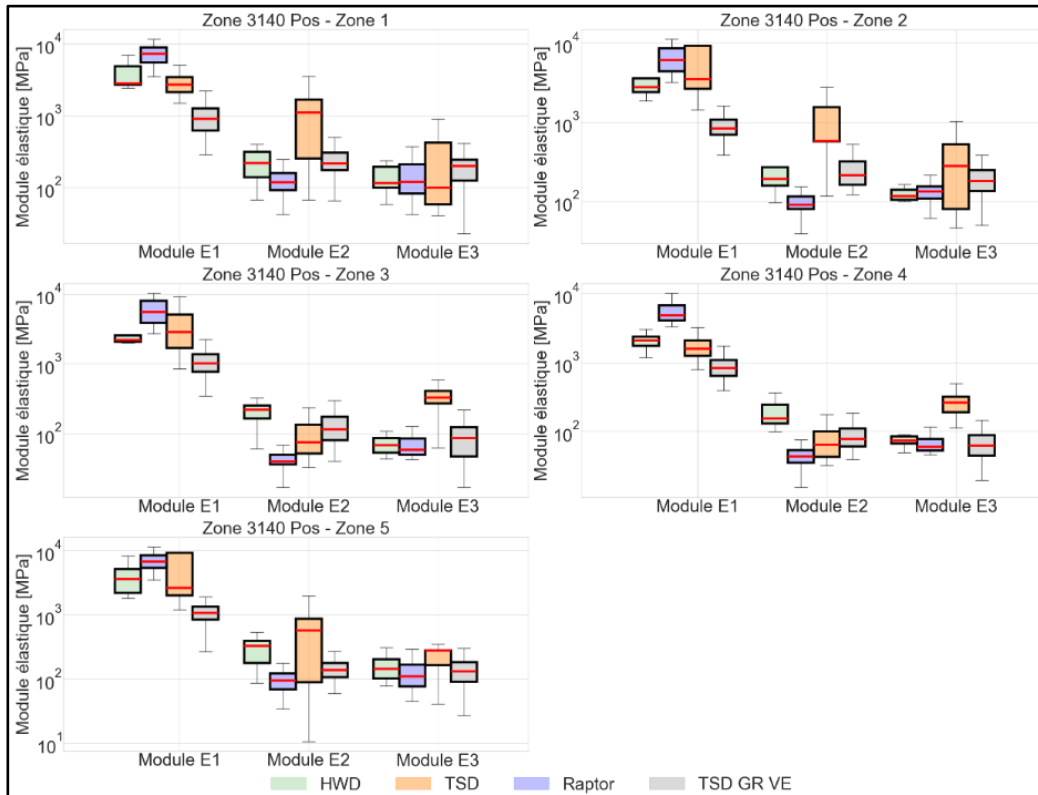


Figure 160 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – RC3140+

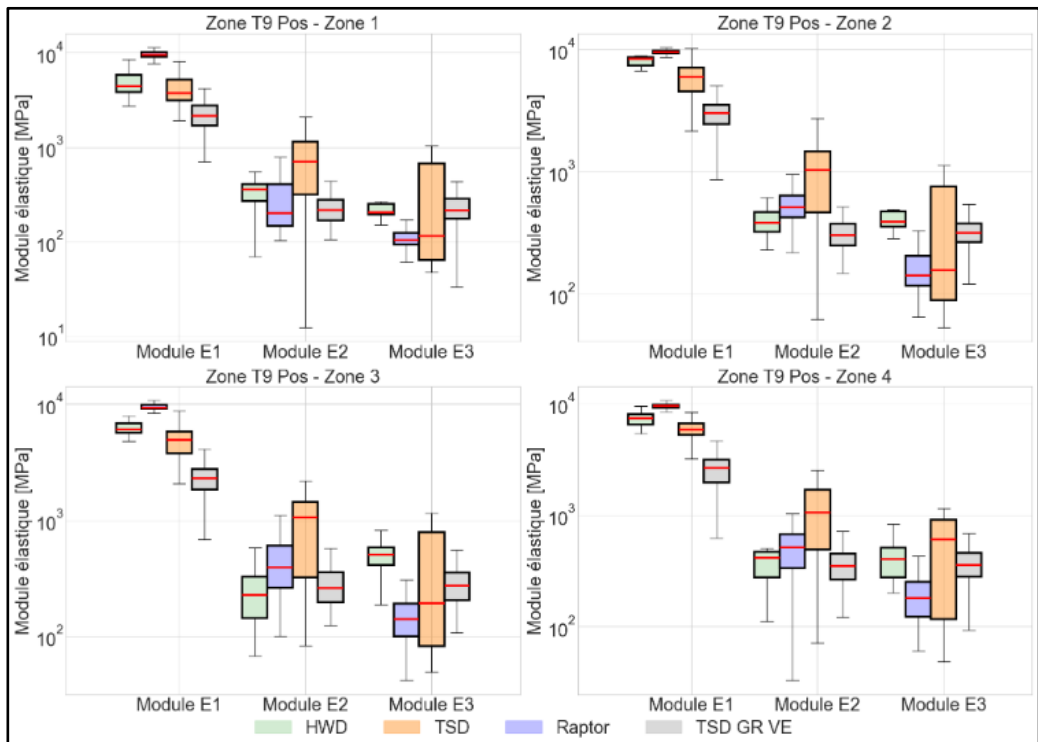


Figure 161 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – T9+

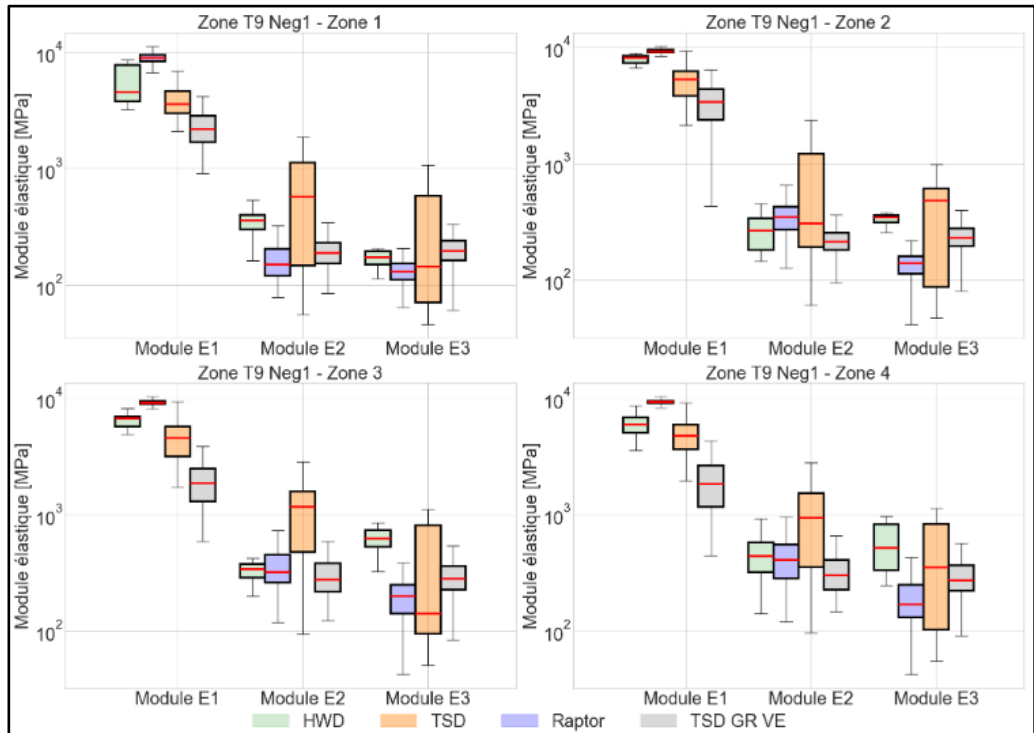


Figure 162 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – T9-

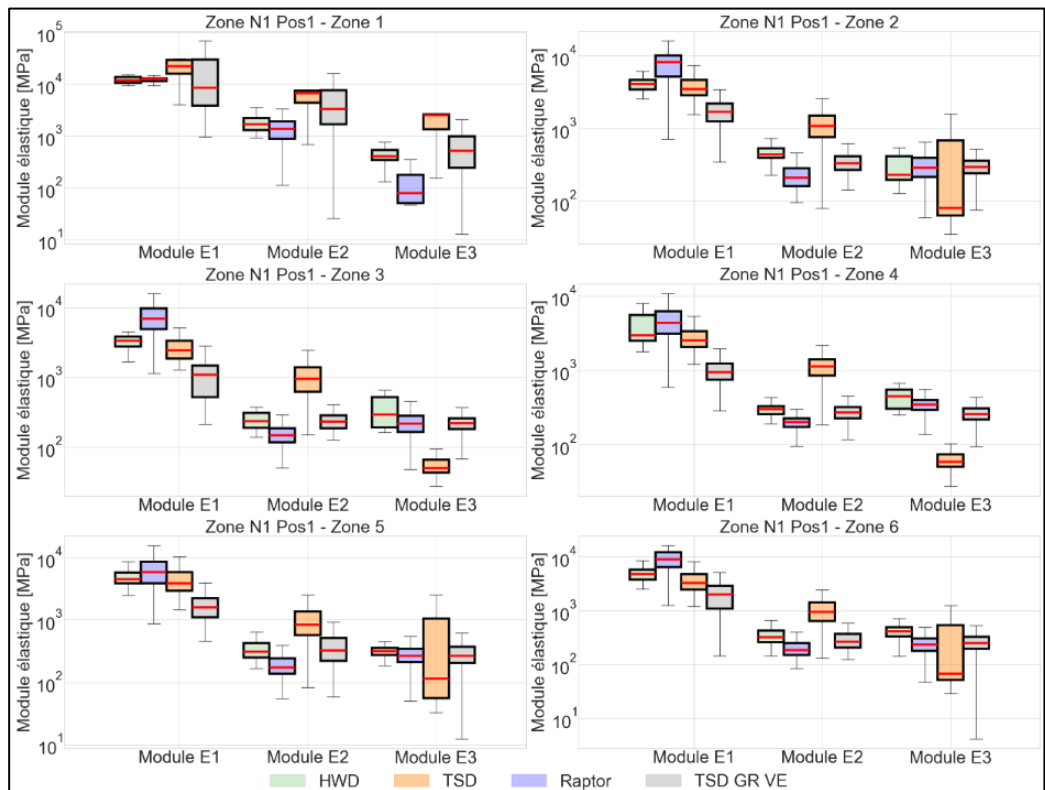


Figure 163 : Comparaison des modules élastiques EL et VE – N1+ (Nyon – Ecublens)

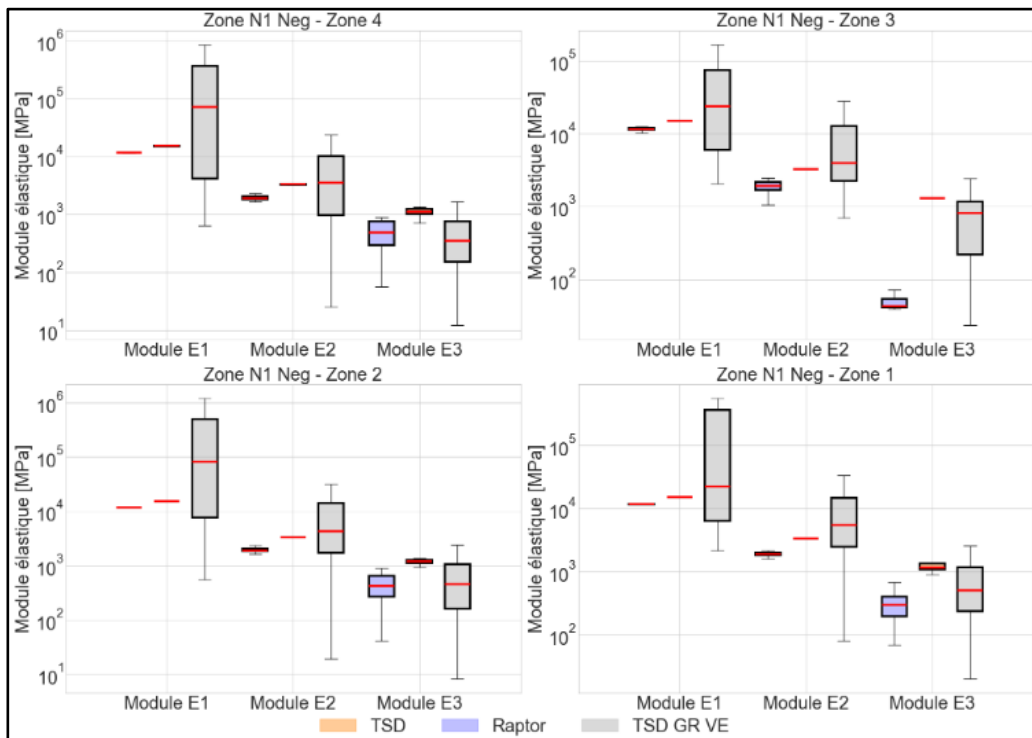


Figure 164 : Comparaison des modules élastiques EL et VE - N1- (Essert-Pittet - Yverdon-les-Bains)

L'analyse des graphiques, illustrant la comparaison statistique des modules élastiques obtenus à partir des données de différents appareils de mesure, révèle que le module E1, estimé via l'approche viscoélastique, présente une variabilité nettement plus élevée par rapport à celle obtenue avec l'approche élastique. En effet, compte tenu de la vitesse de circulation du TSD, qui opère à la vitesse du trafic, l'approche viscoélastique ne semble pas offrir un avantage en termes de précision pour l'estimation des modules élastiques des couches bitumineuses. Cette constatation suggère que, pour des mesures effectuées à des vitesses routières normales, l'approche élastique pourrait être plus appropriée et fiable pour l'évaluation des propriétés mécaniques des matériaux routiers.

Concernant les modules E2 et E3, l'utilisation de l'approche viscoélastique du fournisseur du TSD entraîne une variabilité plus faible comparée à celle obtenue avec l'approche élastique pour le TSD. Ces modules viscoélastiques se rapprochent davantage des modules obtenus avec le HWD, soulignant ainsi les avantages de l'adoption de l'approche viscoélastique pour estimer les modules des couches de fondation et du sol à partir des données TSD.

Il est pertinent à ce stade de suggérer dans le futur la considération du comportement viscoélastique plutôt pour les couches granulaires, avec un simple facteur d'amortissement, plutôt que pour les couches bitumineuses avec un modèle de comportement de type Huet-Sayegh très complexe à optimiser numériquement. L'apport de la considération d'un comportement viscoélastique des couches bitumineuses par rapport à un comportement purement élastique est discutable, surtout en tenant compte des vitesses de circulation relativement élevées.

7.3 Discussion – Comparaison des modules élastiques

L'analyse des données recueillies par le TSD, le RAPTOR et le HWD montre que chacun de ces appareils permet une détermination de la rigidité des couches constituant la chaussée auscultée. Bien que les résultats soient globalement similaires, des nuances importantes ont été observées. Le TSD et le RAPTOR, avec leur fréquence de mesure élevée, offrent une capacité supérieure à détecter des variations locales dans les propriétés des matériaux, ce qui est déterminant pour identifier les zones nécessitant une attention particulière, alors que le HWD est tributaire pour ce point du choix des profils à mesurer. Cependant, il a été regrettable que les mesures effectuées par le RAPTOR aient été réalisées pendant des périodes de la journée où les températures de surface étaient particulièrement élevées, ce qui a empêché la comparaison fiable des modules élastiques des couches bitumineuses à une température de référence de 15 °C.

La comparaison des approches élastique et viscoélastique pour l'estimation des modules élastiques a révélé des différences significatives en termes de valeurs absolues et de précision. L'approche élastique, par sa simplicité, a offert des résultats plus stables et prévisibles, particulièrement adaptés pour des mesures rapides et efficaces en conditions réelles de circulation. En revanche, bien que l'approche viscoélastique puisse théoriquement tenir compte d'une modélisation plus réaliste, elle n'a pas montré d'avantages significatifs en termes de précision dans le contexte de la vitesse élevée des mesures, comme c'est le cas avec le TSD. De plus, il est important de souligner que les divergences entre les résultats obtenus par les deux approches, élastique et viscoélastique, demeurent relativement faibles, ce qui indique que l'approche élastique constitue toujours une méthode valable et adéquate pour estimer les modules élastiques des couches granulaires, tout en demeurant plus simple à interpréter.

8 Conclusions et recommandations

8.1 Conclusions

En Suisse, l'évaluation actuelle de la portance des structures routières est généralement confinée à l'échelle de projets spécifiques. Les appareils de mesure traditionnellement utilisés, tels que le HWD, et les déflectographes Lacroix et Benkelman, en raison de leur faible rendement, ne permettent pas une évaluation exhaustive de l'indice I₅, qui caractérise la portance des structures sur l'ensemble d'un réseau routier.

Dans ce contexte, le présent projet de recherche vise à explorer la capacité et la fiabilité des appareils de mesures à haut rendement pour évaluer la capacité portante des structures routières. L'objectif est de comparer ces technologies de mesure à grand rendement, comme le TSD et le RAPTOR, avec un appareil de référence, le HWD, afin de déterminer leur efficacité et leur précision dans le contexte plus large de la gestion de l'entretien des infrastructures routières. Cette étude espère ainsi contribuer à une meilleure compréhension des performances des différents dispositifs de mesure et à l'amélioration des pratiques d'évaluation de la portance des structures routières à l'échelle d'un réseau.

Les comparaisons effectuées ont démontré la capacité de ces appareils à effectuer des mesures fiables et répétables à l'échelle d'un réseau routier, soulignant leur potentiel pour l'évaluation de l'indice I₅ pour la portance de la chaussée. L'analyse des mesures de déflexion réalisées par le TSD, le RAPTOR et le HWD a démontré une concordance générale dans les valeurs à travers les zones étudiées, avec des nuances importantes révélant les capacités spécifiques et les limitations de chaque appareil. Il a été observé que le TSD avait tendance à sous-estimer les déformations sur les chaussées rigides, ce qui suggère que le HWD est vraisemblablement plus sensible aux petites déformations. Parallèlement, le RAPTOR a montré des résultats globalement proches de ceux du HWD, permettant une évaluation similaire de la chaussée. De plus, l'analyse des déflexions D₁₅₀₀ par le TSD a mis en évidence une grande variabilité, avec des valeurs qui oscillent entre zéro et des pics élevés sur de courtes distances. Enfin, la comparaison des indicateurs SCI₃₀₀, MLI, et LLI a souligné la capacité du TSD et du RAPTOR à détecter efficacement les zones de faiblesses, grâce à leur fréquence spatiale de mesure élevée et permet une évaluation plus précise et localisée de la qualité de la chaussée. Ce point est cependant à nuancer, dans le cas du TSD, par rapports aux problèmes vraisemblablement liés à la procédure de post-traitement des mesures brutes et qui conduisent à des résultats de déflexion peu fiables loin de la charge et pour des structures de chaussée relativement rigides.

La détermination des modules de rigidité à partir des données recueillies par le TSD, le RAPTOR, et le HWD illustre bien que chaque appareil se distingue par des particularités, bien qu'une tendance générale à la similitude se dessine dans les résultats globaux. Le TSD et le RAPTOR, grâce à leur fréquence de mesure élevée, se démarquent par leur aptitude à détecter les variations locales des propriétés des matériaux, une capacité utile pour cibler les zones nécessitant une intervention spécifique sachant qu'avec le HWD, le risque de ne pas les détecter est non négligeable. Cet avantage des appareils à grand rendement enrichit significativement la précision et la portée des diagnostics de la portance des infrastructures routières, permettant une allocation plus ciblée des ressources de maintenance et de réparation.

Il est apparu que l'utilisation optimale de ces technologies, pour le moment, devrait se concentrer sur l'exploitation des indicateurs de déflexion tels que SCI300, MLI, et LLI. Ces indicateurs se sont révélés particulièrement utiles pour identifier les zones de faiblesse structurelle à l'échelle du réseau, permettant ainsi de cibler précisément les interventions nécessaires pour le maintien et l'amélioration des infrastructures routières.

En conclusion, les appareils TSD et RAPTOR émergent comme des outils très prometteurs pour la surveillance et la maintenance des réseaux routiers. Leur capacité à fournir des données détaillées sur l'état des chaussées permet une gestion plus efficace des ressources et une planification stratégique des réparations, assurant ainsi une durabilité accrue des routes. À l'avenir, avec des ajustements méthodologiques et une meilleure compréhension des systèmes d'exploitation propre à chaque appareil, ces technologies pourraient révolutionner les approches traditionnelles de l'évaluation des infrastructures routières.

8.2 Recommandations pour la normalisation

Le présent chapitre rassemble les recommandations proposées pour une intégration dans la normalisation suisse sur la portance des structures routières.

Appareil TSD :

- L'intégration des vitesses de déflexion pour obtenir des déflexions totales peut introduire des accumulations d'erreurs, notamment en raison de la complexité du processus et de la sensibilité des équipements utilisés.
- Les mesures effectuées par le TSD ne sont pas adaptées pour des structures routières particulièrement rigides ou avec une épaisseur élevée, où la précision des mesures peut être compromise.
- Les anomalies observées dans les bassins de déflexion, intégrés à partir des vitesses de déflexion, peuvent être exacerbées par la propagation de l'effet de la charge sur une grande distance, captée par un laser de référence qui devrait normalement enregistrer une vitesse de déflexion nulle.
- L'utilisation des données obtenues pour estimer les modules élastiques peut s'avérer problématique en raison du volume de données présentant des anomalies, ce qui pourrait rendre les estimations des modules moins fiables.

- Il est recommandé de se concentrer sur l'exploitation des indicateurs de déflexion pour évaluer l'état des couches de la structure routière, afin d'assurer une analyse plus robuste et fiable des données.

Appareil RAPTOR :

- L'appareil RAPTOR permet de mesurer directement les déflexions de la chaussée lors du passage d'un véhicule chargé circulant à la vitesse du trafic, fournissant ainsi des données immédiates et précises sur l'état structural.
- Il est à noter que les informations concernant le système de traitement des données n'ont pas été communiquées à l'équipe de projet, limitant ainsi la possibilité d'une analyse approfondie et indépendante des données recueillies.
- Les déflexions mesurées par le RAPTOR sont très comparables à celles mesurées par le HWD, confirmant la fiabilité de cet appareil dans les conditions de mesure routière normales.
- Il est recommandé d'utiliser les indicateurs de déflexion recueillis pour évaluer l'état des différentes couches de la structure routière, afin de mieux comprendre leur intégrité et planifier les maintenances nécessaires.

Pour optimiser les mesures de portance, il est recommandé de réaliser les essais durant la nuit ou sous couverture nuageuse, période durant laquelle les températures de surface de la chaussée sont généralement plus basses et ne présentent pas de gradients thermiques élevés à différentes profondeurs de la couche bitumineuse. Il serait judicieux de mener ces essais à des températures de l'air comprises entre 10 °C et 25 °C, afin de garantir une fiabilité des formules de correction de l'effet de la température. Cette approche permettrait de minimiser les variations induites par les fluctuations thermiques, offrant ainsi des conditions plus stables et comparables pour l'évaluation des propriétés mécaniques de la chaussée.

Annexes A – Comparaison des déflexions maximales

Les figures ci-dessous illustrent la comparaison statistique des déflexions maximales enregistrées par chaque appareil de mesure pour les différentes zones homogènes identifiées dans chaque secteur.

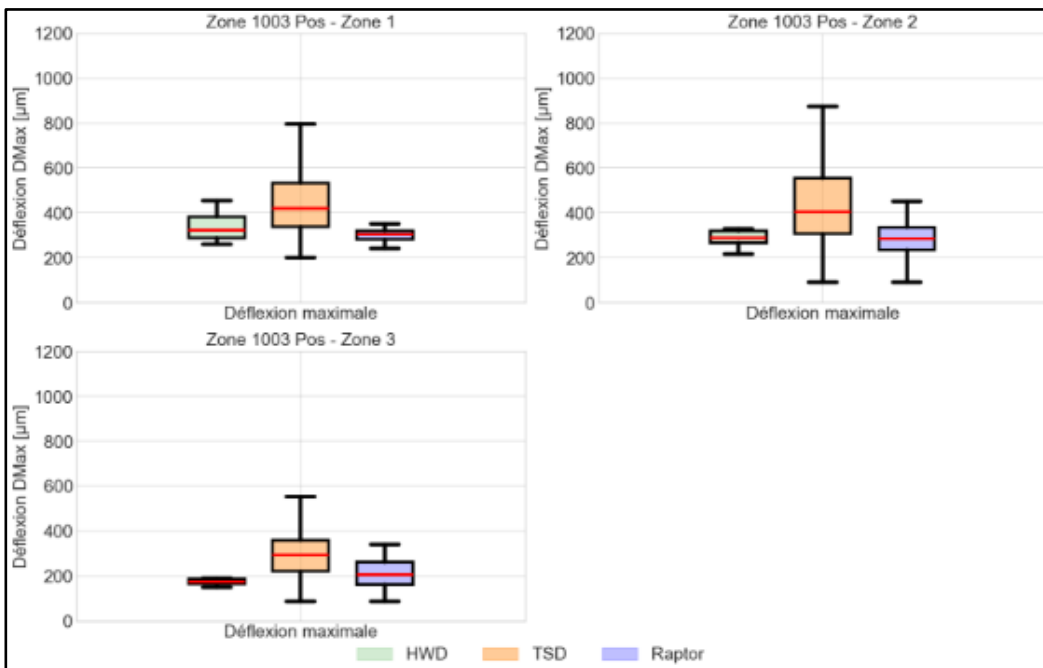


Figure 165 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC1003+

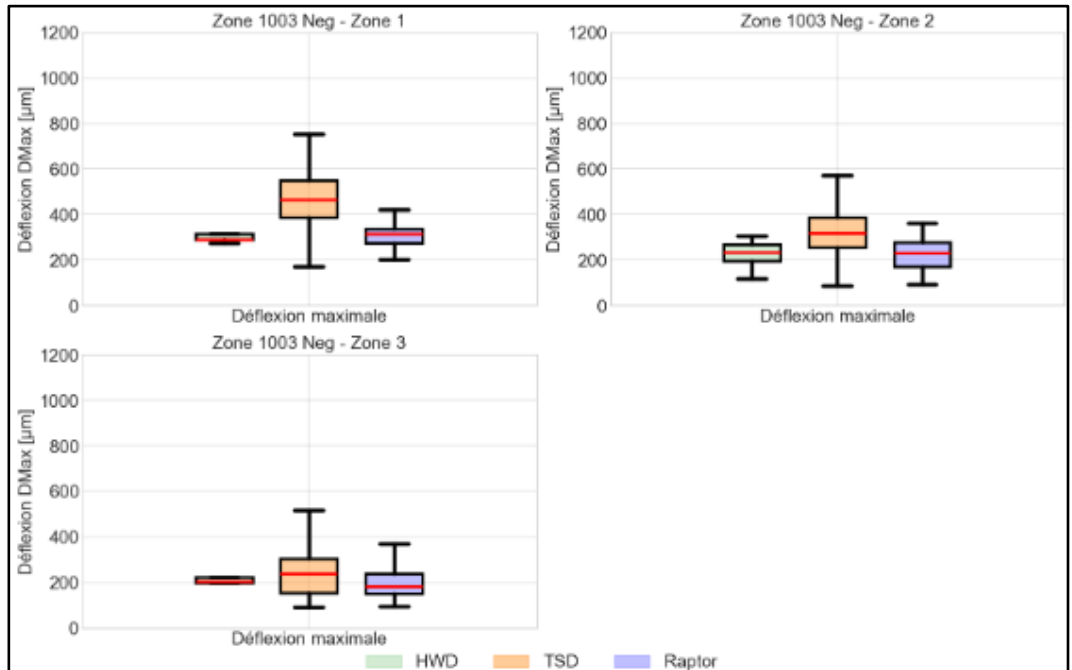


Figure 166 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC1003-

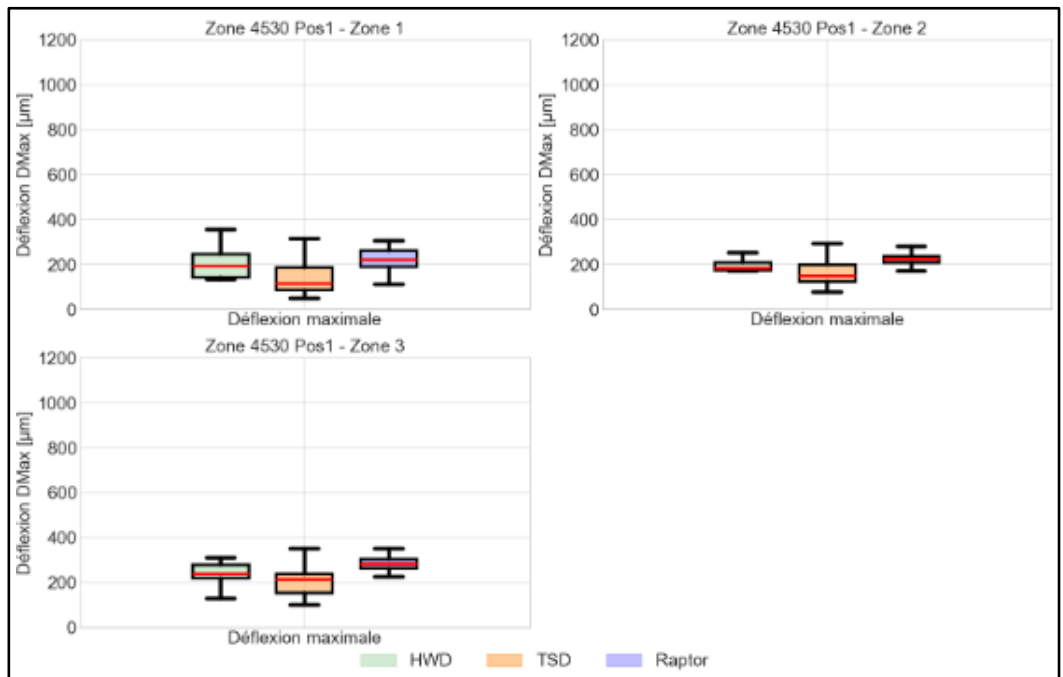


Figure 167 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC4530+

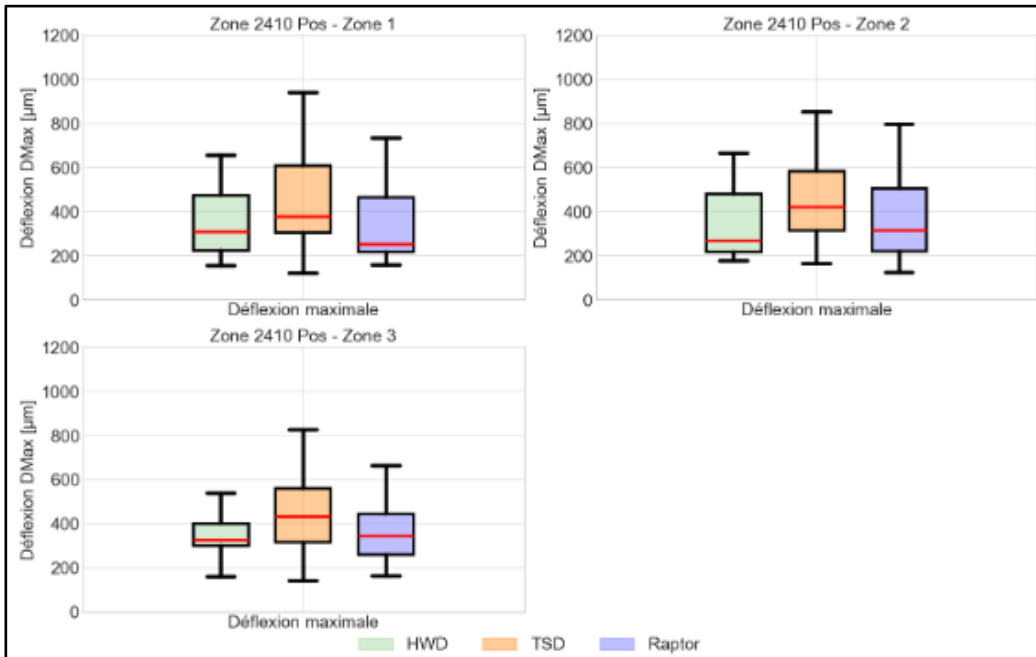


Figure 168 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC2410+

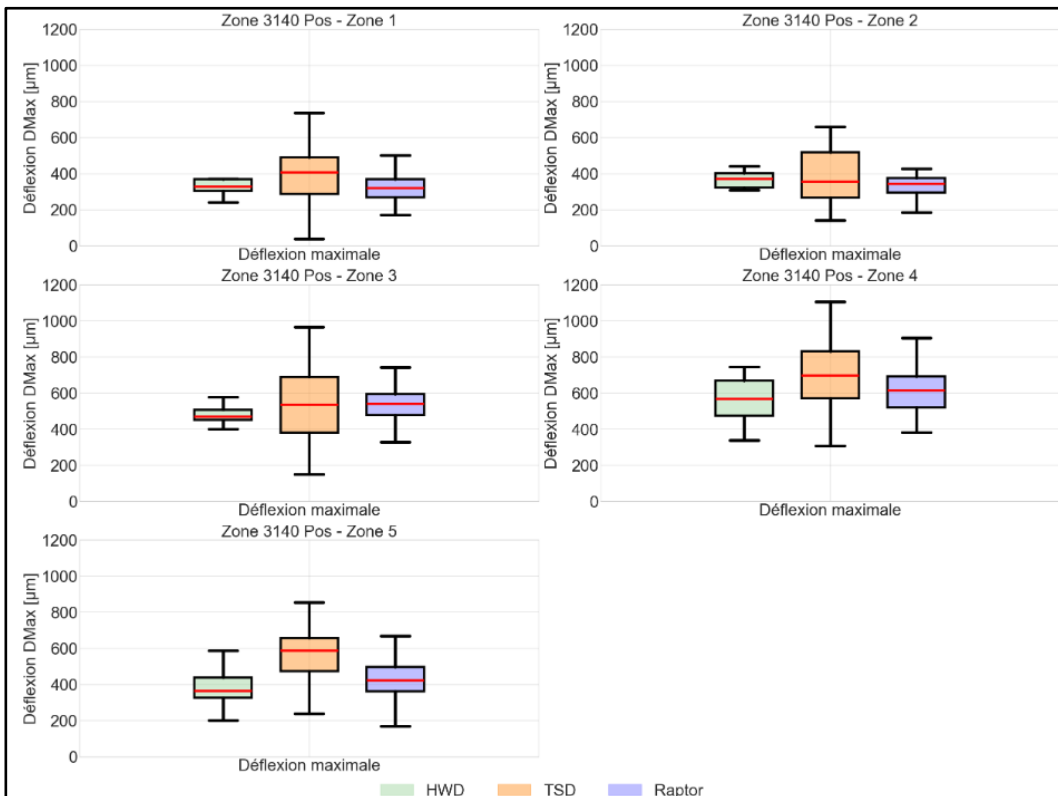


Figure 169 : Comparaison des déflexions maximales DMax – RC3140+

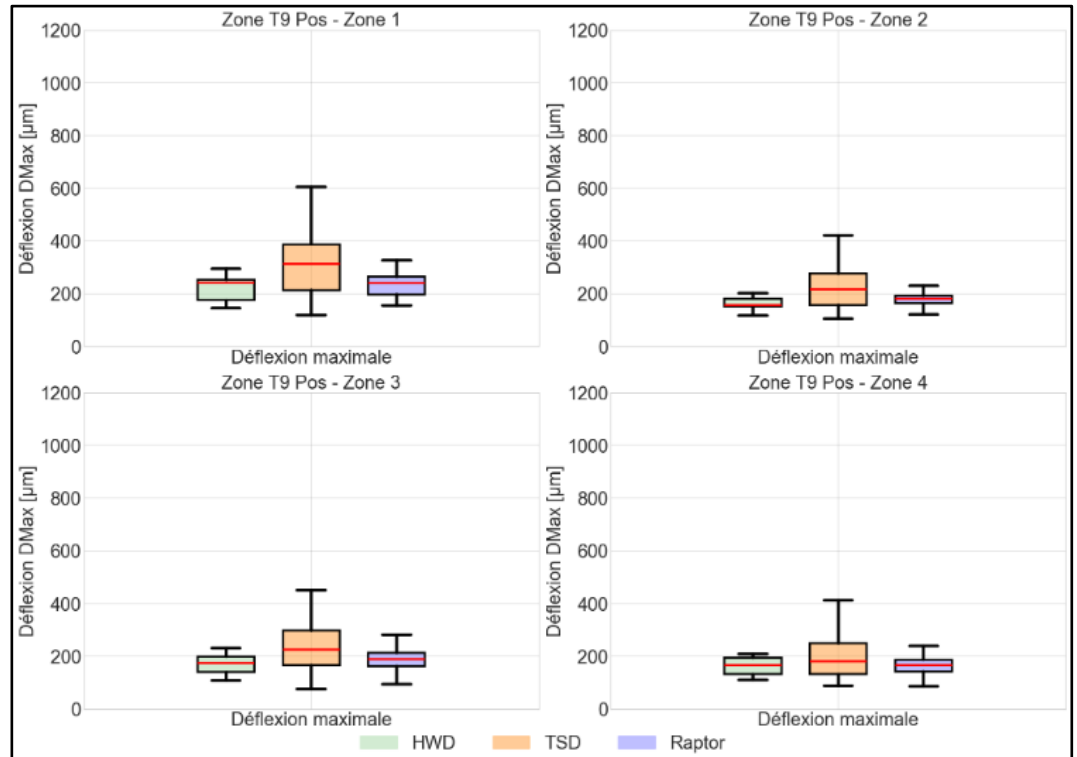


Figure 170 : Comparaison des déflexions maximales DMax – T9+

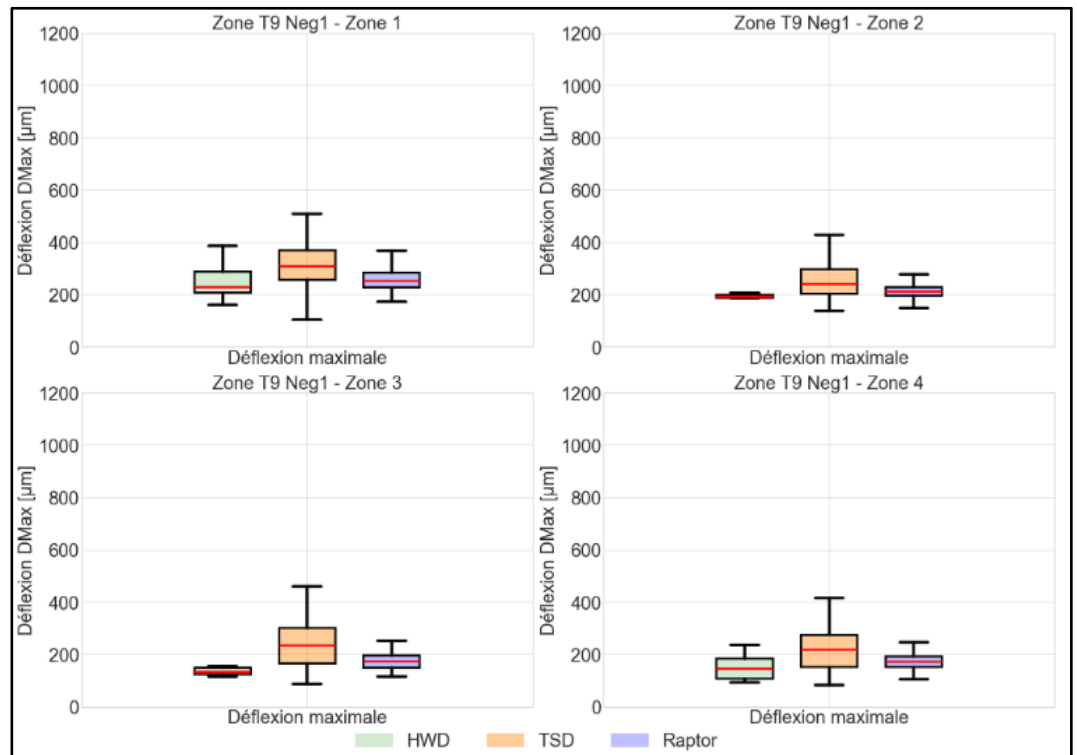


Figure 171 : Comparaison des déflexions maximales DMax – T9-

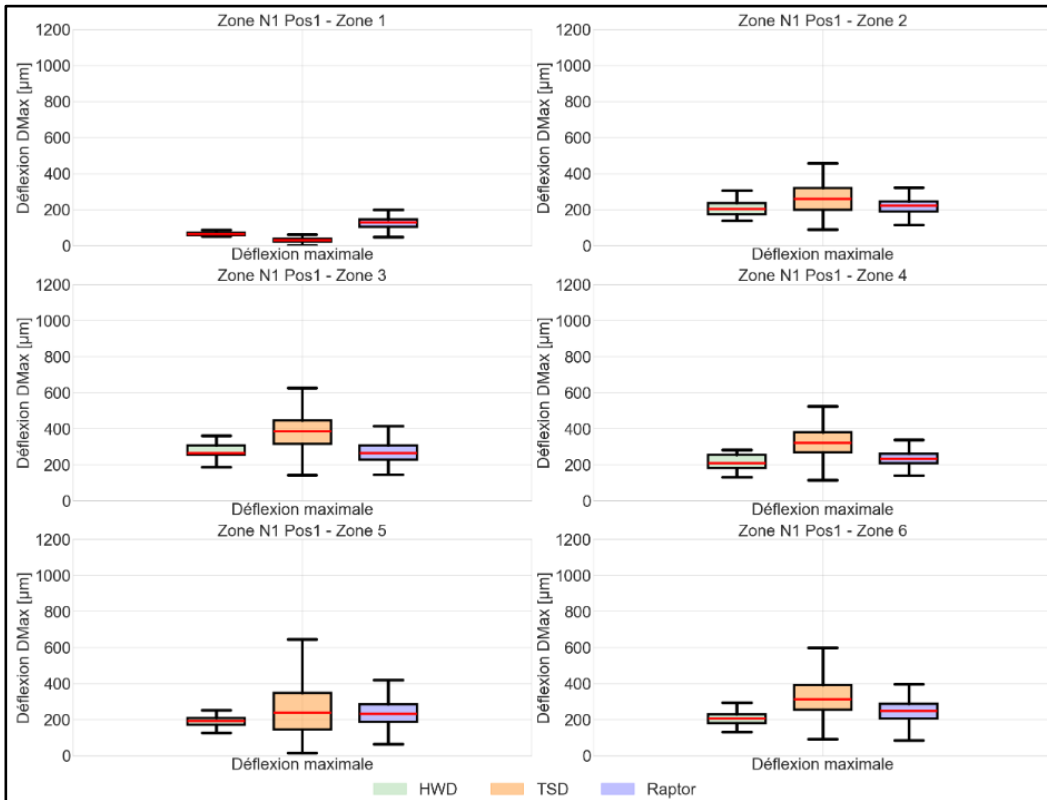


Figure 172 : Comparaison des déflexions maximales DMax – N1+ (Nyon – Ecublens)

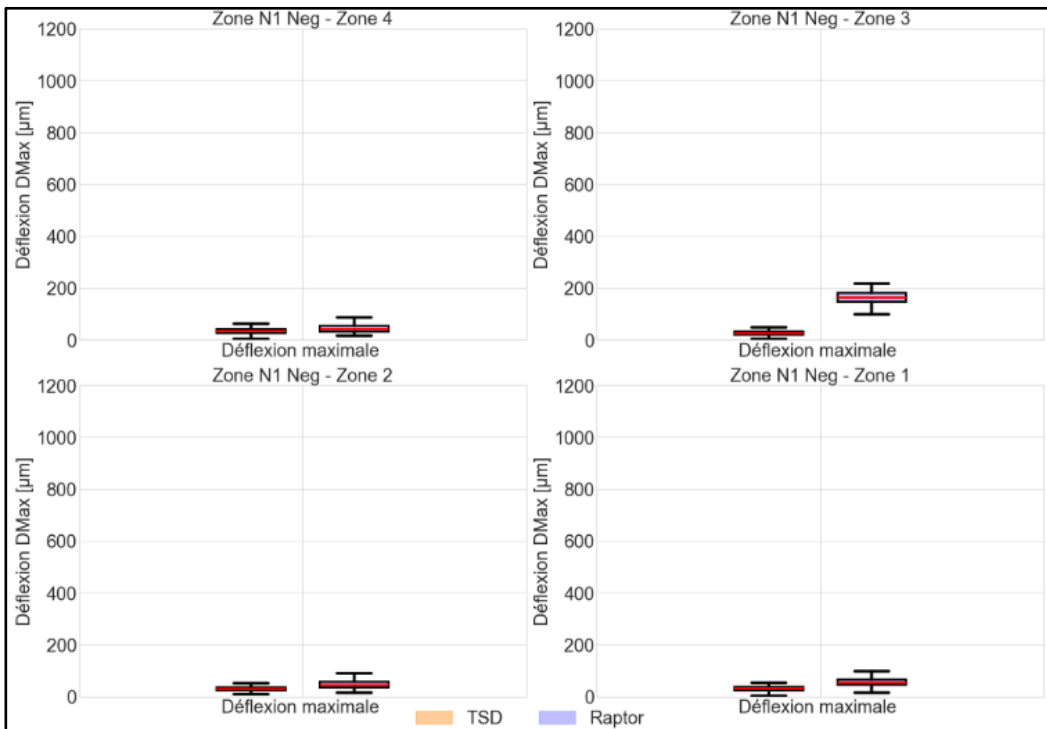


Figure 173 : Comparaison des déflexions maximales DMax – N1- (Essert-Pittet – Yverdon-les-Bains)

Les boxplots qui illustrent les mesures de déflexion maximale enregistrées par les trois appareils de mesure dans chaque zone homogène révèlent une convergence des résultats, similaire à celle observée pour les déflexions Do. En particulier, les médianes des déflexions maximales, ajustées en fonction de la charge appliquée par chaque appareil, montrent une proximité notable, avec les valeurs du RAPTOR qui tendent à s'aligner étroitement avec celles du HWD. Il est cependant important de souligner que les déflexions maximales mesurées par le TSD affichent une variabilité plus élevée, caractérisée par une dispersion accrue des valeurs dans certaines zones.

Bibliographie

- [1] B. Picoux et R. Tautou, « Amélioration de l'interprétation des méthodes d'auscultation dans le cadre de l'établissement d'un diagnostic précis de la chaussée à partir de méthodes d'impact », Laboratoire GC2D, Université de Limoges, France, DVDC/R/011, juin 2018.
- [2] P. Lepert, G. Aussedat, et J.-M. Simonin, « Évaluation du curviamètre MT 15 », Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées, no 209, p. 3-11, 1997.
- [3] M. Broutin, « Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers. Development of a FEM dynamical time-domain analysis for the backcalculation of structural properties. ».
- [4] M. Ould-Henia et R. Braber, « Falling Weight Deflectometer et déflectographe Lacroix : Comparaison, domaine d'application et perspectives », Route et Trafic N° 7-8, 2008
- [5] S. Wurckler, « Développement de techniques d'auscultation de chaussées. », INSA de Rennes, 2010
- [6] B. H. Nam, K. H. Stokoe, et H. Youn, « Enhanced Sensing and Data Processing System for Continuous Profiling of Pavement Deflection », Materials, vol. 12, no 10, Art. no 10, janv. 2019, doi: 10.3390/ma12101653.
- [7] Brian K. Diefenderfe, « Investigation Of The Rolling Wheel Deflectometer As A Network-Level Pavement Structural Evaluation Tool ». 2010
- [8] P. Joy, « Dynatest expands pavement consulting services with RAPTOR », Equipment World, janvier 2019.
- [9] A. Skar, E. Levenberg, S. Andersen, et M. B. Andersen, « Analysis of a moving measurement platform based on line profile sensors for project-level pavement evaluation », Road Materials and Pavement Design, vol. 22, no 9, p. 2069-2085, sept. 2021, doi: 10.1080/14680629.2020.1741429.
- [10] G. M. Mabrouk, O. S. Elbagalati, S. Dessouky, L. Fuentes, et L. F. Walubita, « 3D-finite element pavement structural model for using with traffic speed deflectometers », International Journal of Pavement Engineering, vol. 0, no 0, p. 1-15, juin 2021, doi: 10.1080/10298436.2021.1932880.
- [11] G. Hildebrand, « Development of a high speed deflectograph », Nordic Road and Transport Research, vol. 14, no 3, déc. 2002
- [12] J. Krarup, S. Rasmussen, L. Aagaard, et P. G. Hjorth, « Output from the Greenwood traffic speed deflectometer », ARRB Conference, 22nd, 2006, Canberra, Act, Australia, nov. 2006
- [13] B. W. Ferne, P. Langdale, N. Round, et R. Fairclough, « Development of the UK Highways Agency Traffic Speed Deflectometer », présenté à Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 8th International Conference (BCR2A'09)University of Illinois, Urbana-Champaign, 2009.
- [14] S. W. Katicha et G. W. Flintsch, « Field Demonstration of the Traffic Speed Deflectometer in New York », présenté à Transportation Research Board 94th Annual MeetingTransportation Research Board, 2015.
- [15] J. Lee, M. Moffatt, et J. M. Ramanujam, « Exploratory Study to Use Traffic Speed Deflectometers (TSD) for Project-Level Pavement Evaluations », p. 1-8, juill. 2016, doi: 10.1061/9780784480090.001.

- [16] F. Xiao, Q. Xiang, X. Hou, et S. N. Amirkhanian, « Utilization of traffic speed deflectometer for pavement structural evaluations », *Measurement*, vol. 178, p. 109326, juin 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109326.
- [17] Q. Li, Q. Zou, Q. Mao, X. Chen, et B. Li, « Efficient Calibration of a Laser Dynamic Deflectometer », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no 4, p. 806-813, avr. 2013, doi: 10.1109/TIM.2013.2240932.
- [18] J.-M. Roussel, « Apport de la viscoélasticité dans l'analyse dynamique des essais au Heavy Weight Deflectometer », phdthesis, Université de Lyon, 2020.
- [19] J. Simonin, D. Lièvre, S. Rasmussen, et G. Hildebrand, « Assessment of the Danish High Speed Deflectograph in France », 2005.
- [20] G. Flintsch, B. Ferne, B. Diefenderfer, S. Katicha, J. Bryce, et S. Nell, « Evaluation of Traffic-Speed Deflectometers », *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2304, p. 37-46, déc. 2012, doi: 10.3141/2304-05.
- [21] A. Abdel-Khalek, « Pavement structural evaluation using the Rolling Wheel Deflectometer », LSU Master's Theses, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2011.
- [22] B. Joly et al., « Mesure de Déflexions à grand rendement ».
- [23] Laboratoire central des ponts et chaussées, Éd., *Ovalisation: exécution et exploitation des mesures version 1.1*. in *Méthode d'essai LPC*, no. 41. Paris: LCPC, Laboratoire central des ponts et chaussées, 1995.
- [24] DIN 18134:2012-04, *Baugrund_ - Versuche und Versuchsgeräte_ - Plattendruckversuch*. doi: 10.31030/1869979.
- [25] « AP Trag B 2.1: FWD Asphalt ».
- [26] « CD 227 Design For Pavement Maintenance », *Road Infrastructure, Transportation Engineering*
- [27] J. Simonin, J. Geffard, et P. Hornych, « Performance of Deflection Measurement Equipment and Data Interpretation in France », 2015.
- [28] V. L. Boursicaud, « Nouvelles utilisations des mesures de bassins de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées », phdthesis, École centrale de Nantes, 2018.
- [29] R. Braber et A. Gautier, « Corrélation entre déflexions FWD et Benkelman », *Projet de recherche VSS 2011/503*, oct. 2017
- [30] Y. R. Kim, H. Park, North Carolina State University. Department of Civil Engineering, et United States. Federal Highway Administration, « Use of falling weight deflectometer multi-load data for pavement strength estimation », *FHWA/NC/2002-006*, juin 2002.
- [31] M. Zhang, G. Fu, Y. Ma, R. Xiao, et B. Huang, « Speed and temperature superposition on traffic speed deflectometer measurements », *Transportation Geotechnics*, vol. 40, p. 100990, mai 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2023.100990.
- [32] *Transportation Officials., ASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, 1993.
- [33] Raj V. Siddharthan, « Development of Windows-Based Version of the 3D-Move Analysis Software for Pavement Response Analysis - ProQuest »
- [34] Cerema, « Diagnostic et conception des renforcements de chaussées | Publications du Cerema », 1 mai 2016.

- [35] Christ Van Gorp, « Characterization of Seasonal Influences on Asphalt Pavements with the use of Falling Weight Deflectometers | TU Delft Repository », Civil Engineering and Geosciences (CEG) (TU Delft), 1995.
- [36] E. O. Lukanen 1944-, R. Stubstad, R. C. Briggs, et Braun Intertec, « Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement », FHWA-RD-98-085;DBNX94822-D;NTIS-PB2000107444, juin 2000.
- [37] W. Uddin, D. Zhang, et F. Fernandez, « Finite Element Simulation Of Pavement Discontinuities And Dynamic Load Response », Transportation Research Record, no 1448, 1994,
- [38] X. Qiu, Q. Yang, et F. Wang, « Diagnostic analysis of dynamic deflection for cracked asphalt pavements under FWD impulsive loading », Journal of Vibration Engineering, vol. 16, no 5, Art. no 5, 2014.
- [39] C. Lin, Z. Y. Guo, J. G. Fang, et Y. S. Yang, « Analysis and Evaluation of Transverse-Cracked Semi-Rigid Base Asphalt Pavements Using FWD Data », p. 1-6, avr. 2012, doi: 10.1061/40866(198)1.
- [40] S. W. Lee, J. P. Mahoney, et N. C. Jackson, « Verification Of Backcalculation Of Pavement Moduli », Transportation Research Record, no 1196, 1988
- [41] E. Horak, A. Hefer, S. Emery, et J. Maina, « Flexible road pavement structural condition benchmark methodology incorporating structural condition indices derived from Falling Weight Deflectometer deflection bowls », p. 14, 2015.
- [42] E. Horak, A. Hefer, J. Maina, S. Emery, et Kubu, Structural number determined with the falling weight deflectometer and used as benchmark methodology. 2014. doi: 10.13140/2.1.1459.6165.
- [43] H. Schnoor et E. Horak, « Possible Method of Determining Structural Number for Flexible Pavements with the Falling », présenté à 31st Southern African Transport Conference (SATC 2012), Pretoria, South Africa, 2012.
- [44] E. Horak, « The Use Of Surface Deflection Basin Measurements In The Mechanistic Analysis Of Flexible Pavements. Sixth International Conference, Structural Design Of Asphalt Pavements, Volume I, Proceedings, University Of Michigan, July 13-17, 1987, Ann Arbor, Michigan », Publication of: Michigan University, Ann Arbor, 1987
- [45] E. Horak, D. Emery, et J. Maina, Review of falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields. Accepted for Conference on Asphalt Pavements Southern African (CAPSA) SunCity, August 2015.
- [46] E. Horak et S. Emery, « Evaluation of airport pavements with FWD deflection bowl parameter », présenté à 2nd European Airport Pavement Workshop, Amsterdam, 2009.
- [47] D. M. Burmister, « The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I », Journal of Applied Physics, vol. 16, no 2, p. 89-94, févr. 1945, doi: 10.1063/1.1707558.
- [48] K. Chatti, M. Kutay, N. Lajnef, I. Zaabar, S. Varma, et H. Lee, Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-15-063. 2017.
- [49] P. Ullidtz, Pavement analysis. Amsterdam; Oxford; New-York: Elsevier, 1987.

- [50] M. Nasimifar, S. Thyagarajan, et N. Sivaneswaran, « Backcalculation of Flexible Pavement Layer Moduli from Traffic Speed Deflectometer Data », *Transportation Research Record*, vol. 2641, no 1, p. 66-74, janv. 2017, doi: 10.3141/2641-09.
- [51] « Norme VSS 40 302b: Route et voie ferrée - Terminologie ». 2019.
- [52] « WARRIP-2016-009-PSS16174-TSD-trial_Wix_FINAL_22-May-2017_NO-VC.pdf ».
- [53] Greenwood Engineering, « Vertical Data shift for stiff concrete pavements ».
- [54] « Coefficient de Poisson », Wikipédia.
- [55] P. Dalla Valle et N. Thom, « Improvement to method of equivalent thicknesses (MET) for calculation of critical strains for flexible pavements », *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 19, no 12, p. 1053-1060, déc. 2018, doi: 10.1080/10298436.2016.1238698.
- [56] C. Marshall, R. Meier, et M. Welch, « Seasonal Temperature Effects on Flexible Pavements in Tennessee », *Transportation Research Record*, vol. 1764, no 1, p. 89-96, janv. 2001, doi: 10.3141/1764-10.
- [57] C. P. Nielsen, « Visco-Elastic Back-Calculation of Traffic Speed Deflectometer Measurements », *Transportation Research Record*, vol. 2673, no 12, p. 439-448, déc. 2019, doi: 10.1177/0361198118823500.

Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 30.10.2025

Données de base

Projet N° : TRU_20_02A_01
Titre du projet : Évaluation des méthodes à grand rendement pour la mesure des déflexions de chaussées routières
Echéance effective : 28.02.2026

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet a pour but d'évaluer le potentiel technique des véhicules de mesure à grand rendement de la portance des chaussées routières, afin d'étendre ce genre d'auscultation à l'échelle de réseaux complets. Cela constitue un saut technologique par rapport aux méthodes traditionnelles comme la poutre de Benkelman, le déflectographe Lacroix et le Falling Weight Deflectometer (FWD) qui se limitent à des évaluations de sections réduites.

Deux appareils de mesure de la portance à grand rendement, le Traffic Speed Deflectometer (TSD), et le RAPTOR sont évalués dans le cadre du présent projet, et comparés avec un appareil de référence en Suisse, le FWD. Pour cela, un programme de mesures couvrant un total de 101 km réparti sur trois cantons (NE, VD, VS) est réalisé, comprenant 56 km de routes nationales et 44 km de routes cantonales, avec des structures de chaussées souples, rigide et semi-rigide.

Les appareils à grand rendement ont démontré une excellente répétabilité des mesures sur les sections auscultées avec plusieurs passages des véhicules.

L'étude comparative des données brutes collectées par le TSD, le RAPTOR et le FWD/HWD révèle des différences conceptuelles entre ces appareils, bien que les déflexions mesurées montrent des similitudes significatives. Il a été constaté notamment que le TSD tend à sous-estimer les déflexions sur les structures rigides en raison d'un processus de post-traitement numérique bien documenté dans ce projet.

Les indicateurs de déflexion Surface Curvature Index (SCI300), Middle Layer Index (MLI) et Lower Layer Index (LLI), analysés pour le TSD et le RAPTOR, démontrent leur capacité à détecter efficacement les zones de faiblesse structurelle.

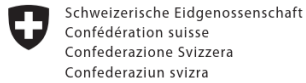
L'indicateur de la déflexion la plus éloignée, pertinent pour évaluer la qualité du sol support, ne semble pas assez fiable dans le cas du TSD, comparativement au RAPTOR et FWD. L'appareil TSD n'est pas très indiqué pour des structures rigides et/ou épaisses.

Les modules de rigidité élastiques obtenus à partir de calculs inverses des données du TSD démontrent une variabilité plus importante par secteur par rapport aux valeurs issues du FWD/HWD, en particulier concernant les modules des couches de fondation et du sol.

Les méthodes de calculs inverses appliquées par le centre de recherche montrent qu'elles ne sont pas totalement matures, et que des développements sont nécessaires afin d'exploiter une évaluation structurelle par des modules de rigidité des couches de la chaussée.

Les différentes analyses révèlent l'importance de réaliser les auscultations sous des conditions de températures les plus stables, par exemple de nuit, sous couverture nuageuse, et assez proches de températures de référence (entre 10 et 25°C).

La normalisation suisse peut enfin admettre dès à présent l'applicabilité des appareils à grand rendement pour la mesure de la portance, au niveau réseau avec une exploitation des indicateurs issus des déflexions. A moyen terme, et avec l'amélioration des procédures de post-traitement des données mesurées et de calcul inverse, une utilisation de ces appareils au niveau projet pourrait être envisagée.



Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

Atteinte des objectifs :

Le projet a atteint ses principaux objectifs, à savoir:

- Réalisation d'une campagne de mesures comparatives entre le TSD et l'appareil de référence FWD. Un financement externe a permis d'étendre le comparatif à un second appareil de mesure, le RAPTOR
- Le rendement des appareils a été confirmé avec l'auscultation de 101 km de routes nationales et cantonale, en deux jours, et sans interruption du trafic
- Le détail de fonctionnement des appareils a été évalué dans la mesure du possible et notamment de la disponibilité des informations auprès des fabricants
- Évaluation de la qualité des mesures et de leur répétabilité
- Proposition des méthodes d'exploitation des mesures avec la suggestion d'indicateurs d'état pertinents pour l'évaluation de la qualité structurelle du réseau ausculté
- Contribution pour l'actualisation des normes VSS 40330 (Mesure de déflexion), VSS 40925 (Relevé de l'état et indice de portance I5) et potentiellement VSS 40733 (Calcul de renforcement).

Déductions et recommandations :

L'équipe de recherche peut émettre les recommandations suivantes:

- Envisager l'utilisation des véhicules à grand rendement pour le moment pour une évaluation au niveau réseau et non pas au niveau projet
- Le TSD ne semble pas adapté pour l'auscultation de chaussées à rigidité élevée / épaisses
- Les campagnes de mesures de la portance doivent être réalisées dans des conditions de température les plus stables possibles (par exemple de nuit ou sous couverture nuageuse), et comprises entre 10 et 25°C.
- Il est recommandé d'exploiter à l'heure actuelle les indicateurs issues directement des déflexions (SCI300, MLI, LLI, etc.).
- Les modules de rigidité issus du calcul inverse ne sont pas assez fiables pour le moment en raison de la maturité insuffisante des méthodes de calcul. Ce point devrait évoluer dans le futur proche

Publications :

Pas de publications

Chef/cheffe de projet :

Nom : Ould Henia Prénom : Mehdi

Service, entreprise, institut : Nibuxs

Signature du chef/de la cheffe de projet :

Ould Henia,
Mehdi

Signé numériquement par Ould Henia,
Mehdi
DN: cn=Ould Henia, Mehdi, cn=CH,
o=Nibuxs SA, email=mehdi.ould-
henia@nibuxs.ch
Raison: j'approuve ce document
Date: 2020.12.12 16:56:05 +01'00'



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Le projet de recherche a atteint la plupart des objectifs de la demande initiale.
L'équipe de recherche a identifié le domaine d'utilisation des véhicules de mesure de la portance à grand rendement, et mis en évidence certaines limitations qui sont responsables du retard dans le déroulement du projet.
Les recommandations pratiques d'utilisation sont déjà utiles pour les gestionnaires du patrimoine pour envisager l'usage de cette familles d'appareils au niveau du réseau (choix des indices d'état, conditions d'utilisation, méthode d'évaluation avancées, etc.).
Les limites d'utilisation sont identifiées, certaines étant liées à la nature confidentielle des technologies (procédures blackbox), et doivent être suivies dans le futur pour tenir compte des développements toujours en cours.
Des adaptations pour la normalisation sont proposées par l'équipe de recherche.

Mise en oeuvre :

Les gestionnaires du patrimoine peuvent, sur la base de ce rapport, évaluer la pertinence de réaliser une évaluation de la portance sur l'ensemble de leur réseau.
Les normes concernées par le thème peuvent être adaptées à leur prochaine révision.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

- Amélioration de la précision des appareils, en particulier pour les chaussées rigides
- Développement des méthodes d'exploitation des mesures de déflexion de ces appareils, notamment pour le calcul des modules de rigidité

Influence sur les normes :

Des adaptations pour la normalisation sont proposées par l'équipe de recherche.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Horat

Prénom : Martin

Service, entreprise, institut : Stadt Zürich Tiefbauamt

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :

Horat
Martin

Digital signiert von Horat Martin
DN: c=Horat Martin,
email=Martin.Horat@zuerich.ch
Datum: 2025.12.12 10:55:29
+01'00'