



Analyse des données de contrôle de compactage en continu (CCC) de planches d'essai en enrochement

Mémoire

Valérie St-Gelais

Maîtrise en génie civil - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Analyse des données de contrôle de compactage en continu (CCC) de planches d'essai en enrochement

Mémoire

Valérie St-Gelais

Sous la direction de :

Jean Côté, directeur de recherche

Marc Smith, codirecteur de recherche

Résumé

Des planches d'essai en enrochement ont été construites dans le but de déterminer les conditions de compactage optimales des zones d'enrochement de la Romaine-2. Ces planches d'essai ont été compactées en utilisant une nouvelle technologie de compactage, soit le contrôle de compactage en continu (Continuous Compaction Control (CCC)). L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer le potentiel d'utilisation de cette technologie pour l'analyse de la performance des barrages en remblai. Pour se faire, les données CCC des planches d'essai et les résultats des essais *in-situ* réalisés sur celles-ci ont été utilisés.

Premièrement, une méthode de traitement des données CCC a été développée. Par la suite, à partir des données CCC triées et traitées des planches d'essai, un paramètre de compactage, dit CMVr, est développé. Ce paramètre est représentatif des conditions de compactage des différentes planches d'essai, tout comme les résultats des essais *in-situ*. Des relations ont donc été développées entre le CMVr et les modules de déformation issus des essais *in-situ*.

Les résultats montrent que les modules de déformation augmentent avec l'augmentation du CMVr, tel qu'attendu. Toutefois, une dispersion non négligeable des données est observée autour des relations. Afin de confirmer les tendances obtenues, il est recommandé de réaliser plus d'essais *in-situ* pour un même matériau et de les effectuer à différentes passes de compacteur afin d'élargir le spectre d'énergie de compactage évalué.

Autrement, la technologie CCC est considéré prometteuse pour l'analyse de performance des barrages en remblai. Vu son caractère continu, les zones de faiblesse peuvent être rapidement ciblées. Des analyses supplémentaires sont toutefois nécessaires afin d'utiliser le CCC dans le but d'estimer les tassements d'un barrage.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	xi
Remerciements	xxi
Introduction.....	1
Mise en contexte	1
Problématique.....	2
Objectifs de l'étude.....	4
Organisation du mémoire.....	4
Chapitre 1 État des connaissances.....	7
1.1 Propriétés de l'enrochement	7
1.1.1 Tassements des matériaux d'enrochement	7
1.1.2 Modules de déformation	9
1.2 Contrôle de compactage en continu (CCC).....	22
1.2.1 Définition générale.....	22
1.2.2 <i>Compaction Meter Value</i> (CMV)	23
1.2.3 Autres paramètres de compaction existants	30
1.2.4 Relations existantes.....	37
Chapitre 2 Planches d'essai	41
2.1 Description	41
2.2 Compactage.....	44
2.3 Essais in-situ	45
2.3.1 Mesure de masse volumique.....	45
2.3.2 Déflectomètre à masse tombante (FWD)	48
2.3.3 Essai de chargement de plaque (PLT)	50
2.3.4 Analyse multi-modale des ondes de surface (MMASW).....	54
2.3.5 Principales conclusions	57
Chapitre 3 Méthodologie.....	60
3.1 Traitement des données CCC.....	60
3.1.1 Triage des données CCC	60
3.1.2 Traitement des données CCC	70
3.2 Détermination d'un CMV représentatif	81

3.3	Relations entre le CMVr et les modules de déformation obtenus des essais <i>in-situ</i>	86
3.3.1	Essais FWD et PLT	86
3.3.2	Essais MMASW	88
Chapitre 4	Résultats	93
4.1	Évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe	93
4.1.1	Planches compactées en 4 passes	94
4.1.2	Planches compactées avec 8 passes	98
4.2	Détermination d'un CMV représentatif	101
4.2.1	Résultats typiques	101
4.2.2	Analyse statistique des résultats.....	109
4.3	Évaluation de l'influence des paramètres de compactage	112
4.4	Relations entre le CMVr et les modules de déformation obtenus des essais <i>in-situ</i>	116
4.4.1	Relations entre le CMVr et les modules de déformation issus des essais FWD et PLT	116
4.4.2	Relation entre le CMVr et les modules de Young issus des relevés MMASW.....	119
Chapitre 5	Discussion	121
5.1	Évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe	121
5.2	Détermination d'un CMV représentatif	121
5.2.1	Justification du choix d'utiliser le CMVr comme CMV représentatif de la rigidité à la fin du compactage	122
5.3	Évaluation de l'influence des paramètres de compactage	125
5.4	Relations entre le CMVr et les modules de déformation obtenus des essais <i>in-situ</i>	127
5.4.1	Influence des conditions de compactage sur la relation CMVr- E_{PLT}	128
5.4.2	Comparaison avec les relations de la littérature	131
5.4.3	Comparaison des relations CMVr- E_{PLT} et CMVr- E_{MMASW}	133
5.5	Application de la méthode à un barrage réel.....	135
Conclusion.....		141
Conclusions		141
Recommandations		143
Bibliographie.....		145

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Facteurs influençant le tassement dans l'enrochement.....	8
Tableau 1.2 : Modules élastiques.....	10
Tableau 1.3 : Modules de déformations d'enrochement issus d'études antérieures	20
Tableau 1.4 : Modes d'opération (Mooney & Adam, 2007)	28
Tableau 1.5 : Relations empiriques obtenues pour de l'enrochement issues de Liu <i>et al.</i> (2014).....	37
Tableau 2.1 : Exigences de mise en place pour la recharge interne d'un barrage selon H-Q et NGI.....	43
Tableau 2.2 : Conditions de mise en place des planches d'essai (Verret <i>et al.</i> , 2013).....	43
Tableau 2.3 : Caractéristiques des compacteurs utilisés pour les planches d'essai (Verret <i>et al.</i> , 2013)	44
Tableau 2.4 : Masses volumiques sèches obtenues et corrigées (Verret <i>et al.</i> , 2013).....	47
Tableau 2.5 : Chargements appliqués pour un point d'essai FWD.....	48
Tableau 2.6 : Modules de déformation minimal et maximal obtenus des essais de déflectomètre à masse tombante (FWD) pour chaque planche	49
Tableau 2.7 : Modules de déformation minimaux et maximaux (E_E et E_{EP}) obtenus des essais de chargement de plaque (plaque de 750 mm).....	53
Tableau 2.8 : Modules de Young minimal et maximal obtenus à partir des profils moyens des vitesses d'onde de cisaillement normalisées	57
Tableau 2.9 : Principales conclusions des essais de contrôle sur l'influence des conditions de mise en place étudiées.....	58
Tableau 3.1 : Information retenue après le tri préliminaire des données CCC	62
Tableau 3.2: Résumé des résultats obtenus suite au triage des données CCC....	69

Tableau 3.3 : Pourcentage du nombre de valeurs éliminées en fonction d'une valeur seuil de RMV de 20 (par levée pour chaque planche).	76
Tableau 5.1 : Comparaison de la moyenne et de la variance des distributions du CMV _{der} , du CMV _r et du CMV _{moy}	124
Tableau 5.2 : Comparaison des conclusions issues des essais de contrôle et des données de compactage CCC (CMV _r moyen)	125
Tableau A.1: Modules de déformation élastiques et élasto-plastiques obtenus avec la plaque de 450 mm	157
Tableau A.2: Modules de déformation élastiques et élasto-plastiques obtenus avec la plaque de 750 mm	159
Tableau A.3: Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 1.....	161
Tableau A.4: Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 2.....	161
Tableau A.5 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 3.....	162
Tableau A.6 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 4.....	162
Tableau A.7 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 5.....	163
Tableau A.8 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 6.....	163
Tableau A.9 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 7.....	164
Tableau A.10 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 8.....	164

Tableau A.11 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 9.....	165
Tableau A.12 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 10.....	165
Tableau B.1 : Paramètres de rotation et de translation en x et y pour le changement de système d'axe de chaque planche.....	176
Tableau B.2 : Description des étapes du triage par passe	181
Tableau B.3 : Statistiques des paramètres de vitesse et de temps d'acquisition du compacteur pour chaque levée de la planche 1	204

Liste des figures

Figure 1: Coupe verticale du barrage Romaine 2 (modifié de Longtin <i>et al.</i> , 2012)	2
Figure 1.1 : Relation non-linéaire contrainte-déformation d'un sol granulaire (Briaud, 2000).....	11
Figure 1.2 : Essai de chargement de plaque (<i>PLT</i>).....	14
Figure 1.3 : Essai au déflectomètre à masse tombante (<i>FWD</i>).....	16
Figure 1.4 : Essai d'analyse multi-modale des ondes de surface (<i>MMASW</i>).....	17
Figure 1.5 : Méthode simplificatrice de Flitzpatrick pour l'évaluation du module de déformation pendant la construction (Hunter & Fell, 2003).....	18
Figure 1.6 : Schéma d'un compacteur muni de la technologie CCC (White & Vennapusa, 2010).....	22
Figure 1.7 : Vibration d'un rouleau compacteur induite par la rotation d'une masse excentrique (modifié de Anderegg & Kaufmann, 2004).....	24
Figure 1.8 : Traitement du processeur.....	25
Figure 1.9 : Augmentation de la première harmonique avec l'augmentation de la rigidité du sol.....	25
Figure 1.10 : Aire compactée associée à un CMV (Geodynamik).....	27
Figure 1.11 : Profondeur d'influence du rouleau compacteur (modifié de Mooney <i>et</i> <i>al.</i> , 2010).....	30
Figure 1.12 : Diagramme des forces appliquées sur le rouleau compacteur (Mooney <i>et al.</i> , 2010).....	31
Figure 1.13 : Modèle simplifié de l'interaction sol-rouleau (modifié de Anderegg & Kaufmann, 2004).....	34
Figure 1.14 : Définition du paramètre k_s par la relation F_s-x pour un contact continu (haut) et discontinu (bas) (modifié de Rinehart & Mooney, 2009).....	35

Figure 1.15 : Définition du paramètre k de Bomag par la relation F_s-x pour un contact continu (haut) et discontinu (bas) (modifié de Rinehart & Mooney, 2009)	35
Figure 1.16 : Relations F_s-x pour un milieu semi-infini et élastique utilisées pour l'obtention du paramètre E_{vib} (modifié de Mooney & Adam, 2007).	36
Figure 1.17 : Relations empiriques tirées de la littérature reliant le CMV et le module de déformation issu d'essais (a) FWD et (b) PLT	38
Figure 1.18 : Relations linéaires entre le CMV et le module de déformation PLT obtenues par White and Thompson (2008)	39
Figure 2.1 : Vue en plan et coupes longitudinale et transversale de planches d'essai types (remblai A). Échelle : 1 : 200. Unité : mètre (modifié de Verret <i>et al.</i> , 2013)	41
Figure 2.2 : Configuration du site d'étude des planches d'essai (Verret <i>et al.</i> , 2013)	42
Figure 2.3 : Comparaison des modules de déformation issus des essais PLT et FWD avec la plaque de 450 mm (tiré de Grenier, 2011)	54
Figure 2.4 : Exemple d'un profil moyen de vitesse des ondes de cisaillement (Planche 1, Levé 4)	56
Figure 3.1 : Schématisation de la méthode de triage des données CCC	61
Figure 3.2 : Exemple de données après le triage par planche (planche numéro 6)	64
Figure 3.3 : Résultat des données triées par levée pour la planche 6	65
Figure 3.4 : Méthode d'identification visuelle des passes (planche 6, levée 4)	66
Figure 3.5 : Identification des passes pour la levée 4 de la planche 6	67
Figure 3.6 : Schématisation du résultat final du triage des données	68
Figure 3.7 : Division de la planche 6 en sections avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	70
Figure 3.8 : Positions des CMV moyens pour toutes les sections de la dernière levée de la planche 6 à la première passe.	72

Figure 3.9 : Numérotation des sections (planche 6, dernière levée, première passe)	72
Figure 3.10 : Schématisation de la méthode de traitement utilisée pour les données CCC (P6L4).....	74
Figure 3.11 : Histogrammes des RMV par levée de la planche 1.....	77
Figure 3.12 : Identification des numéros de traces pour la dernière levée de la planche 6.....	79
Figure 3.13 : Comparaison de la variation spatiale des données brutes (CMV brute) et des données traitées (CMV moyen) pour toutes les traces de la première passe à la dernière levée de la planche 6.	80
Figure 3.14 : Définition des paramètres de la courbe de régression de type gaussien.....	82
Figure 3.15 : Méthode de détermination d'un CMVr pour une section donnée (section #69 de la dernière levée de la planche 3).....	83
Figure 3.16 : Exemple d'un cas où le CMVr correspond à la valeur de la régression à la dernière passe (planche 4, dernière levée, section #89).....	84
Figure 3.17 : Exemple de détermination du CMVr pour (a) une planche à 8 passes (P3L4, section #69) et (b) une planche à 4 passes (P6L4, section #32).....	85
Figure 3.18 : Exemples de cas où aucun CMVr n'est défini (a) Planche 8, dernière levée, section #17 (b) Planche 1, dernière levée, section #64.....	86
Figure 3.19 : Exemple des rayons d'influence utilisés pour corrélérer les modules de déformation issus des essais FWD et PLT (Planche 6, Levée 4).....	87
Figure 3.20 : Position du relevé MMASW (planche 6).....	88
Figure 3.21 : Profondeur d'influence utilisée pour le calcul du module de Young .	89
Figure 3.22 : Volume de sol approximatif impliqué lors d'un essai MMASW (modifié de Bouchard, 2016).....	90
Figure 3.23 : Zone d'influence du relevée MMASW (planche 6).....	91

Figure 4.1 : Exemples d'évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe (a) P2L4, section #88, (b) P5L2, section #69, (c) P10L4, section #10, (d) P1L4, section #78, (e) P6L3, section #3, (f) P6L4, section #33, (g) P10L4, section #78, (h) P2L4, section #63 et (i) P1L4, section #81	95
Figure 4.2 : Tendance générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes (P6L4)	97
Figure 4.3 : Tendance générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes (P2L4)	98
Figure 4.4 : Exemples d'évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe (a) P4L2, section #29, (b) P7L4, section #90, (c) P3L4, section #84, (d) P8L4, section #11, (e) P9L4, section #90, (f) P4L2, section #3 (g) P3L4, section #57, (h) P8L4, section #67 et (i) P7L4, section #60.....	99
Figure 4.5 : Tendance générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes (P8L4)	100
Figure 4.6 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression très élevé (a) P10L4, section #14), (b) P1L4 section #6, (c) P9L4, section #43 et (d) P8L4 section #11	103
Figure 4.7 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression élevé (a) P1L4, section #2, (b) P5L2, section #19, (c) P3L4, section #11 et (d) P7L4, section #24	104
Figure 4.8 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression faible (a) P6L4, section #27, (b) P10L4, section #41, (c) P9L4, section #14 et (d) P4L2, section #13	105
Figure 4.9 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression très faible (a) P1L4, section #24, (b) P10L4, section #67, (c) P8L4, section #14 et (d) P9L4, section #26	106
Figure 4.10 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression nul (a) P5L2, section #90, (b) P1L4, section #80, (c) P3L4, section #89 et (d) P8L4, section #68	108

Figure 4.11 : Statistiques des coefficients de corrélation (r^2) obtenus par planche	109
Figure 4.12 : Histogramme des N_{opt} (a) planches compactées en 4 passes et (b) planches compactées en 8 passes	110
Figure 4.13 : Statistiques sur la méthode de détermination du CMVr pour les planches compactées (a) en 8 passes et (b) en 4 passes.	111
Figure 4.14 : CMVr moyen obtenu pour chaque planche	112
Figure 4.15 : Influence des paramètres de compactage sur le CMV moyen (a) Poids du compacteur, (b) Nombre de passes, (c) Diamètre maximal de l'enrochement, (d) Arrosage et (e) Recharge externe	114
Figure 4.16 : Relations obtenues entre le CMVr et les modules de déformation issus du premier chargement des essais (a) FWD (contrainte de 377 kPa) et (b) PLT (contrainte de 1 000 kPa).....	118
Figure 4.17 : Relation obtenue entre le CMVr et le module de Young calculé à partir des profils moyens des vitesses d'ondes de cisaillement.....	120
Figure 5.1 : Exemples de détermination d'un CMV représentatif de la rigidité du sol à la fin du compactage (a) en prenant la valeur du CMV à la dernière passe (CMV _{der}) (b) selon la méthode du CMVr et (c) en calculant la moyenne des CMV (CMV _{moy})	123
Figure 5.2 : Influence (a) du poids du compacteur, (b) du nombre de passes, (c) du diamètre maximal (600 mm ou 900 mm) et (d) de l'arrosage sur la relation CMVr - E_{PLT} obtenue au premier chargement (contrainte de 1 000 kPa).....	129
Figure 5.3 : Évaluation de l'effet de l'arrosage en combinant l'effet du diamètre maximal (600 mm VS 900 mm), du nombre de passes et de l'arrosage en même temps.	131
Figure 5.4 : Comparaison des relations obtenues avec celles issues de la littérature (a) relation obtenue avec les essais FWD (premier chargement à 30 kN) et (b) relation obtenue avec les essais PLT (premier chargement à 1 000 kPa) .	132

Figure 5.5 : Comparaison des relations issues des (a) relevés MMASW et (b) des essais PLT.....	134
Figure 5.6: Comparaison des pentes sécantes à très petites déformations ($S_{s-élas.}$) et à plus grandes déformations (S_s) (modifié de Briaud, 2000)	135
Figure 5.7 : Relation du CMV_r en fonction du CMV_{moy}	136
Figure 5.8 : Relation contrainte-déformation obtenue pour la zone d'encrochement interne de la Romaine 2 (matériau 3O) (modifié de Smith, 2015)	137
Figure 5.9 : Comparaison entre les modules de déformation issus des essais PLT de la planche 7 et ceux calculés à partir des déformations mesurées sur le barrage Romaine-2 pendant la construction (zone interne d'encrochement)	138
Figure A.1 : Positions des essais de contrôle (FWD, PLT et MMASW) des planches 1 à 5.....	155
Figure A.2 : Positions des essais de contrôle (FWD, PLT et MMASW) des planches 6 à 10	156
Figure A.3 : Profils des vitesses de cisaillement moyennes des planches d'essai	167
Figure B.1: Étapes du tri préliminaire des données CCC	171
Figure B.2 : Méthode des aires des triangles	173
Figure B.3 : Données triées par planche et levée des planches 1 à 3.....	177
Figure B.4 : Données triées par planche et levée des planches 4 à 6.....	178
Figure B.5 : Données triées par planche et levée des planches 7 à 9.....	179
Figure B.6 : Données triées par planche et levée de la planche 10	180
Figure B.7 : Résultats du tri par passe pour la planche 1	183
Figure B.8 : Résultats tri par passe pour la planche 2.....	184
Figure B.9 : Résultats tri par passe pour la planche 3.....	185
Figure B.10 : Résultats tri par passe pour la planche 4.....	186

Figure B.11 : Résultats tri par passe pour la planche 5	186
Figure B.12 : Résultats tri par passe pour la planche 6	187
Figure B.13 : Résultats tri par passe pour la planche 7	188
Figure B.14 : Résultats du tri par passe de la planche 8	189
Figure B.15 : Résultats du tri par passe pour la planche 9	190
Figure B.16 : Résultats du tri par passe pour la planche 10	191
Figure B.17 : Division de la planche 1 avec les positions des données CMV de la deuxième passe de la dernière levée.	193
Figure B.18 : Division de la planche 2 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	193
Figure B.19 : Division de la planche 3 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	194
Figure B.20 : Division de la planche 4 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	194
Figure B.21 : Division de la planche 5 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	195
Figure B.22 : Division de la planche 6 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	195
Figure B.23 : Division de la planche 7 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	196
Figure B.24 : Division de la planche 8 avec les positions des données CMV de la cinquième passe de la dernière levée.	196
Figure B.25 : Division de la planche 9 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	197
Figure B.26 : Division de la planche 10 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.	197

Figure B.27 : Division de la planche 1 (dernière levée) selon les traces du compacteur à la première passe	200
Figure B.28 : Division de la planche 1 (dernière levée) selon les traces du compacteur à la deuxième passe	200
Figure B.29 : Division de la planche 8 (dernière levée) selon les traces du compacteur à la cinquième passe	201
Figure B.30 : Histogrammes de la vitesse instantanée du compacteur des levées 2, 3 et 4 de la planche 1	203
Figure B.31 : Histogrammes du temps d'acquisition des données des levées 2, 3 et 4 de la planche 1	204
Figure C.1 : Tendances générales de l'évolution du CMV avec le nombre de passes des planches 1, 2, 5, 6 et 10 (de bas en haut, de gauche à droite)	209
Figure C.2 : Tendances générales de l'évolution du CMV avec le nombre de passes des planches 3, 4, 7, 8 et 9 (de bas en haut, de gauche à droite)	210

À ma famille et à mes amis

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur, monsieur Jean Côté, pour m'avoir acceptée en tant qu'étudiante à la maîtrise. Merci pour votre aide et votre soutien. Vous prenez le temps pour vos étudiants et sachez que c'est apprécié. Dès que j'avais besoin de vous rencontrer, je pouvais compter sur une réponse rapide pour avoir rendez-vous avec vous. Lors de nos rencontres, vous avez toujours pris le temps nécessaire pour répondre à mes questions. Ce fut une belle collaboration et je vous en suis reconnaissante.

Je remercie également mon co-directeur, monsieur Marc Smith. Nous avons eu l'occasion de discuter à quelques reprises sur mon projet et même sur d'autres sujets. Lors de ces rencontres, vos conseils et le partage de votre expérience ont été enrichissants pour moi et grandement appréciés.

J'aimerais aussi souligner l'aide de monsieur Daniel Verret dans les débuts de mon projet. Merci pour votre accueil lors de ma visite à Hydro-Québec, mais également merci pour votre aide et vos conseils apportés par la suite.

Merci bien sûr à tous mes collègues sans qui mon expérience à la maîtrise aurait été bien moins motivante, enrichissante et bénéfique. Grâce à vous, je garde de beaux souvenirs de ma maîtrise. Vous étiez toujours prêts à écouter, aider et discuter. Un merci particulier à Alexandra, Vincent, Stéphane et Manuel, collègues géotechniciens, qui ont toujours été ouverts à mes (nombreuses) questions et demandes de conseils.

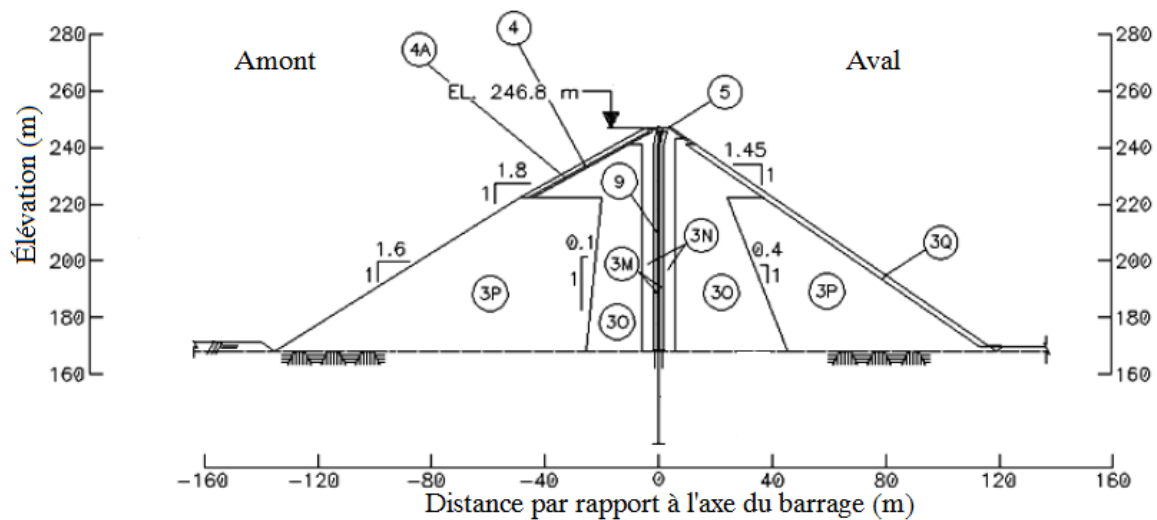
Enfin, je voudrais remercier tous les partenaires de la chaire de recherche industrielle CRSNG/Hydro-Québec sur l'optimisation du cycle de vie des barrages en remblai. Leur soutien financier nous permet de se consacrer à notre recherche à temps plein et c'est très apprécié.

Introduction

Mise en contexte

En 2009, Hydro-Québec débute les travaux de réalisation du projet de la Romaine. Ce projet comprend quatre barrages en enrochement et devrait se terminer en 2020 (Hydro-Québec, 2017). Un des barrages se distingue des autres par sa coupe atypique. Il s'agit de la Romaine 2, dit barrage en enrochement à noyau asphaltique (*Asphaltic core rockfill dam* - ACRD). Le choix d'un noyau asphaltique plutôt qu'un noyau en till, plus usuel au Québec, est jugé plus économique vu l'éloignement des dépôts de till par rapport au site du barrage (Longtin *et al.*, 2012). Ce type d'ouvrage est construit pour la première fois au Québec et est l'un des plus hauts de ce genre au monde (hauteur de 111 m).

La coupe verticale type du barrage Romaine 2 est montrée à la Figure 1. Le noyau est très mince, ayant une épaisseur de seulement 0,5 m à 0,85 m. Le compactage des zones d'enrochement (recharges internes et externes) est donc très important afin de minimiser les tassements différentiels et ainsi préserver l'intégrité du noyau. À l'été 2010, des planches d'essai sont donc construites afin de déterminer les conditions de compactage et de mise en place optimales pour l'enrochement de la Romaine 2. Les différentes variantes de mise en place évaluées vont des exigences d'Hydro-Québec pour des barrages en enrochement à noyau de till (ECRD) aux exigences de l'Institut norvégien de géotechnique (NGI) développées pour des barrages ACRD (Verret *et al.*, 2013). Le présent mémoire porte sur l'analyse des données recueillies pendant la réalisation de ces planches d'essai de remblai en enrochement.



Légende

- | | | | |
|-----|--|-----|---|
| ⊙3M | Zone de support (max. 80 mm) | ⊙4 | Enrochement (600 - 800 mm) |
| ⊙3N | Zone de transition (max. 200 mm) | ⊙4A | Enrochement de protection (max. 500 mm) |
| ⊙3O | Recharge interne (max. 600 mm) | ⊙5 | Surface de la route (max. 31,5 mm) |
| ⊙3P | Recharge externe (max. 1200 mm) | ⊙9 | Noyau asphaltique |
| ⊙3Q | Couche de protection D/S (max. 1000 mm, max. 25% < 300 mm) | | |

Figure 1: Coupe verticale du barrage Romaine 2 (modifié de Longtin *et al.*, 2012)

Problématique

Les méthodes de contrôle de compactage conventionnelles, tel que le nucléodensimètre, les mesures de densité *in-situ* par excavation et les essais en laboratoire, sont impossibles ou difficiles à appliquer pour de l'enrochement grossier. Dû à la taille des particules d'enrochement, pouvant aller à plus d'un mètre de diamètre, l'échantillonnage intact du sol est impossible. Pour les essais en laboratoire, le matériau doit être écrêté ou bien un matériau dont la courbe granulométrique est parallèle à celle de l'enrochement est utilisé (Marachi *et al.*, 1972). Les résultats de laboratoires sont donc peu représentatifs. De plus, les

essais *in-situ* de contrôle de compactage sont ponctuels et peu d'essais sont réalisés (Bouchard, 2016). Leurs résultats ne sont donc pas représentatifs de l'ensemble de l'ouvrage. De ce fait, des zones de faiblesse pourraient ne pas être identifiées lors du contrôle de compactage.

Pour le compactage du barrage Romaine 2 et de ses planches d'essai, une nouvelle technologie de compactage a été utilisée, soit la technologie de contrôle de compactage en continu (CCC). Cette technologie donne en continu et en temps réel une mesure de la rigidité du sol durant le compactage. Cette mesure correspond au calcul d'un paramètre de compactage qui peut prendre différentes formes selon le type de compacteur utilisé. Dans le cas des planches d'essai, le paramètre de compactage utilisé est le *compaction meter value* (CMV). Celui-ci est obtenu à partir des mesures d'un accéléromètre fixé au rouleau compacteur. Il correspond à un ratio d'amplitudes représentatif de la rigidité du sol.

La technologie de compactage CCC a été développée dans les années 70, en Suède, avec pour but d'améliorer le contrôle qualité du compactage des sols (Thurner & Sandström, 2000). Depuis, cet outil est utilisé comme méthode de contrôle qualité du compactage dans le domaine routier dans divers pays d'Europe et plus récemment aux États-Unis (Rinehart *et al.*, 2012; Thurner & Sandström, 2000). Il n'existe toutefois que très peu de documentations concernant l'utilisation du CCC dans le domaine des barrages.

Les planches d'essai de la Romaine 2 sont donc une belle opportunité d'étudier la méthode de compactage CCC comme alternative aux techniques de contrôle de compaction conventionnelles pour les zones d'enrochement des barrages. En effet, sur chaque planche, des mesures de module de déformation sont réalisées permettant donc d'évaluer la possibilité d'utiliser le CCC dans le but d'estimer les modules de déformation pour l'analyse de performance d'un barrage.

Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel d'utilisation de la technologie de contrôle de compactage en continu (CCC) dans l'analyse de la performance des barrages en remblai.

Pour se faire, les objectifs spécifiques de cette étude sont :

1. Développer une méthodologie de traitement des données de compactage CCC des planches d'essai.
2. Déterminer une valeur de CMV représentative de la rigidité du sol (CMVr) à la fin du compactage pour chaque planche d'essai.
3. Évaluer l'influence des conditions de compactage à l'aide du CMVr.
4. Établir des corrélations entre le paramètre de compactage CMVr et les résultats des essais *in-situ* réalisés sur les planches d'essai.
5. Évaluer l'application du paramètre CMVr et des relations obtenues avec celui-ci et les résultats des essais *in-situ* dans le contexte d'un barrage.

Organisation du mémoire

Ce mémoire se divise en 5 chapitres.

Le chapitre 1 est une revue de la littérature. La première partie comprend les connaissances pertinentes reliées à l'enrochement et les modules de déformation alors que la deuxième partie comprend une revue de littérature exhaustive sur le contrôle de compactage en continu (CCC). Celle-ci définit en général ce qu'est le CCC, puis décrit en détail le *compaction meter value* (CMV). D'autres paramètres de compactage sont également brièvement montrés. Enfin, un recensement des relations présentes dans la littérature reliant le CMV à des modules de déformation est réalisé.

Le chapitre 2 concerne les planches d'essai de la Romaine-2. Il comprend une description de celles-ci, de la méthode de compactage utilisée et des différents essais *in-situ* réalisés. Les résultats des essais *in-situ* et les principales conclusions tirées de ceux-ci sont également résumés.

Le chapitre 3 décrit les différentes méthodologies utilisées pour réaliser les objectifs spécifiques du projet. Premièrement, la méthode de traitement des données CCC est montrée, puis celle utilisée pour la détermination du CMV représentatif de la rigidité à la fin du compactage (CMVr). Enfin, les méthodes utilisées pour relier le CMVr aux modules de déformation des essais *in-situ* sont montrées.

Le chapitre 4 présente les résultats obtenus. Les deux premières sections montrent les résultats reliés à la détermination du CMVr. Par la suite, l'influence des conditions de compactage sur la rigidité de l'enrochement est évaluée à l'aide du CMVr moyen obtenu par planche. Enfin, la dernière section montre les relations obtenues entre le CMVr et les modules de déformation des essais *in-situ*.

Enfin, le chapitre 5 est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats montrés au chapitre 4. Les 4 premières sections sont un retour sur les sections du chapitre 4 alors que la dernière section permet d'évaluer l'application du CMVr et des relations obtenues avec celui-ci dans le contexte d'un barrage.

Chapitre 1 État des connaissances

1.1 Propriétés de l'enrochement

Selon Breitenbach (1993), pour un ingénieur géotechnicien, la transition entre un matériau de remblai et un matériau d'enrochement correspond au moment où les essais de contrôle *in-situ* et de laboratoire usuels ne sont plus applicables. Il définit plus précisément l'enrochement comme un matériau dont plus de 30% doit être retenu sur le passant 19 mm, mais dont moins de 15% doit passer le tamis de 0,074 mm. L'enrochement est utilisé pour la construction des zones de recharge des barrages en remblai. Selon Kutzner (1997), la distribution idéale d'un enrochement pour la construction d'un barrage doit être étalée et avoir un pourcentage maximal de 5% et 30% pour le passant 5 mm et 20 mm respectivement et un diamètre maximal allant de 600 à 1 000 mm. Toutefois, cette description restent indicative puisque le choix du type d'enrochement dépend toujours du contexte de construction du barrage (Breitenbach, 1993; Kutzner, 1997).

Le rôle de l'enrochement dans un barrage est d'assurer sa stabilité. Ainsi, le tassement dans les zones de recharge doit être limité afin d'assurer la protection du noyau imperméable du barrage. Ce constat est d'autant plus important pour un barrage de type ACRD, vu la faible épaisseur de son noyau. Ainsi, les sections suivantes portent sur l'étude du tassement dans l'enrochement et des modules de déformation, utiles pour l'estimation des tassements.

1.1.1 Tassements des matériaux d'enrochement

Le principal mécanisme de tassement dans l'enrochement est dû au concassage et au broyage des particules (Kutzner, 1997). Dans l'enrochement, les contraintes se concentrent aux contacts grain-grain. Lorsque la résistance maximale de la roche est atteinte, les particules se brisent aux points de concentration. Il se produit alors un réarrangement des particules provoquant le tassement du

matériau. Par un effet en chaîne, de nouveaux points de contact et de nouvelles zones de concentration de contraintes se forment, provoquant de nouveaux bris et tassements jusqu'à l'atteinte d'un équilibre (Bouchard, 2016).

Plusieurs facteurs influencent le tassement dans l'enrochement. Le Tableau 1.1 en décrit les principaux selon Bouchard (2016), Soud (2016), Kermani (2016) et Briaud (2000). Il est important de garder en tête que ces facteurs sont inter-reliés (Bouchard, 2016).

Tableau 1.1 : Facteurs influençant le tassement dans l'enrochement

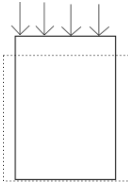
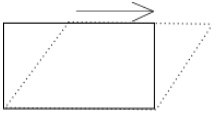
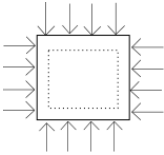
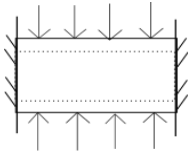
Facteur	Description
État de contrainte du sol	Une augmentation de la contrainte moyenne provoque le bris des grains et donc plus de tassements.
Forme des particules, taille des particules, minéralogie.	La distribution des contraintes est moins uniforme pour un matériau avec des particules angulaires que pour un matériau aux particules arrondies. En effet, pour une particule angulaire, la concentration des contraintes aux extrémités est plus importante que pour une particule arrondie. Ainsi, les particules angulaires se brisent plus facilement et donc provoquent plus de tassements. De plus, il a été observé que plus la taille d'une particule est importante, plus le tassement observé est important. Ce serait dû au fait que, pour une particule de taille importante, la probabilité d'avoir des défauts est plus élevée. Enfin, le type de roche (minéralogie) influence également le tassement. Si la roche est de bonne qualité (résistance à la compression élevée), moins elle a tendance à se briser et donc à provoquer des tassements.

Facteur	Description
Mouillage	La présence d'eau augmente les contraintes dans fissures de la roche et par conséquent la fragmentation de celle-ci. De plus, l'eau permet la lubrification entre les grains, facilitant leur réarrangement.
Granulométrie	Une granulométrie étalée permet une meilleure distribution des contraintes qu'une granulométrie uniforme puisqu'elle permet plus de contacts grain-grain. Ainsi, un matériau uniforme produit plus de tassements qu'un matériau bien étalé.
Structure du sol (dense, lâche, porosité, masse volumique).	Un sol dense (masse volumique élevée et faible indice des vides) a tendance à moins tasser qu'un sol lâche (masse volumique faible et indice des vides élevé).

1.1.2 Modules de déformation

Un module de déformation correspond à un rapport entre la contrainte appliquée et la déformation engendrée par cette contrainte. Dans le domaine élastique linéaire, quatre principaux modules, dits élastiques, sont définis au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Modules élastiques

Modules	Module de Young E	Module de cisaillement G	Module isostatique K	Module oedométrique M
Conditions charge- ment	 <ul style="list-style-type: none"> • Contrainte axiale • Déformation radiale permise 	 <ul style="list-style-type: none"> • Cisaillement direct 	 <ul style="list-style-type: none"> • Chargement isostatique 	 <ul style="list-style-type: none"> • Contrainte axiale • Déformation radiale empêchée
Définition	$E = \frac{\Delta\sigma'_1}{\Delta\varepsilon_1}$	$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$	$K = \frac{\Delta p'}{\Delta\varepsilon_v}$	$M = \frac{\Delta\sigma'_1}{\Delta\varepsilon_1}$
	$\Delta\sigma'_1$ =contrainte effective axiale $\Delta\varepsilon_1$ =déformation axiale	$\Delta\tau$ =contrainte de cisaillement $\Delta\gamma$ =déformation angulaire	$\Delta p'$ =contrainte effective moyenne $\Delta\varepsilon_v$ =déformation volumétrique	$\Delta\sigma'_1$ =contrainte effective axiale $\Delta\varepsilon_1$ =déformation axiale

Il existe également un module appelé module résilient (M_r). Il est obtenu à partir d'un essai triaxial cyclique dont les conditions de chargement sont typiques au domaine routier. Il est défini tel que :

$$M_r = \frac{\sigma_{dr}}{\varepsilon_r^1}$$

Équation 1

Où σ_{dr} correspond à la contrainte déviatorique répétée (cyclique) et ε_r^1 correspond à la déformation axiale réversible (Grenier, 2007). La déformation axiale réversible correspond à la portion de déformation non plastique (non permanente). Le module dépend donc de la durée de la charge, du nombre de cycle et de la fréquence des cycles de chargement (ASTM, 2015).

En réalité, le comportement contrainte-déformation d'un enrochement est non-linéaire. Ce faisant, différents modules de déformation sont obtenus selon la pente utilisée sur la courbe contrainte-déformation. La Figure 1.1 montre les différentes pentes définies selon Briaud (2000) soit la pente sécante (S_s), tangente (S_t), cyclique (S_c), résiliente (S_r) et de déchargement (S_u). Le terme S est utilisé plutôt que E (pour module), car le module ne correspond pas directement à la pente de la courbe, mais il y est directement relié (Bouchard, 2016; Briaud, 2000).

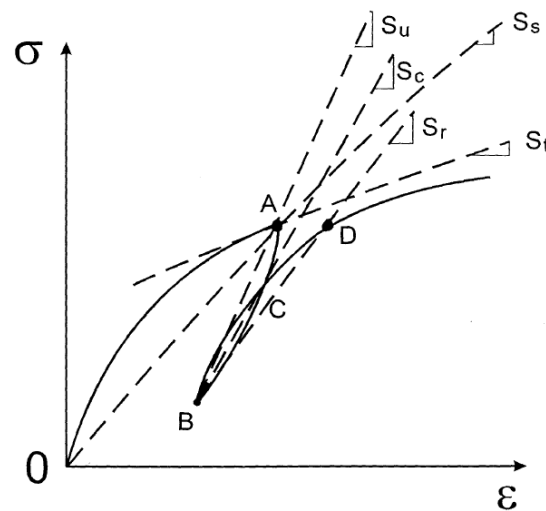


Figure 1.1 : Relation non-linéaire contrainte-déformation d'un sol granulaire (Briaud, 2000)

De plus, le module de déformation de l'enrochement est nécessairement influencé par les mêmes facteurs influençant le tassement dans l'enrochement (Tableau 1.1). À ces facteurs, s'ajoutent ceux liés aux conditions de chargement. Le module de déformation est différent selon à quelle contrainte de confinement (contrainte

moyenne principale) et à quel niveau de déformation il est mesuré. De plus, l'enrochement étant un matériau élasto-plastique, le module dépend aussi de l'historique de chargement subi par l'enrochement (Briaud, 2000).

Le module de déformation d'un enrochement est obtenu à partir d'essais en laboratoire et à partir d'essais *in-situ* ou de mesures de tassements directement prises sur le barrage tel que décrit dans les paragraphes qui suivent. Par la suite, des résultats d'études antérieures sont également montrés afin de comparer les modules de déformation obtenus avec les planches d'essai avec ceux issus de la littérature.

Essais de laboratoire

Pour évaluer les propriétés de l'enrochement, des essais en laboratoire à grande échelle ont été développés tels que des essais triaxiaux, oedométrique et de cisaillement direct (Hunter & Fell, 2002). De ces essais, il est possible de définir différents modules de déformation, tels que ceux définis à la section 1.1.2.

Toutefois, malgré les échantillons à grande échelle, la taille des particules d'enrochement reste trop importante pour tester des échantillons d'enrochement représentatifs en laboratoire. Des méthodes d'échantillonnage indirectes sont donc utilisées pour définir le module de déformation en laboratoire (Kutzner, 1997; Marachi *et al.*, 1972). Ces méthodes sont décrites ci-dessous.

- 1) Le matériau est écrêté de façon à ce que son diamètre maximal corresponde à 1/5 ou à 1/10 du diamètre de l'échantillon en laboratoire sans que le volume tronqué n'excède 30% du volume total.
- 2) Un matériau de plus petite taille dont la courbe granulométrique est parallèle à celle de l'enrochement étudié est utilisé. Le type de roche doit être le même que celui de l'enrochement étudié.

De plus, pour l'estimation du module de déformation d'un barrage, les conditions sur le terrain (stratification et anisotropie due à la mise en place du matériau) et le cheminement des contraintes *in-situ* sont difficiles à reproduire en laboratoire (Kermani, 2016). Ainsi, dû à ces effets d'échelle, les résultats des essais en laboratoire ne sont pas très représentatifs. Ils sont toutefois un bon départ pour débiter la conception d'un barrage s'ils sont validés par la suite par des essais *in-situ* (Bouchard, 2016).

Essais *in-situ*

Différents essais *in-situ* existent pour évaluer les déformations de l'enrochement d'un barrage. Dans le cadre de ce mémoire, seuls les essais *in-situ* effectués sur les planches d'essai de la Romaine-2 sont présentés, soit des essais de chargement de plaque (*Plate Load Test (PLT)*), des essais au déflectomètre à masse tombante (*Falling Weight Deflectometer (FWD)*) et des essais d'analyse des ondes de surface multi-modale (*Multi-Modal Analysis Surface Waves (MMASW)*). Selon Hydro-Québec, c'est la première fois que des essais FWD et MMASW sont effectués sur des matériaux d'enrochement pour la construction d'un barrage (Verret *et al.*, 2013).

Essai de chargement de plaque (*Plate Load Test (PLT)*)

L'essai de chargement de plaque consiste à appliquer une charge sur une plaque circulaire déposée sur la surface du sol. Des LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sont installés autour de la plaque. À l'aide des LVDT, les déflexions verticales du sol sont enregistrées tout au long du chargement et du déchargement (Figure 1.2). Il est donc possible d'obtenir la courbe contrainte-déformation du sol.

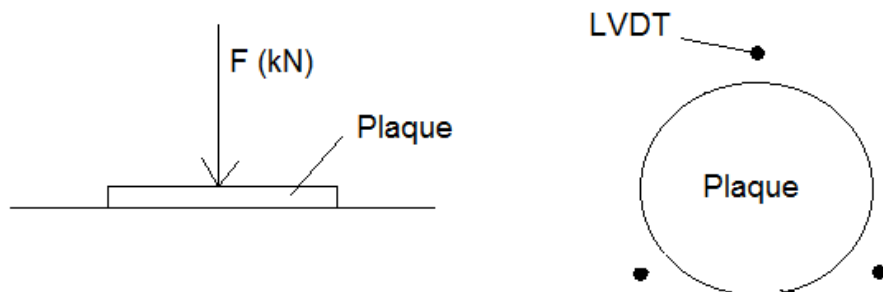


Figure 1.2 : Essai de chargement de plaque (*PLT*)

Le module de déformation est obtenu à l'aide de l'équation de Boussinesq issue de la solution analytique pour le calcul des déformations causées par l'application d'une charge sur une plaque rigide circulaire appuyée sur un milieu semi-infini élastique isotrope (ASTM, 2017). L'équation est définie comme suit :

$$E = \frac{\pi(1 - \nu^2)pr}{2\Delta H} \quad \text{Équation 2}$$

Où E est le module de déformation (MPa), ν le coefficient de poisson du sol, p la contrainte appliquée sur la plaque (MPa), ΔH la déflexion verticale mesurée par les LVDT (mm) et r le rayon de la plaque (mm).

Toutefois, pour les planches d'essai, le roc étant relativement près de la surface, l'hypothèse d'un milieu semi-infini n'est pas plausible. Ainsi, l'équation de base de Boussinesq est modifiée de manière à prendre en compte la présence du roc. L'équation du module de déformation est donc définie tel que (Grenier, 2011):

$$E = (1 + \nu) \frac{pr}{2\Delta H} \left(2(1 - \nu) \left(\frac{\pi}{2} - \omega \right) - \sin \omega \cos \omega \right) \quad \text{Équation 3}$$

Avec $\omega = \arctan\left(\frac{r}{z}\right)$, où z correspond à l'épaisseur du milieu (mm).

Défectomètre à masse tombante (*Falling Weight Deflectometer (FWD)*)

L'essai du déflectomètre à masse tombante se base sur les mêmes principes que l'essai PLT, sauf que cette fois-ci la charge est dynamique. La charge est produite par la chute d'une masse sur un disque en contact avec le sol. Des géophones

sont disposés le long de l'axe de l'essai (aligné sur le centre de la plaque) de façon à mesurer les déplacements verticaux à la surface du sol (Grenier, 2007), tel qu'illustré à la Figure 1.3.

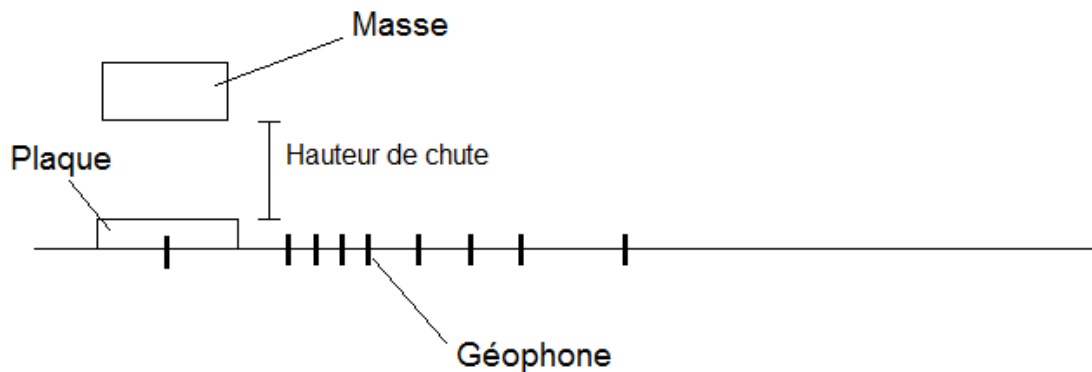


Figure 1.3 : Essai au défectomètre à masse tombante (*FWD*)

Le calcul du module de déformation est fait à l'aide de l'Équation 3 pour un milieu fini (présence de roc à faible profondeur).

Analyse multi-modale des ondes de surface (*Multi-Modal Analysis Surface Waves* (MMASW))

Lors de l'essai MMASW, un impact est induit à la surface du sol (chute libre d'un poids) et des capteurs sont installés à intervalle régulier le long d'un levé. Les capteurs reçoivent la réponse du sol à l'impact. Connaissant la distance séparant les capteurs et le temps de propagation de l'onde, il est possible de calculer la vitesse de propagation des ondes de surface. Par un processus d'inversion de la courbe de dispersion de l'onde, un profil de vitesse est obtenu au centre des capteurs (Figure 1.4).

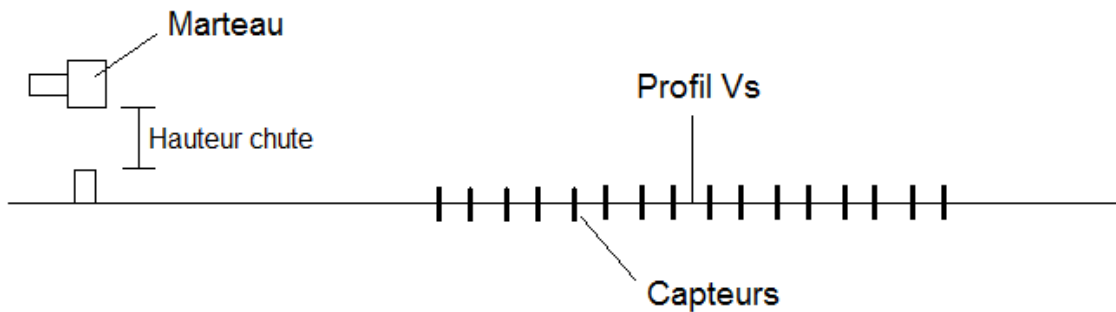


Figure 1.4 : Essai d'analyse multi-modale des ondes de surface (MMASW)

À partir des profils de vitesses de cisaillement, le module de cisaillement maximal peut être calculé selon la relation suivante (Lefebvre *et al.*, 2010) :

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad \text{Équation 4}$$

Où G_{max} correspond au module de cisaillement dans le domaine élastique (MPa), ρ à la masse volumique du milieu (kg/m^3) et V_s à la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (m/s^2).

Le module G_{max} correspond au module pour de petites déformations dans le domaine élastique. Celui-ci est directement relié au module de Young et au coefficient de poisson. Il est donc possible de définir le module d'élasticité à petites déformations de l'enrochement selon l'Équation 5 suivante (Verret *et al.*, 2013).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad \text{Équation 5}$$

Où E est le module de Young (élastique) (MPa), G le module de cisaillement dans le domaine élastique (MPa) et ν le coefficient de poisson du milieu.

Mesures de tassements prises directement sur le barrage

Le module de déformation de l'enrochement d'un barrage peut également être mesuré à partir des mesures de tassements obtenues directement sur le barrage pendant et après la construction. Différentes méthodes permettent de définir le module de déformation *in-situ*. Seulement deux sont montrées, soit celle de Flitzpatrick et celle de Kermani (2016).

Méthode de Flitzpatrick

Une des méthodes les plus simples est celle proposée par Flitzpatrick. L'équation est définie comme suit (Hunter & Fell, 2003):

$$E_{rc} = \gamma H d_1 / \delta_s \quad \text{Équation 6}$$

Où E_{rc} est le module de déformation de l'enrochement durant la construction (MPa), γ le poids volumique de l'enrochement (kN/m^3), H la hauteur du barrage en construction au-dessus de la couche d_1 , d_1 l'épaisseur de la couche et δ_s le tassement de la couche d_1 .

La Figure 1.5 illustre les différents paramètres de l'équation.

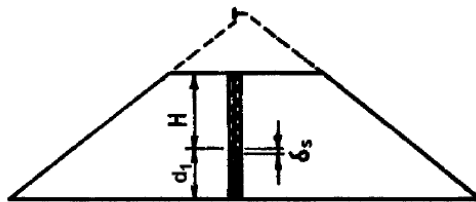


Figure 1.5 : Méthode simplifiée de Flitzpatrick pour l'évaluation du module de déformation pendant la construction (Hunter & Fell, 2003)

Au centre du barrage, le module E_{rc} peut être comparé au module M puisqu'alors, les conditions de chargement sont similaires à celles d'un essai oedométrique (Bouchard, 2016). L'équation de Flitzpatrick ne tient toutefois pas compte de l'effet de la forme du barrage sur la distribution des contraintes verticales dans l'enrochement (Hunter & Fell, 2003).

Méthode de Kermani (2016)

Kermani (2016) propose des lignes de tendance permettant d'estimer les tassements à long terme d'un barrage en se basant sur le comportement de celui-ci pendant la construction. La méthode utilise un module de déformation similaire à l'Équation 6, mais la distribution des contraintes verticales dans l'enrochement est prise en compte. Pour se faire, les contraintes verticales sont mesurées à l'aide d'une analyse numérique linéaire élastique simple. Ainsi, le module est défini tel que :

$$E_{rc} = \frac{\sigma_z}{\delta_s/d_1} \quad \text{Équation 7}$$

Où E_{rc} est le module de déformation de l'enrochement durant la construction (MPa), σ_z la contrainte verticale au milieu de la couche, d_1 l'épaisseur de la couche et δ_s le tassement de la couche d_1 (Kermani, 2016).

Résultats études antérieures

Afin de comparer les valeurs des modules de déformation obtenus avec les planches d'essai de la Romaine 2, une brève revue de littérature des modules de déformation issus de diverses études a été réalisée. Les principaux résultats sont montrés au Tableau 1.3. Il est important de noter que les modules reportés sont obtenus à partir de différentes conditions. Ils permettent toutefois de se situer dans

ce qui a été fait dans la littérature. Pour plus de détails sur l'obtention des modules, le lecteur est invité à consulter les références.

Tableau 1.3 : Modules de déformations d'enrochement issus d'études antérieures

Référence	Essais	Modules de déformation	Commentaires
Modules issus de différentes études			
Fell <i>et al.</i> (2005)	Mesures in-situ Méthode Flitzpatrick	20,5 à 375 MPa	Obtenus sur différents barrages construits à partir de matériaux d'enrochement différents et compactés selon différentes méthodes.
Kutzner (1997)	Mesures in-situ.	50 à 150 MPa	Valeurs typiques. Module enrochement dépend beaucoup du mécanisme de rupture des grains.
Hoff (1999)	Modules résilients. Étude pour réseau ferroriaire.	100 à 970 MPa	Obtenus pour différents nombre de cycles. Différentes contraintes. Différents matériaux. Différente énergie de compaction et différentes teneurs en eau.
Kermani (2016)	Modules déformation à partir des tassements mesurés in-situ	20 à 150 MPa	Obtenus sur différents barrages construits à partir de matériaux d'enrochement différents et compactés selon différentes méthodes.

Modules issus des planches d'essai et de la Romaine 2			
Grenier (2011)	PLT	90 à 660 MPa	Obtenus sur planches d'essais. Diamètre max varie. Différente énergie de compactage. Arrosage oui ou non.
Grenier (2011)	FWD	90 à 450 MPa	Obtenus sur planches d'essais. Diamètre max varie. Différente énergie de compactage. Arrosage oui ou non.
Smith (2015)	Mesure in-situ (Erc). Pose hypothèse élastique.	80 à 180 MPa	Obtenus sur barrage Romaine 2 dans les différentes zones d'enrochement.
Verret <i>et al.</i> (2013)	MMASW Module de Young	340 à 820 MPa	Obtenus sur planches d'essai à partir des profils de vitesses normalisées.
Grenier and Dussault (2013)	PLT	95 à 474 MPa	Obtenus pour les zones de recharge 3O et 3P de la Romaine-2

Il est possible de remarquer que l'intervalle des modules de déformation obtenu avec les relevés MMASW des planches d'essai est plus élevé que les autres. Considérant que le module est obtenu dans le domaine élastique à très petites déformations, ces résultats ne sont pas surprenants.

1.2 Contrôle de compactage en continu (CCC)

1.2.1 Définition générale

Le contrôle de compactage en continu (CCC) est une méthode de compactage qui permet de déterminer un paramètre de rigidité du sol sur une surface continue. Le paramètre est défini en fonction de la réponse du sol aux vibrations envoyées par le compacteur. Celui-ci est donc muni d'un accéléromètre fixé sur le rouleau compacteur, d'un système d'acquisition de données instantané et d'un système GPS afin de localiser dans l'espace les données enregistrées (Figure 1.6). Différentes méthodes de calculs du paramètre de rigidité existent selon le type de compacteur.

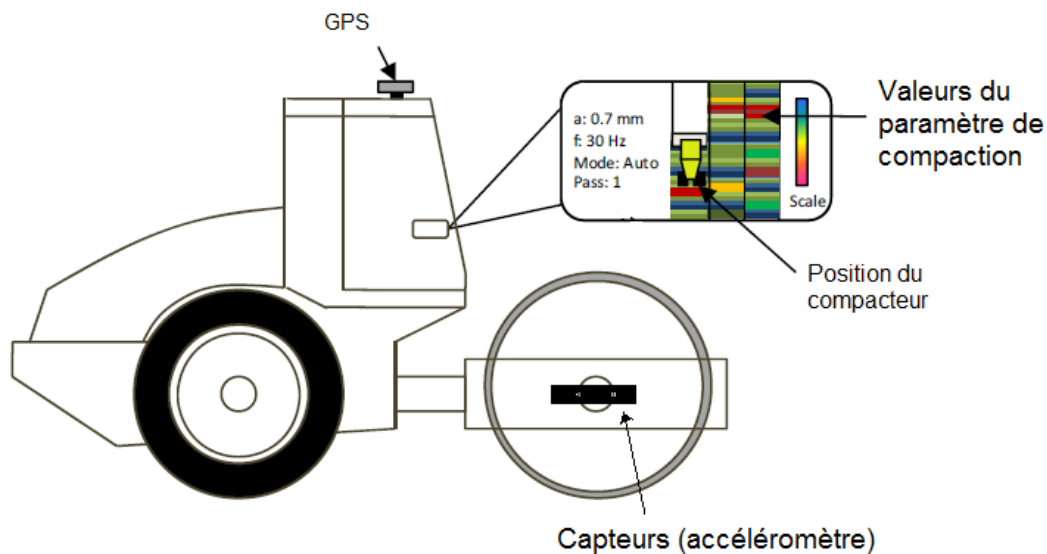


Figure 1.6 : Schéma d'un compacteur muni de la technologie CCC (White & Vennapusa, 2010)

Le compactage dit «intelligent» est similaire au compactage continu, mais le compacteur est capable d'ajuster automatiquement ces paramètres (amplitude,

fréquence de vibration) afin d'optimiser le compactage du sol. Dans le cas des planches d'essai de la Romaine 2, le compactage «intelligent» n'a pas été utilisé.

1.2.2 *Compaction Meter Value (CMV)*

Tel que mentionné dans l'introduction, le paramètre de compaction utilisé pour le compactage des planches d'essai est le *Compaction Meter Value (CMV)*. Avant d'analyser les résultats de compactage des planches d'essai, il est important de bien comprendre le principe de calcul du CMV. Cette section comprend donc une revue de littérature détaillée de ce paramètre.

Historique

Durant les années 70, le Dr. Heinz Thurner, subventionné par la *Swedish Highway Administration*, entreprend des recherches ayant comme objectif de développer une méthode permettant la mesure de la rigidité du sol en continu et instantanément. Ces recherches montrèrent que la vibration d'un rouleau compacteur, mesurée à l'aide d'un accéléromètre, varie dans le temps. Il en conclut que cette variation est due à l'augmentation de la rigidité du sol (Thurner & Sandström, 2000).

Avec Sandström, Thurner fonde la compagnie Geodynamik. En 1978, avec l'aide de Florssblad de Dynapac, Sandström et Thurner développent le *Compaction Meter Value*. Le CMV est présenté pour la première fois en 1980 lors de la *First International Conference on Compaction* à Paris (Mooney & Adam, 2007).

Principe

Le principe de calcul du *Compaction Meter Value* se base sur l'analyse du mouvement vertical du rouleau compacteur à l'aide de données mesurées par un

accéléromètre. Le rouleau compacteur vibre grâce à la rotation d'une masse excentrique autour de son axe (Figure 1.7). Selon les types de compacteur, l'opérateur a le choix entre 2 ou 3 fréquences de vibration prédéfinies. La fréquence fixée par l'opérateur lors du compactage correspond à la fréquence fondamentale du rouleau et elle est appelée fréquence d'excitation (Ω).

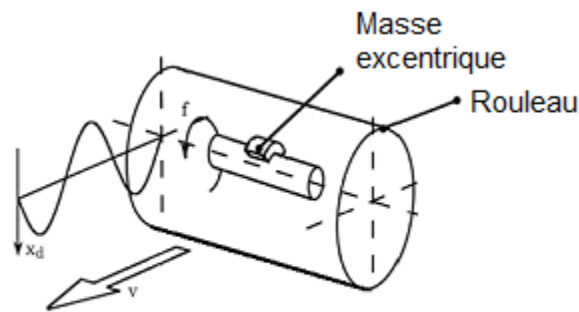


Figure 1.7 : Vibration d'un rouleau compacteur induite par la rotation d'une masse excentrique (modifié de Anderegg & Kaufmann, 2004)

Lorsque le rouleau entre en contact avec le sol, la fréquence d'excitation du rouleau se déforme et cette déformation est proportionnelle à la rigidité du sol (Floss *et al.*, 1983). Afin de mesurer cette déformation, le signal de l'accéléromètre est traité par un processeur de façon à en extraire les différentes harmoniques et subharmoniques. Une harmonique est un multiple entier de la fréquence fondamentale (2Ω = première harmonique) alors qu'une subharmonique correspond à une fréquence sous la fréquence fondamentale (par ratio de $1/x$). Pour se faire, le principe des séries de Fourier est utilisé. Par la suite, l'amplitude de ces différentes fréquences est calculée par analyse spectrale (Figure 1.8).

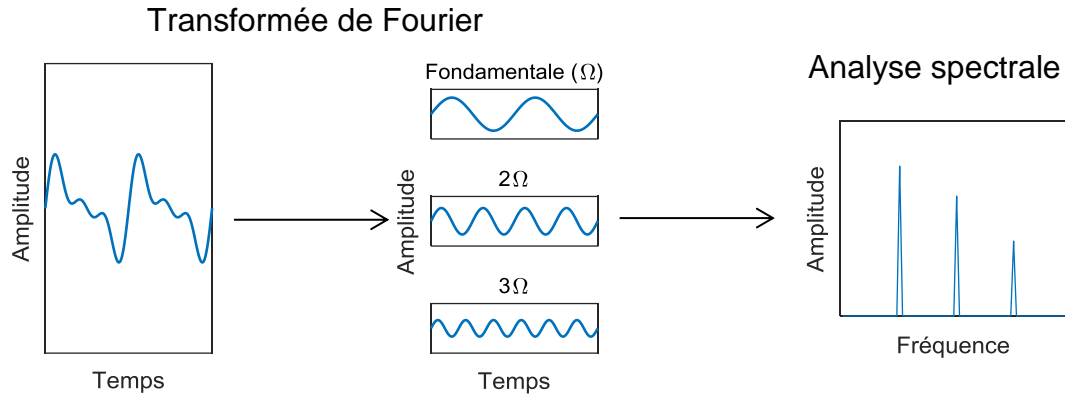


Figure 1.8 : Traitement du processeur

Selon Floss *et al.* (1983), la première harmonique est celle permettant de mieux caractériser la déformation du signal de base puisqu'elle est dominante par rapport aux autres fréquences. En effet, les autres fréquences, de moindre amplitude, sont plus sensibles au bruit pouvant provenir du rouleau et de son châssis.

Ainsi, il est observé qu'avec l'augmentation de la rigidité du sol, l'amplitude de la première harmonique augmente, tel qu'illustré à la Figure 1.9.

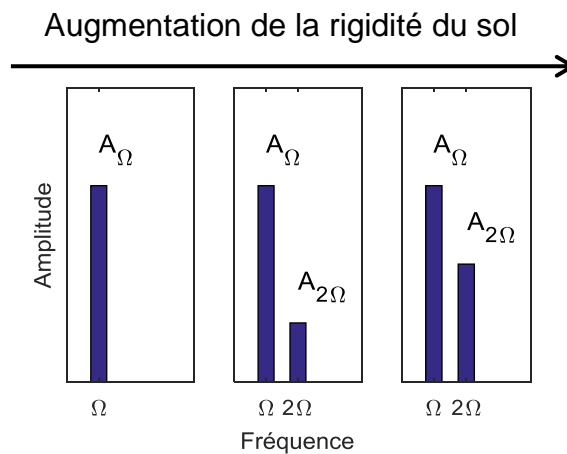


Figure 1.9 : Augmentation de la première harmonique avec l'augmentation de la rigidité du sol

Le *Compaction Meter Value* dit CMV est donc défini comme étant le ratio entre l'amplitude d'accélération de la première harmonique du mouvement vertical du rouleau ($A_{2\Omega}$) sur l'amplitude de la fréquence d'excitation de celui-ci (A_{Ω}). Ce ratio est multiplié par une constante C. La constante permet d'obtenir des valeurs de CMV selon une échelle de 100. Elle est souvent posée à une valeur de 300 (Sandström & Pettersson, 2003; White *et al.*, 2008). Le CMV est alors défini tel que :

$$CMV = C \frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}} \quad \text{Équation 8}$$

Ce faisant, par définition, le CMV augmente avec l'augmentation de la rigidité du sol. Il est toutefois influencé par plusieurs facteurs. Ces facteurs comprennent le poids et la vitesse du compacteur, la fréquence et l'amplitude de vibration du rouleau et le type de sol compacté (Forssblad, 1980; Mooney & Adam, 2007).

Acquisition des mesures CMV

Lors du compactage, une mesure de CMV est associée à une aire compactée correspond à la largeur du rouleau par la distance parcourue par le compacteur pour un intervalle de temps donné, soit le temps d'acquisition des mesures (Geodynamik). La Figure 1.10 illustre le principe.

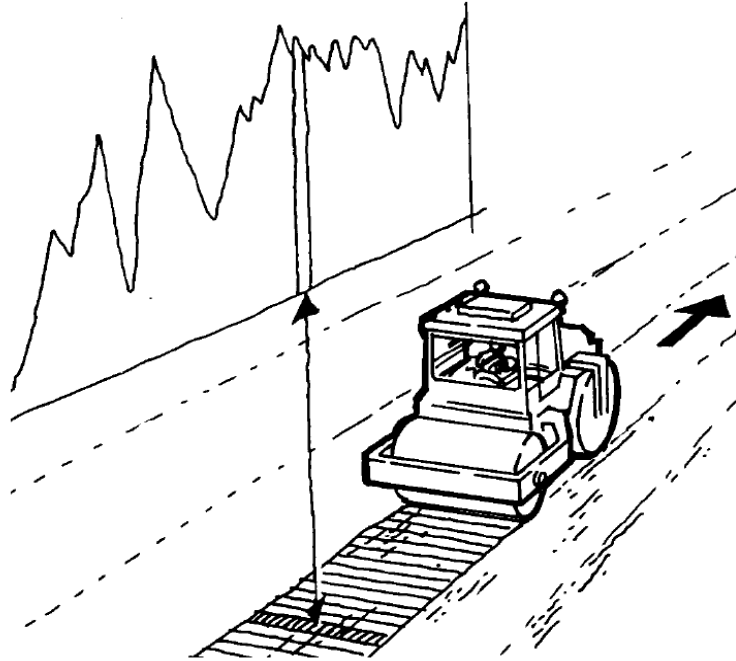


Figure 1.10 : Aire compactée associée à un CMV (Geodynamik)

Par exemple, un CMV est obtenu à environ chaque 0,25 m sur les planches d'essai. Sachant que le compacteur compacte à une vitesse de 5 km/h, le temps d'acquisition des données est d'environ 0,2 secondes. Ce faisant, le contrôle de compactage en continu produit un important volume de données.

Modes de vibration

Avec l'augmentation de la rigidité du sol, le contact entre le rouleau et le sol devient discontinu. Cette discontinuité devient de moins en moins périodique jusqu'à devenir chaotique. Des modes d'opération ont été définis décrivant cette évolution. Les modes sont fonction de l'interaction rouleau-sol, de la rigidité du sol, de la vitesse du compacteur et de l'amplitude de vibration du rouleau. Le Tableau 1.4 résume les différents modes reliés à ces facteurs.

Tableau 1.4 : Modes d'opération (Mooney & Adam, 2007)

Interaction rouleau-sol	Modes d'opération	Application du CCC	Rigidité du sol	Vitesse du compacteur	Amplitude du rouleau
Contact continu	Continuous Contact	Oui	Faible	Vite	Faible
Perte de contact périodique	Partial uplift	Oui			
	Double jump	Oui			
	Rocking motion	Non			
Perte de contact chaotique	Chaotic motion	Non	Élevée	Lent	Élevée

Ainsi, à partir d'un certain mode (*rocking motion*), le mouvement du rouleau est jugé trop chaotique et alors, les valeurs de CMV ne sont plus représentatives de la rigidité du sol. À ce stade, un relâchement du sol peut être occasionné, faisant diminuer anormalement les valeurs de CMV. De plus, les vibrations du rouleau peuvent être dommageables pour l'équipement et inconfortable pour le conducteur (Geodynamik).

Resonant meter value (RMV)

Afin d'éviter de compacter dans un mode supérieur au «*double jump*», un paramètre appelé *Reasonant Meter Value* (RMV), a été développé. Le concept du paramètre RMV est similaire à celui du CMV. RMV est défini comme suit :

$$RMV = C \frac{A_{0,5\Omega}}{A_{\Omega}}$$

Équation 9

Où C correspond à la même constante utilisée à l'Équation 8, $A_{0,5\Omega}$ à l'amplitude d'accélération de la subharmonique harmonique du mouvement vertical du rouleau et A_{Ω} à l'amplitude d'accélération de la fréquence d'excitation du rouleau compacteur.

La subharmonique apparaît lorsque qu'il n'y a plus de contact continu avec le sol. Plus le contact devient discontinu et chaotique, plus l'amplitude de la subharmonique augmente. Ainsi, tant que le contact entre le compacteur et le sol est continu, les valeurs de RMV sont nulles, mais dès que le contact devient discontinu, des valeurs de $RMV > 0$ sont mesurées (White *et al.*, 2009). À partir d'un certain stade, pour des valeurs élevées de RMV, les valeurs de CMV ne sont plus représentatives. Le compacteur est alors dans le mode «*rocking motion*». Il est donc important de tenir compte du RMV lors de l'interprétation des valeurs de CMV (White & Vennapusa, 2010).

La littérature ne définit toutefois pas clairement à partir de quelles valeurs de RMV le compacteur a atteint son mode «*rocking motion*». Peu d'articles posent une valeur type. Le seul répertorié est celui de White *et al.* (2008), où une valeur de 17 est posée comme valeur RMV seuil à partir de laquelle les CMV ne sont plus considérés représentatifs de la rigidité du sol.

Profondeur d'influence

Diverses études ont tenté d'évaluer la profondeur d'influence du rouleau compacteur. En général, les conclusions de ces études montrent que la profondeur varie de 0,5 m à 1,5 m selon le poids, la fréquence et l'amplitude du rouleau

compacteur. Ce faisant, la profondeur d'influence du rouleau compacteur est généralement plus élevée que celle des essais *in-situ* conventionnels (Mooney *et al.*, 2010). La Figure 1.11 compare la profondeur d'influence d'un rouleau, estimée entre 1 à 1,2 m, avec celle d'un essai FWD, correspondant environ au diamètre de la plaque utilisée (Mooney *et al.*, 2010).

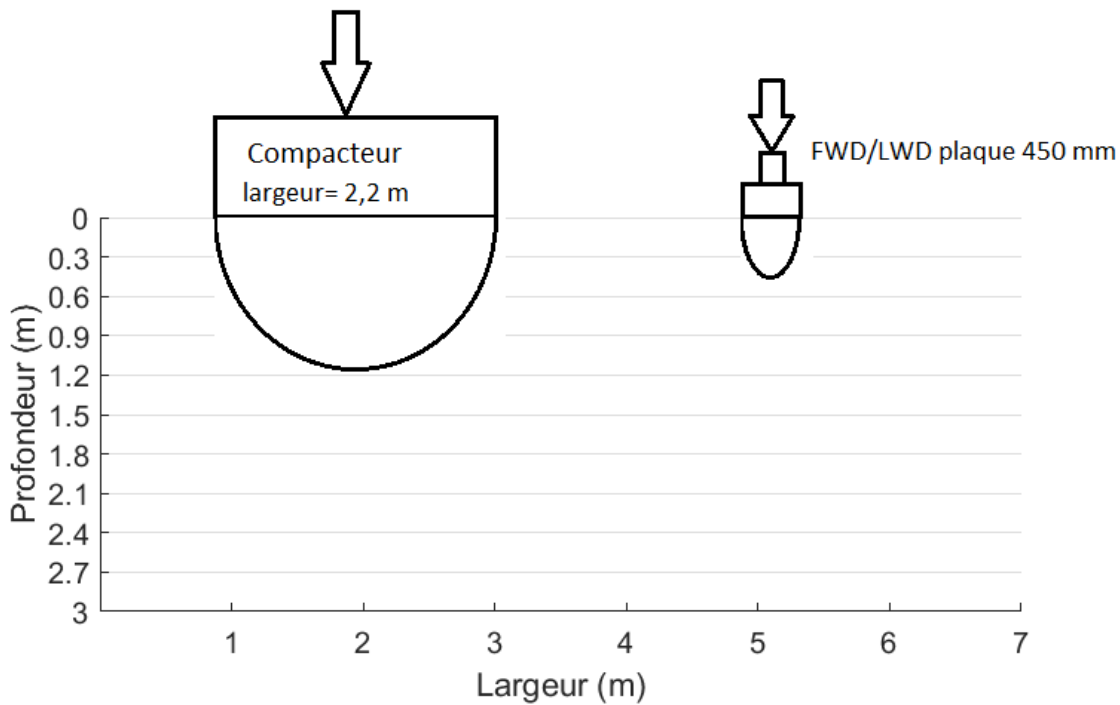


Figure 1.11 : Profondeur d'influence du rouleau compacteur (modifié de Mooney *et al.*, 2010)

Il est donc important de prendre en compte cette différence lorsque les valeurs de CMV sont comparées aux modules de déformation issus des essais *in-situ*.

1.2.3 Autres paramètres de compaction existants

Outre le *Compaction Meter Value*, d'autres paramètres de compaction ont été développés par différents fabricants. Cette section se veut être une brève introduction à ces différents paramètres existants comprenant le *Machine Drive Power* (MDP), le *Compaction Control Value* (CCV), le module de vibration (E_{vib}) et le module de rigidité (k_s).

Machine Drive Power (MDP)

Le *Machine Drive Power* se base sur les concepts de perte d'énergie d'une roue sur un sol (White *et al.*, 2005). L'expression semi-empirique du MDP est la suivante (Mooney *et al.*, 2010)

$$MDP = P_g - WV \left(\sin \alpha + \frac{a}{g} \right) - (mV + b) \quad \text{Équation 10}$$

Où P_g est l'énergie nécessaire pour faire bouger le compacteur, W le poids du rouleau compacteur, V la vitesse du compacteur, α l'angle de la pente (positif pour une montée et négatif pour une descente (White *et al.*, 2005)), a l'accélération du compacteur, g , l'accélération gravitationnelle et m et b des coefficients de la perte d'énergie du compacteur.

La Figure 1.12 illustre les différents paramètres de l'Équation 10.

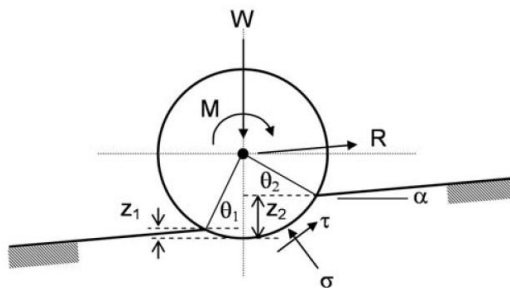


Figure 1.12 : Diagramme des forces appliquées sur le rouleau compacteur (Mooney *et al.*, 2010)

Le premier terme de l'équation correspond à l'énergie nécessaire pour faire bouger le rouleau compacteur sur le sol. Le deuxième terme de l'équation correspond à la demande d'énergie supplémentaire associée au degré d'inclinaison de la surface

ou aux accélérations du rouleau compacteur. Enfin, la troisième portion de l'équation représente l'énergie interne dissipée par la machine (White *et al.*, 2005). Enfin, les paramètres m et b sont déterminés lors de la calibration du rouleau compacteur (White & Thompson, 2008).

Ainsi, une valeur de MDP positive signifie que le sol est moins compacté que la surface de calibration alors qu'une valeur négative signifie qu'il est plus compacté (White & Vennapusa, 2010; White & Thompson, 2008). Les valeurs de MDP diminuent donc avec l'augmentation de la rigidité du sol.

Compaction control value (CCV)

Ce paramètre de compaction est développé par la compagnie Sakai. Le principe est similaire à celui du CMV, mais d'avantages d'harmoniques sont prises en compte dans le calcul du paramètre (Mooney & Adam, 2007). L'expression du CCV est donnée par :

$$CCV = \left[\frac{A(0.5\Omega) + A(1.5\Omega) + A(2.5\Omega) + A(3\Omega)}{A(2.5\Omega) + A(3\Omega)} \right] \times 100 \quad \text{Équation 11}$$

Où $A(x\Omega)$ est l'amplitude de la fréquence correspondante à x fois la fréquence d'excitation (Ω). Tout comme le CMV, le CCV augmente avec l'augmentation de la rigidité.

Module de rigidité (k_s)

Le module de rigidité k_s est développé par la compagnie Ammann vers la fin des années 90 (Mooney & Adam, 2007). Le concept se base sur un modèle simplifié de l'interaction rouleau-sol. Le modèle comprend un diagramme des forces

agissant sur le rouleau et un système de ressort-amortisseur représentant le sol. Le modèle est illustré à la Figure 1.13.

Lors du compactage, le rouleau vibre grâce à la rotation d'une masse excentrique autour de son axe. Cette rotation engendre une force centrifuge de magnitude constante (Rinehart & Mooney, 2009). La composante verticale de cette force est donnée ci-dessous :

$$F(t) = m_e r_e \Omega^2 \cos(\Omega t) \quad \text{Équation 12}$$

Où Ω est la fréquence d'excitation du rouleau (rad/s), $m_e r_e$ est le moment de la masse excentrique et t le temps en seconde.

Selon la Figure 1.13, la force F_s appliquée sur le sol par le rouleau est exprimée tel que :

$$F_s = k_s x + c_s \dot{x} \quad \text{Équation 13}$$

Où le paramètre k_s correspond à la rigidité du sol (N/m), le paramètre c_s à l'amortissement du sol (Ns/m) et la variable x au déplacement vertical du rouleau compacteur (m) mesuré par un accéléromètre. Cette force F_s correspond également à la force résultante verticale agissant sur le rouleau définie selon l'Équation 14 suivante. Dans ce cas-ci, l'inertie de la structure supportant le rouleau est négligée (Rinehart & Mooney, 2009).

$$F_s = m_e r_e \Omega^2 \cos(\Omega t) + (m_f + m_d)g - m_d \ddot{z}_d \quad \text{Équation 14}$$

Où $m_e r_e \Omega^2 \cos(\Omega t)$ correspond à la composante verticale de la force centrifuge (kN), m_f à la masse de la structure supportant le rouleau (frame) (kg), m_d à la masse du rouleau (drum) (kg), g à l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$) et \ddot{z}_d à l'accélération du rouleau (m/s^2).

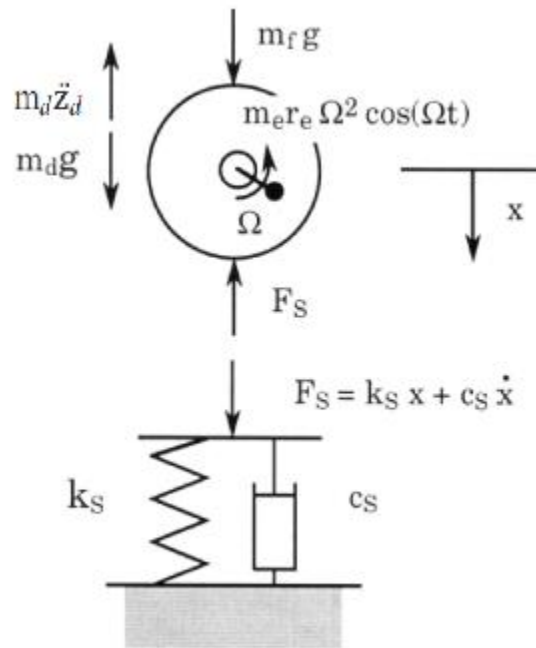


Figure 1.13 : Modèle simplifié de l'interaction sol-rouleau (modifié de Anderegg & Kaufmann, 2004)

Le paramètre k_s est obtenu en traçant la relation $F_s - x$. Il correspond à la pente de la droite sécante passant par le point de déflexion nulle à la déflexion maximale (voir Figure 1.14).

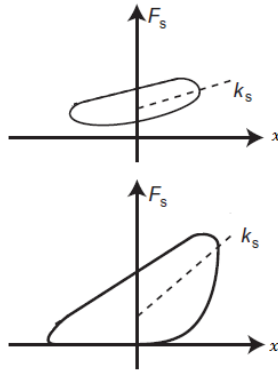


Figure 1.14 : Définition du paramètre k_s par la relation F_s - x pour un contact continu (haut) et discontinu (bas) (modifié de Rinehart & Mooney, 2009)

Module de vibration (E_{vib})

Le module de vibration E_{vib} a été développé par Bomag. Il se base sur les mêmes concepts que le k_s , sauf que le paramètre de rigidité k n'est pas sécant à la courbe F_s - x , mais plutôt tangent à la courbe de chargement (Figure 1.15).

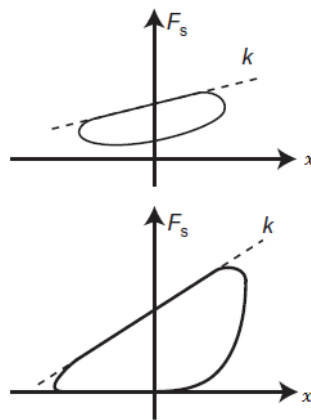


Figure 1.15 : Définition du paramètre k de Bomag par la relation F_s - x pour un contact continu (haut) et discontinu (bas) (modifié de Rinehart & Mooney, 2009)

Pour relier le paramètre k avec le module E_{vib} , la solution théorique de Lundberg pour une plaque cylindrique appuyée sur un milieu semi-infini élastique est utilisée. Celle-ci est définie aux équations suivantes. Le module E est le module de Young

et ν le coefficient de poisson du milieu alors que L et R sont la largeur et le rayon du rouleau compacteur respectivement.

$$x = \frac{2(1 - \nu^2) F_s}{\pi E} \frac{L}{L} \left(1.8864 + \ln \frac{L}{b} \right) \quad \text{Équation 15}$$

Où b est le contact entre le rouleau et le sol :

$$b = \sqrt{\frac{16 \cdot R(1 - \nu^2)}{\pi E \cdot L} F_s} \quad \text{Équation 16}$$

Ainsi, la relation F_s - x pour différents modules E est calculée selon les Équation 15 et Équation 16 (Figure 1.16). La valeur E_{vib} est obtenue en estimant la valeur du k par interpolations des différentes droites E (Mooney & Adam, 2007).

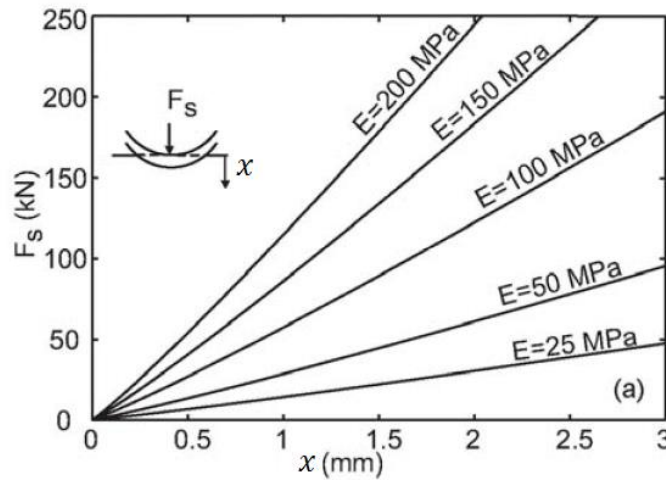


Figure 1.16 : Relations F_s - x pour un milieu semi-infini et élastique utilisées pour l'obtention du paramètre E_{vib} (modifié de Mooney & Adam, 2007).

1.2.4 Relations existantes

Compaction Meter Value (CMV)

Différentes études ont permis de développer des relations entre le CMV et des paramètres géotechniques plus conventionnels. Les relations sont empiriques et généralement développées pour une condition de terrain donnée. Toutefois, peu d'études ont utilisé du matériau d'enrochement. Celle répertoriée est l'étude conduite par Liu *et al.* (2014) reliant le CMV à des mesures de masse volumique et au pourcentage de particule fine pour un matériau d'enrochement. Les relations empiriques, présentées au Tableau 1.5, montrent que le CMV augmente linéairement avec l'augmentation de la masse volumique.

Tableau 1.5 : Relations empiriques obtenues pour de l'enrochement issues de Liu *et al.* (2014)

Relations empiriques	Coefficient de régression
$\rho = 0,720CMV + 0,112$	$r^2 = 0,687$
$\rho = 0,601CMV - 0,555(P5)^2 + 0,710(P5) + 0,002$	$r^2 = 0,726$

Où ρ est la masse volumique de l'enrochement (g/cm^3), CMV le *compaction meter value* et $P5$ le pourcentage passant le tamis 5 mm.

Autrement, la majorité des études trouvées dans la littérature ont utilisés des matériaux granulaires routiers et parfois des matériaux cohérents. Parmi ces études, diverses relations sont développées reliant le CMV avec différents essais *in-situ*. Seules les relations reliant le CMV aux résultats d'essais PLT et FWD sont montrées ici. Malheureusement, aucune relation reliant le CMV à des mesures d'essais MMASW n'a été trouvée dans la littérature.

La Figure 1.17 montre les relations obtenues avec des essais de chargement de plaque (PLT) et de déflectomètre à masse tombante (FWD) par différents auteurs et pour différentes conditions de compactage. Les matériaux avec lesquels ces corrélations ont été développées vont du sable (SM, SC, SP ou SW) à du gravier (GC, GM ou GP). Les contraintes appliquées lors des essais sont généralement inconnues. Seule l'étude de White *et al.* (2009) fournit l'information, soit des contraintes de 200 kPa à 400 kPa pour les essais PLT et de 94 kPa à 192 kPa pour les essais FWD.

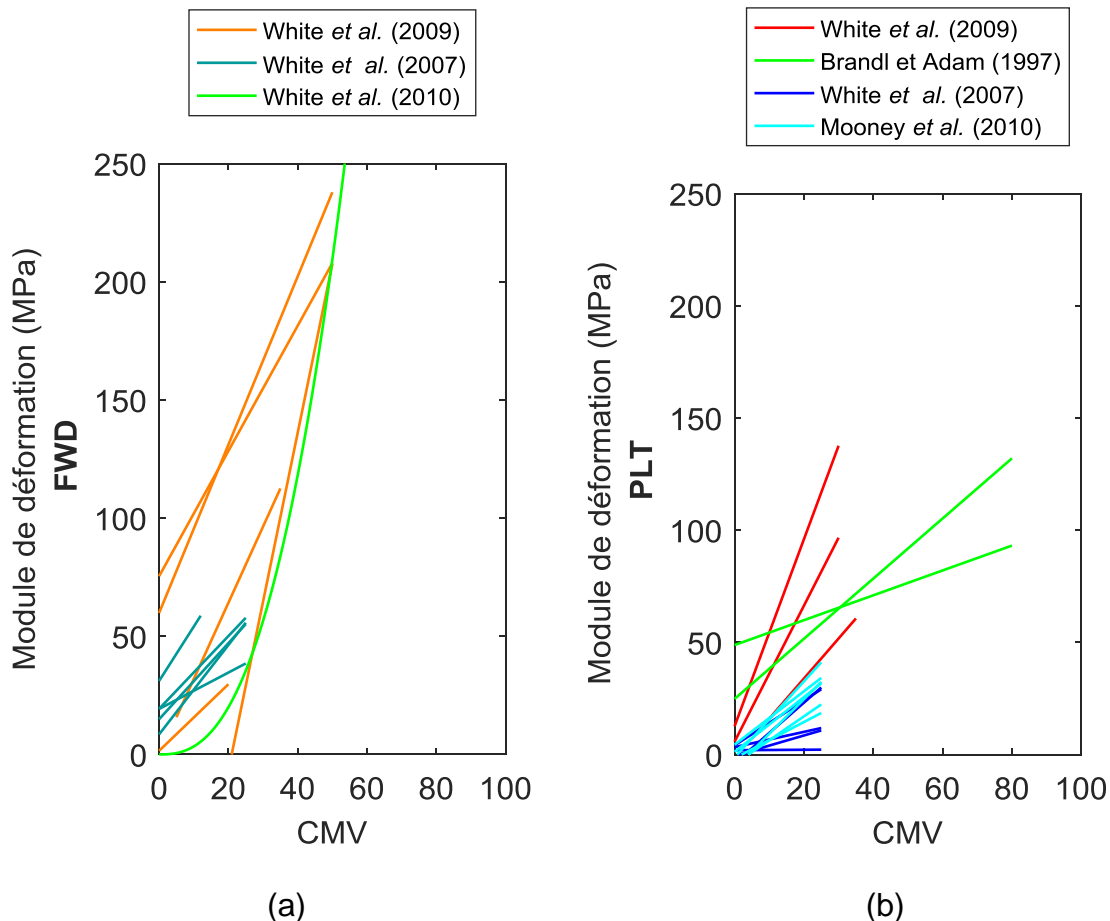


Figure 1.17 : Relations empiriques tirées de la littérature reliant le CMV et le module de déformation issu d'essais (a) FWD et (b) PLT

Ces relations sont majoritairement linéaires. Seule l'étude de White *et al.* (2010) montre une relation non-linéaire. De plus, en général, le coefficient de corrélation r^2 est élevé pour toutes les études allant de 0,5 à des valeurs de plus de 0,9. Une autre étude, réalisée par White and Thompson (2008), montre également des relations linéaires entre le CMV et des modules de déformation issus d'essais PLT. N'ayant pu retrouver les équations, les résultats sont seulement montrés graphiquement à la Figure 1.18. Les matériaux utilisés vont du sable (SM) à du gravier (GM, GP et GC).

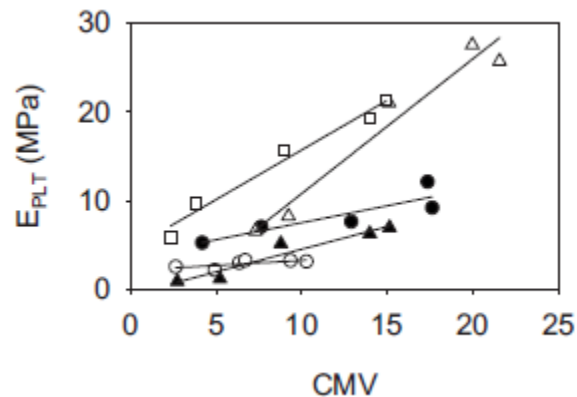


Figure 1.18 : Relations linéaires entre le CMV et le module de déformation PLT obtenues par White and Thompson (2008)

Il est important de noter que ces relations sont majoritairement développées par passe. C'est-à-dire que les essais *in-situ* sont effectués pour différentes passes. Leurs résultats sont par la suite reliés aux valeurs de CMV moyen ou au CMV moyen d'une zone autour de l'essai pour la passe donnée. Ce faisant, un large spectre d'énergie de compaction est analysé. Ce n'est toutefois pas le cas des planches d'essai de la présente étude puisque pour celles-ci, les essais *in-situ* ne sont réalisés qu'à la fin du compactage. Le spectre d'énergie est donc limité.

Autres paramètres

Des relations ont également été développées avec les autres paramètres de compactage décrits à la section 1.2.3 (MDP, CCV, k_s et E_{vib}). Encore une fois, ces

relations sont empiriques et développées pour des conditions de compactage données. Le lecteur est invité à consulter les articles de White and Vennapusa (2010) et de Mooney *et al.* (2010) qui ont réalisé de bonnes revues des diverses études ayant développé des relations entre un paramètre de compactage donné et des résultats d'essais *in-situ*.

Chapitre 2 Planches d'essai

2.1 Description

À l'été 2010, dix planches d'essai sont construites afin de déterminer les conditions de compactage et de mise en place optimales des matériaux d'enrochement pour la construction des recharges interne et externe du barrage la Romaine 2. Les planches ont des dimensions de 15 m par 10 m et ont été construites en plusieurs levées. L'épaisseur et le nombre de levées varient dépendamment de la taille des particules de l'enrochement utilisé. La Figure 2.1 montre une vue en plan et les coupes longitudinale et transversale de planches d'essai types.

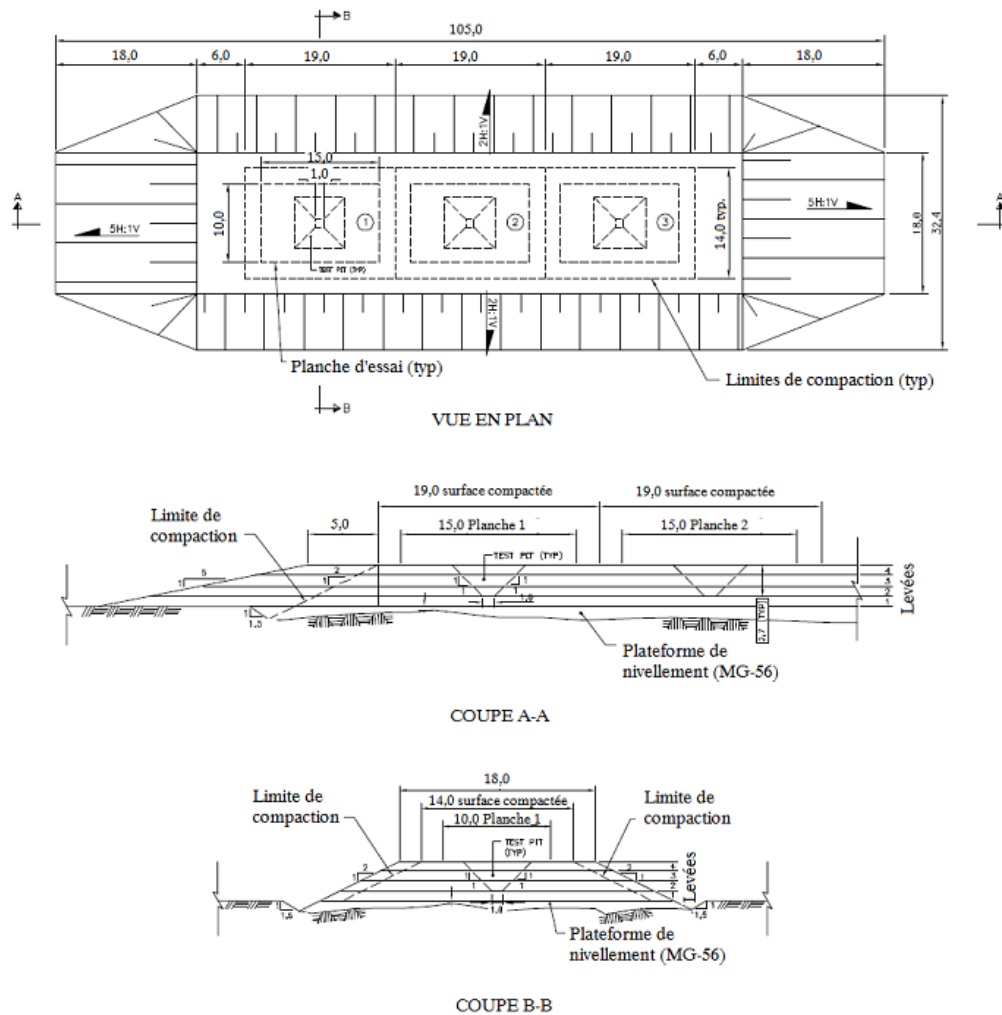


Figure 2.1 : Vue en plan et coupes longitudinale et transversale de planches d'essai types (remblai A). Échelle : 1 : 200. Unité : mètre (modifié de Verret *et al.*, 2013)

Les planches d'essai sont construites en 5 remblais (allant de A à E), contenant une à trois planches d'essai. La disposition des remblais (test fills) et des planches d'essai (test pads) est montrée à Figure 2.2 ci-dessous. Pour voir les plans détaillés de chaque planche, consulter l'Annexe A.1.

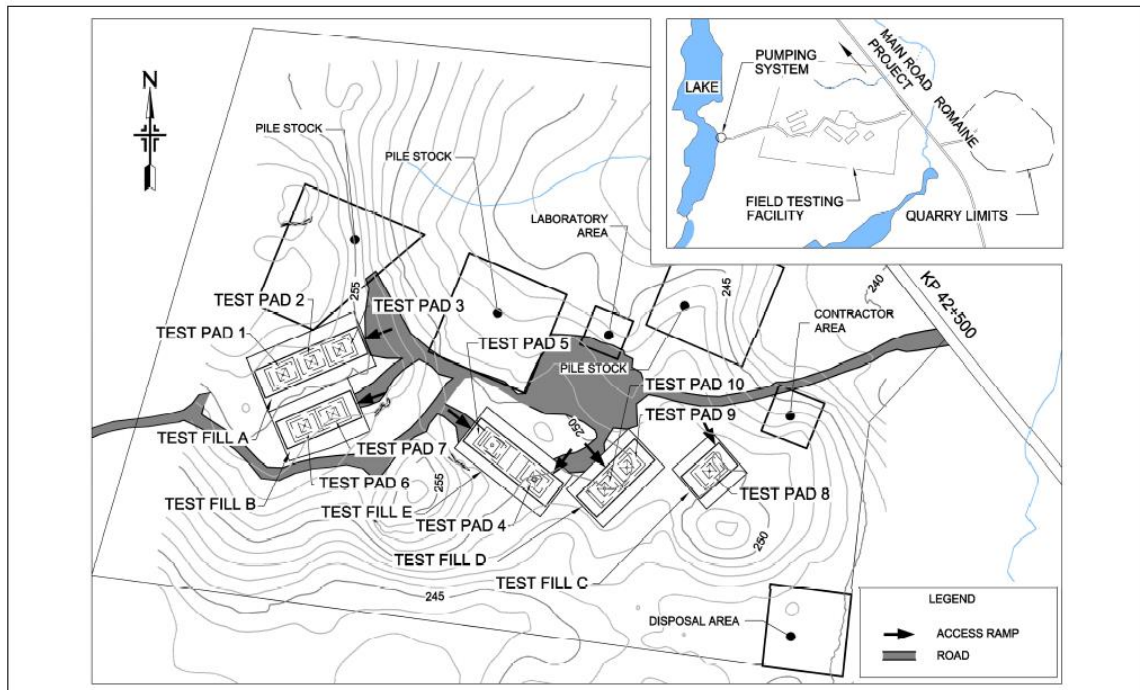


Figure 2.2 : Configuration du site d'étude des planches d'essai (Verret *et al.*, 2013)

Les conditions de mise en place des planches d'essai vont des exigences d'Hydro-Québec (H-Q) pour des barrages ECRD (Earth Core Rockfill Dam) aux exigences de l'Institut Norvégien de Géotechnique (NGI) pour des barrages ACRD (Asphaltic Core Rockfill Dam). Les variables étudiées sont le nombre de passes du compacteur, le poids du compacteur, le diamètre maximal des particules et l'arrosage de l'enrochement. Le Tableau 2.1 donne les exigences de mise en place pour la recharge interne d'un barrage selon les deux méthodes (HQ et NGI). Pour la recharge externe, les exigences sont similaires, sauf que le matériau est plus grossier.

Tableau 2.1 : Exigences de mise en place pour la recharge interne d'un barrage selon H-Q et NGI

Méthode	Poids du compacteur	Type de matériau	Nombre de passes	Arrosage
H-Q (ECDR)	10 t	0-900 mm	4 passes	non
NGI (ACRD)	15 t	0-400 mm et 0-700 mm	8 passes	oui

Afin d'évaluer l'influence de chacune de ces variables, chaque planche d'essai a sa propre combinaison de conditions de mise en place. Les différentes combinaisons sont montrées au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Conditions de mise en place des planches d'essai (Verret *et al.*, 2013)

Planche d'essai (P)	Enrochement		Épaisseur des levées (mm)	Compaction		Arrosage (l/m ³)
	Matériau	Granulométrie (mm)		Poids du compacteur (t)	Nombre de passes	
1	3D	0-900	900	10	4	-
2	3D	0-900	900	16.3	4	-
3	3D	0-900	900	16.3	8	-
4	3P	0-1200	1800	16.3	8	-
5	3E	0-1800	1800	16.3	4	-
6	3O	0-600	900	16.3	4	-
7	3O	0-600	900	16.3	8	-
8	3D	0-900	900	16.3	8	200
9	3O	0-600	900	16.3	8	200
10	3O	0-600	900	16.3	4	200

Des essais de déflectomètre à masse tombante (*falling weight deflectometer – FWD*), de chargement de plaque (*plate load test – PLT*) et d'analyse multi-modale des ondes de surface (*multi-modal analysis of surface waves – MMASW*) ainsi que des mesures de masses volumiques et de tassements sont effectués sur chaque planche. Ces tests de contrôle permettent d'évaluer l'influence de chaque variable (poids du compacteur, nombre de passes, diamètre maximal des particules et arrosage) sur la rigidité de l'enrochement en comparant les résultats des différentes planches d'essai. Les résultats sont montrés à la section 2.3.

2.2 Compactage

Pour le compactage des planches d'essai, deux types de compacteur sont utilisés, soit le CS-583E Caterpillar et le HT-3625 Hamm. Tous deux sont équipés d'un système d'acquisition permettant l'application de la technologie CCC. Dans les deux cas, le paramètre de compaction utilisé est le *compaction meter value (CMV)*. Leurs caractéristiques respectives sont données au Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Caractéristiques des compacteurs utilisés pour les planches d'essai (Verret *et al.*, 2013)

	CS-583E Caterpillar	HT-3625 Hamm
Poids des masses sur l'axe du rouleau	10t	16,3t
Vitesse durant la compaction	5 km/h	5 km/h
Fréquence de vibration	30 Hz	30 Hz
Force dynamique appliquée	166 kN	331 kN
Largeur du rouleau	2 134 mm*	2 220 mm

La procédure de compactage appliquée à chaque levée pour toutes les planches est décrite comme suit (tirée de Verret *et al.*, 2013):

- Le compacteur allait d'une extrémité à l'autre du remblai en avançant et puis en reculant

- Chaque nouvelle passe superposait la précédente d'un quart de la largeur du rouleau
- Chaque passe était dans la direction longitudinale du remblai lorsque le compacteur avançait ou reculait
- Les compacteurs travaillaient uniquement sur une surface horizontale
- La zone de compactage était plus large que la zone du banc d'essai de 4 m dans la direction latérale et de 2 m longitudinalement
- Le compacteur n'allait pas à moins de 2 m des limites latérales
- Un système GPS était en fonction tout au long du compactage
- Une passe est obtenue une fois que les passages du rouleau ont recouvert toute la surface à compacter.

2.3 Essais in-situ

Tel que mentionné à la section 2.1, des tests de contrôle sont effectués sur les planches d'essai de façon à évaluer l'influence des différentes conditions de mise en place et de compactage sur la rigidité de l'enrochement. La méthodologie, les résultats et les principales conclusions des essais de contrôle sont montrés dans les sections suivantes. Les positions des essais sur les planches d'essai sont montrées en Annexe A.2. Pour plus de détails sur les essais de contrôle, consulter l'article de Verret *et al.* (2013).

2.3.1 Mesure de masse volumique

Pour chaque planche d'essai, une mesure de masse volumique est effectuée une fois le compactage terminé. La procédure consiste à excaver un volume suffisamment élevé d'enrochement de façon à ce que le poids de la plus grosse particule n'excède pas 2% du poids total de l'échantillon (Verret *et al.*, 2013). Une fois excavé, le volume est évalué à l'aide d'un laser. La masse de sol excavée est quant à elle soit transposée dans un camion puis pesée ou alors directement pesée sur une balance appropriée (capacité de 50 t). L'emplacement et les dimensions des volumes excavés (test pits) sont montrés à la Figure 2.1.

Malgré la précision de l'outil à rayon X, le volume mesuré est sous-estimé. En effet, une fois le matériau excavé, la pression qui était exercée par celui-ci sur le sol devient subitement nulle. Ce changement de pression provoque une expansion du sol vers l'intérieur de l'excavation. Ce faisant, les volumes mesurés sont sous-estimés et la masse volumique mesurée est surestimée. Afin de corriger cet effet, les volumes mesurés sont augmentés en considérant une expansion uniforme des parois correspondant à 20% du D_{50} du sol, tel que :

$$V_{corr} = V_m + 0,2D_{50} \cdot A_{exc} \quad \text{Équation 17}$$

Où V_{corr} correspond au volume corrigé, V_m au volume mesuré et A_{exc} à la surface totale de l'excavation. Cette correction est jugée représentative de ce qui est observé dans la réalité (Verret *et al.*, 2013).

Les résultats des masses volumiques sèches obtenues et corrigées pour toutes les planches sont montrés au Tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Masses volumiques sèches obtenues et corrigées (Verret *et al.*, 2013)

Planche	Masse kg	Volume	Volume corrigé	Masse volumique	Masse volumique corrigée
	kg	m ³	m ³	kg/m ³	kg/m ³
1	67735	30	30,9	2258	2192
2	74894	32,9	34,1	2276	2196
3	71206	30,4	31,7	2342	2246
4	94689	42,9	45,2	2207	2095
5	265011	120	126,3	2208	2098
6	76786	33,1	34	2320	2258
7	80013	34	34,7	2353	2306
8	83916	36	34,7	2331	2418
9	76905	32,6	34	2359	2262
10	78129	33,8	35,1	2312	2226

Il est important de considérer que l'évaluation de la masse volumique pour un enrochement est difficile vu la taille importante du diamètre maximal (D_{max}). En plus de la source d'erreur provoquée par l'expansion des parois de l'excavation, il y a le remaniement des parois lors de l'extraction de la masse de sol par la pelle qui provoque des sources d'erreur. En excavant, des morceaux de roche peuvent tomber ou glisser le long des parois. Ainsi, après l'extraction du sol, le volume calculé ne correspond plus au volume réel excavé. Ce problème est très aléatoire et donc difficile à corriger. De plus, il est d'autant plus important lorsque le D_{max} est très grand, car il est alors impossible de réaliser une coupe nette dans le sol (Smith, 2017).

Enfin, même une fois corrigées, les masses volumiques des planches d'essai restent très élevées. Une réflexion supplémentaire sur la validité des résultats reste encore à faire (Smith, 2017). Ces résultats ne sont donc pas pris en compte dans l'analyse des données CCC.

2.3.2 Défectomètre à masse tombante (FWD)

Les essais FWD sont effectués une fois la dernière levée compactée. Les essais sont réalisés avec une plaque de 450 mm et une masse d'environ 285 kg (la hauteur de chute variant entre 60 et 400 mm). En tout, neuf géophones sont disposés à 0, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 1800, et 2400 mm de distance du centre de la plaque. Pour chaque planche, une dizaine de points d'essai sont effectués (9 à 18 points par planche). Tel que mentionné précédemment, les emplacements des essais sont disponibles en Annexe A.2. Les numéros affichés correspondent aux numéros d'essai.

Pour chaque point d'essai, 4 chargements sont appliqués (Tableau 2.5). Il est à noter qu'avant le premier chargement, un préchargement est appliqué afin de bien asseoir la plaque sur la surface de l'enrochement.

Tableau 2.5 : Chargements appliqués pour un point d'essai FWD

Nombre de chute	Hauteur de chute (mm)	Charge maximale enregistrée (kN)
3	60	30
3	125	40
3	270	60
3	400	80

Pour l'interprétation des résultats, deux méthodes sont utilisées, soit la méthode statique et la méthode dynamique. Dans le cadre de cette maîtrise, seul les résultats de l'analyse statique sont utilisés.

Pour l'obtention des modules de déformation, la méthode statique utilise la même équation que pour l'essai PLT, soit l'Équation 3 de la section 1.1.2. La déflexion verticale (ΔH) utilisée dans l'équation correspond à la déflexion maximale mesurée directement sous la plaque par le géophone disposé au centre de la plaque (position 0 m) et le coefficient de poisson est posé à 0,35 (Grenier, 2011). Le Tableau 2.6 donne les modules de déformation minimum et maximum obtenus pour chaque planche.

Tableau 2.6 : Modules de déformation minimal et maximal obtenus des essais de déflectomètre à masse tombante (FWD) pour chaque planche

Planche	Module de déformation (E)	
	(MPa)	
	Min.	Max.
1	131	314
2	169	346
3	123	416
4	103	368
5	133	377
6	136	293
7	136	311
8	198	448
9	186	335
10	93	310

Les résultats pour tous les essais FWD et pour chaque chargement sont montrés en détail à l'Annexe A.4. Il est à noter que les résultats montrent que le module de déformation augmente généralement avec l'augmentation de la charge, ce qui est attendu (Grenier, 2011).

2.3.3 Essai de chargement de plaque (PLT)

Un essai de chargement de plaque (PLT) est réalisé au centre de chaque planche une fois celle-ci construite et compactée. Pour la planche d'essai 10, un deuxième point d'essai est effectué afin de vérifier la variabilité de l'essai. Il est à noter qu'à l'emplacement des essais PLT, un essai FWD a été préalablement effectué (Grenier, 2011).

Deux diamètres de plaque sont utilisés, soit un diamètre de 450 mm et un diamètre de 750 mm. Pour chaque point d'essai, trois chargements sont effectués dans l'ordre chronologique suivant (tiré de Grenier, 2011) :

- 1) Avec plaque 450 mm (contraintes visées de 200, 500 et 1000 kPa)
 - a. Chargement à 165 kN soutenu pendant 3 minutes (premier chargement)
 - b. Trois cycles de chargement à 35 kN (maintien charge 2 min, déchargement, repos 2 minutes)
 - c. Trois cycles de chargement à 80 kN (maintien charge 2 min, déchargement, repos 2 minutes)
 - d. Trois cycles de chargement à 165 kN (maintien charge 2 min, déchargement, repos 2 minutes)

- 2) Avec plaque 750 mm (contraintes visées de 200, 600 et 1000 kPa)
 - a. Chargement à 440 kN soutenu pendant 3 minutes (premier chargement)
 - b. Trois cycles de chargement à 88 kN (maintien charge 2 min., déchargement, repos 2 minutes)
 - c. Trois cycles de chargement à 265 kN (maintien charge 2 min., déchargement, repos 2 minutes)

- d. Trois cycles de chargement à 440 kN (maintien charge 2 min., déchargement, repos 2 minutes)
- 3) Chargement à la rupture avec la plaque de 450 mm (sauf pour les planches 2 et 3)
- a. Chargement jusqu'à une charge maximale d'environ 500 kN. À partir de 300-350 kN jusqu'à la charge maximale, le chargement est effectué par paliers d'environ 50 kN.
 - b. Déchargement suivi période de repos de 2 min.

Tout comme pour les essais FWD, il est à noter qu'avant la séquence de chargement, un préchargement est effectué afin de bien asseoir les plaques de 450 mm et de 750 mm.

Les modules de déformation sont calculés selon l'Équation 3, tel qu'expliqué à la section 1.1.2. Deux types de modules de déformation sont calculés. Il y a le module de déformation élastique (E_E), obtenu en ne considérant que le tassement élastique ($\Delta H_{\text{Elastique}}$) et le module de déformation élasto-plastique (E_{EP}), obtenu en considérant les tassements élastique et plastique (ΔH_{max}).

Les tassements élastique et plastique (tassements maximaux), sont déterminés selon l'équation suivante (Grenier, 2011) :

$$\Delta H_{\text{max}} = H_{\text{max}} - H_{\text{initial}} \quad \text{Équation 18}$$

Où H_{max} est le tassement maximal mesuré et H_{initial} le tassement initial avant le chargement. Selon Grenier (2011), le tassement initial est toujours nul dans le cas des planches d'essai ($H_{\text{initial}}=0$ mm).

Le tassement élastique est quant à lui obtenu en soustrayant du tassement maximal mesuré (H_{\max}) le tassement résiduel mesuré après le déchargement (H_{final}) tel que (Grenier, 2011) :

$$\Delta H_{\text{Elastique}} = H_{\max} - H_{\text{final}} \quad \text{Équation 19}$$

De plus, tout comme pour les essais FWD, le coefficient de poisson est posé à 0,35 (Grenier, 2011).

Les résultats avec la plaque de 750 mm sont jugés plus conséquents en fonction des différentes conditions de compactage que ceux obtenus avec la plaque de 450 mm. En général, les résultats pour la plaque de 450 mm sont significativement plus élevés, ce qui est questionnable quant à leur validité. En effet, la plaque de 450 mm étant de petit diamètre comparativement à la taille des particules d'enrochement, les résultats de l'essai sont plus affectés par la présence de gros blocs à la surface (Grenier, 2011). Le Tableau 2.7 donne le minimum et le maximum des modules de déformation élastiques et élasto-plastiques obtenus pour chaque planche avec la plaque de 750 mm.

Tableau 2.7 : Modules de déformation minimaux et maximaux (E_E et E_{EP}) obtenus des essais de chargement de plaque (plaque de 750 mm)

Planche	Module de déformation (MPa)			
	E_E		E_{EP}	
	Min.	Max.	Min.	Max
1	149	483	89	409
2	124	345	118	327
3	119	413	117	375
4	185	540	154	469
5	184	663	97	318
6	130	356	124	282
7	137	392	132	397
8	136	421	132	391
9	225	478	205	430
10	120	416	115	350

Les résultats pour tous les différents chargements obtenus avec les plaques de 450 mm et 750 mm de diamètre sont montrés en détail à l'annexe A.3. Tout comme pour les essais FWD, les résultats montrent que le module de déformation augmente avec la charge.

Enfin, en comparant les résultats des essais FWD et PLT avec la plaque de 450 mm, Grenier (2011) a montré que les deux essais permettaient d'obtenir des modules similaires, tel qu'illustré à la Figure 2.3 suivante.

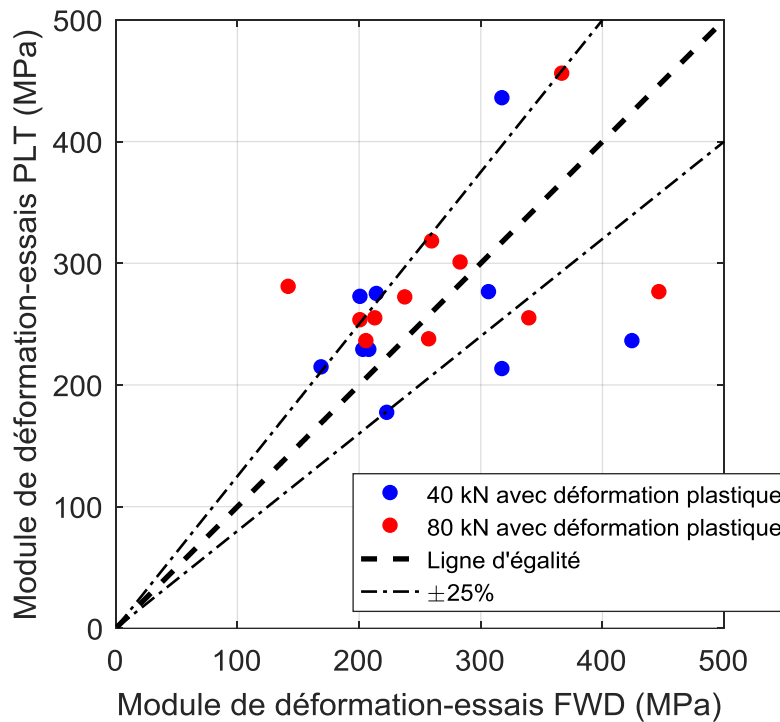


Figure 2.3 : Comparaison des modules de déformation issus des essais PLT et FWD avec la plaque de 450 mm (tiré de Grenier, 2011)

2.3.4 Analyse multi-modale des ondes de surface (MMASW)

Pour chaque planche, des relevés MMASW sont effectués une fois la dernière levée compactée. Pour certaines planches, des essais sont également faits à différentes levées afin de visualiser l'effet du compactage des levées supérieures sur les levées sous-jacentes. C'est le cas des planches 1 et 9 où des profils sont obtenus à chaque levée avant compactage. Pour la planche 3, des profils sont également obtenus après le compactage de la levée 1 et avant le compactage de la levée 4.

Tous les essais MMASW sont réalisés sur l'axe longitudinal des planches d'essai au centre de celles-ci (voir Annexe A.2). La source d'excitation provient de la chute

libre d'un marteau de 15 kg. La hauteur de chute varie entre 0,1 à 0,8 m selon l'épaisseur des enrochements.

Un relevé comprenait 16 capteurs placés à un intervalle de 0.2 m, le premier capteur étant à une distance de 3 m de la source. À chaque 0,4 m le long de l'axe, des profils Vs sont obtenus. En tout, pour chaque relevé MMASW, 28 profils sont déterminés le long de l'axe, couvrant une distance de 10,8 m. Grâce à ces nombreux profils, une carte tomographique est réalisée pour chaque planche. Ces cartes ne sont toutefois pas montrées dans ce mémoire.

L'analyse des résultats des relevés MMASW est effectuée en utilisant des vitesses de cisaillement normalisées pour une contrainte donnée. En effet, la vitesse de cisaillement des ondes est essentiellement fonction de la porosité et de la contrainte de confinement du matériau. Ainsi, afin d'annuler l'effet de profondeur, les vitesses obtenues des relevés sont normalisées pour une contrainte de 100 kPa (Équation 20) (Vannobel *et al.*, 2013). Une contrainte de 100 kPa est jugée représentative des conditions de confinement à la première levée où alors les vitesses mesurées sont considérées représentatives des vitesses mesurées sur un barrage (Verret *et al.*, 2013).

$$V_{s1} = V_s (P_a / \sigma'_v)^{0.25} \quad \text{Équation 20}$$

Où V_{s1} est la vitesse des ondes de cisaillement normalisée (m/s), P_a la pression atmosphérique (100 kPa) et σ'_v la contrainte verticale effective (kPa).

Pour le calcul de la contrainte effective, un poids volumique de 21 kN/m³ et un poids de 22 kN/m³ sont utilisés pour un matériau non-compacté et compacté respectivement (Vannobel *et al.*, 2013).

De plus, afin de faciliter la comparaison des résultats entre les planches d'essai, un profil moyen des vitesses normalisées (V_{s1}) est calculé pour chaque planche. Tous les profils moyens obtenus sont donnés en Annexe A.5. La Figure 2.4 en montre un exemple.

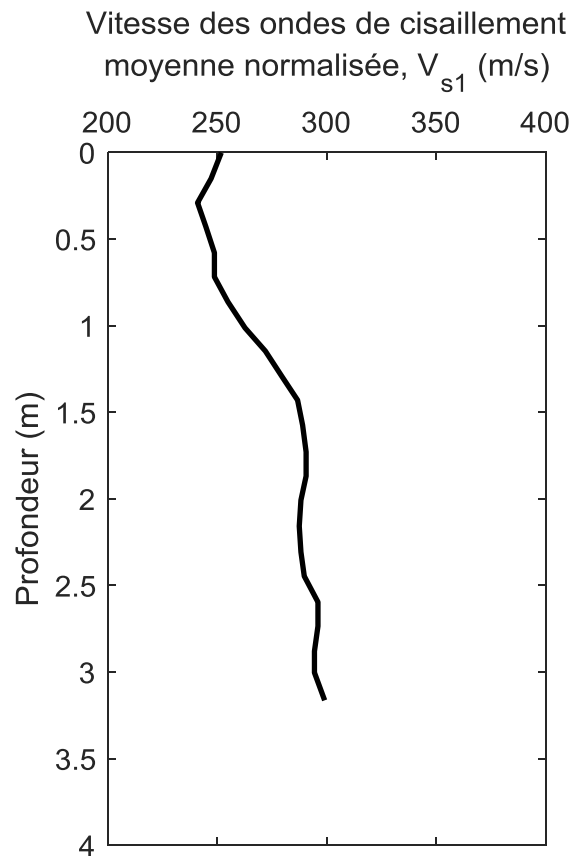


Figure 2.4 : Exemple d'un profil moyen de vitesse des ondes de cisaillement (Planche 1, Levé 4)

À partir des profils moyens de vitesses, il est possible de calculer le module de Young du milieu selon les Équation 4 et Équation 5 présentées à la section 1.1.2. Le coefficient de poisson utilisé pour le calcul du module de Young varie de 0,3 à 0,34 pour les enrochements compactés et de 0,33 à 0,37 pour les enrochements non compactés (Grenier, 2011). Les modules de Young minimal et maximal obtenus pour chaque planche sont donnés au Tableau 2.8 suivant.

Tableau 2.8 : Modules de Young minimal et maximal obtenus à partir des profils moyens des vitesses d'onde de cisaillement normalisées

	Module de Young	
	(Mpa)	
Planche	Min.	Max.
1	344	529
2	371	609
3	434	746
4	368	580
5	331	450
6	368	632
7	423	788
8	460	768
9	333	726
10	342	615

2.3.5 Principales conclusions

Le Tableau 2.9 résume les principales conclusions de l'influence des différentes conditions de mise en place sur la rigidité de l'enrochement pour chaque essai de contrôle. Les conclusions sont issues des résultats obtenus avec la plaque de 750 mm au premier chargement pour les essais PLT alors que pour les essais FWD, les conclusions sont tirées des résultats du chargement à 60 kN (Grenier, 2011).

Tableau 2.9 : Principales conclusions des essais de contrôle sur l'influence des conditions de mise en place étudiées

		Influence sur la rigidité de l'enrochement			
Paramètre de compactage		Masse volumique	PLT	FWD	MMASW
	↑ Poids compacteur	↑	↑	↑	↑
Recharge interne	↑ Nombre de passes	↑	↑	↑	↑
	↓ Diamètre maximale des particules	↑	↑	↓	~
	Arrosage	~	↑	~	~
Recharge externe	↑ Nombre de passes	↑	↑	Plaque	↑
(planches 4 et 5)	↓ Diamètre maximale des particules	↑	↑	trop petite	~

Légende	
↑	Augmentation
↓	Diminution
~	Conclusions mitigées

En somme, les résultats des essais de contrôle montrent que le poids du compacteur et le nombre de passes influencent significativement la rigidité de l'enrochement. Tel qu'attendu, les planches compactées avec 8 passes et un compacteur de 16,3 t ont des modules de déformation plus élevés que les planches compactées en 4 passes avec un compacteur de 10 t. Pour ce qui est de l'influence du diamètre maximal et de l'arrosage, les conclusions sont mitigées. Pour un matériau plus fin, le module de déformation devrait être plus élevé que

pour un matériau grossier. Toutefois, le contraire est observé selon les résultats des essais FWD alors que pour les résultats des relevés MMASW, la différence entre les deux matériaux est très mince. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que la granulométrie des deux types d'enrochement était finalement assez similaire (Lefebvre *et al.*, 2010; Verret *et al.*, 2013). Enfin, pour ce qui est de l'effet de l'arrosage, aucune conclusion claire n'est tirée (Verret *et al.*, 2013).

De plus, les résultats des relevés MMASW ont permis de clairement montrer que l'énergie de compactage des levées supérieures influençait la rigidité des levées inférieures (Bouchard, 2016). Enfin, l'essai FWD, plus rapide que l'essai PLT et moins encombrant, est jugé prometteur puisqu'il permet d'évaluer la variabilité du module de déformation. Toutefois, il est recommandé d'utiliser une plaque de 750 mm plutôt qu'une plaque de 450 mm (Grenier *et al.*, 2013).

Les conclusions du Tableau 2.9 seront revisitées sur la base des résultats de l'analyse du CMV au Chapitre 5 .

Chapitre 3 Méthodologie

L'analyse des données CCC des planches d'essai de la Romaine 2 a pour but d'évaluer le potentiel de cette technologie à établir les modules de déformation utiles à l'analyse de performance d'un barrage. Pour se faire, différents sous-objectifs sont définis (voir section *Objectifs de l'étude*). Ce présent chapitre montre les différentes méthodologies utilisées afin de réaliser les sous objectifs suivants :

- Développer une méthodologie de traitement des données de compactage CCC des planches d'essai.
- Déterminer une valeur de CMV représentative de la rigidité du sol (CMVr) à la fin du compactage pour chaque planche d'essai.
- Relier le paramètre de compactage CMVr avec les résultats des essais *in-situ* réalisés sur les planches d'essai.

3.1 Traitement des données CCC

3.1.1 Triage des données CCC

La technologie de compactage CCC produit un important volume de données. Il est donc important de les trier avant de les traiter. La méthode de tri utilisée est illustrée à la Figure 3.1, puis détaillée dans les sections suivantes.

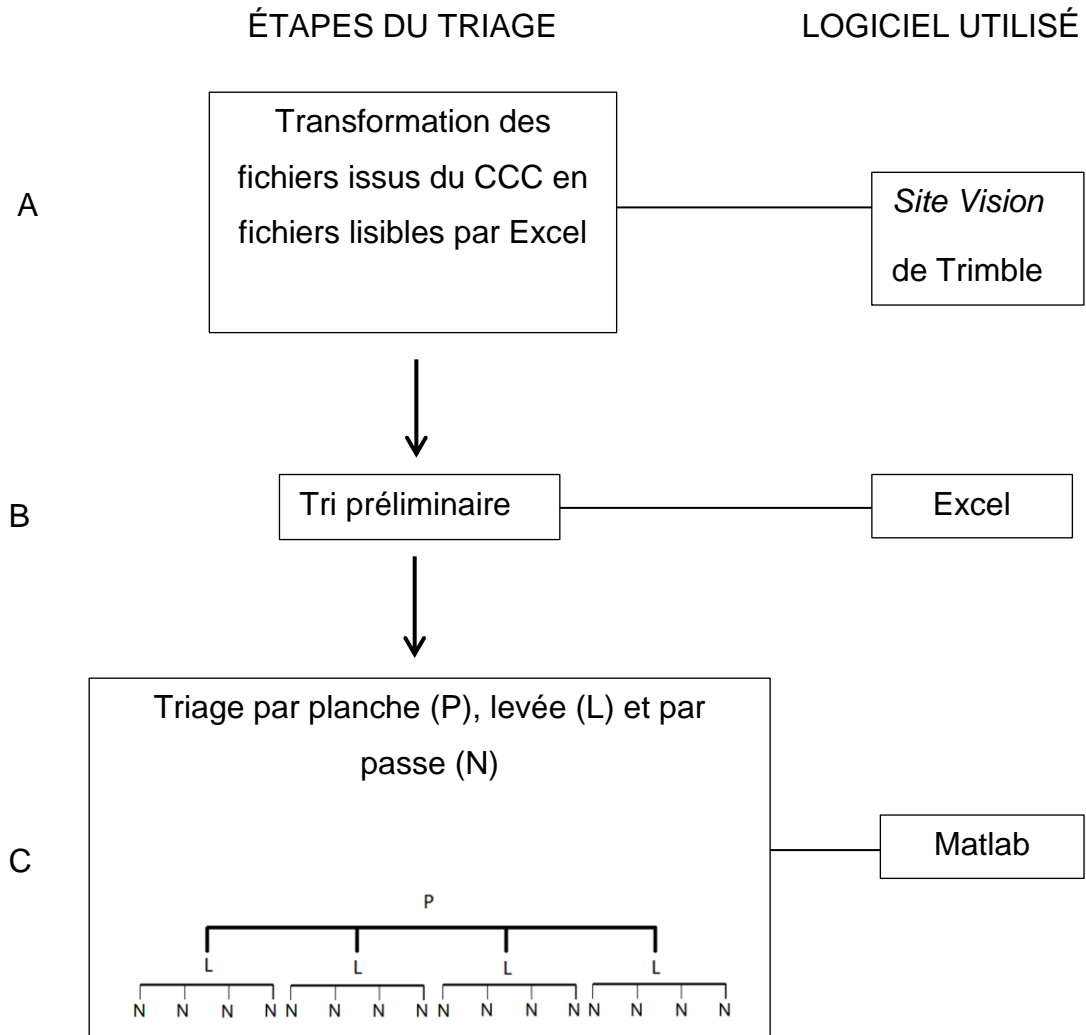


Figure 3.1 : Schématisation de la méthode de triage des données CCC

Tri préliminaire

Les données issues du compactage CCC des planches d'essai sont enregistrées par le compacteur CS-583E Caterpillar et le compacteur HT-3625 Hamm sous forme de fichier *.tag. Ces fichiers sont lisibles seulement à partir du logiciel *Site Vision* de Trimble. À l'aide de ce logiciel, il est toutefois possible d'extraire les fichiers *.tag sous forme de fichiers *.csv, lisibles par le logiciel Excel. Ainsi, pour le

traitement des données CCC, tous les fichiers *.tag ont été transformés en fichiers *.csv à l'aide du logiciel *Site Vision* (étape A de la Figure 3.1).

Par la suite, un tri préliminaire des données est réalisé à partir du logiciel Excel (étape B). Ce tri consiste à supprimer les colonnes des fichiers dont les informations sont jugées non nécessaires et de supprimer les lignes dont les valeurs de CMV ou les coordonnées GPS sont notées N/A (Non Applicable). Une valeur N/A de CMV signifie que la technologie CCC n'est pas activée alors qu'une coordonnée N/A signifie que le GPS n'est pas activé. La Figure B.1 de l'Annexe B.1 montre les étapes du tri préliminaire. Une fois les données triées, l'information retenue comprenait (Tableau 3.1):

Tableau 3.1 : Information retenue après le tri préliminaire des données CCC

Nom colonne	Signification
Time	Date/mois/jour/Heure:minute:seconde de l'enregistrement
Left Y (m)	Coordonnée Y de l'extrémité gauche de rouleau compacteur
Left X (m)	Coordonnée X de l'extrémité gauche de rouleau compacteur
Left Z (m)	Coordonnée Z de l'extrémité gauche de rouleau compacteur
Right Y (m)	Coordonnée Y de l'extrémité droite de rouleau compacteur
Right X (m)	Coordonnée X de l'extrémité droite de rouleau compacteur
Right Z (m)	Coordonnée Z de l'extrémité droite de rouleau compacteur
Speed (km/h)	Vitesse du compacteur instantanée
CMV	Valeur du CMV
RMV	Valeur du RMV
Frequency (Hz)	Fréquence du rouleau d'opération
Amplitude (mm)	Amplitude de la fréquence d'opération
Direction	Direction du compacteur (forward ou reverse)
Tag File Name	Nom du fichier tag

En tout, 19 fichiers Excel sont obtenus. La taille des fichiers va de 2 168 données à 36 591 données. Ces fichiers sont par la suite enregistrés dans Matlab pour la

suite du triage, soit l'étape C comprenant le triage par planche, par levée puis par passe (voir Figure 3.1).

Triage par planche (P)

Les coordonnées GPS des extrémités des planches d'essai sont connues et celles des données également. À partir de ces informations, il est possible d'associer les données à leur planche respective.

Pour se faire, une coordonnée unique (X,Y,Z) est associée à une donnée. Cette coordonnée correspond à la coordonnée centrale située entre les coordonnées (X,Y) de l'extrémité gauche et les coordonnées (X,Y) de l'extrémité droite du compacteur. La coordonnée Z est calculée en faisant la moyenne des coordonnées Z des extrémités gauche et droite.

Par la suite, la méthode des aires des triangles est utilisée afin de déterminer si le point de donnée se situe à l'intérieur de la planche d'essai. Le principe de la méthode est montré à l'Annexe B.2. Enfin, les données sont triées en ordre chronologique afin de faciliter la suite du triage.

La Figure 3.2 montre le résultat du tri par planche pour la planche 6.

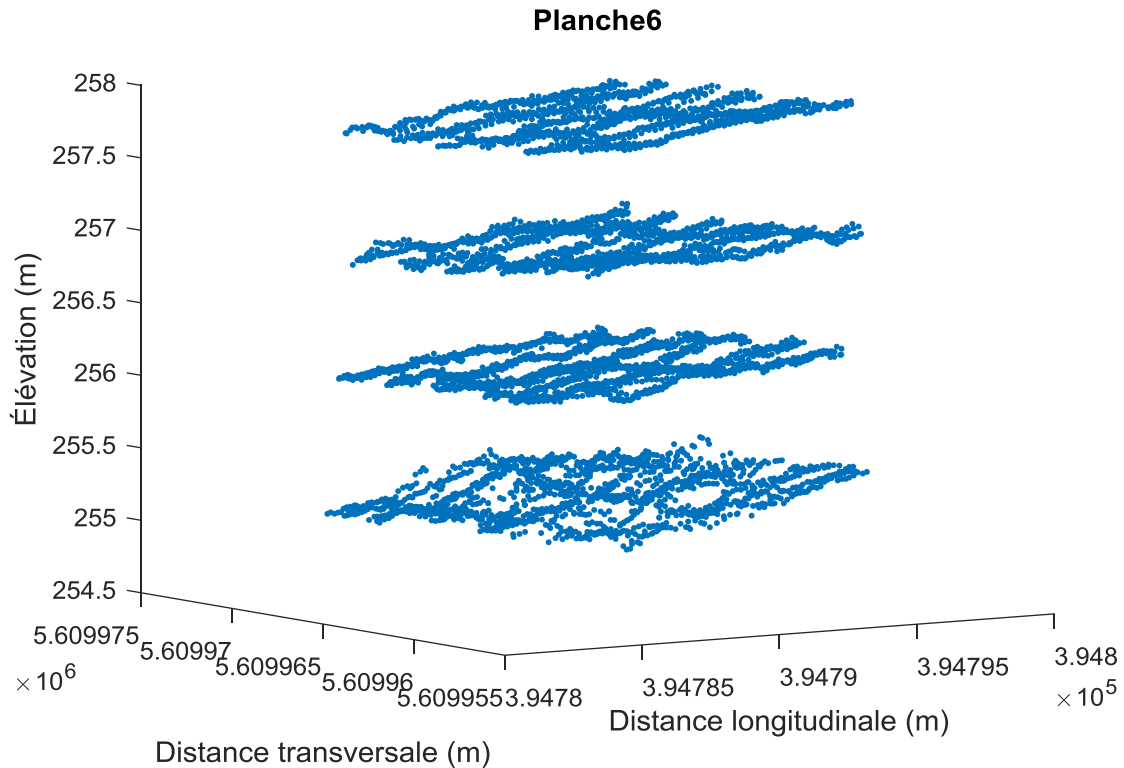


Figure 3.2 : Exemple de données après le triage par planche (planche numéro 6)

Triage par levée (L)

Pour identifier les différentes levées, la différence d'élévation entre deux données successives est mesurée. Lorsque l'écart correspond à une épaisseur de levée plus ou moins un intervalle de tolérance, une nouvelle levée est identifiée. La limite supérieure de tolérance est posée à 0,2 m alors que la limite inférieure est posée à 0,05 m. En plus de tenir compte de l'erreur de précision du GPS, la limite supérieure permet de considérer les irrégularités du terrain alors que la limite inférieure permet de considérer le tassement dû à l'accumulation des passes du compacteur (Verret, 2016).

De plus, afin de faciliter l'interprétation des données, les coordonnées X et Y sont transformées. À la place des valeurs du GPS, les valeurs sont modifiées pour un

système d'axe correspondant aux dimensions des planches d'essai. Ainsi, les coordonnées X et Y ont des intervalles de 0 à 15 m et de 0 à 10 m respectivement. La méthode de transformation des coordonnées est expliquée à l'Annexe B.3.

Les résultats des données triées par levée pour toutes les planches sont donnés en Annexe B.4. La Figure 3.3 en montre un exemple.

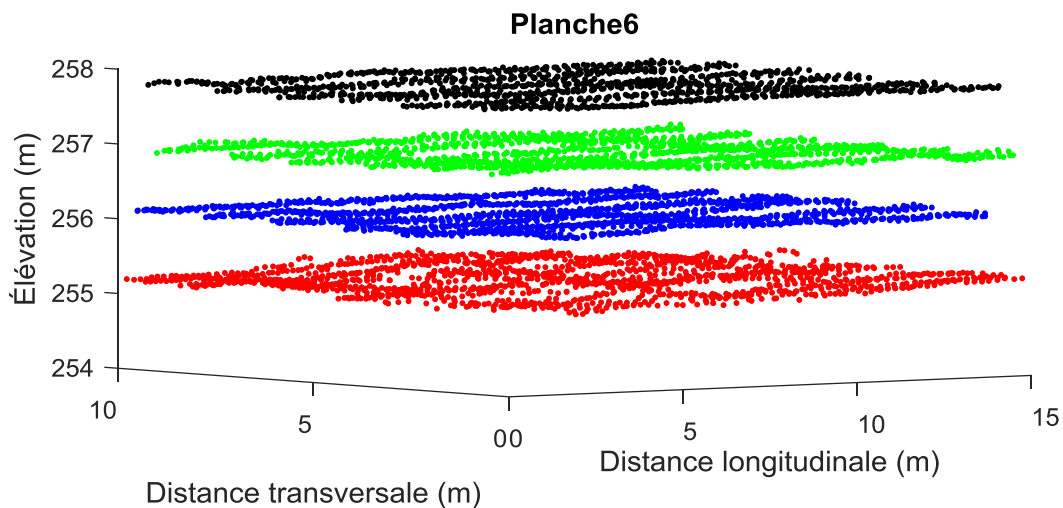


Figure 3.3 : Résultat des données triées par levée pour la planche 6

En générale, les levées pour toutes les planches ont été identifiées. Seule la levée 1 de la planche 1 est manquante.

Il est également à noter que pour certaines planches, la levée de nivellement est identifiée. Cette couche, construite à partir de matériau MG-20, permet le nivellement du terrain sous la planche d'essai.

Triage par passe (N)

Malgré que le compactage des planches d'essai soit très structuré, il n'a pas été possible de définir un critère de détection unique pour toutes les planches. Ainsi, différents critères sont établis pour détecter une passe.

La méthode de triage par passe comprend cinq étapes. Les quatre premières étapes permettent de trier les données selon différents critères de détection de passes, définis au Tableau B.2 de l'annexe B.5. Ces critères sont établis en fonction de la procédure de compactage type, mais aussi suite à l'interprétation des données. Enfin, la cinquième étape consiste à identifier visuellement les passes qui n'ont pas été détectées par les critères de détection. Pour se faire, les données sont illustrées en fonction du temps et de la distance transversale. Une passe est identifiée lorsque toute la distance transversale est traversée par le compacteur. La Figure 3.4 montre la méthode d'identification visuelle des passes.

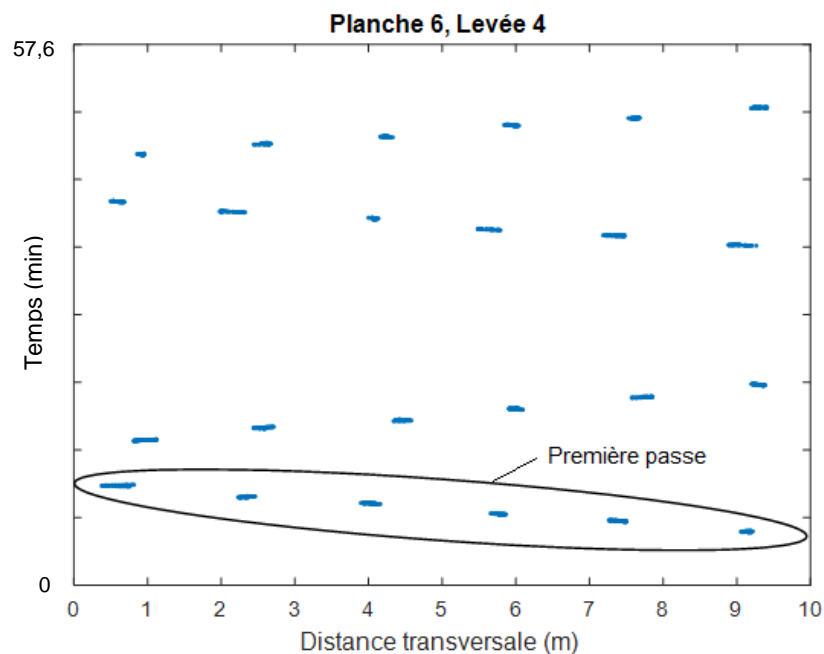


Figure 3.4 : Méthode d'identification visuelle des passes (planche 6, levée 4)

Les résultats du tri par passe pour chaque planche sont donnés à l'Annexe B.6. Selon les résultats, certaines passes sont manquantes ou même des passes supplémentaires sont détectées pour des raisons inconnues. Toutefois, pour toutes les dernières levées, le compte des passes est juste, ce qui est important, sachant que les essais *in-situ* sont effectués une fois la dernière levée compactée.

La Figure 3.5 montre les résultats du triage par passe pour la levée 4 de la planche 6.

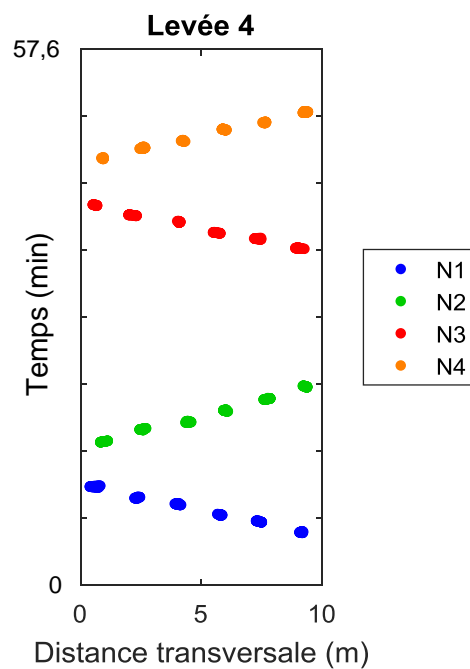


Figure 3.5 : Identification des passes pour la levée 4 de la planche 6

Résultats du triage

Le résultat final du triage des données est une matrice contenant les données par planche, par levée puis par passe, tel qu'illustré à la Figure 3.6.

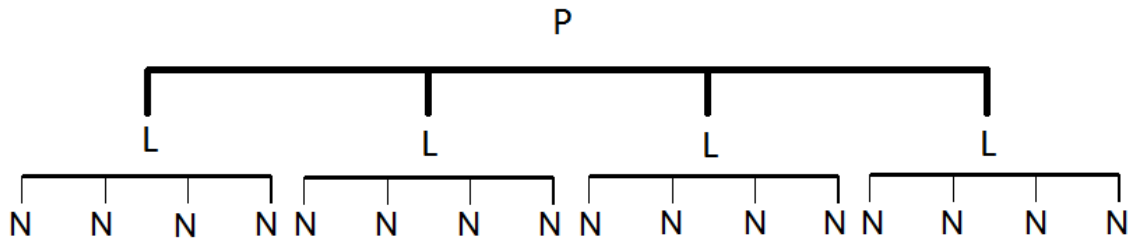


Figure 3.6 : Schématisation du résultat final du triage des données

Le Tableau 3.2 permet de résumer les résultats obtenus suite au triage des données.

Tableau 3.2: Résumé des résultats obtenus suite au triage des données CCC

Planches identifiées	Levés identifiées	Nombre de passes identifiées	Planches identifiées	Levés identifiées	Nombre de passes identifiées
(P)	(L)	(N)	(P)	(L)	(N)
P1	Levée 2	4	P7	Levée 1	6
	Levée 3	4		Levée 2	8
	Levée 4	4		Levée 3	8
P2	Levée 1	4		Levée 4	8
	Levée 2	4	P8	Levée 1	7
	Levée 3	3		Levée 2	8
	Levée 4	4		Levée 3	8
P3	Levée 1	4		Levée 4	8
	Levée 2	5	P9	Couche fond MG-20	N/A
	Levée 3	7		Levée 1	8
	Levée 4	8		Levée 2	8
P4	Couche fond MG-20	N/A		Levée 3	7
	Levée 1	8	Levée 4	8	
	Levée 2	8	P10	Couche fond MG-20	N/A
P5	Couche fond MG-20	N/A		Levée 1	5
	Levée 1	4		Levée 2	4
	Levée 2	4		Levée 3	3
P6	Levée 1	4	Levée 4	4	
	Levée 2	4			
	Levée 3	4			
	Levée 4	4			

3.1.2 Traitement des données CCC

Méthodologie

Une fois les données CCC triées, un traitement des données est réalisé afin de faciliter leur analyse. Le traitement consiste à diviser les planches en section puis à calculer un CMV moyen pour chaque section.

La division des planches selon l'axe transversal est faite en fonction des traces du compacteur. Une trace correspond à un aller ou retour effectué par le compacteur le long de la distance longitudinale de la planche. Pour ce qui est de la dimension longitudinale, la planche est divisée par mètre. Par exemple, pour la planche 6 à la dernière levée, la division est effectuée selon les traces du compacteur à la première passe (Figure 3.7).

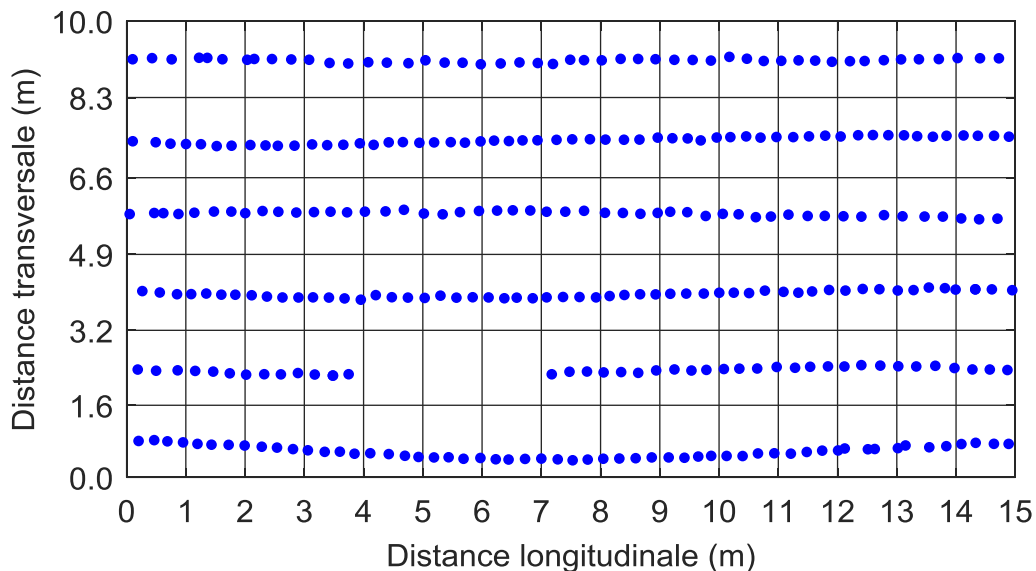


Figure 3.7 : Division de la planche 6 en sections avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

Parfois, certaines sections n'ont aucune donnée CMV. Cela est également observé à l'occasion pour les autres planches. Toutefois, la cause de cette défaillance d'enregistrement est inconnue.

Les divisions pour toutes les planches sont montrées en Annexe B.7. Pour la majorité des planches, la division transversale est réalisée en fonction des traces du compacteur à la première passe. Seules les planches 1 et 8 ont une division en fonction de la deuxième passe et de la cinquième passe respectivement. Ce choix permet de définir des CMV moyens sur l'ensemble de la surface de la planche. Autrement, une division selon les traces de la première passe ne permettait pas de couvrir toute la surface (voir l'Annexe B.8).

Une fois la planche divisée, le CMV moyen pour chaque section est calculé selon l'Équation 21 (Figure 3.8). Il est à noter que seules les valeurs jugées représentatives de la rigidité du sol sont comprises dans le calcul du CMV moyen. En effet, tel qu'expliqué à la section 1.2.2, pour des valeurs élevées de RMV, le compacteur a dépassé son mode *double jump* et alors le signal de l'accéléromètre devient chaotique. Ainsi, les CMV ayant un RMV plus grand que 20 sont écartés du calcul du CMV moyen. Le choix de la valeur seuil de 20 est justifié à la section suivante.

$$CMV \text{ moyen} = \frac{\sum CMV \text{ contenus dans la section}}{\text{nombre de données CMV dans la section}} \quad \text{Équation 21}$$

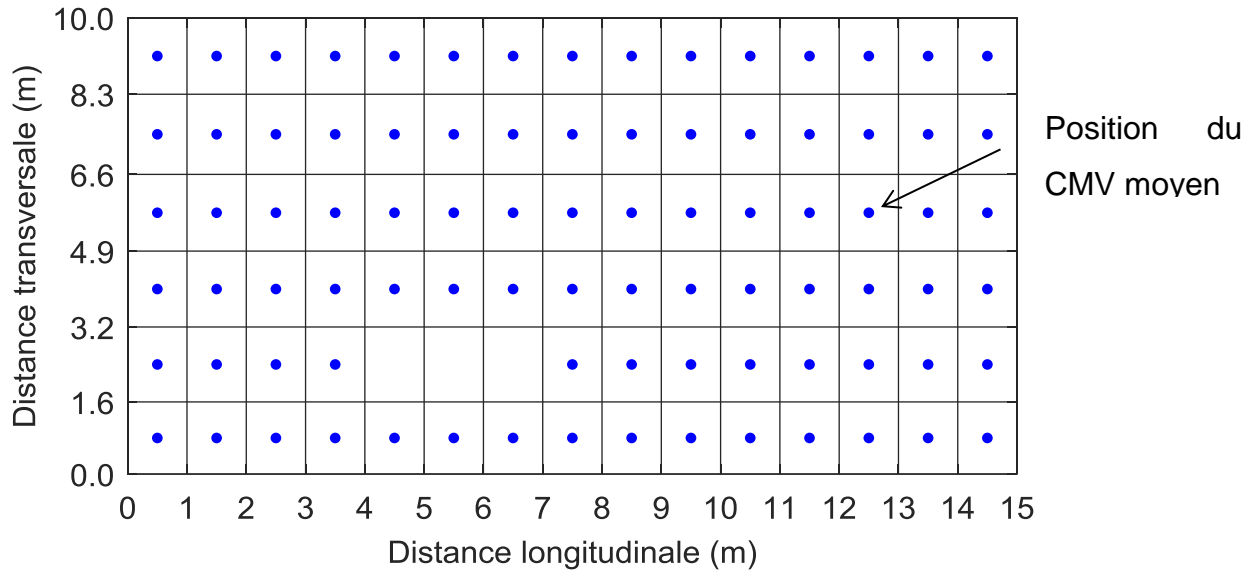


Figure 3.8 : Positions des CMV moyens pour toutes les sections de la dernière levée de la planche 6 à la première passe.

De plus, un système de numérotation des sections est utilisé (Figure 3.9). La numérotation est la même pour toutes les planches.

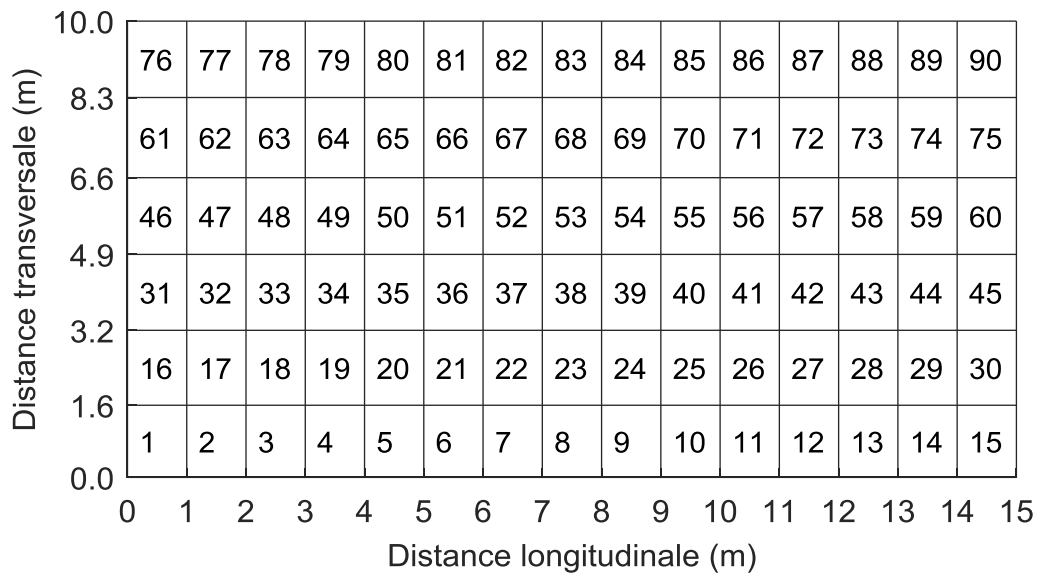


Figure 3.9 : Numérotation des sections (planche 6, dernière levée, première passe)

Enfin, ce traitement est réalisé pour toutes les planches, à chaque levée et pour chaque passe. Ainsi, pour une levée donnée, il est possible d'avoir l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe pour chaque section.

En résumé, une fois les données triées, la méthode de traitement consiste à diviser la planche en sections pour une levée donnée. Par la suite, pour chaque passe, un CMV moyen est mesuré par section. Ce faisant, pour une section donnée, l'évolution du CMV avec le numéro de passe est obtenu. La

Figure 3.10 illustre la méthode de traitement utilisée.

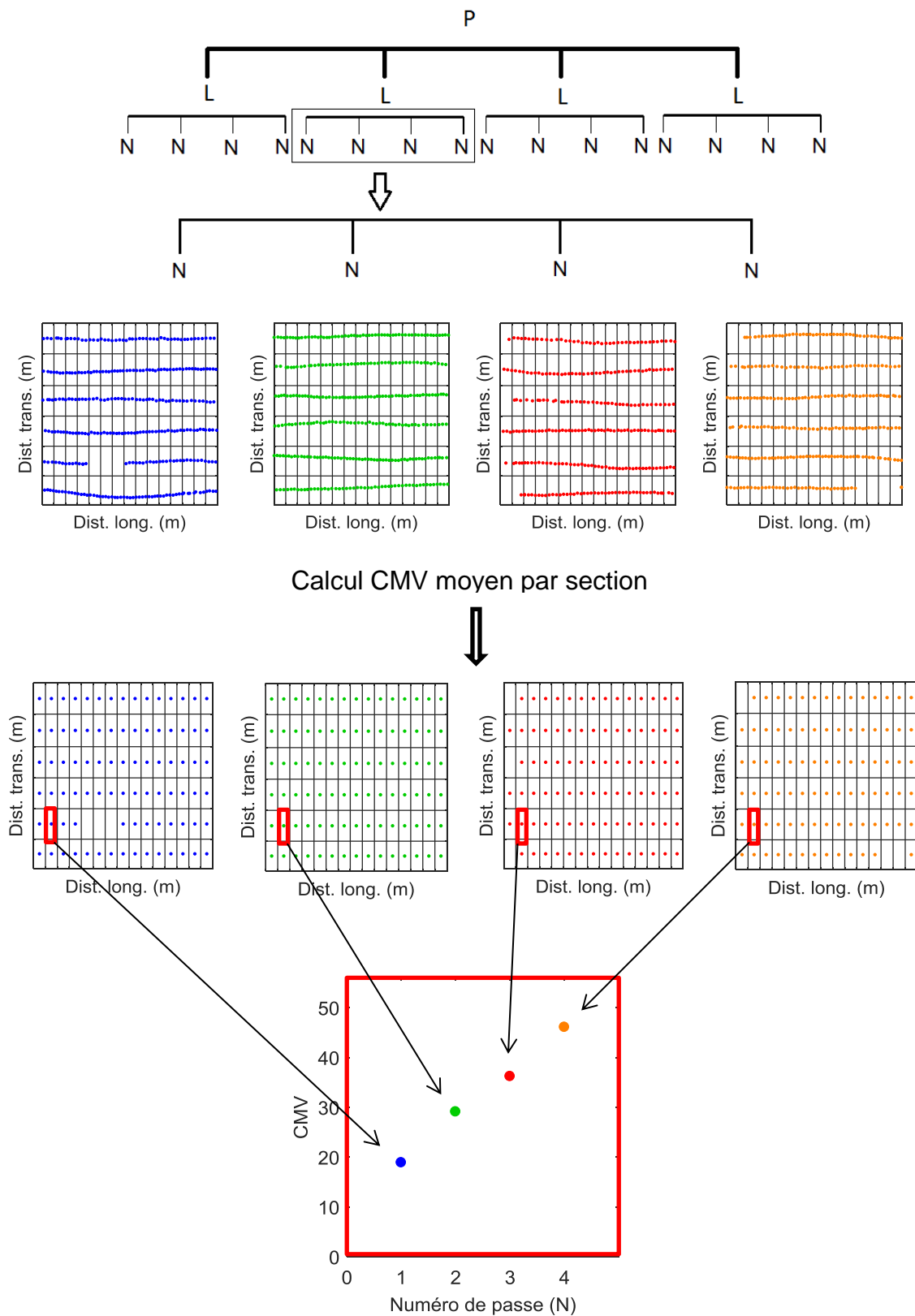


Figure 3.10 : Schématisation de la méthode de traitement utilisée pour les données CCC (P6L4)

Validation de la méthodologie

Tel que mentionné à la section précédente, la valeur seuil de RMV pour laquelle le CMV n'est plus considéré représentatif de la rigidité du sol est posée à 20. Le choix de cette valeur limite est difficile puisque la littérature ne donne pas beaucoup d'information à ce sujet. Tel que discuté à la section 1.2.2, le seul article répertorié est celui de White *et al.* (2008). Les auteurs ont posé une valeur de 17 comme valeur de RMV seuil à partir de laquelle les données CMV ne sont plus représentatives de la rigidité du sol. Les matériaux utilisés étaient du sable uniforme (SP) à du sable bien étalé silteux (SW-SM) et le type de compacteur était un CS-563 Caterpillar d'un poids de 11,3 t. N'ayant trouvée aucune autre valeur de référence, une valeur arbitraire de 20 a donc été posée pour les planches d'essai.

Afin de vérifier que cette valeur seuil ne soit pas trop pénalisante, la distribution des RMV par levée pour toutes les planches est évaluée. En général, les distributions montrent que le choix d'une valeur seuil de 20 n'est pas trop restrictif. Le Tableau 3.3 donne le pourcentage des valeurs éliminées par levée pour toutes les planches.

Tableau 3.3 : Pourcentage du nombre de valeurs éliminées en fonction d'une valeur seuil de RMV de 20 (par levée pour chaque planche).

Planches	Levés			
	1	2	3	4
	%	%	%	%
1	-	41	33	35
2	5	7	8	10
3	6	3	9	7
4	2	1	-	-
5	3	1	-	-
6	13	3	2	1
7	11	4	4	2
8	3	11	9	8
9	6	2	1	3
10	3	2	4	3

Ainsi, pour toutes les planches, moins de 13% des CMV sont rejetés, sauf pour la planche 1 où le pourcentage s'élève à 40,5%. Les histogrammes des RMV pour chaque levée de la planche 1 sont donc évalués et montrés à la Figure 3.11. La barre rouge représente la valeur seuil de 20.

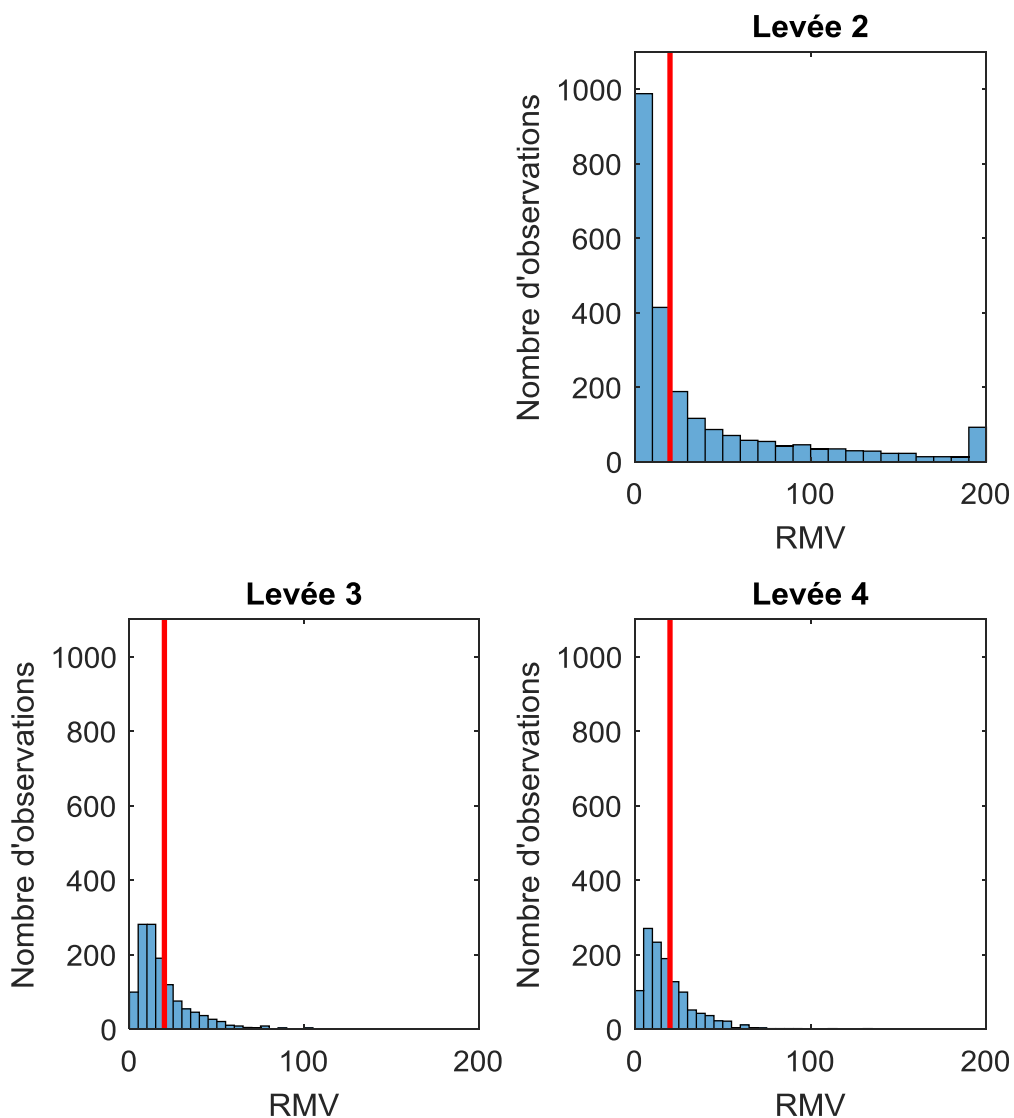


Figure 3.11 : Histogrammes des RMV par levée de la planche 1

La Figure 3.11 montre des valeurs de RMV allant jusqu'à 100 et même jusqu'à 200 pour la deuxième levée. La raison pour laquelle seule la planche 1 obtient des valeurs aussi élevées de RMV n'est pas certaine. Une hypothèse est le type de compacteur. La planche 1 est la seule à avoir été compactée avec le compacteur de 10 t de type CS-583E Caterpillar alors que toutes les autres planches ont été compactées avec le compacteur de 16,3 t de type HT-3625 Hamm.

Tel que vu à la section 1.2.2, le CMV et le RMV sont influencés par le type de compacteur (poids, vitesse, fréquence et amplitude du rouleau) et par le type de sol. Ainsi, un compacteur de 10 t interagit différemment avec de l'enrochement qu'un compacteur de 16,3 t. Il n'est donc pas surprenant d'obtenir des mesures de RMV différentes pour la planche 1. Toutefois, malgré qu'un peu plus du tiers des valeurs CMV soient éliminées, la valeur seuil de 20 est également utilisée pour la planche 1 afin d'appliquer une méthode de traitement homogène pour toutes les planches.

De plus, selon la Figure 3.11, la levée 2 comprend presque deux fois plus d'observations que les levées 3 et 4. En étudiant les statistiques des données de la vitesse et du temps d'acquisition du compacteur, il a été conclu que l'importante densité de données pour la levée 2 est due à une faible vitesse du compacteur (voir Annexe B.9).

Le deuxième élément de la méthodologie à valider est la division des planches (1 m selon l'axe longitudinale par environ 1 m à 2 m selon l'axe transversal). Ce choix est posé afin d'éviter d'altérer la variabilité spatiale du CMV. Afin de vérifier cette hypothèse, les données brutes (CMV brute) et les données traitées (CMV moyen) sont comparées le long d'une trace de compacteur. Pour se faire, les traces sont numérotées allant du bas de la planche (distance transversale de 0 m) au haut de la planche (distance transversale de 10 m), tel qu'illustré à la Figure 3.12.

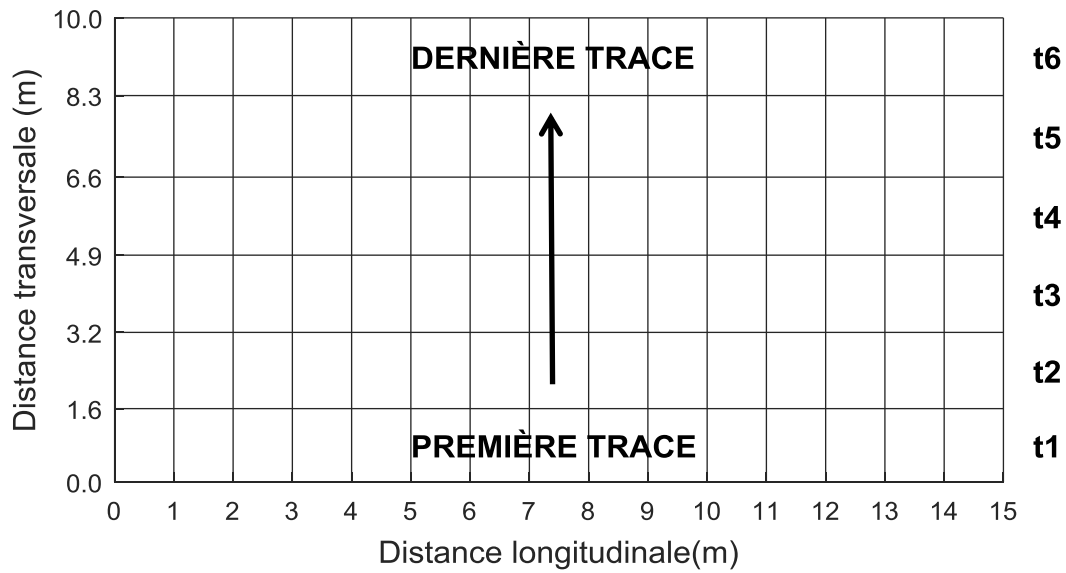


Figure 3.12 : Identification des numéros de traces pour la dernière levée de la planche 6

Ce faisant, il est possible d'évaluer la variabilité spatiale des données brutes et traitées le long de l'axe longitudinale de la planche. La Figure 3.13 montre les résultats pour la dernière levée de la planche 6 avec les données de la première passe.

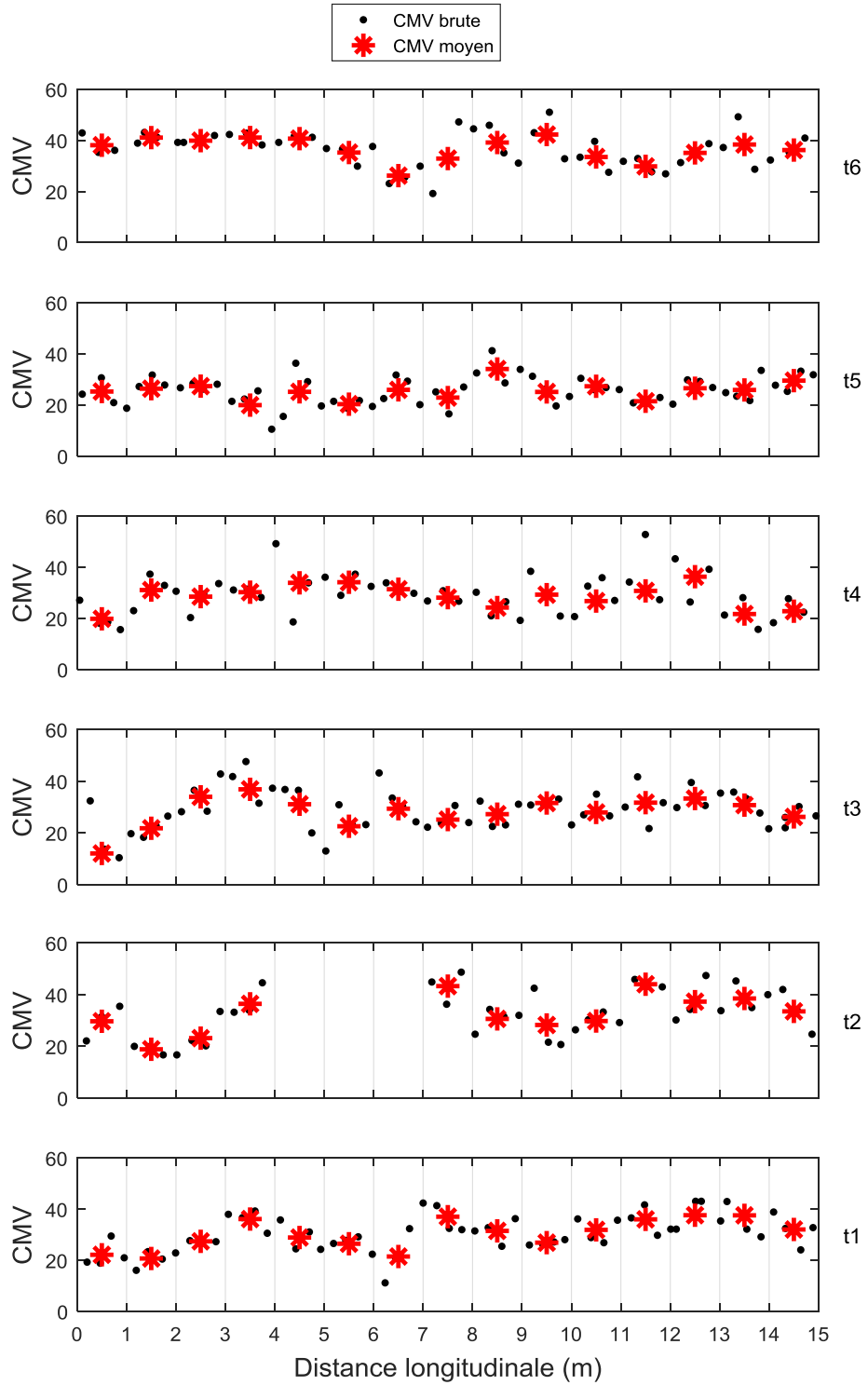


Figure 3.13 : Comparaison de la variation spatiale des données brutes (CMV brute) et des données traitées (CMV moyen) pour toutes les traces de la première passe à la dernière levée de la planche 6.

En général, le CMV moyen représente bien les données brutes. Pour toutes les autres planches, des résultats similaires sont obtenus. Par conséquent, une division par 1 mètre de distance longitudinale permet de ne pas altérer de manière significative la variabilité spatiale du CMV brute.

3.2 Détermination d'un CMV représentatif

Tel que vu à la section 3.1, le traitement des données permet d'obtenir l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe pour une section donnée. Dans le but de relier les données du compactage CCC aux résultats des essais *in-situ*, une valeur de CMV représentative de la rigidité à la fin du compactage (CMV_r) est déterminée pour chaque section.

Pour se faire, la méthode utilisée est de passer une courbe de régression de type gaussien à travers les données. L'équation de la courbe est définie tel que :

$$CMV = CMV_0 + \Delta CMV_f \left[1 - e^{(-N^2/N_{opt}^2)} \right] \quad \text{Équation 22}$$

Où CMV_0 correspond à la valeur théorique du CMV pour une valeur nulle de numéro de passe, ΔCMV_f à l'écart entre le CMV_0 et le plateau atteint par la courbe et N_{opt} au numéro de passe à laquelle le plateau est atteint.

Les paramètres CMV_0 , ΔCMV_f et N_{opt} sont définis à la Figure 3.14 suivante.

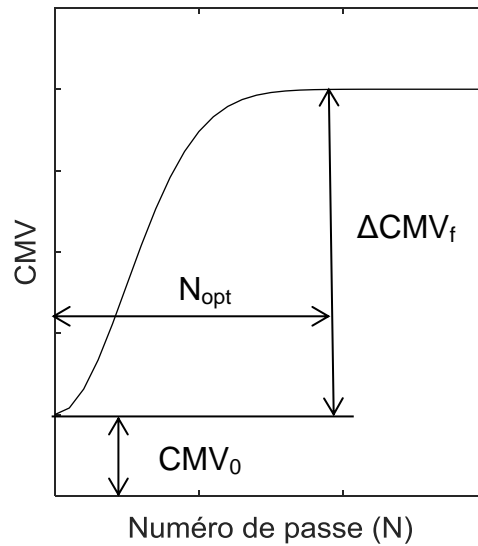


Figure 3.14 : Définition des paramètres de la courbe de régression de type gaussien

Par définition, le CMV augmente avec la rigidité du sol compacté (voir section 1.2.2). Ainsi, le comportement attendu du CMV en fonction du numéro de passe est d'augmenter jusqu'à atteindre un plateau qui correspondrait à la rigidité maximale de l'enrochement. La courbe gaussienne est donc bien adaptée pour reproduire le comportement attendu du CMV. Par conséquent, la valeur du CMV représentatif (CMV_r) est définie comme étant la valeur du plateau atteint par la courbe de régression, c'est-à-dire à la somme des paramètres CMV_0 et ΔCMV_f de l'Équation 22. De plus, le numéro de passe pour lequel l'enrochement atteint sa rigidité maximale est défini comme étant le nombre de passes optimal, soit N_{opt} (Figure 3.15).

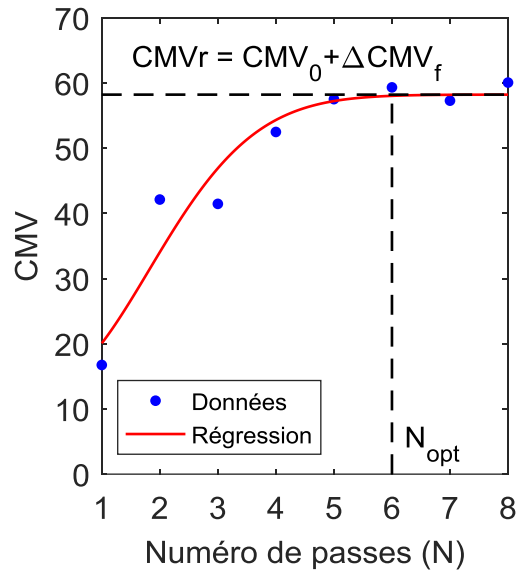


Figure 3.15 : Méthode de détermination d'un CMVr pour une section donnée (section #69 de la dernière levée de la planche 3)

Afin de s'assurer que le plateau est bien atteint à la fin du compactage, la différence entre la valeur de la régression à la dernière passe et la valeur du plateau est évaluée. Un écart de $\pm 5\%$ est toléré, autrement, la valeur du plateau est considérée non représentative de la rigidité à la fin du compactage. Dans ces cas-ci, la valeur de la régression à la dernière passe est utilisée pour définir le CMVr, tel que montré à la Figure 3.16.

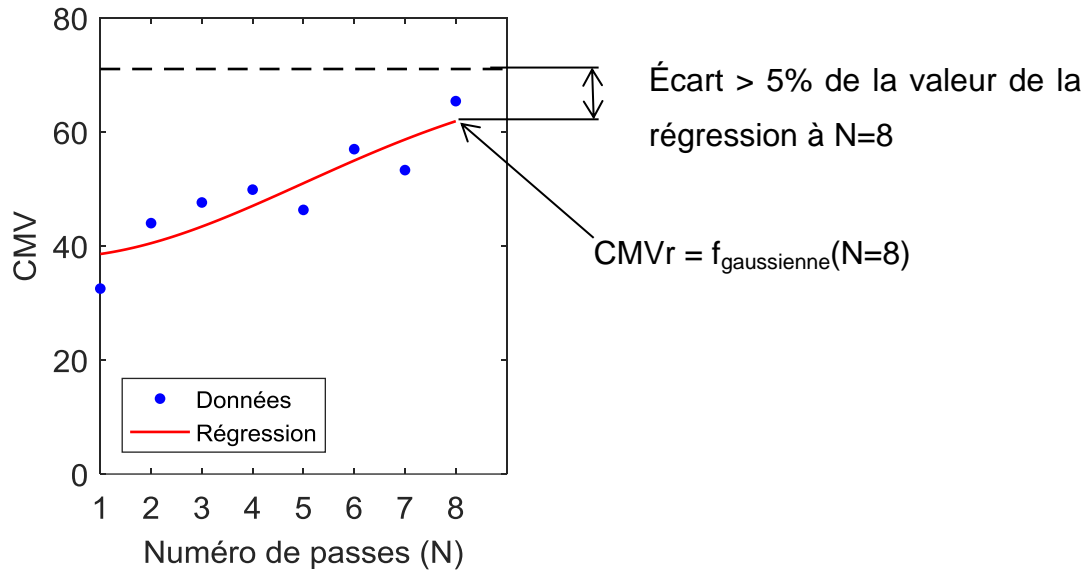


Figure 3.16 : Exemple d'un cas où le CMVr correspond à la valeur de la régression à la dernière passe (planche 4, dernière levée, section #89)

Dans le cas des planches compactées en 8 passes, la courbe devrait atteindre un plateau la majorité du temps (Figure 3.17 (a)). Pour ce qui est des planches compactées en 4 passes, il est probable qu'un plateau soit rarement atteint (Figure 3.17 (b)). Le CMVr devrait donc plus souvent correspondre à la valeur de la régression à la dernière passe.

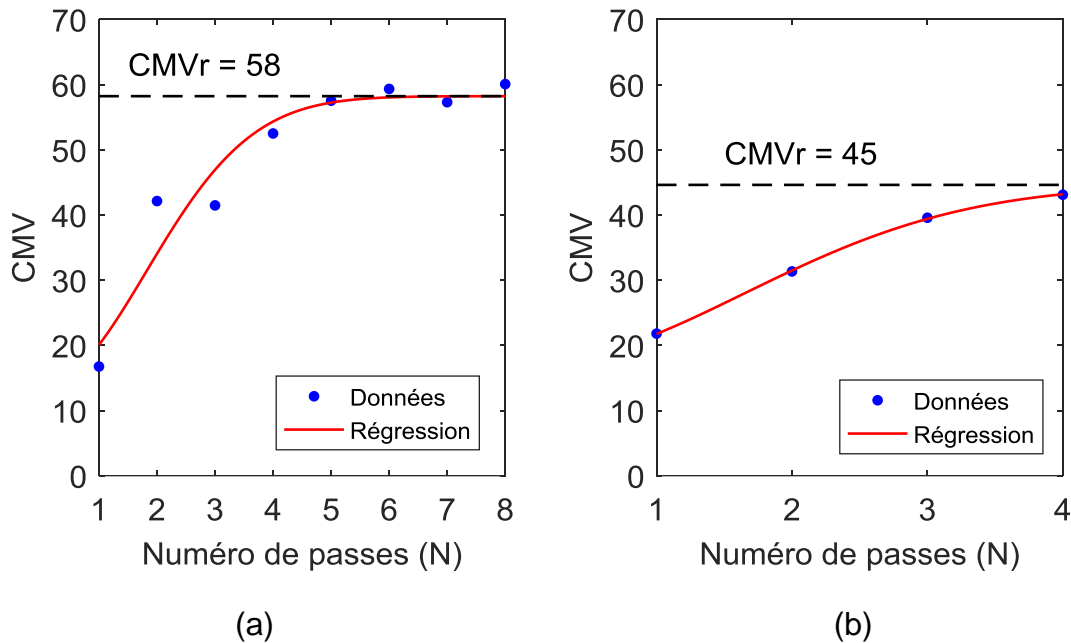


Figure 3.17 : Exemple de détermination du CMVr pour (a) une planche à 8 passes (P3L4, section #69) et (b) une planche à 4 passes (P6L4, section #32)

Enfin, il est probable que dans certains cas, il n'y ait suffisamment pas de données dans une section pour définir un CMVr. En effet, si moins de trois points sont disponibles, il est impossible de calculer une courbe de régression. Aucune valeur de CMVr n'est alors définie (CMVr = Nd) (Figure 3.18 (a)).

De plus, pour une planche compactée en 8 passes, malgré la présence de trois points et plus, si toutes les données proviennent de la 4^e passe en descendant ($N < 5$), la courbe de régression est jugée non représentative de la fin du compactage. Encore une fois, le CMVr est posé comme non-défini (Nd) (voir Figure 3.18 (b)).

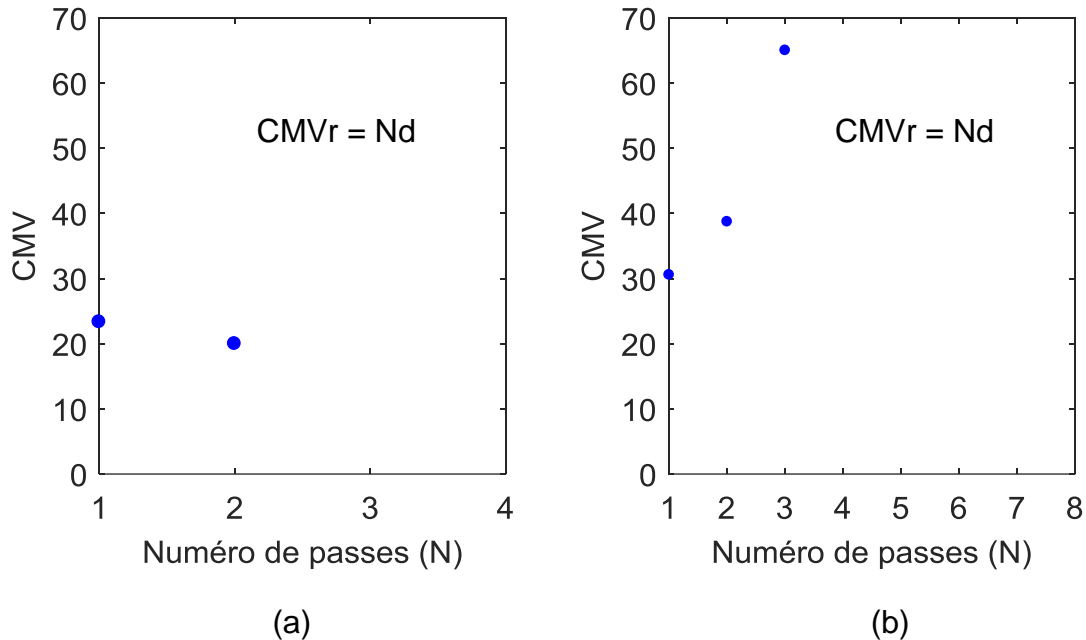


Figure 3.18 : Exemples de cas où aucun CMVr n'est défini (a) Planche 8, dernière levée, section #17 (b) Planche 1, dernière levée, section #64

3.3 Relations entre le CMVr et les modules de déformation obtenus des essais *in-situ*

Les sections suivantes montrent les méthodes utilisées pour relier un module de déformation à un CMVr pour les essais FWD et PLT et les essais MMASW.

3.3.1 Essais FWD et PLT

Pour relier un CMVr au module de déformation issu d'un essai FWD ou PLT, la méthodologie utilisée consiste à calculer la moyenne des CMVr obtenus dans la zone d'influence de l'essai.

Celle-ci est évaluée en fonction du bassin de déflexion de l'essai. Lors des essais FWD, les déflexions sont mesurées sur une distance de 2,4 m à partir du centre de la plaque. Selon les résultats, la majorité des déflexions se produisent entre 0 à 1 000 mm de distance radiale. Le rayon d'influence est donc posé à 1 m pour les essais FWD.

Dans le cas des essais PLT, les déflexions sont seulement mesurées à une distance de 20 mm autour de la plaque. Le bassin de déflexion n'est donc pas connu. Toutefois, l'essai de plaque étant similaire à celui du déflectomètre à masse tombante, la zone d'influence de l'essai PLT est considérée similaire à celle de l'essai FWD. Cependant, les modules des essais PLT sont obtenus avec une plaque de 750 mm alors qu'une plaque de 450 mm est utilisée pour les essais FWD. Le rayon influence est donc ajusté proportionnellement pour une plaque de 750 mm, soit à 1,7 m.

Le CMVr est alors obtenu en calculant la moyenne des CMVr des sections interceptées par le rayon d'influence de l'essai (Figure 3.19).

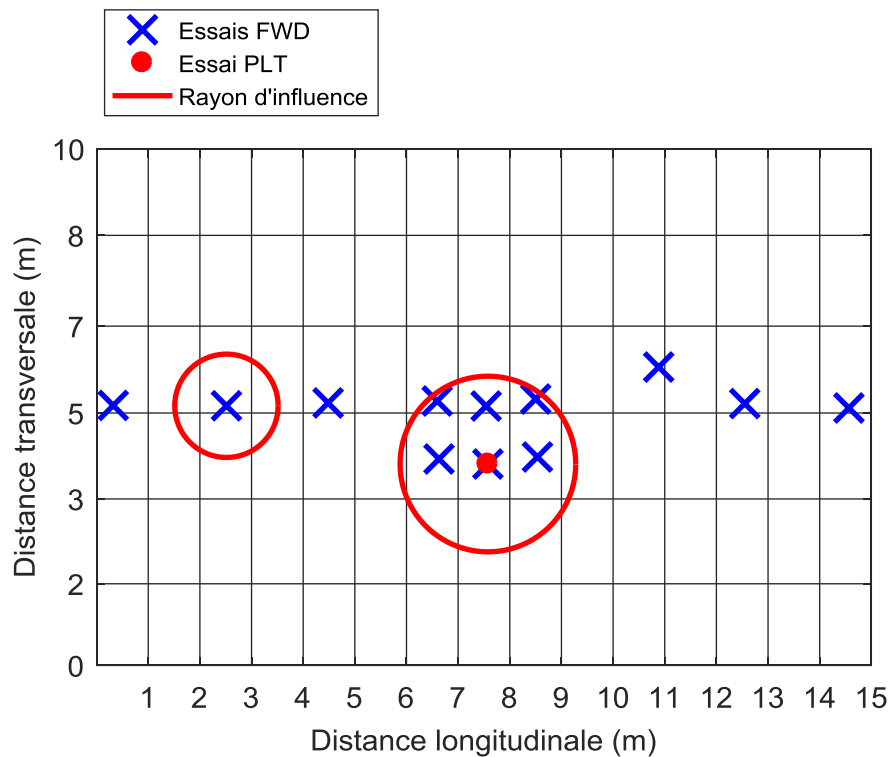


Figure 3.19 : Exemple des rayons d'influence utilisés pour corréler les modules de déformation issus des essais FWD et PLT (Planche 6, Levée 4)

Cette méthode est appliquée à chaque planche pour tous les essais FWD et PLT de façon à obtenir plusieurs couples de données (CMV_r , E_{FWD}) et (CMV_r , E_{PLT}).

3.3.2 Essais MMASW

Tel que vu à la section 2.3.4, 28 profils de vitesse d'ondes de cisaillement sont obtenus par planche. Ces profils sont positionnés le long du relevé MMASW, situé au centre de la planche, soit à une distance transversale de 5m (Figure 3.20). Un profil moyen par planche est calculé en mesurant la moyenne des 28 profils.

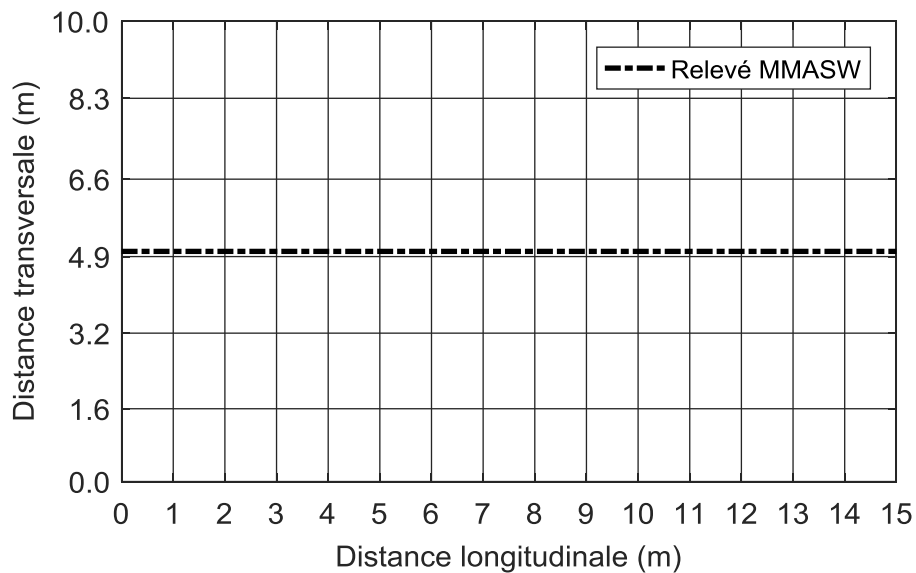


Figure 3.20 : Position du relevé MMASW (planche 6)

À partir des valeurs du profil moyen, le module de Young est calculé à l'aide des Équation 4 et Équation 5 de la section 1.1.2. Afin d'être conséquent avec la profondeur d'influence du compacteur, seules les vitesses obtenues jusqu'à une profondeur de 1,5 m sont utilisées pour le calcul du module de Young, tel qu'illustré à la Figure 3.21.

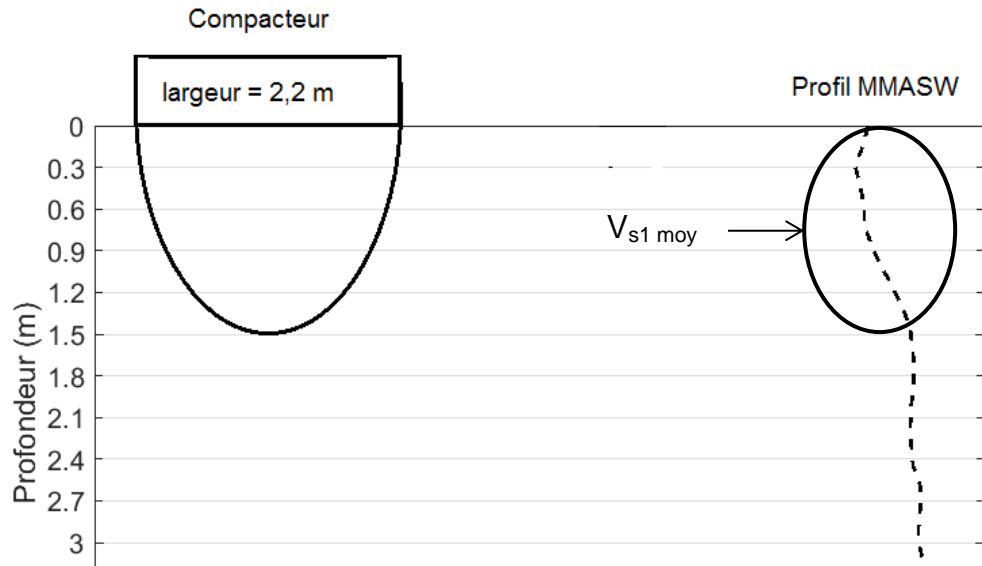


Figure 3.21 : Profondeur d'influence utilisée pour le calcul du module de Young

Enfin, le CMV_r relié au module de Young correspond à la moyenne des CMV_r situées dans la zone d'influence du relevé MMASW. Selon Bouchard (2016), les profils V_s sont représentatifs d'un volume sous les capteurs et non directement au droit des capteurs (Figure 3.22).

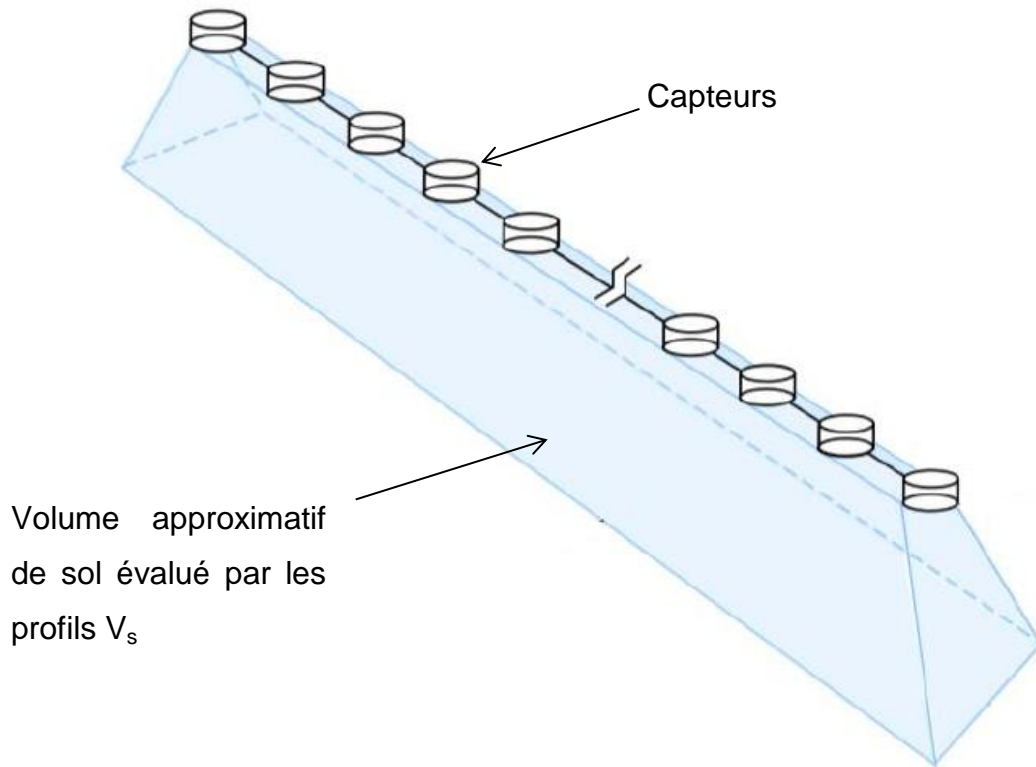


Figure 3.22 : Volume de sol approximatif impliqué lors d'un essai MMASW (modifié de Bouchard, 2016)

Toutefois, il est difficile d'évaluer le volume de sol impliqué lors d'un essai MMASW (Bouchard, 2016). Une distance arbitraire de 0,5 m de distance de part et d'autre du relevé MMASW a donc été posée afin de délimiter la zone d'influence de l'essai (Figure 3.23).

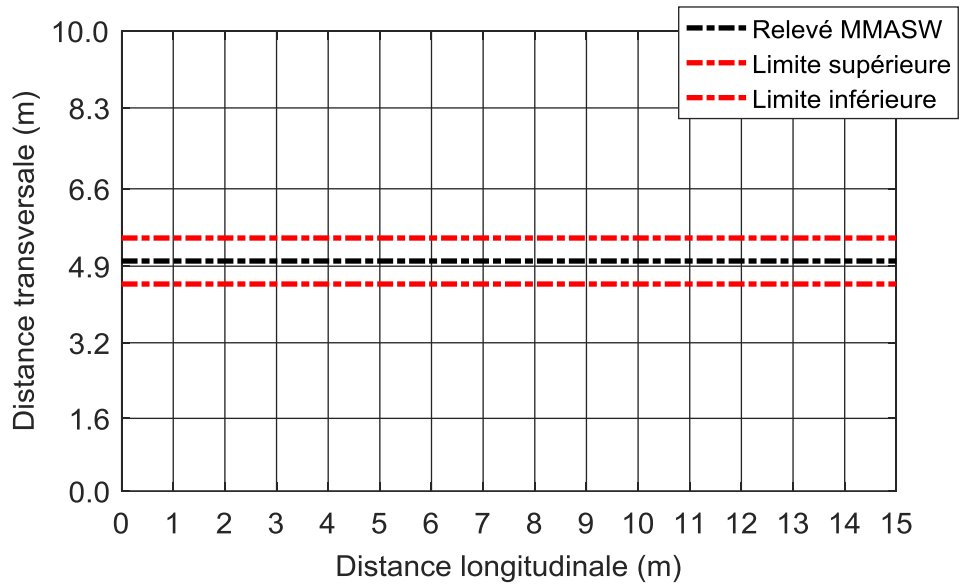


Figure 3.23 : Zone d'influence du relevé MMASW (planche 6)

Ainsi, le CMV_r relié au module de Young est obtenu en mesurant la moyenne des CMV_r contenus dans les sections interceptées par les limites supérieure et inférieure de la zone d'influence (lignes pointillées rouges à la Figure 3.23)

Cette méthode est appliquée pour toutes les planche de façon à obtenir un couple de valeurs (CMV_r , E_{MMASW}) par planche.

Chapitre 4 Résultats

Le présent chapitre montre les résultats obtenus correspondant aux objectifs spécifiques suivants :

- Déterminer une valeur de CMV représentative de la rigidité du sol (CMVr) à la fin du compactage pour chaque planche d'essai.
- Évaluer l'influence des conditions de compactage à l'aide du CMVr.
- Relier le paramètre de compactage CMVr avec les résultats des essais *in-situ* réalisés sur les planches d'essai.

En premier lieu, l'évolution du paramètre CMV avec le numéro de passe est évaluée afin de vérifier si elle correspond au comportement attendu (voir section 3.2). Par la suite, les CMV représentatifs (CMVr) sont déterminés et analysés pour établir l'influence des conditions de compactage sur la rigidité de l'enrochement. Enfin, les relations obtenues entre les CMVr et les modules de déformation des essais *in-situ* sont donnés.

4.1 Évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe

Suite au traitement des données CCC, le CMV est obtenu en fonction du numéro de passe pour chaque section à chaque levée pour toutes les planches (voir

Figure 3.10 de la section 3.1.2). Afin d'évaluer si l'évolution du paramètre CMV correspond au comportement attendu, cette section présente des exemples pour des planches compactées en 4 passes et en 8 passes. Seuls les résultats issus des dernières levées sont montrés, puisque ce sont ceux d'intérêt pour la détermination du CMV représentatif de la rigidité à la fin du compactage (CMVr).

4.1.1 Planches compactées en 4 passes

La Figure 4.1 montre l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe pour différentes sections de planches compactées en 4 passes.

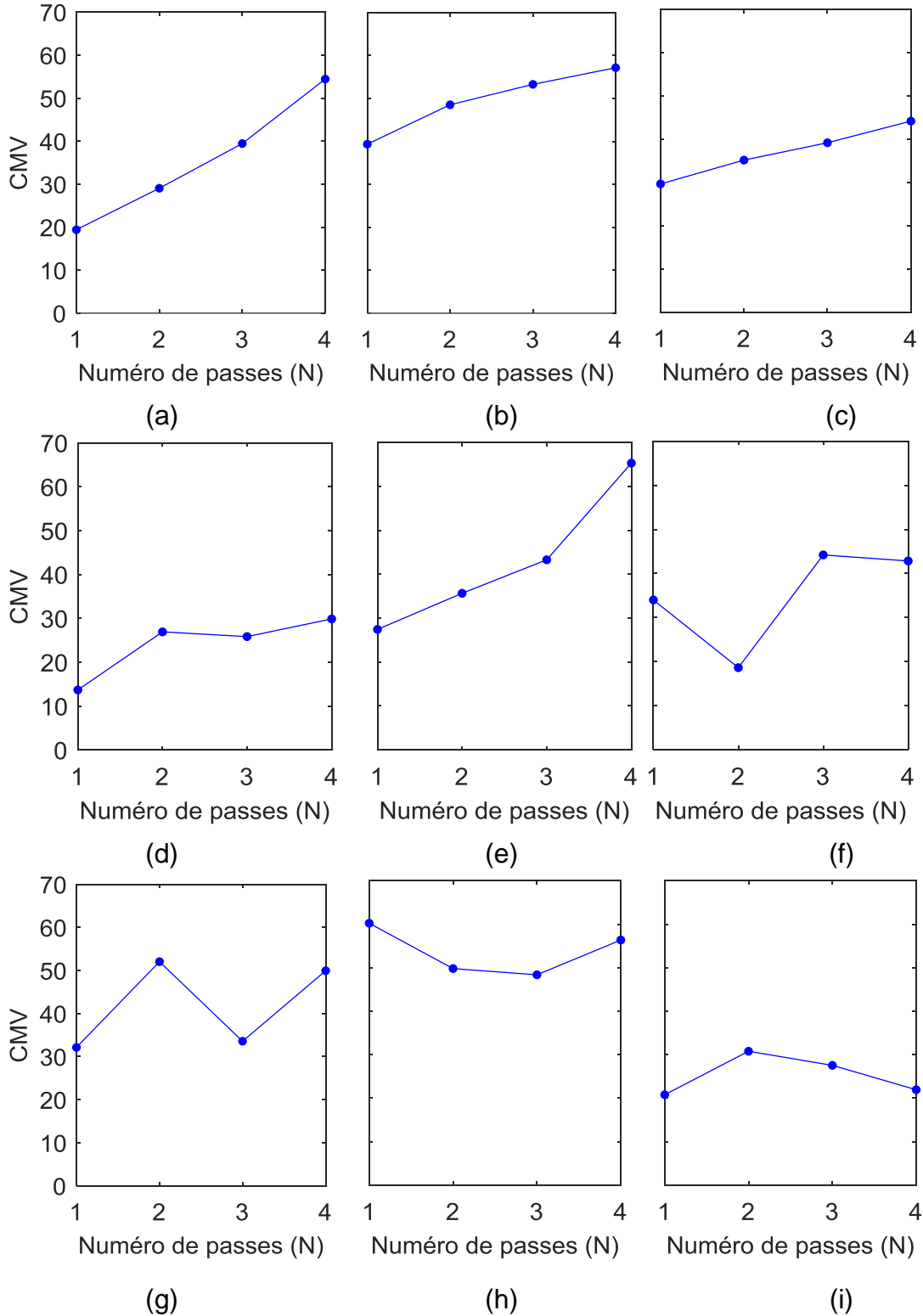


Figure 4.1 : Exemples d'évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe (a) P2L4, section #88, (b) P5L2, section #69, (c) P10L4, section #10, (d) P1L4, section #78, (e) P6L3, section #3, (f) P6L4, section #33, (g) P10L4, section #78, (h) P2L4, section #63 et (i) P1L4, section #81

Il apparaît que le CMV n'adopte pas toujours le même comportement. En effet, pour certaines sections, le CMV augmente avec le numéro de passe, tel qu'attendu ((a) à (e)) alors que pour d'autres, le CMV tend à augmenter, mais avec beaucoup de variation ((f) et (g)). De plus, dans certains cas, le CMV semble diminuer légèrement avec le numéro de passe ((h) et (i)).

Afin d'évaluer en général le comportement du CMV en fonction du numéro de passe, la distribution statistique du paramètre CMV est évaluée pour chaque passe. Pour se faire, l'outil de la boîte à moustache est utilisé, tel que montré à la Figure 4.2 pour la planche 6. La ligne rouge représente la médiane des CMV, les limites supérieure et inférieure de la boîte correspondent respectivement au 25^e (Q1) et 75^e (Q3) percentile de la distribution. Les limites supérieure et inférieure de la moustache correspondent au minimum et au maximum de la distribution. Les minimum et maximum sont définis comme étant 1,5 fois l'écart interquartile (écart entre le 75^e et le 25^e percentile) de part et d'autre des limites inférieure et supérieure de la boîte. Enfin, les croix rouges correspondent aux données se retrouvant à l'extérieur de la moustache, considérées comme des valeurs extrêmes à la distribution. La tendance moyenne du CMV est également montrée et superposée aux boîtes à moustache (trait avec points rouges).

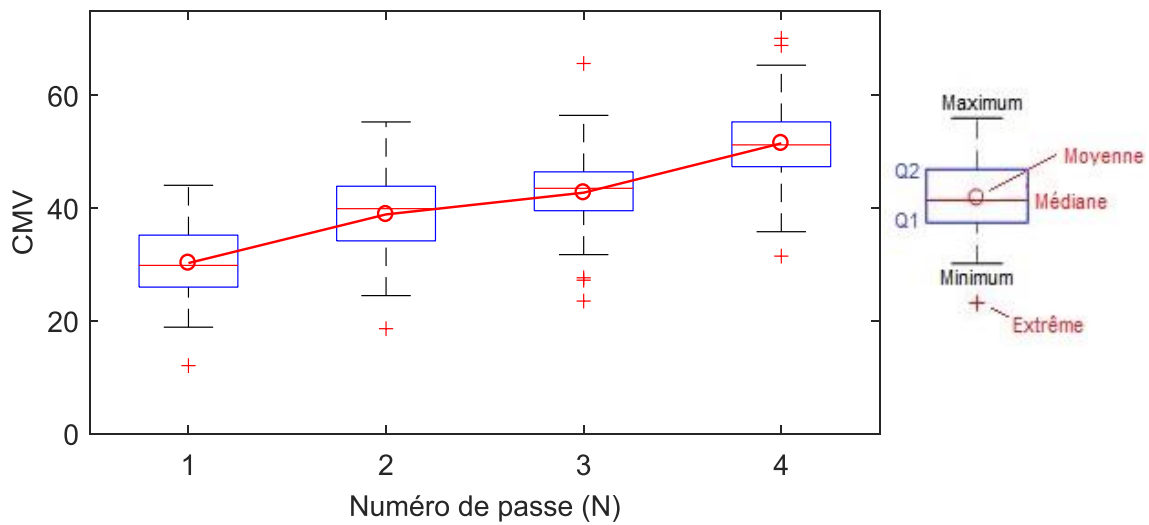


Figure 4.2 : Tendance générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes (P6L4)

Pour chaque numéro de passe, la distribution des CMV est assez homogène autour de la médiane puisque la boîte à moustache n'est pas très étalée. En évaluant la tendance moyenne, il est possible de dire qu'en général, le CMV augmente avec le numéro de passe et n'atteint pas nécessairement de plateau, tel qu'attendu. Pour les autres planches, des résultats similaires sont obtenus (voir Annexe C.1). Seule la planche 2 montre un comportement différent. En effet, entre la première passe et la deuxième passe, les valeurs de CMV augmentent rapidement, puis elles semblent se stabiliser (Figure 4.3).

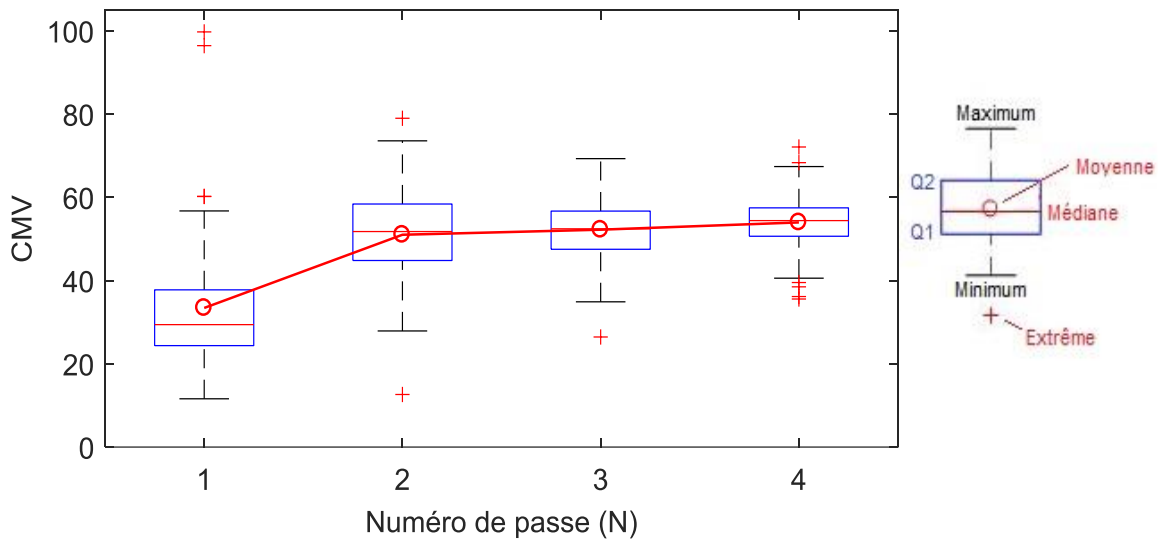


Figure 4.3 : Tendance générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes (P2L4)

4.1.2 Planches compactées avec 8 passes

La Figure 4.4 montre divers exemples du CMV en fonction du numéro de passe pour différentes sections de planches compactées en 8 passes.

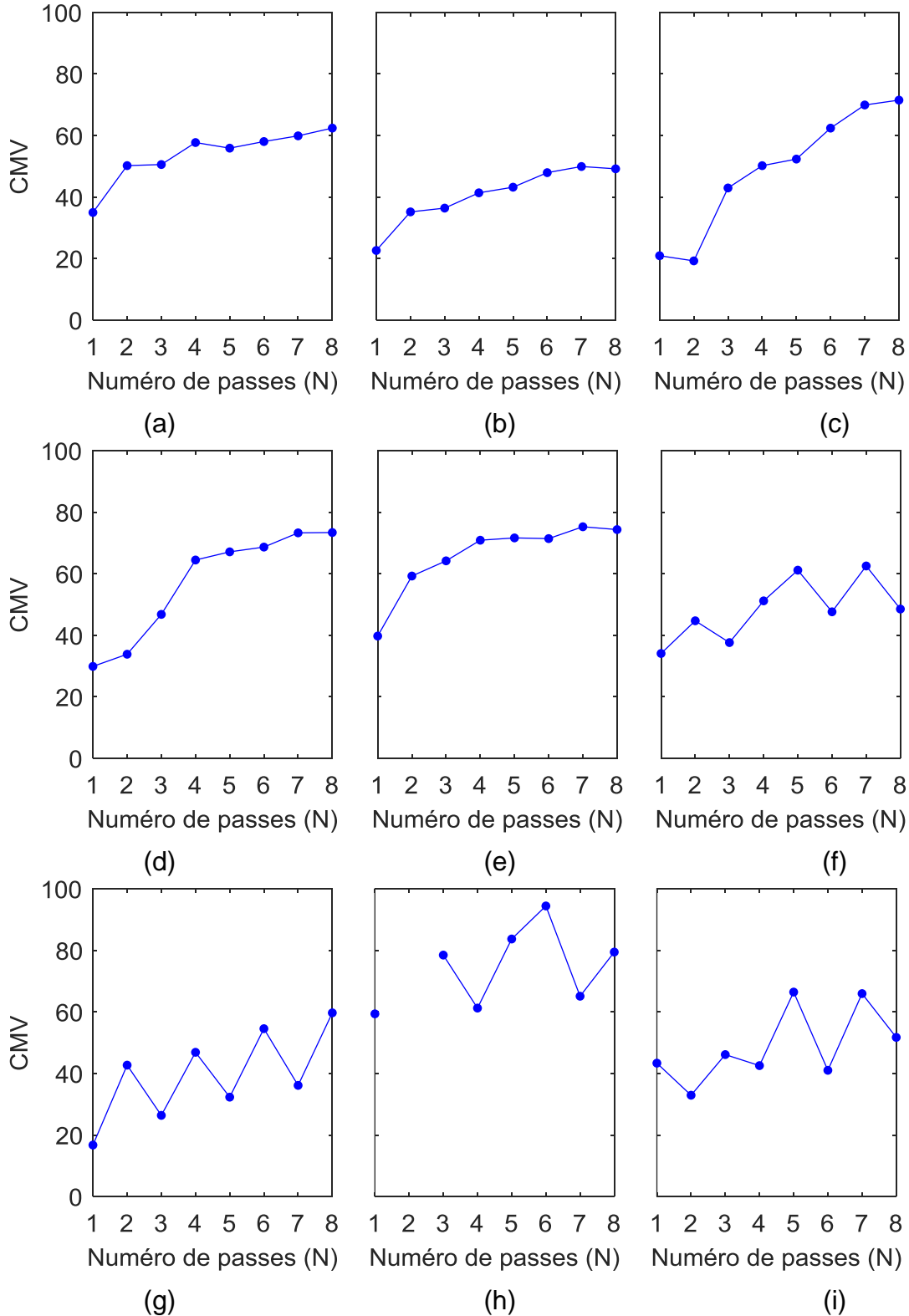


Figure 4.4 : Exemples d'évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe (a) P4L2, section #29, (b) P7L4, section #90, (c) P3L4, section #84, (d) P8L4, section #11, (e) P9L4, section #90, (f) P4L2, section #3 (g) P3L4, section #57, (h) P8L4, section #67 et (i) P7L4, section #60

Tout comme pour les planches compactées en 4 passes, la Figure 4.4 montre différents comportements du CMV en fonction du numéro de passe. Les figures (a) à (e) montrent une augmentation graduelle du CMV jusqu'à l'atteinte d'un plateau, tel qu'attendu. Parfois, les valeurs de CMV oscillent, mais la tendance montre tout de même une augmentation globale du CMV avec le numéro de passe ((f) et (g)). Enfin, certains exemples montrent un comportement plutôt erratique, où une importante variation est observée ((h) et (i)).

Afin d'évaluer la tendance générale du CMV, la même approche utilisée pour les planches compactées en 4 passes est réalisée (Figure 4.5).

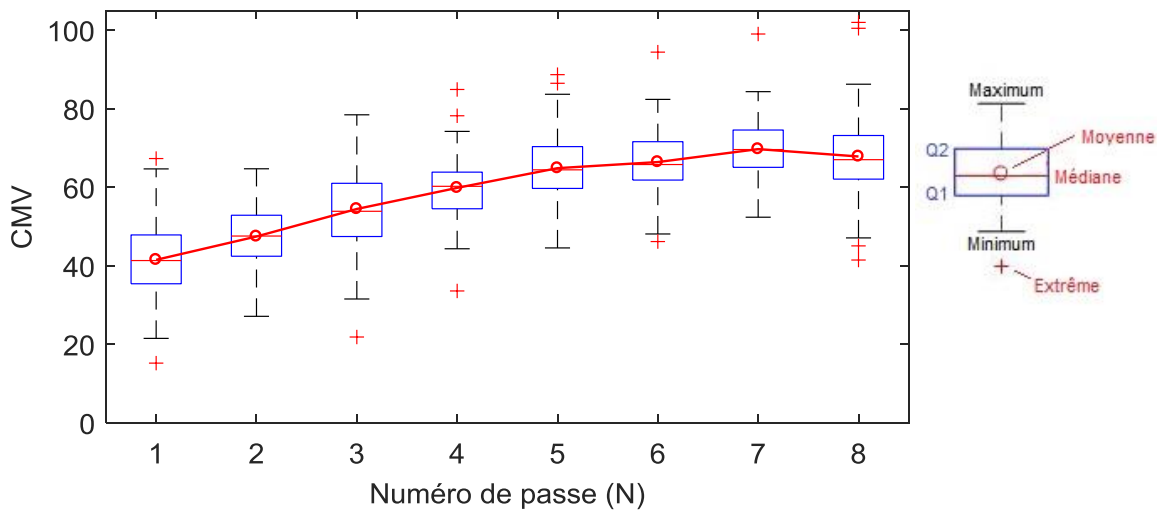


Figure 4.5 : Tendence générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes (P8L4)

En moyenne, le CMV augmente avec le numéro de passe avec un taux plus important aux premières passes qu'aux dernières passes, supposant l'atteinte d'un plateau. De plus, les boîtes à moustache montrent des distributions plutôt concentrées autour de leur médiane. Seules quelques observations considérées extrêmes à la distribution sont observées (croix rouges).

Pour les autres planches compactées en 8 passes, des résultats similaires sont obtenus (voir Annexe C.1). Ainsi, en général, l'évolution du CMV avec le nombre de passes correspond au comportement attendu.

4.2 Détermination d'un CMV représentatif

Cette section montre les résultats obtenus suite à l'application de la méthode de détermination d'un CMVr définie à la section 3.2 de ce mémoire. En premier lieu, des exemples sont donnés. Par la suite, afin d'évaluer globalement les résultats, une analyse statistique des résultats est présentée.

4.2.1 Résultats typiques

Tel que montré à la section 3.2 de ce mémoire, un CMVr est calculé pour chaque section de chacune des dernières levées de toutes les planches. Le CMVr est obtenu par régression, en utilisant une équation de type gaussienne. Le type gaussien est favorisé puisque sa forme générale s'apparente au comportement attendu du CMV en fonction du numéro de passe. Lorsque le nombre de données n'est pas suffisant pour calculer une courbe de régression, aucun CMVr n'est défini (CMVr =Nd).

Pour chaque courbe de régression, un coefficient de régression est obtenu, défini tel que :

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad \text{Équation 23}$$

Où

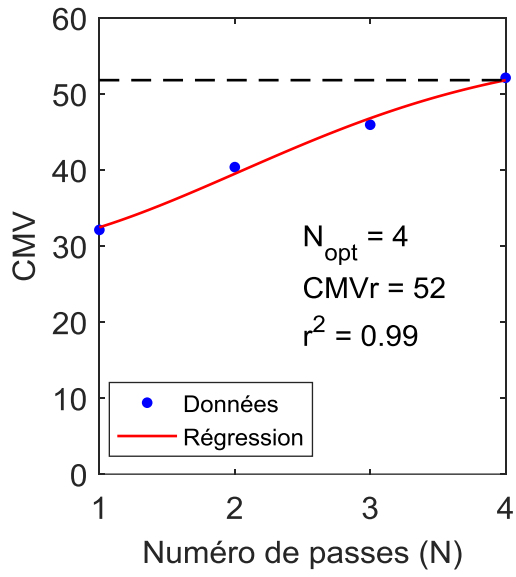
$$SSR = \sum (y_i - f(x_i))^2 \quad \text{Équation 24}$$

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Équation 25}$$

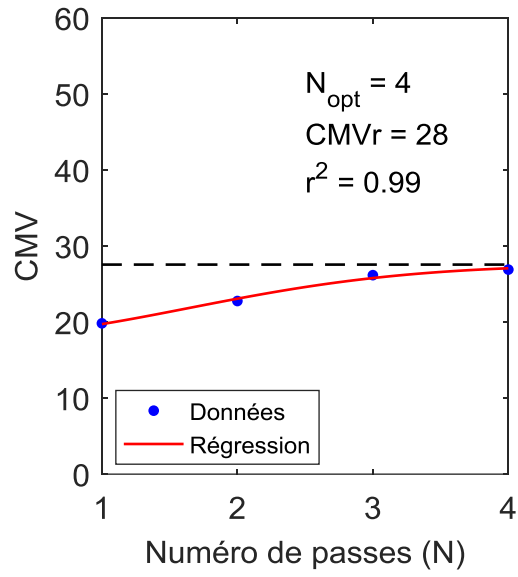
Où SSR correspond à la somme des résidus au carré (sum of the square residuals), SST à la somme de l'écart entre les valeurs et leur moyenne (total sum of square), y_i correspond à la valeur du CMV observé, $f(x_i)$ à la valeur de la régression à une passe donnée x_i et \bar{y}_i à la moyenne des CMV observés.

Ainsi, par définition, un coefficient de régression proche de 0 signifie que le modèle gaussien est similaire à un modèle de type $y = \text{constante}$. D'un autre côté, un coefficient élevé signifie que le comportement du CMV est celui attendu, il est donc bien représenté par l'équation gaussienne.

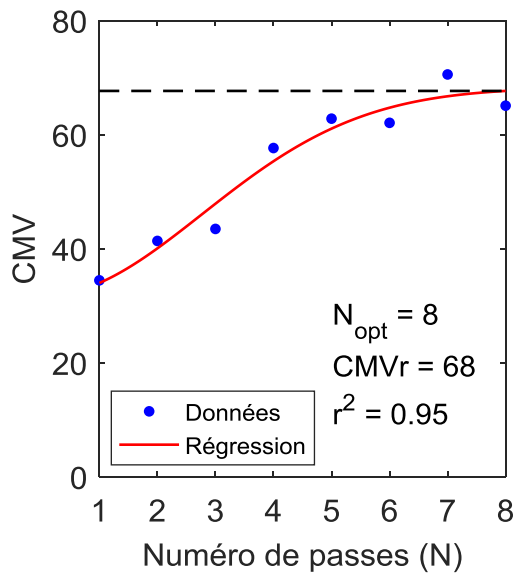
Afin de visualiser les résultats, divers exemples sont donnés en fonction du coefficient de régression obtenu. La plage des coefficients de régression est divisée en quatre, soit un coefficient très élevé ($r^2 \geq 0.8$) (Figure 4.6), un coefficient élevé ($0.6 \leq r^2 < 0.8$) (Figure 4.7), un coefficient faible ($0.3 < r^2 \leq 0.6$) (Figure 4.8) et un coefficient très faible ($r^2 \leq 0.3$) (Figure 4.9).



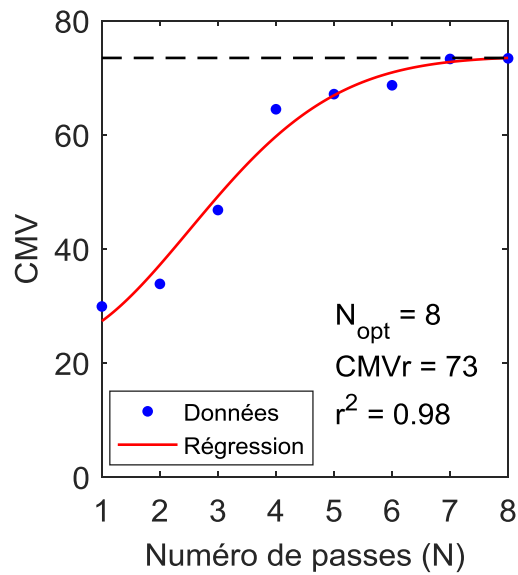
(a)



(b)

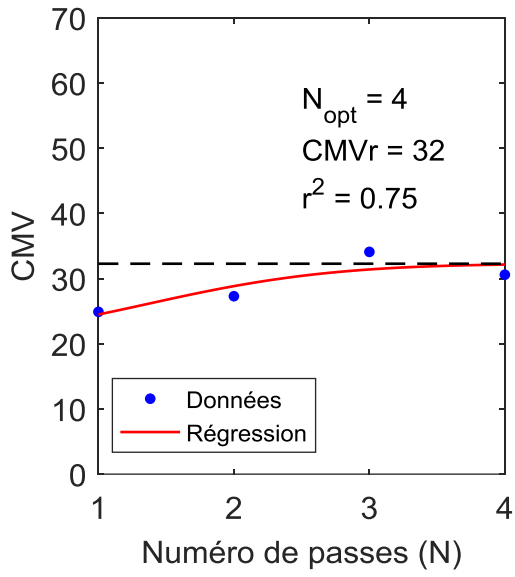


(c)

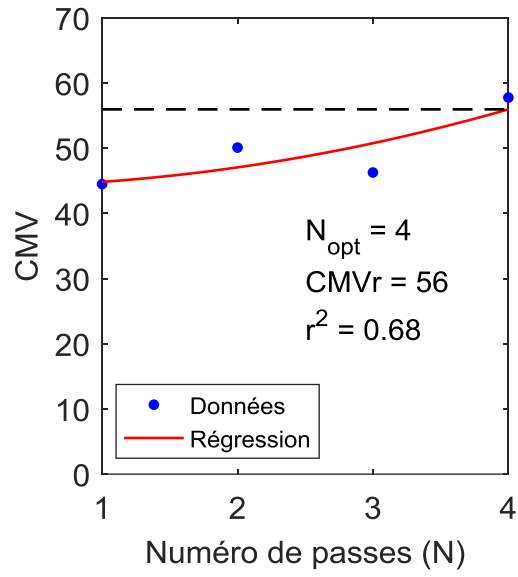


(d)

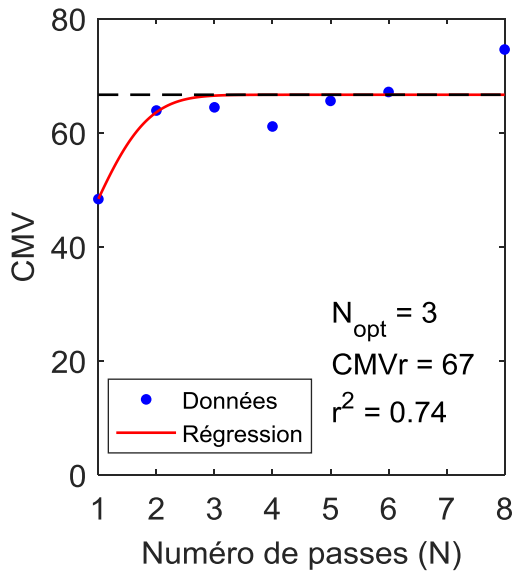
Figure 4.6 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression très élevé (a) P10L4, section #14), (b) P1L4 section #6, (c) P9L4, section #43 et (d) P8L4 section #11



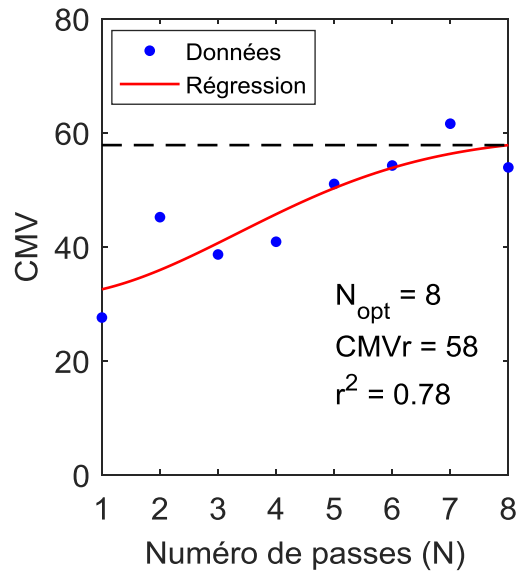
(a)



(b)

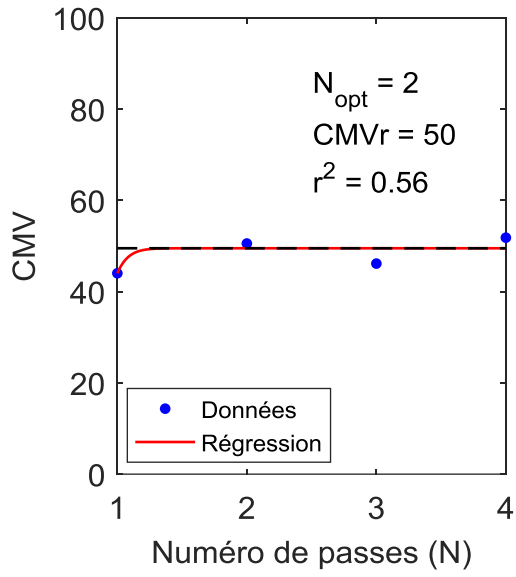


(c)

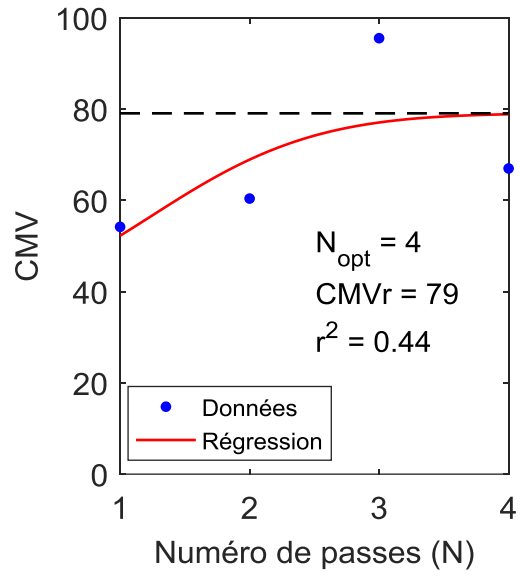


(d)

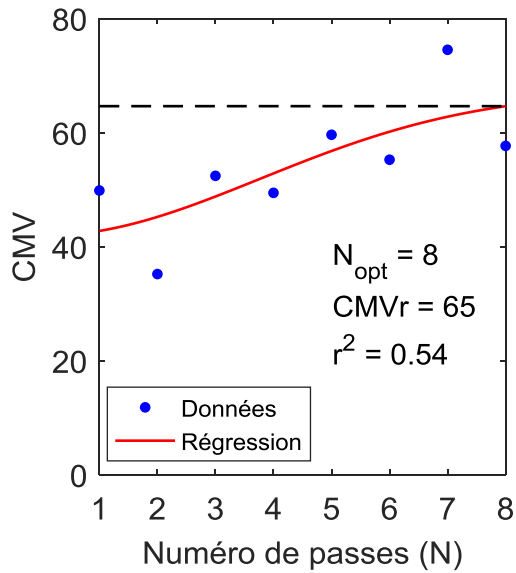
Figure 4.7 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression élevé (a) P1L4, section #2, (b) P5L2, section #19, (c) P3L4, section #11 et (d) P7L4, section #24



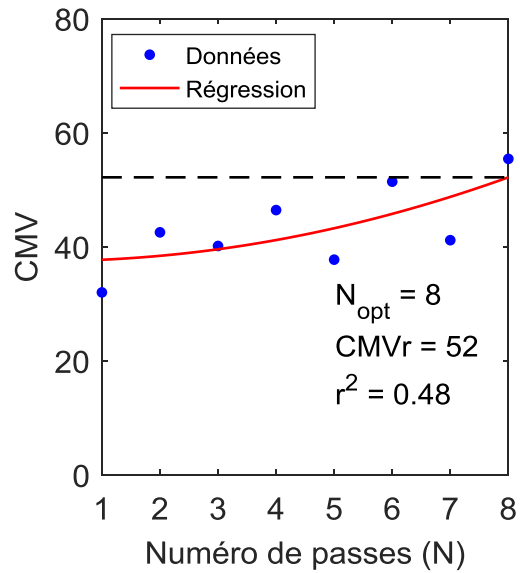
(a)



(b)

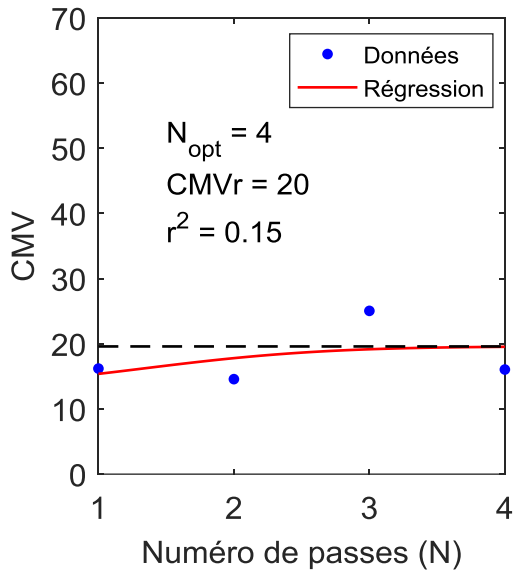


(c)

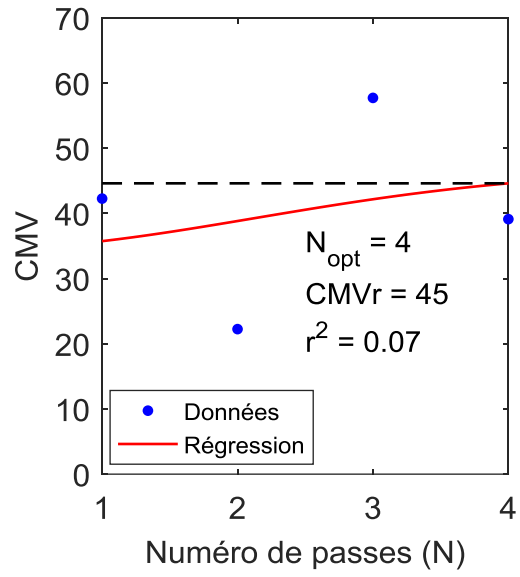


(d)

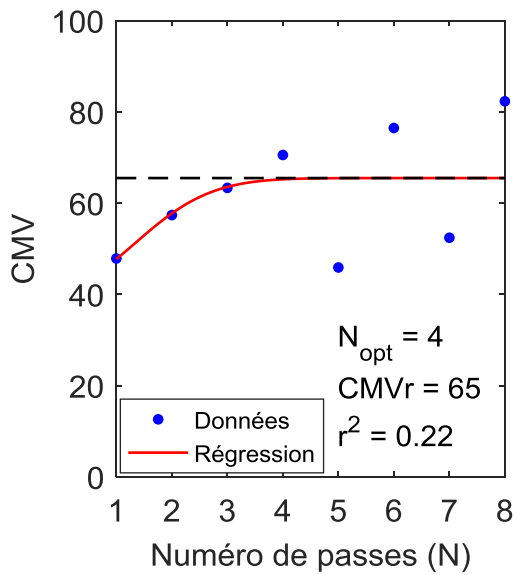
Figure 4.8 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression faible (a) P6L4, section #27, (b) P10L4, section #41, (c) P9L4, section #14 et (d) P4L2, section #13



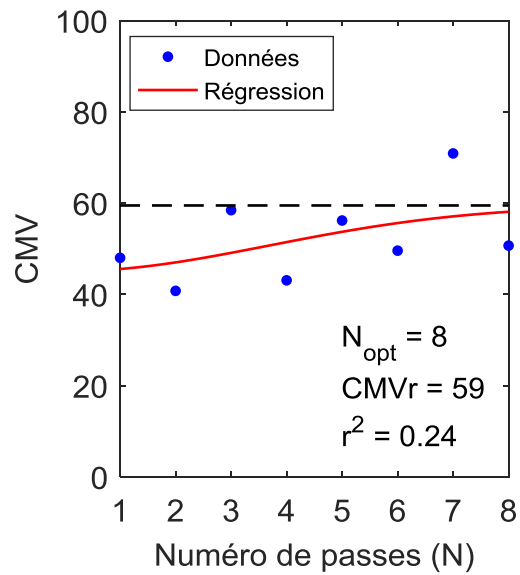
(a)



(b)



(c)

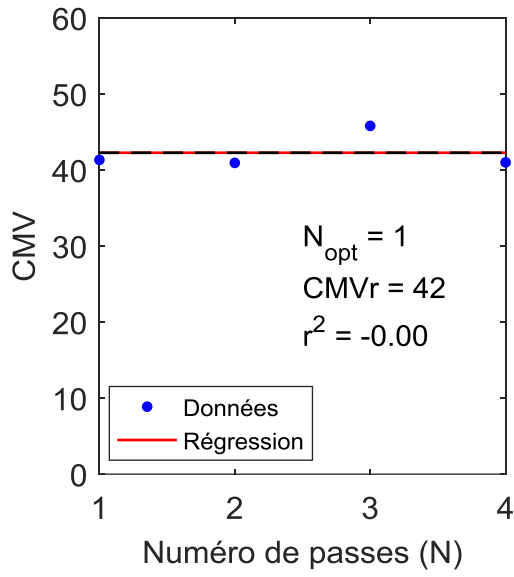


(d)

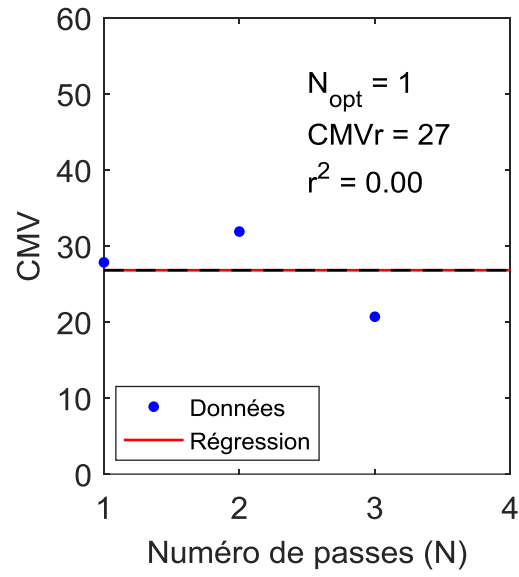
Figure 4.9 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression très faible (a) P1L4, section #24, (b) P10L4, section #67, (c) P8L4, section #14 et (d) P9L4, section #26

Pour un coefficient élevé à très élevé de régression ($r^2 \geq 0.6$), la régression représente bien l'évolution du CMV. Le CMV se comporte donc tel qu'attendu. Sa progression est toutefois plus ou moins variable selon les cas. Autrement, pour un coefficient de régression faible ($r^2 < 0.6$), le comportement du CMV montre parfois une forte variation ou bien semble osciller autour d'une valeur constante. Dans les cas où le r^2 est très faible (<0.3), la notion du CMVr devient plus abstraite.

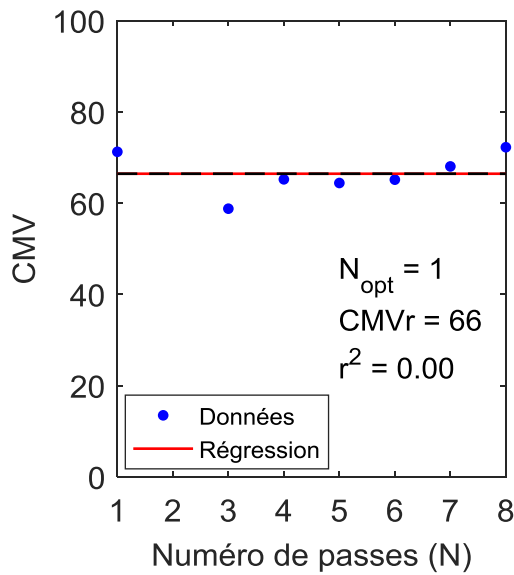
Il est également important de noter qu'un coefficient de régression nul est parfois observé. À ce moment, la courbe gaussienne correspond en fait à une droite horizontale de valeur égale à la moyenne des données (Figure 4.10).



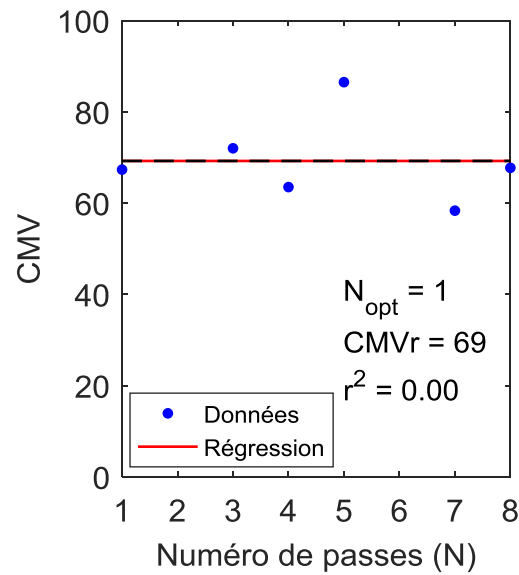
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.10 : Exemples de détermination d'un CMVr avec un coefficient de régression nul
 (a) P5L2, section #90, (b) P1L4, section #80, (c) P3L4, section #89 et (d) P8L4, section #68

Dans tous les cas, malgré un coefficient de régression parfois faible, la valeur du CMVr obtenue à partir de la courbe de régression est considérée représentative des données. En effet, lorsque le coefficient est faible, la régression s'apparente

plutôt à la moyenne des données et il est jugé plus avantageux d'utiliser cette valeur plutôt que de ne définir aucune donnée de CMVr.

4.2.2 Analyse statistique des résultats

La Figure 4.11 montre la distribution des coefficients de régression obtenue pour chaque planche à leur dernière levée. Le pourcentage de données non définies (CMVr = Nd) est également indiqué.

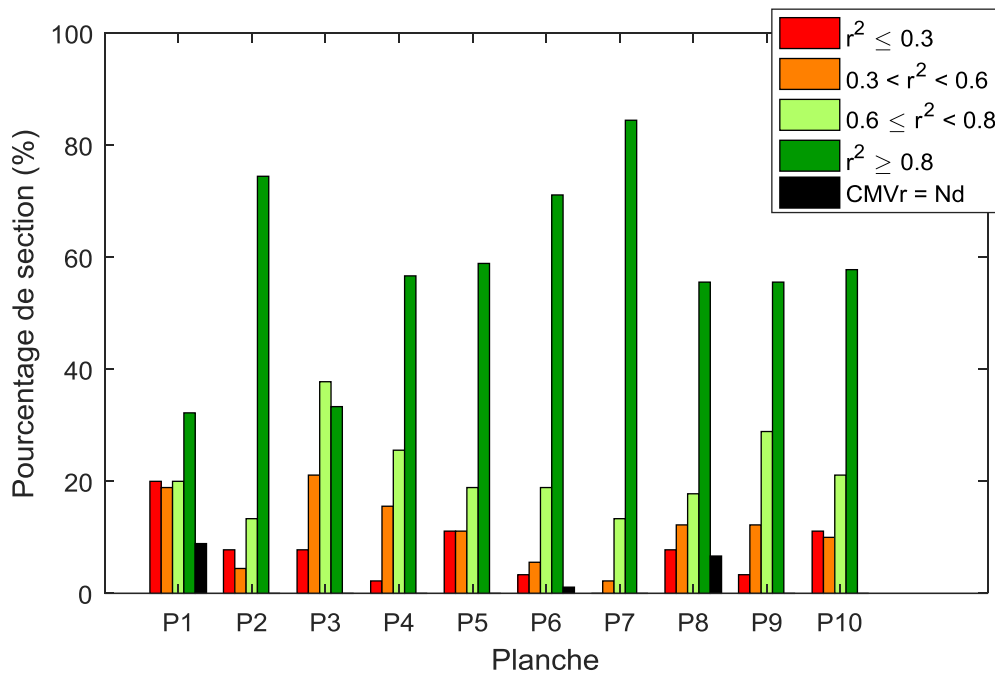


Figure 4.11 : Statistiques des coefficients de corrélation (r^2) obtenus par planche

En général, de 55% à près de 85% du temps, un coefficient de régression élevé à très élevé est obtenu. Seules les planches 1 et 3 montrent une distribution plus uniforme, où un pourcentage d'environ 30 à 40% de r^2 faibles à très faibles est observé. Toutefois, tel que mentionnée à la section 4.2.1, malgré un coefficient de régression faible, la courbe de régression est considérée représentative des données puisqu'elle s'apparente alors à une moyenne des données.

La distribution des valeurs du numéro de passe dit optimal (N_{opt}) est également évaluée selon si la planche est compactée en 4 passes (Figure 4.12 (a)) ou en 8

passes (Figure 4.12 (b)). La valeur de N_{opt} correspond au numéro de passe pour lequel le CMVr est défini.

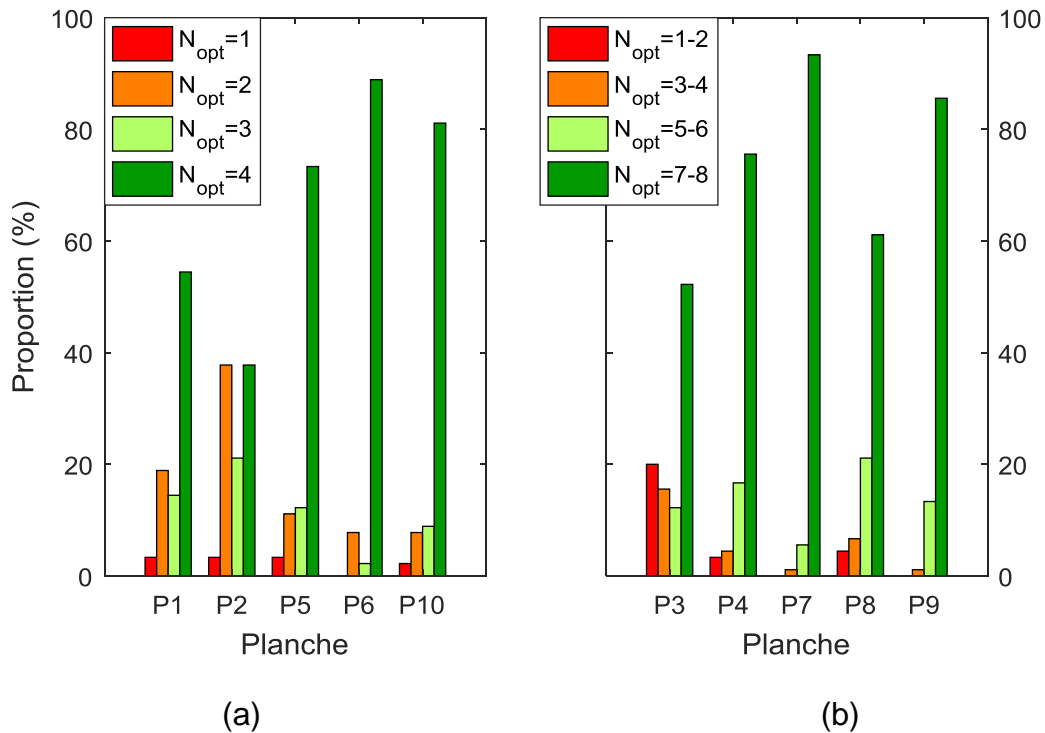


Figure 4.12 : Histogramme des N_{opt} (a) planches compactées en 4 passes et (b) planches compactées en 8 passes

Ainsi, il apparaît que tant pour les planches compactées en 4 passes que celles compactées en 8 passes, le CMVr est la plupart du temps obtenu à la dernière passe ou à l'avant-dernière passe (55% du temps et plus). Seule la planche 2 montre des résultats différents. En effet, une proportion non négligeable (près de 40 %) des CMVr sont obtenus dès la deuxième passe ($N_{opt} = 2$). Ces résultats concordent toutefois avec les observations montrées à la section 4.1.1, où le comportement général du CMV de la planche 2 montrait l'atteinte d'un plateau dès la deuxième passe (voir Figure 4.3).

Enfin, tel qu'expliqué à la section 3.2, le CMVr est défini selon trois options :

- 1) Le CMV correspond au plateau atteint par la courbe de régression

- 2) Si aucun plateau n'est atteint par le CMV une fois le compactage terminé, le CMVr est défini par la valeur de la régression à la dernière passe
- 3) Si le nombre de données est insuffisant, aucun CMVr n'est défini (Nd).

Les statistiques sont donc évaluées pour chaque planche (Figure 4.13). Normalement, un plateau devrait être atteint la majorité du temps pour les planches compactées en 8 passes alors que pour les planches compactées en 4 passes, le CMV devrait rarement atteindre de plateau.

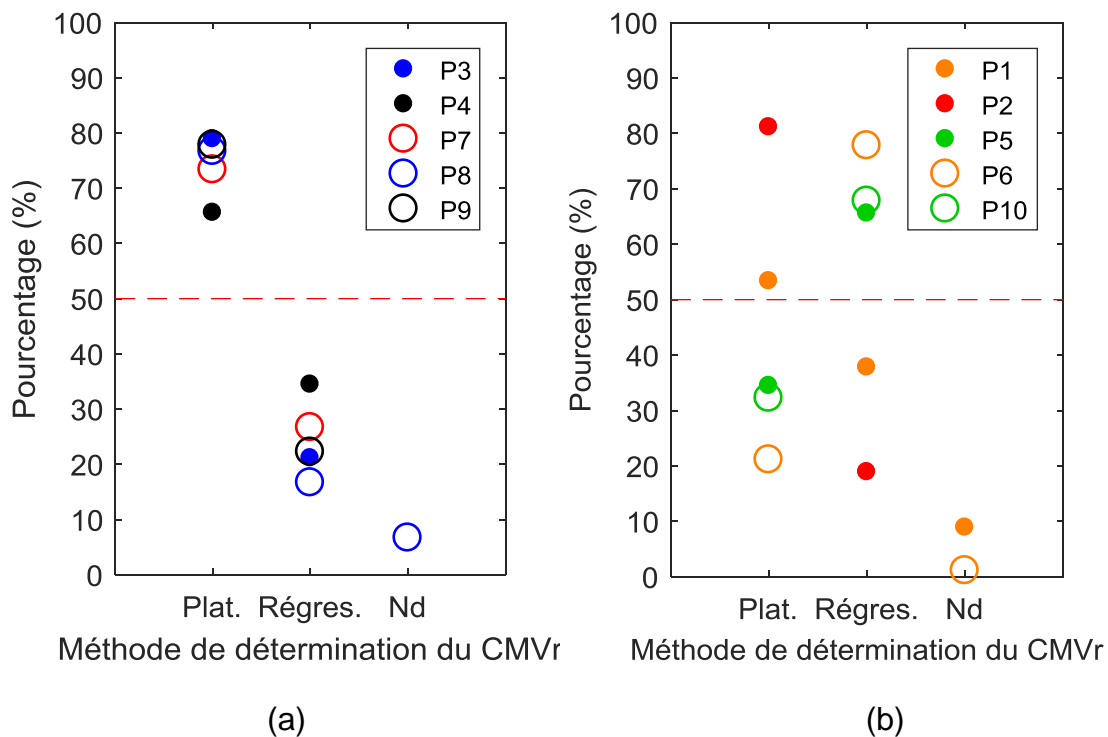


Figure 4.13 : Statistiques sur la méthode de détermination du CMVr pour les planches compactées (a) en 8 passes et (b) en 4 passes.

En général, les résultats correspondent à ce qui est attendu. En effet, pour les planches compactées en 8 passes, un plateau est atteint par le CMV de 65 % à 80% du temps alors que pour les planches compactées en 4 passes, un plateau est atteint 20 % à 35% du temps. Les planches 1 et 2 montrent toutefois un comportement différent. En effet, près de 55% des CMVr de la planche 1 et plus de 80% des CMVr de la planche 2 sont définis par la valeur du plateau atteint par la courbe de régression. Pour ce qui est de la planche 2, cela concorde avec les

observations ultérieures montrant l'atteinte d'un plateau dès la deuxième passe (Figure 4.3 et Figure 4.12).

Enfin, pour 90% du temps et plus, un CMVr a pu être défini pour toutes les planches. Seules les planches 1, 6 et 8 obtiennent des valeurs de CMVr non définies, mais cela ne représente que 10% et moins de la surface totale de leur dernière levée.

4.3 Évaluation de l'influence des paramètres de compactage

Afin d'évaluer l'influence des paramètres de compactage, un CMVr moyen est calculé pour chaque planche. Il correspond à la moyenne des CMVr des 90 sections de la dernière levée. Les résultats obtenus pour toutes les planches sont montrés à la Figure 4.14.

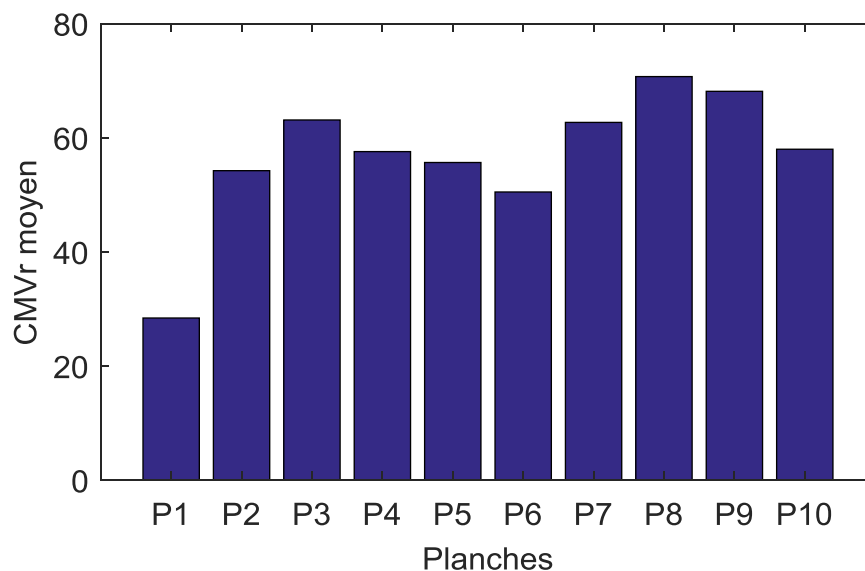


Figure 4.14 : CMVr moyen obtenu pour chaque planche

Tel qu'expliqué à la section 2.1 du mémoire, chaque planche a sa propre combinaison de mise en place de façon à évaluer l'influence de chaque variable

(poids du compacteur, nombre de passes, diamètre maximal des grains et arrosage) sur la rigidité de l'enrochement. Les combinaisons des planches sont données au Tableau 2.2 de la section 2.1.

Ainsi, l'influence des variables est évaluée à l'aide des CMVr moyens en comparant les planches par couple. Un couple de planches correspond à deux planches dont une seule variable de mise en place varie de l'une à l'autre. Par exemple, les planches 1 et 2 ont toutes deux le même diamètre maximal de grain et elles ont toutes deux été compactées avec le même nombre de passe, sans arrosage. Seul le poids du compacteur diffère : leur comparaison permet donc d'évaluer l'influence du poids du compacteur.

La Figure 4.15 montre les résultats pour chaque variable étudiée. Les couples de planches sont identifiés à l'aide d'une couleur unique.

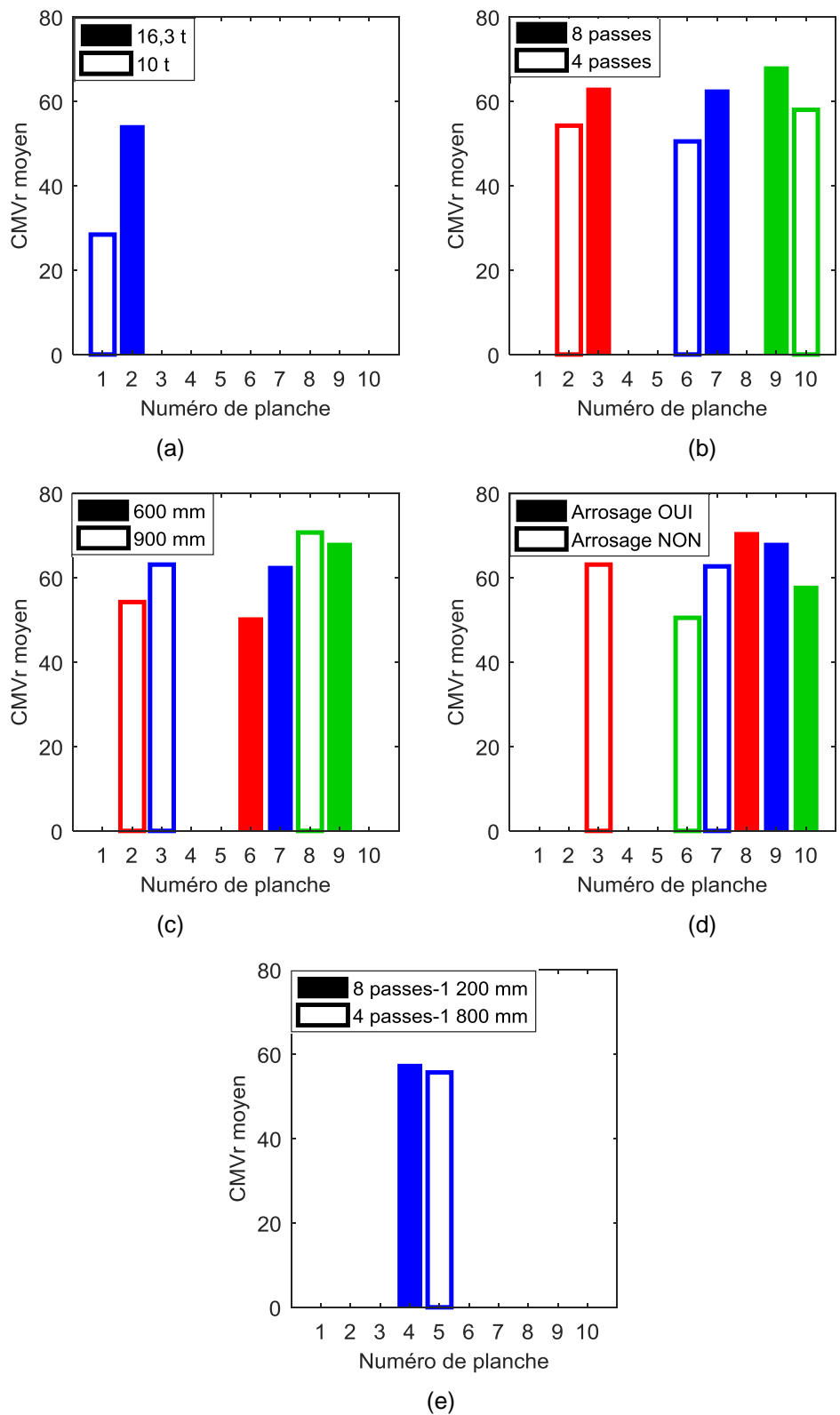


Figure 4.15 : Influence des paramètres de compactage sur le CMV moyen (a) Poids du compacteur, (b) Nombre de passes, (c) Diamètre maximal de l'enrochement, (d) Arrosage et (e) Recharge externe

La Figure 4.15 (a) montre clairement que le poids du compacteur a une influence significative sur la rigidité de l'enrochement. En effet, le CMVr moyen de la planche 2, compactée avec le compacteur de 16,3t, est beaucoup plus élevé que celui de la planche 1, compactée avec le compacteur de 10t.

La Figure 4.15 (b) permet, quant à elle, d'évaluer l'influence du nombre de passes du compacteur. Les résultats obtenus montrent que pour tous les couples de planches, la planche compactée avec 8 passes obtient toujours un CMVr moyen plus élevé que la planche compactée avec 4 passes. Ce faisant, il est possible de dire que d'augmenter de 4 à 8 le nombre de passes du compacteur permet d'augmenter la rigidité de l'enrochement.

Pour ce qui est de l'influence du diamètre maximal des grains de l'enrochement, les planches ayant un diamètre maximal des grains plus important (900 mm) obtiennent un CMVr moyen plus élevé que celles ayant un diamètre maximal plus faible (600 mm) (Figure 4.15 (c)). Ces résultats ne correspondent pas à ce qui est attendu. En effet, tel que mentionné à la section 2.3.5, le matériau avec un diamètre des grains maximal plus faible devrait mieux se compacter et donc obtenir un CMVr moyen plus élevé. La différence est toutefois peu marquée, particulièrement pour le couple de planches 3 et 7.

La quatrième variable étudiée est l'arrosage de l'enrochement. Les résultats montrés à la Figure 4.15 (d) montrent que les planches arrosées obtiennent un CMVr moyen plus élevé que les planches non arrosées. Ces résultats concordent avec ce qui est attendu. Tel que discuté à la section 1.1.1, l'arrosage de l'enrochement permet une meilleure lubrification des grains et augmente la pression dans les fissures des grains, augmentant la probabilité de bris.

Enfin, la Figure 4.15 (e) compare les résultats des planches 4 et 5. Celles-ci permettent d'évaluer les conditions de mise en place pour la recharge externe. Les deux variables étudiées sont le diamètre maximal (1 200 mm VS 1 800 mm) et le nombre de passes (4 passes VS 8 passes). Tel qu'attendu, la planche 4 obtient un CMVr plus élevé que la planche 5. Toutefois, la différence est très peu marquée.

4.4 Relations entre le CMVr et les modules de déformation obtenus des essais *in-situ*

Avec les planches d'essai de la Romaine 2, il est possible de relier les données du compactage CCC obtenues pour une planche d'essai avec les résultats des essais *in-situ* réalisés sur celle-ci. Pour se faire, un CMVr représentatif de la zone d'influence de l'essai est calculé puis relié au module de déformation issu de l'essai *in-situ* (voir section 3.3 pour la méthodologie utilisée). Dans le cas des essais au déflectomètre à masse tombante (FWD) et des essais de chargement de plaque (PLT), le module de déformation est obtenu à partir de l'équation de Boussinesq alors que les essais d'analyse multi-modale des ondes de surface (MMASW) permettent d'obtenir le module de Young du sol (voir section 1.1.2).

4.4.1 Relations entre le CMVr et les modules de déformation issus des essais FWD et PLT

Tel que discuté à la section 2.3.3, la plaque de 450 mm de diamètre est jugée moins adéquate vu la taille importante des particules de l'enrochement. Ainsi, seuls les résultats obtenus avec la plaque de 750 mm sont utilisés pour les relations avec les essais PLT. Pour ce qui est des essais FWD, ayant été effectués qu'avec une plaque de 450 mm, les relations développées devront être utilisées avec précautions. Leur analyse sera par conséquent moins exhaustive que celle des essais PLT.

De plus, tel que montré aux sections 2.3.3 et 2.3.2, les essais *in-situ* de chargement de plaque (PLT) et de déflectomètre à masse tombante (FWD) ont été exécutés pour différents chargements. Pour les essais FWD, les contraintes appliquées vont de 189 kPa à 503 kPa avec une plaque de 450 mm de diamètre, alors que pour les essais PLT, les contraintes vont de 200 kPa à 1 000 kPa avec une plaque de 750 mm.

Cependant, le CMVr étant représentatif de la rigidité des planches d'essai une fois compactée, le module relié au CMVr doit également être représentatif des conditions de compactage. Tel que vu à la section 1.1.2, le module de déformation de l'enrochement est influencé par l'historique de chargement. En effet, l'enrochement étant un matériau élasto-plastique non linéaire, sa structure change une fois le premier chargement effectué (Grenier, 2011). Ce faisant, les relations avec le CMVr sont développées en utilisant les modules de déformation issus des premiers chargements, soit le chargement à 30 kN pour l'essai FWD et le premier chargement à 1 000 kPa pour l'essai PLT.

Selon la méthodologie décrite à la section 3.3.1, dans le cas des essais FWD, un couple de valeurs ($E_{FWD,CMVr}$) est obtenu par essai. Ayant effectué une dizaine d'essais par planche, plusieurs couples de valeurs ($E_{FWD,CMVr}$) sont associés à une planche. Afin de faciliter la visualisation des résultats, la moyenne des données est calculée et illustrée par un point et les valeurs minimales et maximales sont montrées à l'aide de barres horizontales et verticales (Figure 4.16 (a)). Pour ce qui est des essais PLT, n'ayant qu'un seul point d'essai par planche ou alors deux essais pour la planche 10, les couples de valeurs ($E_{PLT,CMVr}$) sont simplement mis en graphique (Figure 4.16 (b)) en un point unique.

De plus, afin d'évaluer la tendance des relations, une droite de régression passant par le point (0,0) est tracée à travers les données. Le trait pointillé représente l'extrapolation de la régression jusqu'au point (0,0) alors que les deux droites

pointillées de part et d'autre de la tendance correspondent à 2 fois l'écart type de l'écart entre la tendance et les données. Ces droites permettent d'évaluer la dispersion des données autour de la droite de régression.

Enfin, sachant que le poids du compacteur est un paramètre influençant significativement le CMV (voir section 1.2.2), il est jugé plus représentatif de ne pas inclure les données de la planche 1 pour le calcul de la droite de régression. En effet, la planche 1 est la seule compactée avec un compacteur de 10 t alors que toutes les autres sont compactées avec un compacteur de 16,3 t.

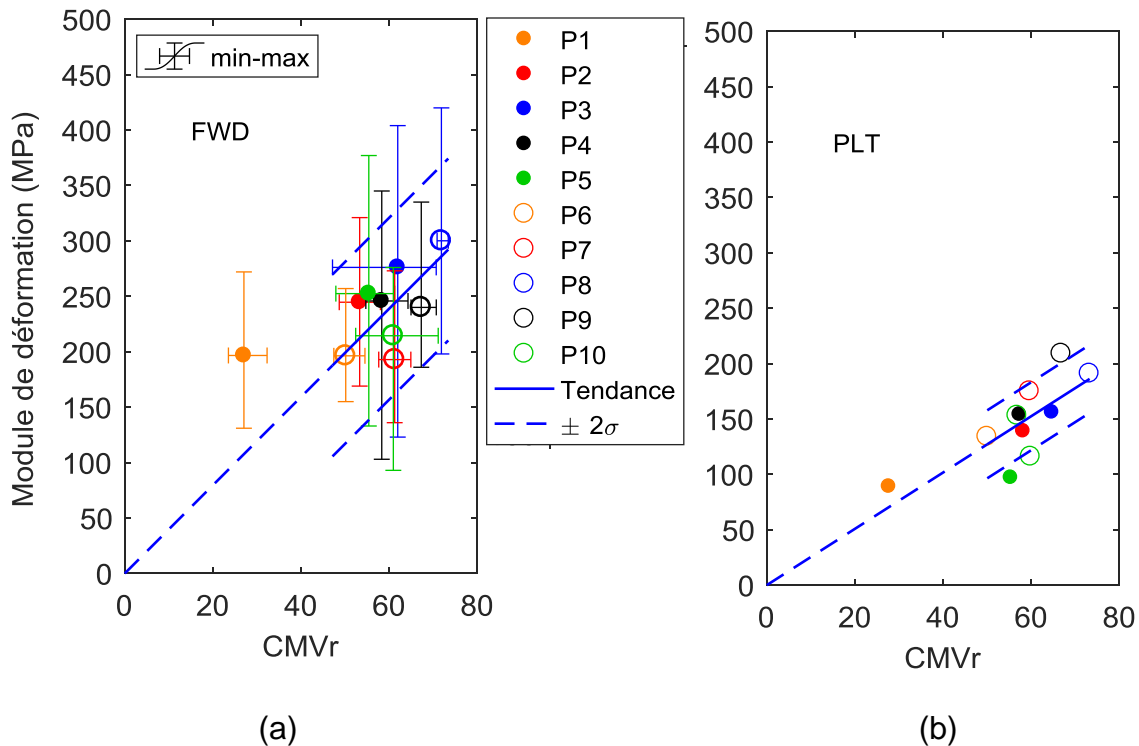


Figure 4.16 : Relations obtenues entre le CMVr et les modules de déformation issus du premier chargement des essais (a) FWD (contrainte de 377 kPa) et (b) PLT (contrainte de 1 000 kPa)

La Figure 4.16 (a) montre une importante dispersion des points de données, surtout en ce qui attrait aux modules de déformation. En effet, la plage des modules pour une planche donnée est très étalée alors que celle des CMVr est

généralement concentrée. Pour ce qui est des essais PLT (Figure 4.16 (b)), la dispersion des points est moins importante.

De plus, tel qu'attendu, les données de la planche 1 sont légèrement à l'écart des autres données. Toutefois, dans le cas des essais PLT, le point semble s'inscrire dans la droite de tendance.

Enfin, malgré une importante dispersion dans le cas des essais FWD, les droites de régression obtenues avec les essais FWD et PLT montrent une tendance positive de la relation du module de déformation en fonction du CMV_r , ce qui concorde avec la littérature (voir section 1.2.4).

4.4.2 Relation entre le CMV_r et les modules de Young issus des relevés MMASW

Tel que montré à la section 3.3.2, un couple (CMV_r , E_{MMASW}) est obtenu par planche (Figure 4.17). Le module E_{MMASW} correspond au module de Young calculé en fonction du profil moyen des vitesses d'ondes de cisaillement. Tout comme pour les essais FWD et PLT, une droite de régression est calculée et extrapolée jusqu'au point (0,0) en ne considérant que les planches compactées avec le compacteur de 16,3 t. De plus, les droites représentant 2 fois l'écart type de l'écart entre les données et la tendance sont tracées afin d'évaluer la dispersion des données.

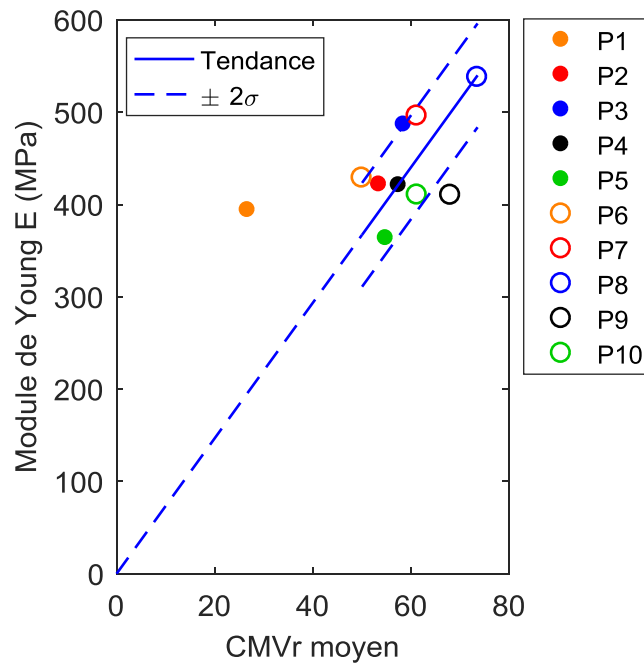


Figure 4.17 : Relation obtenue entre le CMVr et le module de Young calculé à partir des profils moyens des vitesses d'ondes de cisaillement.

Encore une fois, la donnée issue de la planche 1 est à l'écart des autres données et ne semble pas suivre la droite de tendance. De plus, les données sont plutôt dispersées autour de la tendance. Autrement, tout comme pour les essais FWD et PLT, la relation obtenue montre que le module de Young augmente avec le CMVr, mais avec une pente beaucoup plus importante. Cela est dû au fait que les modules de Young issus des profils de vitesses d'ondes sont plus élevés que les modules de déformation des essais FWD et PLT. En effet, les modules de Young sont obtenus à de très petites déformations contrairement aux modules de déformation E_{PLT} et E_{FWD} . Cet aspect sera abordé plus en détail dans le Chapitre 5 de ce mémoire (section 5.4.3).

Chapitre 5 Discussion

Ce chapitre est divisé en 5 sections. Les quatre premières sections permettent de discuter et d'analyser les résultats montrés au Chapitre 5. La dernière section permet d'évaluer l'application du paramètre CMVr et des relations obtenues dans le contexte d'un barrage.

5.1 Évolution du paramètre CMV en fonction du numéro de passe

Les résultats montrés à la section 4.1 montrent que l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe comprend des fluctuations. Les mesures du CMV étant très rapprochées (environ chaque 0,25 m de distance longitudinale (voir section 1.2.2)), les variations observées peuvent être dues à l'hétérogénéité de l'enrochement. En effet, la présence ou l'absence de grosses particules peut provoquer une augmentation ou une diminution de la valeur du CMV. De plus, tel que mentionné à la section 1.2.2, le signal de l'accéléromètre peut contenir du bruit, c'est-à-dire une déformation de la fréquence d'excitation qui n'est pas reliée à l'augmentation de la rigidité du sol, mais plutôt causée par le rouleau et son châssis (Floss *et al.*, 1983).

Malgré tout, en évaluant le comportement général du CMV à l'aide de boîtes à moustache, il a été montré que l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe correspond au comportement attendu. Seule la planche 2 montre un comportement différent.

5.2 Détermination d'un CMV représentatif

Les résultats montrés à la Figure 4.11 permettent de dire que la courbe de régression de type gaussien représente adéquatement le comportement du CMV avec le numéro de passe. En effet, des coefficients de régression très élevés ($r^2 \geq 0.8$) sont généralement obtenus. Seules les planches 1 et 3 obtiennent une

proportion plus grande de coefficients de régression faibles, ce qui peut supposer une variation plus importante du CMV.

De plus, selon les Figure 4.12 et Figure 4.13, la rigidité optimale de l'enrochement est la majorité du temps atteinte à la fin du compactage. En effet, les résultats des planches compactées en 8 passes montrent que pour pratiquement 70% du temps, un plateau est atteint à la 7^e ou à la 8^e passe. Par conséquent, la méthode de compactage en 8 passes adoptée pour le barrage la Romaine-2 est validée. Encore une fois, seules les planches 1 et 2 ont un comportement à part. Les CMV de la planche 1 atteignent 55% du temps un plateau à la fin du compactage alors que ceux de la planche 2 atteignent 80% du temps un plateau dès la deuxième passe du compacteur. Dans le cas de la planche 1, cela peut être relié à l'utilisation du compacteur de 10 t. En effet, ayant été compactée avec moins d'énergie, la planche atteint plus rapidement sa rigidité maximale. Pour ce qui est de la planche 2, aucune explication n'est avancée.

Enfin, en regard des résultats obtenus, il est possible de dire que la méthodologie utilisée pour déterminer un CMV représentatif de la rigidité à la fin du compactage est adéquate. En effet, la courbe de régression de type gaussienne reproduit généralement bien l'évolution du CMV. Dans les cas où le CMV montre d'importantes fluctuations, le CMV_r déterminé par régression est équivalent à la moyenne des données et est, par conséquent, également considéré représentatif des conditions de compactage. De plus, un CMV_r a pu être défini pour 90% et plus de la surface des planches.

5.2.1 Justification du choix d'utiliser le CMV_r comme CMV représentatif de la rigidité à la fin du compactage

Afin de confirmer le choix d'utiliser le CMV_r comme CMV représentatif de la rigidité à la fin du compactage, celui-ci est comparé à deux autres options soit : le CMV mesuré à la dernière passe (CMV_{der}) et le CMV moyen de toutes les passes (CMV_{moy}) (Figure 5.1).

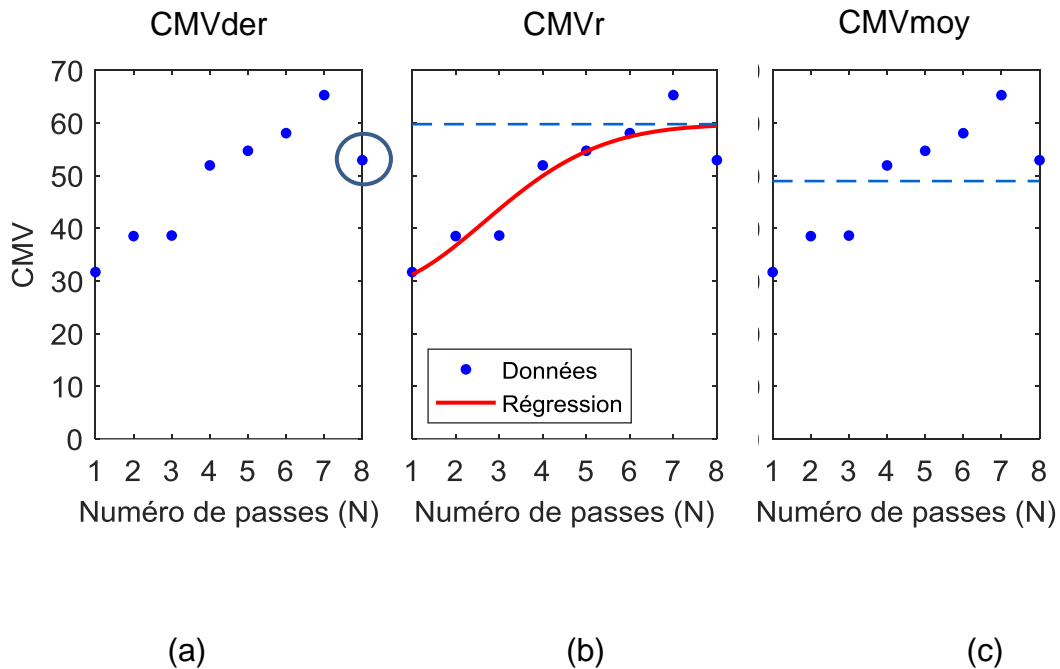


Figure 5.1 : Exemples de détermination d'un CMV représentatif de la rigidité du sol à la fin du compactage (a) en prenant la valeur du CMV à la dernière passe (CMVder) (b) selon la méthode du CMVr et (c) en calculant la moyenne des CMV (CMVmoy)

Le CMV à la dernière passe n'est pas utilisé puisqu'il est posé comme hypothèse qu'il varie beaucoup. En effet, tel que vu à la section 5.1, le CMV est un paramètre variable dû à l'hétérogénéité du sol et au bruit associé au système rouleau-châssis. En ce qui attrait au CMVmoy, sachant que le CMV augmente avec le numéro de passe, il est considéré non représentatif de la rigidité à la fin du compactage puisqu'il sous-estime celle-ci. Afin de confirmer ces hypothèses, la moyenne et la variance des trois paramètres sont comparées pour chaque planche (Tableau 5.1). La moyenne des CMVder est considérée comme étant la moyenne de référence puisqu'elle représente bien la rigidité à la fin du compactage.

Tableau 5.1 : Comparaison de la moyenne et de la variance des distributions du CMVder, du CMVr et du CMVmoy

Planche	Moyenne			Variance		
	CMVder	CMVr	CMVmoy	CMVder	CMVr	CMVmoy
1	28	28	25	39	26	22
2	54	54	48	46	42	63
3	66	63	54	74	48	47
4	59	58	48	69	51	27
5	56	56	49	93	68	67
6	51	50	41	51	43	22
7	63	63	50	37	31	19
8	68	71	58	133	71	40
9	67	68	57	93	46	40
10	58	58	51	96	92	55

Pour toutes les planches, le CMVr obtient une valeur moyenne similaire à celle du CMVder. Il est également significativement moins variable que le CMVder, compte tenu que ses variances sont toujours plus faibles que celles du CMVder. De plus, tel qu'attendu, les valeurs moyennes du CMVmoy sont toujours plus faibles que celles du CMVder.

Il est donc possible de conclure que l'utilisation du CMVr comme CMV représentatif de la rigidité à la fin du compactage est justifiée puisqu'il obtient des valeurs moyennes similaires au CMVder tout en étant moins variable. En effet, l'utilisation d'une courbe de régression permet t'atténuer la variabilité du CMV tout en dégagant une tendance représentative des données.

5.3 Évaluation de l'influence des paramètres de compactage

La section 4.3 présente l'influence des différents paramètres de compactage sur les valeurs de CMVr. Ces résultats sont comparés aux conclusions obtenues par Hydro-Québec en fonction des essais *in-situ* réalisés sur les planches d'essai (voir Tableau 2.9 de la section 2.3.5).

Le Tableau 5.2 résume et compare donc les principales conclusions tirées des résultats des essais *in-situ* et des CMVr moyen par rapport à l'influence des différents paramètres de compactage sur la rigidité de l'enrochement.

Tableau 5.2 : Comparaison des conclusions issues des essais de contrôle et des données de compactage CCC (CMVr moyen)

		Influence sur la rigidité de l'enrochement	
		Essais de contrôle	CMVr moyen
Paramètres de compactage			
Recharge interne	↑ Poids compacteur	↑	↑
	↑ Nombre de passes	↑	↑
	↓ Diamètre maximal des particules	~	↓
	Arrosage	~	↑
Recharge externe (planches 4 et 5)	↑ Nombre de passes	↑	↑
	↓ Diamètre maximal des particules	↑	↑

Concernant l'influence du poids du compacteur et du nombre de passes, les mêmes conclusions sont obtenues. En effet, dans les deux cas, les résultats montrent que l'augmentation du poids ou du nombre de passes du compacteur mène à une augmentation de la rigidité de l'enrochement.

Pour ce qui est de l'influence du diamètre maximal des grains, d'une part l'étude d'Hydro-Québec ne permet pas de conclure alors que d'autre part, les données du CMVr montrent une influence contraire aux attentes. En effet, ce sont les matériaux ayant un diamètre maximal plus grand qui obtiennent un CMVr plus élevé. Toutefois, cette hausse de rigidité pourrait être causée par les valeurs de CMV élevées mesurées directement sur des grosses particules puisque, tel qu'expliqué à la section 5.1, le CMV est influencé par la présence de gros blocs. Autrement, l'écart entre les CMVr moyen n'est pas très marqué (voir Figure 4.15 à la section 4.3). En considérant que les deux matériaux avaient au final une granulométrie similaire (voir section 2.3.5), les conclusions issues des CMVr moyens sont plutôt cohérentes avec celles d'Hydro-Québec.

En ce qui attrait à l'influence de l'arrosage, à partir des CMVr moyens, tel qu'attendu, il est conclu que l'enrochement arrosé acquiert une rigidité plus grande que celui non arrosé. Les résultats des mesures *in-situ* n'ont, quant à eux, pas permis de tirer de conclusion.

En regard de ces résultats, il est possible de dire que les conclusions obtenues à partir du CMVr moyen sont similaires à celles d'Hydro-Québec, ce qui permet de valider le paramètre CMVr. Des conclusions ont même pu être tirées là où il n'a pas été possible avec les résultats des essais *in-situ*. Ceci a probablement été possible grâce au fort taux d'échantillonnage de la technologie CCC comparativement au très faible nombre d'essais *in-situ*.

5.4 Relations entre le CMVr et les modules de déformation obtenus des essais *in-situ*

Les relations obtenues montrent que le module de déformation issu des essais FWD et PLT et le module de Young obtenu avec le relevé MMASW augmente avec le CMVr (Figure 4.16 et Figure 4.17 respectivement). Une relation linéaire est proposée puisque c'est ce qui est majoritairement retrouvé dans la littérature (voir section 1.2.4).

L'importante dispersion observée autour de la relation $CMVr - E_{FWD}$ (Figure 4.16 (a)) peut être expliquée par l'utilisation de la plaque de 450 mm, jugée trop petite par rapport aux dimensions des particules d'enrochement. Autrement, les dispersions observées autour des tendances peuvent provenir de différents facteurs. Tel que vu à la section 1.2.2, le CMV est influencé par le type de sol compacté. Les planches ayant été construites à partir d'enrochement de différentes granulométries, cela peut contribuer à la dispersion des données. Il a toutefois été décidé d'inclure les données de toutes les planches (sauf la planche 1) afin d'établir une tendance générale. De plus, le module de déformation est également un paramètre influencé par différents facteurs, dont la granulométrie et le mouillage (voir Tableau 1.1 de la section 1.1.1). Ces facteurs variant d'une planche à l'autre, cela peut également être une cause de la dispersion des données.

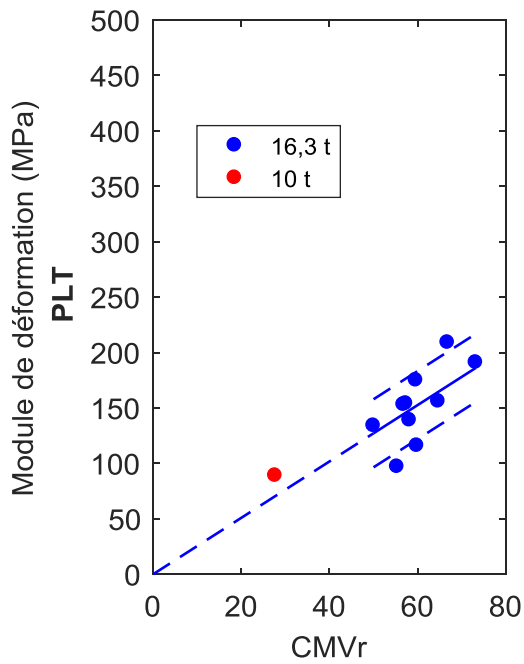
D'un autre côté, les données sont plutôt concentrées autour d'une plage de valeurs de CMVr et de module de déformation ou de module de Young donnée. Ce faisant, il est plus difficile de tirer une tendance claire. Cela peut être dû au fait que le spectre d'énergie de compactage évalué est faible. En effet, les essais *in-situ* sont seulement réalisés à la fin du compactage et non pendant le compactage. Une

amélioration pourrait être d'effectuer des essais *in-situ* pour différentes passes, ce qui permettrait de confirmer la tendance observée.

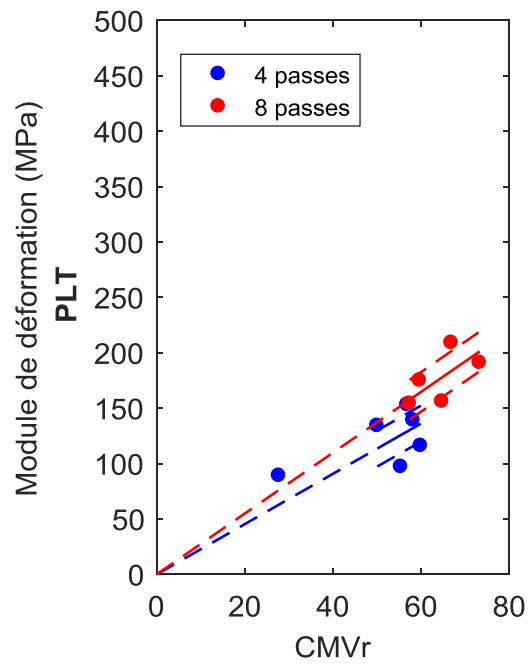
De plus, la profondeur d'influence du compacteur est plus importante que celles des essais *in-situ* FWD ou PLT (voir section 1.2.2). Les CMV_r mesurés sont donc représentatifs d'un plus grand volume d'enrochement que les modules de déformation, ce qui peut amener un biais dans les relations. Ce n'est toutefois pas le cas de la relation obtenue à partir des relevés MMASW puisque les modules de Young sont représentatifs de la zone d'influence du compacteur (voir section 3.3.2).

5.4.1 Influence des conditions de compactage sur la relation CMV_r-E_{PLT}

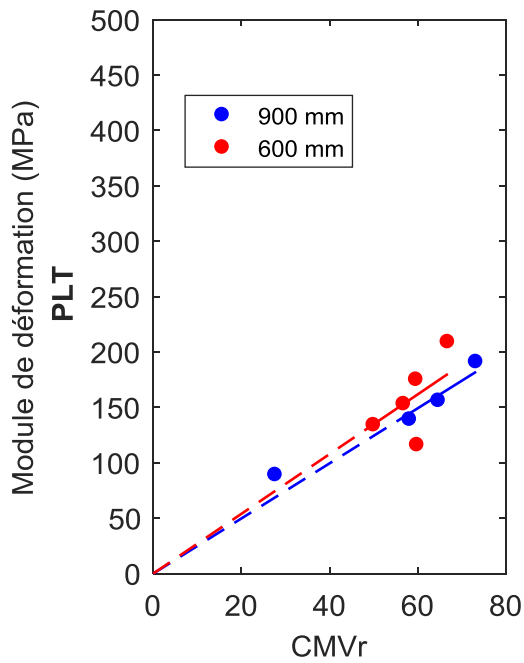
La présente section discute de l'influence des conditions de compactage sur les relations issues des essais PLT à leur premier chargement (contrainte de 1 000 kPa). Pour se faire, les planches d'essai sont divisées en deux groupes en fonction de leurs conditions de compactage et de la variable évaluée. Les résultats sont donnés à la Figure 5.2. Dans le cas de la variable du diamètre maximal, les planches 4 et 5 étant les seules à avoir un diamètre jusqu'à 1 200 mm et 1 800 mm respectivement, il n'est pas possible d'en tirer des tendances. Ainsi, seules les planches ayant un diamètre maximal de 600 mm ou 900 mm sont montrées à la Figure 5.2 (c).



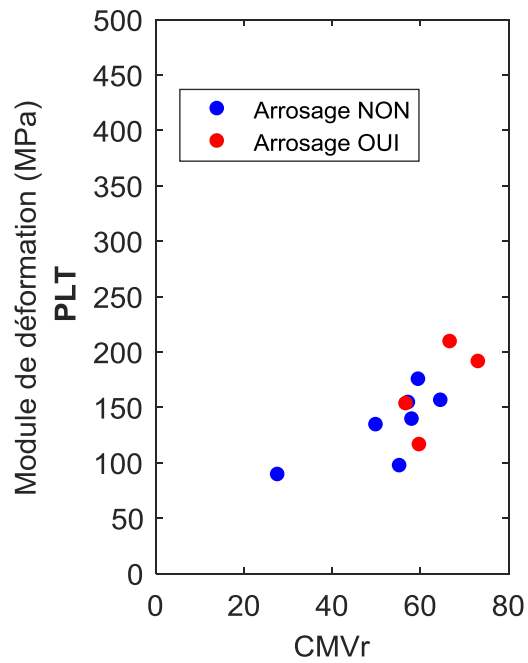
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 5.2 : Influence (a) du poids du compacteur, (b) du nombre de passes, (c) du diamètre maximal (600 mm ou 900 mm) et (d) de l'arrosage sur la relation CMVr - E_{PLT} obtenue au premier chargement (contrainte de 1 000 kPa)

Malgré qu'une seule planche n'ait été compactée avec le compacteur de 10 t, sa rigidité est clairement plus faible que celles des autres planches (Figure 5.2 (a)).

La Figure 5.2 (b) montre, quant à elle, que le fait d'augmenter le nombre de passes de 4 à 8 a pour effet d'augmenter la pente de la droite de tendance. Un gain de 20% de la rigidité de l'enrochement est donc obtenu.

De plus, la Figure 5.2 (c) montre clairement qu'établir les tendances en fonction du type de matériau réduit significativement la dispersion des données. En effet, les données associées au matériau de 600 mm et celles associées au matériaux de 900 mm sont plutôt alignées entre elles. Seule une donnée se situe à l'écart des autres planches de 600 mm, soit celle avec un CMVr de 60 et un module de déformation de 116 MPa (planche 10, essai #1). Autrement, les tendances montrent que l'utilisation d'un matériau avec un diamètre maximal plus faible permet d'augmenter la rigidité de l'enrochement. Afin de confirmer ces résultats, il serait pertinent de réaliser plus d'essais pour un même matériau afin d'obtenir plus de données.

Finalement, la Figure 5.2 (d) permet difficilement de tirer des conclusions quant à l'effet de l'arrosage sur la rigidité de l'enrochement. Toutefois, en affichant les différents paramètres de compactage en même temps, il est possible de mieux évaluer l'effet de l'arrosage, tel que montré à la Figure 5.3. Seules les planches 1, 4 et 5 ne sont pas affichées. L'abréviation A_o signifie que la planche a été arrosée alors que l'abréviation A_n signifie qu'elle n'a pas été arrosée. Les données en losanges correspondent aux planches compactées en 4 passes alors que les données en points correspondent aux planches compactées en 8 passes. Enfin, la légende de couleur permet de différencier les types de matériaux (bleu = matériaux avec diamètre maximal de 900 mm alors que rouge = matériaux avec diamètre maximal de 600 mm).

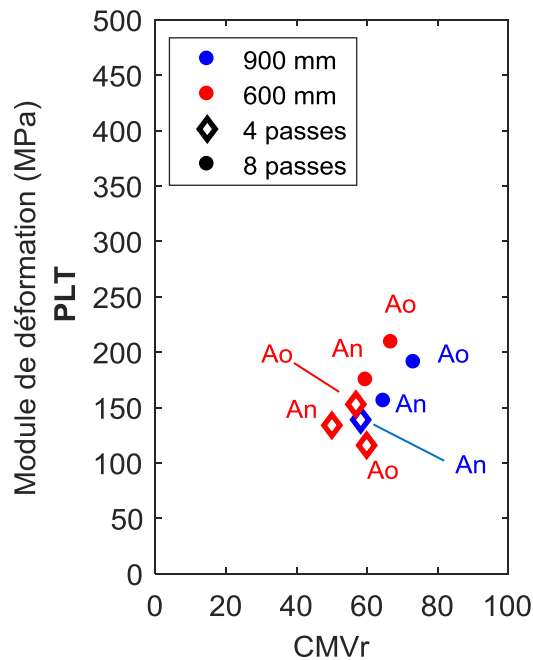


Figure 5.3 : Évaluation de l'effet de l'arrosage en combinant l'effet du diamètre maximal (600 mm VS 900 mm), du nombre de passes et de l'arrosage en même temps.

Ainsi, pour un matériau et un nombre de passes donnés, le point associé à une planche arrosée est généralement plus élevé que celui associé à une planche non arrosée. Encore une fois, seul le point associé à la planche 10 (essai #1) ($CMVr = 60$; $E_{PLT} = 116$ MPa) ne suit pas la tendance . Ainsi, outre cette donnée, les résultats semblent montrer que le fait d'arroser l'enrochement permet d'augmenter la rigidité de la planche.

5.4.2 Comparaison avec les relations de la littérature

Les relations obtenues et montrées à la section 4.4.1 (Figure 4.16) sont comparées à celles issues de la littérature (Figure 1.17 à la section 1.2.4). Afin de faciliter la comparaison, plutôt que de superposer toutes les relations recensées à la Figure 1.17, seules les relations représentant les limites supérieure et inférieure sont illustrées avec les données des planches d'essai (Figure 5.4). De plus, les limites retenues correspondent, lorsque possible, à des relations dont les

matériaux se rapprochent le plus à de l'enrochement, soit du gravier. Les relations sont présentées à l'aide de traits pleins alors que les traits pointillés correspondent à l'extrapolation de celles-ci à l'extérieur de leur domaine de CMV.

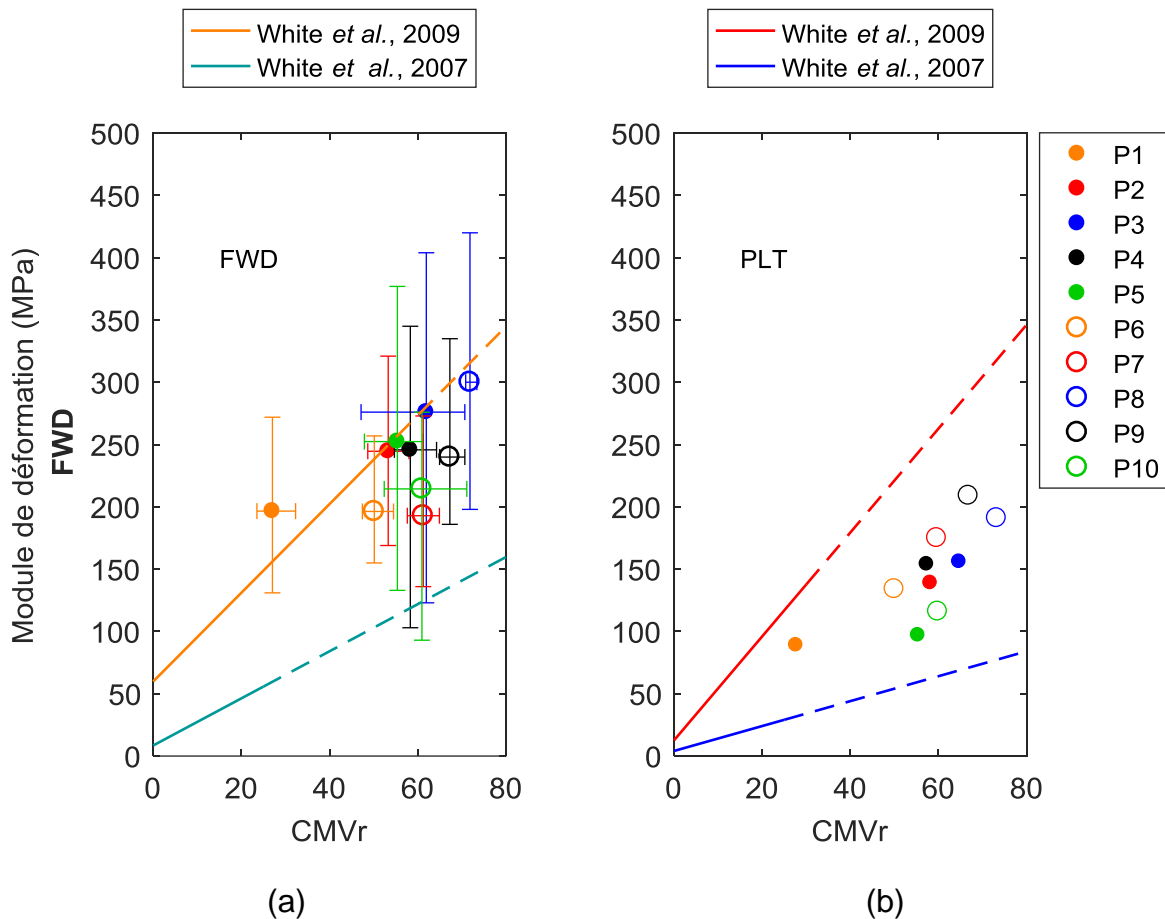


Figure 5.4 : Comparaison des relations obtenues avec celles issues de la littérature (a) relation obtenue avec les essais FWD (premier chargement à 30 kN) et (b) relation obtenue avec les essais PLT (premier chargement à 1 000 kPa)

D'une part, la majorité des données sont à l'extérieur des domaines de CMV pour lesquels les relations de la littérature sont définies. Ces résultats ne sont pas surprenants, considérant que les relations issues de la littérature sont obtenues avec des matériaux de sable et gravier alors que les planches d'essai sont construites avec de l'enrochement. De plus, il est probable que les compacteurs utilisés dans la littérature soient plus légers que celui de 16,3 t utilisé pour les planches d'essai 2 à 10. D'autre part, outre le type de matériau et le poids du

compacteur, il y a l'amplitude et la fréquence du compacteur ainsi que la charge appliquée lors de l'essai FWD ou PLT qui peuvent différer entre les relations obtenues et celles de la littérature.

Autrement, tant pour les essais FWD que PLT, la majorité des données se retrouvent à l'intérieur des limites supérieure et inférieure représentées par le prolongement des relations de *White et al.* (2009) et *White et al.* (2007). Ce faisant, les relations obtenues semblent suivre les tendances de la littérature. Il est toutefois important de garder en tête les différences énumérées précédemment (poids, fréquence et amplitude du compacteur, granulométrie et arrosage de l'enrochement et contrainte appliquée lors de l'essai) puisque ce sont tous des facteurs influençant le CMV ou le module de déformation.

Enfin, il est à noter que, tel que discuté à la section 1.2.4, contrairement aux planches d'essai, les relations de la littérature sont développées pour un type de matériau et seul le nombre de passes varie. Cela peut expliquer pourquoi des coefficients de régression élevés sont généralement obtenus dans la littérature alors que dans le cas des planches d'essai, les données sont plutôt dispersées autour de la tendance linéaire.

5.4.3 Comparaison des relations $CMVr-E_{PLT}$ et $CMVr-E_{MMASW}$

Tel que souligné à la section 4.4.2, la relation $CMVr-E_{MMASW}$ obtient une pente plus abrupte que la relation $CMVr-E_{PLT}$ puisque les modules de Young sont beaucoup plus élevés que les modules de déformation issus des essais PLT (Figure 5.5).

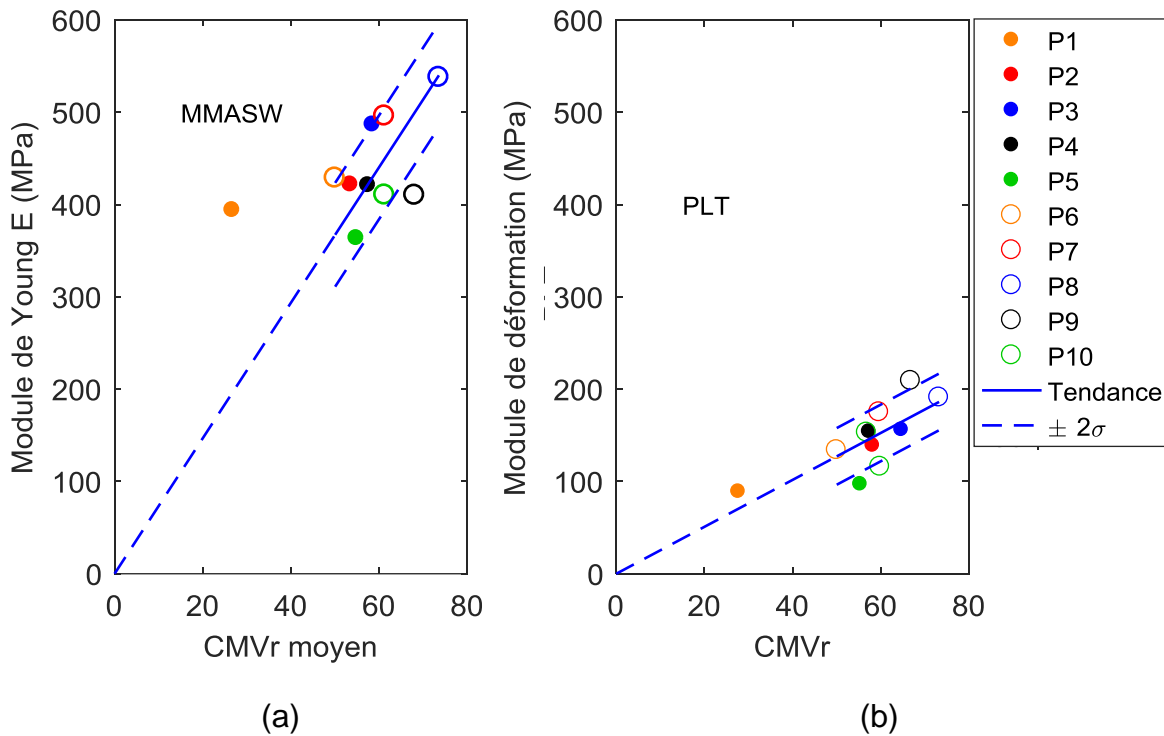


Figure 5.5 : Comparaison des relations issues des (a) relevés MMASW et (b) des essais PLT

En effet, lors de l'essai MMASW, l'excitation provoquée par la chute du marteau induit que de très petites déformations dans le sol. Tel que discuté à la section 1.1.2, le sol a un comportement élasto-plastique non linéaire. Le module de Young mesuré est donc associé à une pente sécante au début de la courbe contrainte-déformation ($S_{s-élas.}$) alors que les modules de déformation issus des essais PLT sont plutôt associés à une pente sécante à la courbe à plus grandes déformations (S_s) (Figure 5.6). La pente $S_{s-élas.}$ étant plus élevée que la pente S_s , le module de Young issu des essais MMASW est nécessairement plus élevé que les modules de déformation issus des essais PLT.

Il est donc normal que la pente de la relation $CMVr-E_{MMASW}$ soit plus élevée que celle reliant le $CMVr$ aux modules de déformation E_{PLT} .

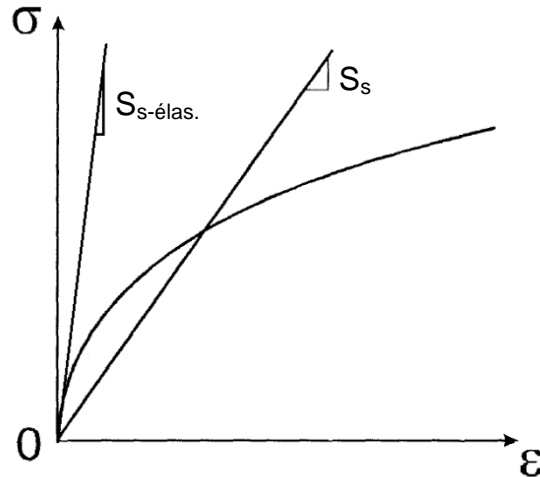


Figure 5.6: Comparaison des pentes sécantes à très petites déformations ($S_{s-élas.}$) et à plus grandes déformations (S_s) (modifié de Briaud, 2000)

5.5 Application de la méthode à un barrage réel

L'application de la méthode de détermination d'un CMVr requiert l'identification des passes du compacteur à l'aide des données CCC. Dans le cas d'un barrage, cela peut s'avérer difficile puisque la trajectoire du compacteur est moins structurée que dans le cas des planches d'essai. De plus, le volume de données étant très important, le traitement des données pour la détermination des CMVr prendrait beaucoup de temps. Par exemple, la base de données du barrage Romaine-2 contient plus de 1,7 G données CCC (Bélanger, 2018).

Dans cette optique, pour un barrage, il est plus facile de mesurer un CMV moyen (moyenne des CMV pour toutes les passes) qu'un CMVr. Une relation est donc développée entre le CMV moyen (CMVmoy) et le CMVr à partir des données de compactage CCC des planches d'essai (Figure 5.7).

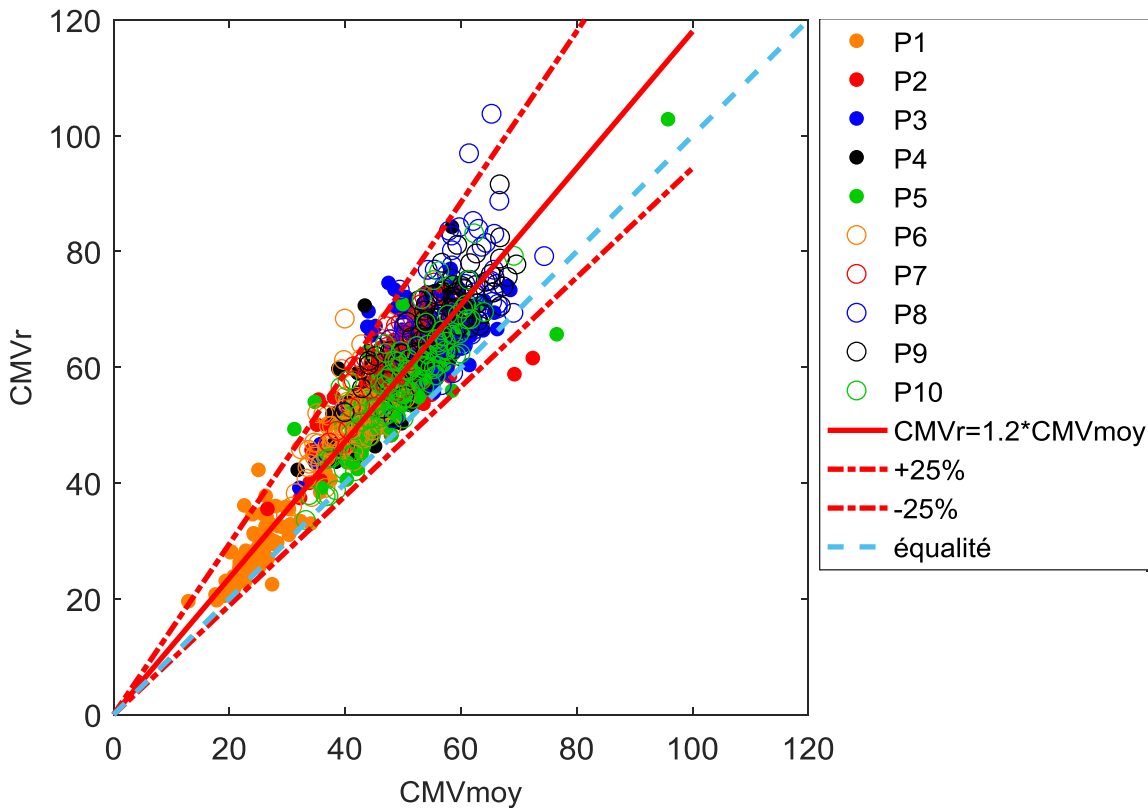


Figure 5.7 : Relation du CMVr en fonction du CMVmoy

La relation établie montre qu'avec une erreur relative de $\pm 25\%$, le CMVr correspond à 1,2 fois le CMVmoy. De plus, le coefficient de régression (r^2) obtenu est plutôt élevé, avec une valeur de 0,8. Cette relation permet donc de définir rapidement un CMVr pour un barrage sans avoir à identifier les passes du compacteur.

Autrement, la méthode développée a permis de relier un CMVr à un module de déformation obtenu à partir d'un essai PLT. Toutefois, les modules de déformation utilisés pour l'analyse de performance d'un barrage proviennent généralement des mesures de tassement directement obtenues sur le barrage.

Dans le cas de la Romaine 2, la méthode utilisée pour calculer les modules de déformation des zones d'enrochement est définie selon Smith (2015). Cette méthode consiste à relier la déformation axiale mesurée en un point à la contrainte verticale calculée à ce point (pour plus de détails, voir Smith (2015)). Le module de déformation est alors obtenu en mesurant la pente de la relation contrainte-déformation.

Ainsi, à partir des données mesurées et calculées par Smith (2015), il est possible de comparer les modules obtenus à partir des essais PLT à ceux obtenus sur le barrage Romaine 2. Toutefois, plutôt que de définir la relation contrainte-déformation en une droite linéaire comme Smith (2015), il a été décidé de définir une relation bilinéaire, tel qu'illustré à la Figure 5.8. Les résultats montrés correspondent à ceux obtenus pour la zone interne d'enrochement de la Romaine 2 (matériau 3O).

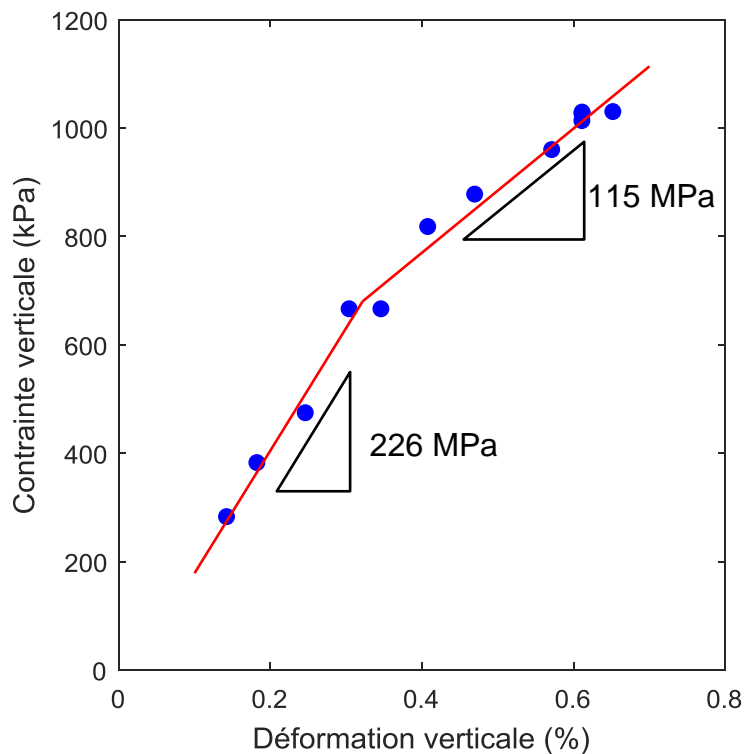


Figure 5.8 : Relation contrainte-déformation obtenue pour la zone d'enrochement interne de la Romaine 2 (matériau 3O) (modifié de Smith, 2015)

À partir de la Figure 5.8, des modules de déformation de 226 MPa et de 115 MPa sont obtenus pour la première et la deuxième période respectivement. La jonction entre les deux droites correspond à la pause hivernale (arrêt des constructions), où alors du fluage commence à être observé (Smith, 2018). Le changement de pente pourrait également correspondre à l'enclenchement du mécanisme de broyage dans l'enrochement. En effet, le broyage apparaît à partir d'une certaine contrainte et une fois dépassé cette contrainte, les déformations sont plus importantes (Kermani, 2016).

Ces modules sont donc comparés à ceux obtenus avec les essais PLT réalisés sur la planche d'essai 7 (Figure 5.9). La planche numéro 7 est celle dont les conditions de compactage sont similaires à la zone 3O du barrage Romaine 2. En plus du module de déformation mesuré au premier chargement, les modules issus des cycles de chargement à 200 kPa, 600 kPa et 1 000 kPa sont également comparés (voir section 2.3.3 pour la séquence de chargement).

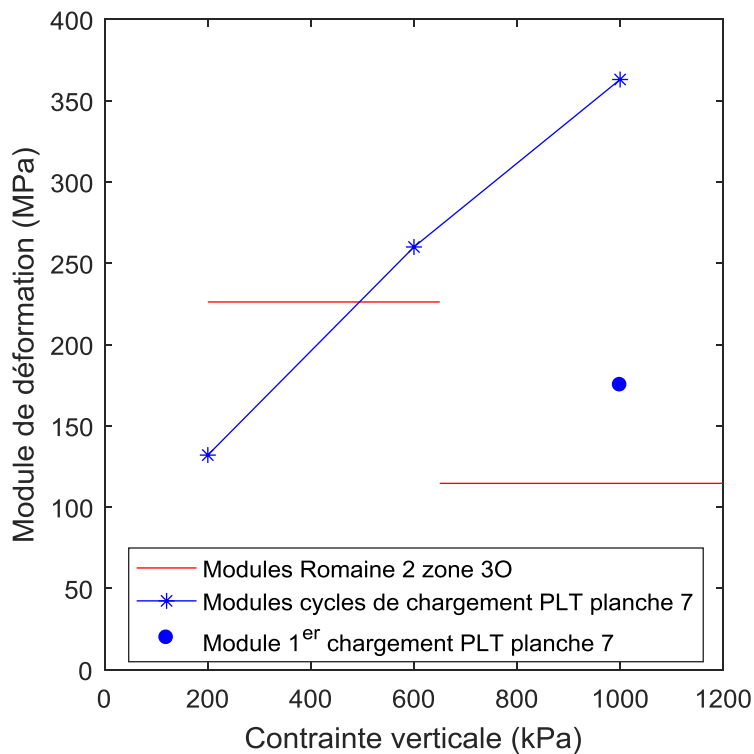


Figure 5.9 : Comparaison entre les modules de déformation issus des essais PLT de la planche 7 et ceux calculés à partir des déformations mesurées sur le barrage Romaine-2 pendant la construction (zone interne d'enrochement)

Le module de déformation obtenu à un chargement de 200 kPa sur la planche d'essai 7 est plus faible que le module issu de la première pente de la courbe contrainte-déformation de la Romaine-2. Toutefois, à partir d'une contrainte verticale d'environ 600 kPa, les modules de la Romaine 2 sont toujours plus faibles que ceux issus des essais PLT. Ainsi, les essais PLT semblent surestimer les tassements lors de la première période de construction (1^{er} droite) alors que pour la deuxième période de construction (2^e droite), ils semblent les sous-estimer.

D'une part, le volume de sol impliqué dans un essai de plaque est beaucoup plus faible que le volume de sol représentatif des tassements mesurés sur le barrage. De plus, le temps de chargement est beaucoup plus long dans le contexte de construction d'un barrage (environ 2 ans) que lors d'un essai de plaque (2 minutes). Ce faisant, les tassements mesurés lors de l'essai PLT sont pratiquement instantanés alors que dans le cas du barrage, la masse de sol comprend une certaine inertie. En effet, suite à la construction d'une nouvelle couche d'enrochement, des tassements supplémentaires peuvent être observés même plusieurs temps après la construction de la couche. Il est possible alors que cet effet d'inertie soit responsable de l'écart entre le module obtenu à une contrainte de 200 kPa pour l'essai PLT et celui mesuré sur le barrage.

D'autre part, les déformations supplémentaires mesurées sur le barrage pendant la deuxième période pourraient provenir de déformations plastiques causées par le fluage ou alors par le mécanisme de déformation de broyage. De plus, les tassements mesurés sur le barrage sont représentatifs d'une couche de sol beaucoup plus importante (environ 50 m) que ceux mesurés par l'essai PLT (environ 0,45 m). Le potentiel de déformation est donc plus important dans le cas du barrage.

Ainsi, en regard de ces résultats, l'essai PLT ne semble pas capable de reproduire les tassements mesurés pendant la construction du barrage. Éventuellement, les

modules de déformation pourraient être corrigés pour correspondre à ceux obtenus à partir des déformations mesurées sur le barrage. Une fois corrigés, ceux-ci pourront être reliés aux CMVr issus du compactage du barrage.

D'un autre côté, lors de la construction d'un barrage, les zones d'enrochement sont compactées par levées (couches). Tel que discuté à la section 2.3.4, grâce aux relevés MMASW des planches d'essai, Bouchard (2016) a pu démontrer que le compactage des levées supérieures augmentait la rigidité des couches inférieures. En effet, le compactage dynamique des couches sus-jacentes et leur poids propre engendre une surcharge dynamique et statique. Hors, le CMVr n'est représentatif de la rigidité qu'une fois le compactage d'une levée terminé. À ce moment, aucune surcharge n'est appliquée sur la couche (état de contrainte nulle). Dès que la couche subit le compactage des levées supérieures, le CMVr n'est alors plus représentatif de la rigidité de la couche, puisqu'il ne considère pas les surcharges appliquées. Ainsi, afin que les CMVr mesurés pendant la construction du barrage soient toujours pertinents une fois la construction terminée, il faudrait évaluer l'évolution du CMVr en fonction de la surcharge appliquée par les levées sus-jacentes.

Enfin, bien que des analyses supplémentaires sont nécessaires afin d'appliquer la technologie CCC à l'analyse de performance d'un barrage, celle-ci reste prometteuse puisqu'elle permet d'évaluer la variabilité spatiale de la rigidité de l'enrochement. Ce faisant, les zones de faiblesse peuvent rapidement être ciblées.

Conclusion

Conclusions

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer le potentiel d'utilisation de la technologie de contrôle de compactage en continu (CCC) dans l'analyse de performance des barrages en remblai. Pour se faire, les données de compactage CCC et les résultats des essais *in-situ* des planches d'essai de la Romaine-2 ont été utilisés.

Premièrement, une méthode de traitement des données de compactage CCC a été développée. Cette méthode a permis de trier les données par planche d'essai, par levée de compactage et puis par passe de compacteur (Figure 3.6). Par la suite, pour une levée donnée, la planche d'essai est divisée en sections. Pour chaque section, un CMV moyen est calculé par passe de compacteur. Ce faisant, le traitement des données CCC permet d'obtenir l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe pour chaque section d'une levée pour une planche donnée (Figure 3.10). La division des planches d'essai a été réalisée de façon à préserver la variabilité spatiale du CMV.

L'analyse des résultats du CMV en fonction du numéro de passe a montré que le comportement du CMV correspond, la majorité du temps, à celui attendu, soit d'augmenter avec le numéro de passe et, dans le cas des planches compactées en 8 passes, d'atteindre un plateau à la fin du compactage. En effet, de 55% à 95% du temps, le CMV atteint un plateau à la 7^e ou à la 8^e passe du compacteur, signifiant que la rigidité maximale de l'enrochement est atteinte. Ces résultats permettent donc de valider la méthode de compactage de la Romaine-2.

Par la suite, un CMV représentatif de la rigidité de l'enrochement à la fin du compactage (CMV_r) est déterminé en passant une courbe de régression de type

gaussien à travers les données du CMV en fonction du numéro de passe. Le CMVr est défini comme étant la valeur de la régression à la dernière passe. En général, un coefficient de régression très élevé ($r^2 \geq 0.8$) est obtenu (de 55 % à 85% du temps, sauf pour les planches 1 et 3). Le type gaussien est donc approprié pour reproduire l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe. Autrement, les résultats montrent qu'un coefficient de régression faible est obtenu lorsque le CMV montre beaucoup de fluctuations. La courbe de régression s'apparente alors à la moyenne des données. Par conséquent, même pour un coefficient de régression faible, le CMVr issu de la courbe de régression est considéré représentatif de la rigidité de l'enrochement à la fin du compactage. De plus, il a été montré que l'utilisation d'une courbe de régression permet de diminuer la variabilité du CMV et donc du bruit associé à sa mesure.

À partir du CMVr moyen obtenu par planche, il a été possible d'évaluer l'influence des conditions de compactage. Les conclusions obtenues sont similaires à celles issues des résultats des essais *in-situ*, ce qui a permis de valider le paramètre CMVr. Ces résultats sont prometteurs puisque la réalisation d'essais *in-situ* sur un barrage nécessite l'arrêt temporaire des travaux dans la zone de l'essai, ce qui n'est pas le cas avec le CMVr puisqu'il est déterminé directement à partir des données de compactage. Il a même été possible de tirer des conclusions là où cela n'avait pas été possible avec les essais *in-situ*. Il est probable que ce soit dû au fait que la technologie CCC produit un important volume de mesures contrairement aux essais *in-situ* ponctuels.

Enfin, les relations obtenues entre le CMVr et les modules de déformations issus des essais *in-situ* (essais PLT, FWD et MMASW) montrent que le module de déformation tend à augmenter avec le CMVr, ce qui corrobore avec la littérature. Toutefois, une dispersion non négligeable des données est observée autour des tendances. Cette dispersion pourrait provenir du fait que des facteurs influençant le CMVr et le module de déformation, telle que la granulométrie et l'arrosage de

l'enrochement, varie d'une planche à l'autre. En effet, l'influence des conditions de compactage sur les relations obtenues a été évaluée et les résultats tendent à montrer qu'établir les relations pour un type de matériau donné diminue la dispersion des données. Autrement, la profondeur d'influence du rouleau compacteur est plus importante que celle des essais FWD et PLT, ce qui amène un biais dans les relations et pourrait contribuer à la dispersion des données. Enfin, outre la dispersion des données, il est difficile de tirer des tendances claires dû au faible spectre d'énergie de compactage évalué.

Finalement, l'utilisation de la technologie CCC pour l'analyse de performance des barrages en remblai est considérée prometteuse. En effet, vu son caractère continu, les zones de faiblesse pourraient être rapidement ciblées. Afin d'appliquer la méthode développée à un barrage réel, une relation entre le CMVr et le CMV moyen (correspondant à la moyenne des CMV de toutes les passes du compacteur) a été établie. Cette relation permettrait de rapidement déterminer un CMVr sans avoir à identifier les passes du compacteur pour un barrage. Des analyses supplémentaires sont toutefois nécessaires afin d'être capable de relier le CMVr aux modules de déformation provenant des tassements mesurés directement sur le barrage. De plus, pour l'instant, le CMVr mesuré pour une couche donnée n'est pas représentatif de la rigidité de celle-ci une fois la construction du barrage terminée. Il serait donc pertinent d'évaluer la variation du CMVr en fonction des surcharges appliquées par les levées sus-jacentes lors de la construction du barrage.

Recommandations

Suite à l'étude, quatre principales recommandations sont proposées :

- Un logiciel de traitement des données pourrait être développé de façon à obtenir directement l'évolution du CMV en fonction du numéro de passe.

- Afin de confirmer les tendances obtenues entre le CMVr et les modules de déformation des essais *in-situ*, il est recommandé d'élargir le spectre d'énergie de compactage et de développer les relations pour un seul type de matériau. Pour se faire, plutôt que d'effectuer les essais *in-situ* à la fin du compactage, les essais pourraient être réalisés à différentes passes.
- Des analyses supplémentaires sont nécessaires afin d'être capable de relier le CMVr aux modules de déformation obtenus à partir des tassements directement mesurés sur un barrage. Pour se faire, une correction des modules des essais *in-situ* pourrait être appliquée.
- Afin que les CMVr mesurés pendant la construction soient encore représentatifs de la rigidité une fois la construction du barrage terminée, il serait pertinent d'évaluer l'effet des surcharges appliquées par les couches sus-jacentes pendant la construction sur le CMVr.

Bibliographie

- Anderegg, R., & Kaufmann, K. (2004). Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: Feedback Control Systems in Automatic Compaction and Compaction Control. *Journal of the Transportation Research Board*, 10.
- ASTM. (2015). Calculating *In Situ* Equivalent Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory (pp. 1-7): Université Laval.
- ASTM. (2017). Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Rigid Plate Loading Method (pp. 1-10): Université Laval.
- Bélangier, Simon-Ghislain. (2018). *Non publié*. (Mémoire), Université Laval.
- Bouchard, J. (2016). *Caractérisation de l'enrochement du barrage Romaine-2*. (Maîtrise), Université Laval, Québec.
- Brandl, H., & Adam, D. (1997). *Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials*. Article présenté à la Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hambourg.
- Breitenbach, A. J. (1993). Rockfill Placement and Compaction Guidelines. *Geotechnical Testing Journal*, No. 16, 76-84.
- Briaud, J.-L. (2000). *Introduction to soil moduli*. Texas A&M University
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams* (T. F. Group Ed.). London, UK: A.A. Balkema publishers.
- Floss, R., Gruber, N., & Obermayer, J. (1983). *A dynamical test method for continuous compaction control*. Article présenté à la 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Forssblad, L. (1980). Compaction meter on vibrating rollers for improved compaction control. 541-546.
- Geodynamik. Compactometer, compaction meter for vibratory rollers ALFA-022R.
- Grenier, Simon, & Dussault, Gilles. (2013). *Essais de chargement de plaque sur les zones de recharge 3O et 3P du barrage et de la digue F2 de la Romaine-2*. Qualitas
- Grenier, S. (2007). *Analyse dynamique du déflectomètre à masse tombante: Tome 1*. (Doctorat), Université Laval.

- Grenier, S. (2011). *Essais au déflectomètre à masse tombante et essais de chargement de plaque sur remblais d'essais en enrochement*. Groupe Qualitas
- Grenier, S., Verret, D., Longtin, H., Mathieu, B., & Hammamji, Y. (2013). *Romaine-2 Hydroelectric Project: Use of Falling Deflectometer and Plate Load Tests on Large-Scale Rockfills*. Article présenté à la Canadian Dam Association Annual Conference, Montréal, Québec.
- Hoff, I. (1999). *Material Properties of Unbound Aggregates for Pavement Structures*. The Norwegian University of Science and Technology.
- Hunter, G. , & Fell, R. (2003). Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, No. 129, 909-917.
- Hunter, G. , & Fell, R. . (2002). *The deformation behavior of rockfill* (405). The University of New South Wales
- Hydro-Québec. (2017). *Projet de la Romaine*. Tiré de <http://www.hydroquebec.com/romaine/projet/>
- Kermani, M. (2016). *Prediction of post-construction settlements of rockfill dams based on construction field data*. (Doctorat), Université Laval, Québec, Canada.
- Kutzner, C. (1997). *Earth and Rockfill Dams: Principles of Design and Construction*. Netherlands: A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Lefebvre, G., Karray, M., & Ethier, Y. (2010). *Relevés MASW : Remblais d'essais en enrochement - Secteur la Romaine 2* (Dossier QUAS-10-01S). Géowave : Études et investigations géowave inc.
- Liu, D., Li, Z., & Lian, Z. (2014). Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology. *Elsevier: Automation in Construction*, No. 44, 234-247.
- Longtin, H., Péloquin, É., Verret, D., Mathieu, B., Beauséjour, N., Hammamji, Y., & Rattue, A. (2012). *Romaine-2 Hydroelectric Project: Design of the first large asphalt core rockfill dam and dikes in North America*. Article présenté à la Canadian Dam Association Annual Conference, Saskatoon, SK, Canada.
- Marachi, N. D., ASCE, A. M., K. Chan, C., & Bolton Seed, H. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials. *Journal of the mechanics and foundations division*, 95-115.
- Mooney, M., & Adam, D. (2007). *Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview*. Article présenté à la Seventh

International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Boston, Massachussets.

Mooney, M. A., Rinehart, R. V., Facas, N. W., & Musimbi, O. M. (2010). *Intelligent Soil Compaction Systems* (676). Iowa State University

Rinehart, R. V., & Mooney, M. A. . (2009). Measurement depth of vibratory roller-measured soil stiffness. *Géotechnique*, No. 7, 609-620.

Rinehart, Robert V. , Mooney, Micheal A. , Facas, Norman W. , & Musimbi, Odon M. . (2012). Examination of Roller-Integrated Continuous Compaction Control on Colorado Test Site. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2310, 3-12.

Sandström, Ake J. , & Pettersson, Carl B. . (2003). Intelligent Systems for QA/QC in soil compaction, 17. Tiré de

Smith, M. (2015). *Rockfill settlement measurement and modelling of the Romaine-2 dam during construction*. Article présenté à la 25^e Congrès des Grands Barrages, Stavanger.

Smith, M. (2017) *Consultation personnelle*.

Smith, M. (2018). [Consultation personnelle].

Soud, I. (2016). *Modélisation en centrifugeuse pour étudier le comportement des barrages en enrochement avec noyaux minces centraux pendant la construction et la mise en eau*. (Doctorat), Université Laval, Québec, Canada.

Thurner, H. F., & Sandström, A. (2000). *Continuous Compaction Control, CCC*. Article présenté à la European Workshop: Compaction of Soils and Granular Materials, Paris.

Vannobel, P., Smith, M., Lefebvre, G., & Karray, M. (2013). *Control of Rockfill Placement for the Romaine-2 Asphaltic Core Dam in Northern Quebec*. Article présenté à la Canadian Dam Association Annual Conference, Montréal, Québec.

Verret, D. (2016) *Consultation personnelle*.

Verret, D., Grenier, S., Longtin, H., & Kara, R. (2013). *Romaine-2 Hydroelectric Project: Large-scale test Fills for ACRD Dam and Dikes Design*. Article présenté à la Annual Conference of the Canadian Dam Association, Montréal, Québec.

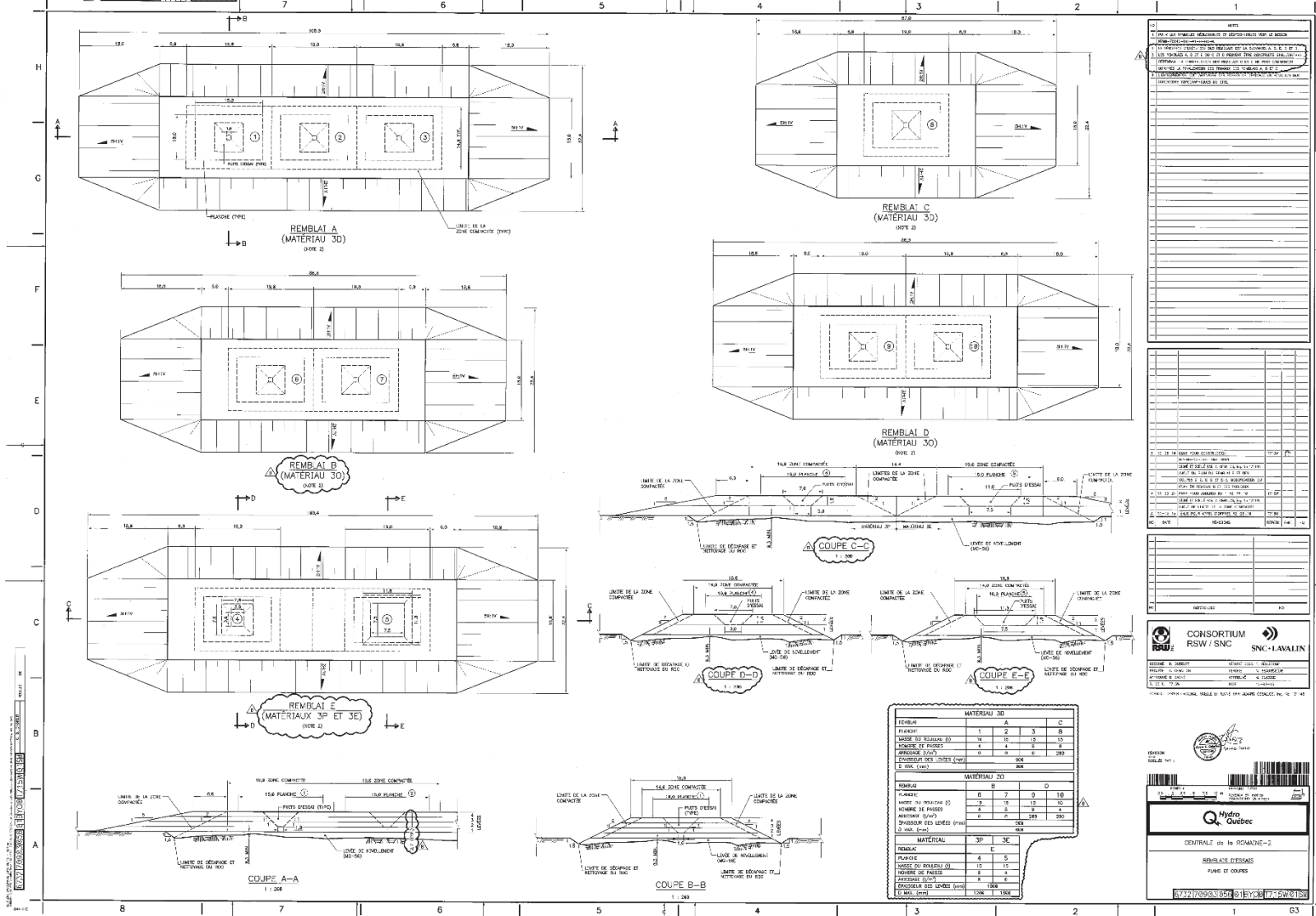
White, D. J. , & Vennapusa, P. KR. . (2010). *A Review of Roller-Integrated Compaction Monitoring Technologies for Earthworks*. Iowa State University

- White, David J. , Jaselskis, Edward J. , Schaefer, Vernon R. , & Cackler, E. Thomas (2005). Real-Time Compaction Monitoring in Cohesive Soils from Machine Response. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1936, 173-180.
- White, David J. , & Thompson, Mark J. . (2008). Relationships between In Situ and Roller-Integrated Compaction Measurements for Granular Soils. *American Association of Civil Engineers ASCE*, 1763-1771.
- White, David J. , Thompson, Mark J. , Vennapusa, Pavana , & Siekmeier, John (2008). Implementing Intelligent Compaction Specification on Minnesota TH-64: Synopsis of Measurement Values, Data Management and Geostatistical Analysis. *Journal of the Transportation Research Record*, 1-9.
- White, David J., Thompson, Mark J., & Vennapusa, Pavana. (2007). *Field Study of Compaction Monitoring Systems: Self-Propelled Non-Vibratory 825G and Vibratory Smooth Drum CS-533E Rollers*
- White, D. J., Vennapusa, P., Zhang, J., Gieselman, H., & Morris, M. D. (2009). *Implementation of Intelligent Compaction Performance Based Specifications in Minnesota* (MN/RC 2009-14). Iowa State University
- White, D. J., Vennapusa, P. K., Gieselman, H., Zhang, J., Goldsmith, R., Johanson, L., & Quist, S. (2010). *Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials* (ER10-01). Iowa State University

ANNEXE A. Planches d'essai

A.1 Plans des planches d'essai

Figure 2 : Plans et coupes des remblais d'essais



CONSORTIUM RSW / SNC - SNC - IANALIN

REMBLAI D'ESSAI

PROJET: CENTRALE DE LA ROMANNE-2

REMBLAI D'ESSAI

PLANS ET COUPES

DATE: 2011-08-08

PROJET: CENTRALE DE LA ROMANNE-2

REMBLAI D'ESSAI

PLANS ET COUPES

DATE: 2011-08-08

A.2 Positions des essais de contrôle

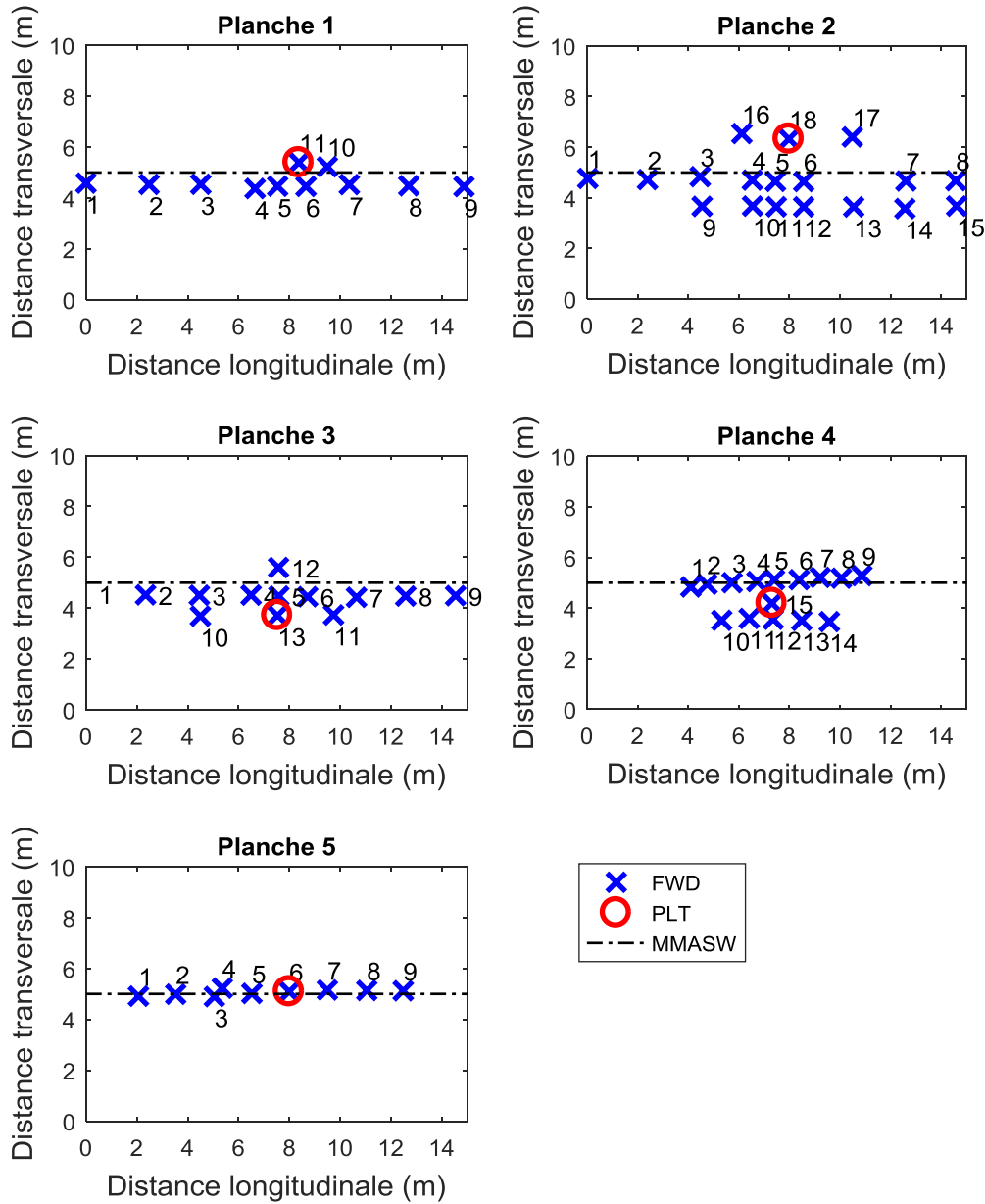


Figure A.1 : Positions des essais de contrôle (FWD, PLT et MMASW) des planches 1 à 5

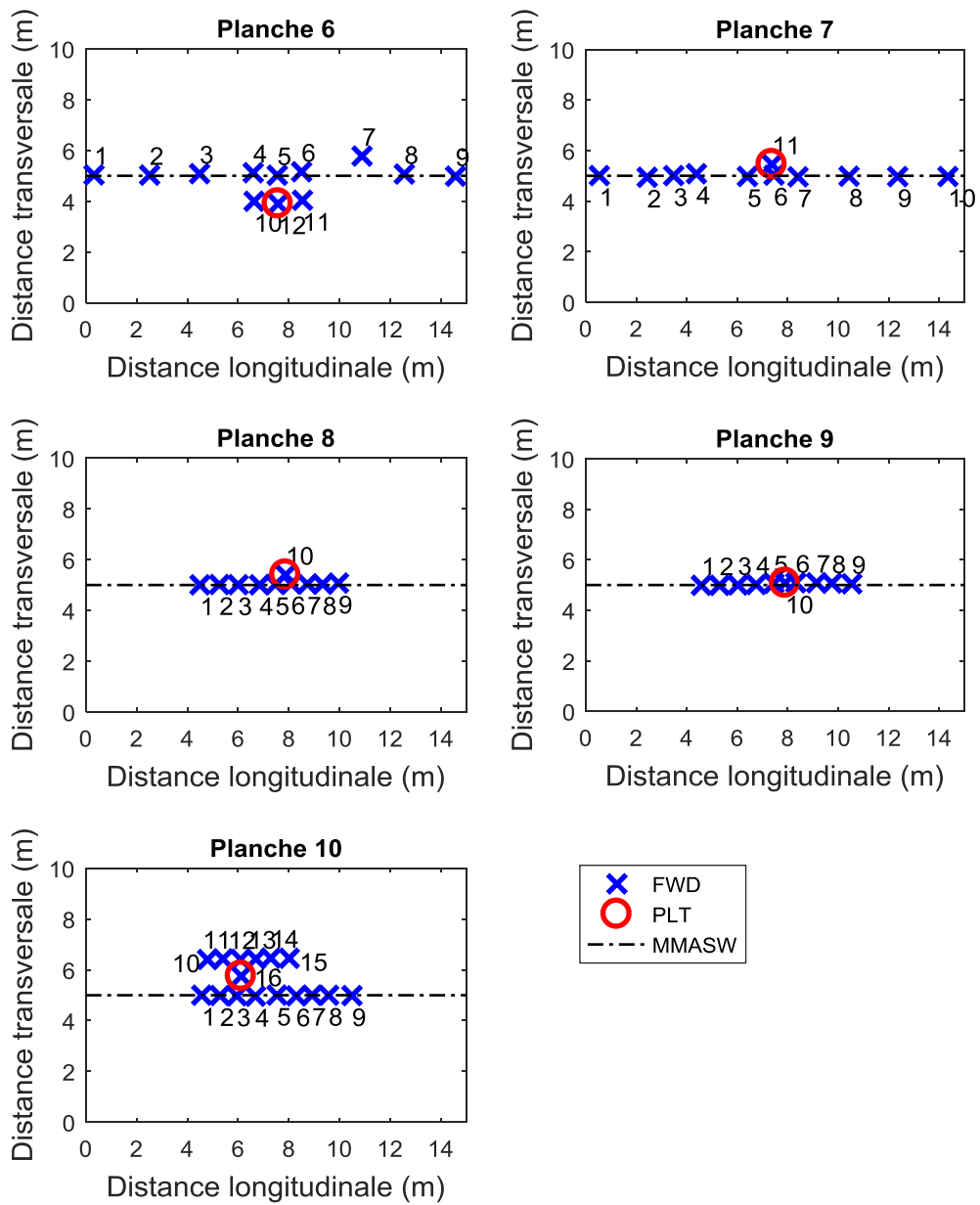


Figure A.2 : Positions des essais de contrôle (FWD, PLT et MMASW) des planches 6 à 10

A.3 Essais de chargement de plaque (PLT)

Tableau A.1: Modules de déformation élastiques et élasto-plastiques obtenus avec la plaque de 450 mm

Remblai	Planche	Niveau de chargement	Charge réelle	Module	
				E_{EP}	E_E
			(kN)	(Mpa)	(Mpa)
A	1	Premier à 165 kN	164,8	122	298
		Trois cycles à 35 kN	35,2	238	236
		Trois cycles à 80 kN	86,4	254	272
		Trois cycles à 165 kN	166,5	409	483
A	2	Premier à 165 kN	159,9	306	345
		Trois cycles à 35 kN	33,8	178	180
		Trois cycles à 80 kN	81,2	257	266
		Trois cycles à 165 kN	160,7	327	309
A	3	Premier à 165 kN	155,4	330	413
		Trois cycles à 35 kN	32,6	224	221
		Trois cycles à 80 kN	85,4	318	328
		Trois cycles à 165 kN	161,4	375	406
E	4	Premier à 165 kN	165,4	166	540
		Trois cycles à 35 kN	38	413	405
		Trois cycles à 80 kN	82,4	467	477
		Trois cycles à 165 kN	167,5	469	504
E	5	Premier à 165 kN	163,4	121	663
		Trois cycles à 35 kN	35,7	203	211
		Trois cycles à 80 kN	84,3	267	292
		Trois cycles à 165 kN	155,2	306	364

Remblai	Planche	Niveau de chargement	Charge réelle	Module	
				E_{EP}	E_E
			(kN)	(Mpa)	(Mpa)
B	6	Premier à 165 kN	181,7	167	356
		Trois cycles à 35 kN	34,9	187	192
		Trois cycles à 80 kN	82,4	260	287
		Trois cycles à 165 kN	160,7	282	311
B	7	Premier à 165 kN	181,6	310	392
		Trois cycles à 35 kN	35,6	202	233
		Trois cycles à 80 kN	79,2	269	294
		Trois cycles à 165 kN	165,5	397	373
C	8	Premier à 165 kN	NA	NA	NA
		Trois cycles à 35 kN	35,3	208	212
		Trois cycles à 80 kN	87,7	302	324
		Trois cycles à 165 kN	158,9	391	421
D	9	Premier à 165 kN	151,6	358	403
		Trois cycles à 35 kN	32,8	224	241
		Trois cycles à 80 kN	73	289	298
		Trois cycles à 165 kN	154,6	390	404
D	10.1	Premier à 165 kN	166,5	123	416
		Trois cycles à 35 kN	40,3	178	192
		Trois cycles à 80 kN	78,5	233	257
		Trois cycles à 165 kN	162	303	347
D	10.2	Premier à 165 kN	162,8	170	383
		Trois cycles à 35 kN	39,5	214	206
		Trois cycles à 80 kN	82,5	289	305
		Trois cycles à 165 kN	163,6	350	387

Tableau A.2: Modules de déformation élastiques et élasto-plastiques obtenus avec la plaque de 750 mm

Remblai	Planche	Niveau charge	Charge réelle	Module	
				E_{EP}	E_E
		(kN)	(kN)	(Mpa)	(Mpa)
A	1	Premier à 440 kN	443,1	89	307
		Trois cycles à 88 kN	89,1	139	149
		Trois cycles à 265 kN	263,5	223	246
		Trois cycles à 440 kN	440	265	308
A	2	Premier à 440 kN	442,3	139	345
		Trois cycles à 88 kN	90,4	118	124
		Trois cycles à 265 kN	263	206	218
		Trois cycles à 440 kN	443	263	280
A	3	Premier à 440 kN	439,7	156	294
		Trois cycles à 88 kN	86,7	117	119
		Trois cycles à 265 kN	260,6	219	224
		Trois cycles à 440 kN	446	300	318
E	4	Premier à 440 kN	440,9	154	370
		Trois cycles à 88 kN	89	175	185
		Trois cycles à 265 kN	267,1	287	297
		Trois cycles à 440 kN	439,8	351	393
E	5	Premier à 440 kN	438,4	97	355
		Trois cycles à 88 kN	91,1	168	184
		Trois cycles à 265 kN	263	270	299
		Trois cycles à 440 kN	441,8	318	366
B	6	Premier à 440 kN	441,8	134	254
		Trois cycles à 88 kN	91,7	124	130
		Trois cycles à 265 kN	263,4	185	211
		Trois cycles à 440 kN	438,4	236	295
B	7	Premier à 440 kN	439,7	175	365
		Trois cycles à 88 kN	87,4	132	137
		Trois cycles à 265 kN	262,8	260	287
		Trois cycles à 440 kN	442,3	363	352

Remblai	Planche	Niveau charge	Charge réelle	Module	
				E_{EP}	E_E
		(kN)	(kN)	(Mpa)	(Mpa)
C	8	Premier à 440 kN	440,2	191	330
		Trois cycles à 88 kN	87,4	132	136
		Trois cycles à 265 kN	267,5	240	248
		Trois cycles à 440 kN	441,3	305	325
D	9	Premier à 440 kN	426,6	209	478
		Trois cycles à 88 kN	84,4	205	225
		Trois cycles à 265 kN	256,2	346	372
		Trois cycles à 440 kN	436,6	430	465
D	10.1	Premier à 440 kN	439,8	116	336
		Trois cycles à 88 kN	90	147	155
		Trois cycles à 265 kN	264,1	282	289
		Trois cycles à 440 kN	444	327	369
D	10.2	Premier à 440 kN	441,5	153	293
		Trois cycles à 88 kN	89,8	115	120
		Trois cycles à 265 kN	265,2	216	228
		Trois cycles à 440 kN	440,8	288	312

A.4 Essais au déflectomètre à masse tombante (FWD)

Tableau A.3: Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 1

PLANCHE 1	Niveau de charge			
	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	131	143	168	195
2	177	184	192	210
3	202	208	229	245
4	189	199	191	206
5	170	191	206	251
6	212	212	241	219
7	192	189	190	212
8	216	210	235	254
9	272	257	290	314
10	215	241	241	252
11	187	201	195	207

Tableau A.4: Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 2

PLANCHE 2	Niveau de charge			
	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	290	313	329	346
2	169	173	183	200
3	296	294	276	327
4	255	262	290	311
5	213	262	249	269
6	270			
7	194	230	222	224
8	286	197	286	289
9	210	268	255	286
10	257	223	275	297
11	189	267	215	237
12	275	201	302	318
13	291	281	314	326
14	208	292	230	251
15	239	214	259	280
16	227	244	282	302
17	214	250	249	290
18	321	319	334	340

Tableau A.5 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 3

PLANCHE 3	Niveau de charge			
Numéro d'essai	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	233	252	275	302
2	125	139	167	182
3	193	200	211	226
4	332	332	349	364
5	325	328	345	372
6	123	133	150	170
7	314	316	317	331
8	404	402	396	396
9	289	293	306	321
10	384	359	385	416
11	279	289	315	396
12	293	292	294	310
13	295	307	313	284

Tableau A.6 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 4

PLANCHE 4	Niveau de charge			
Numéro d'essai	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	203	207	213	231
2	279	279	276	300
3	212	212	201	232
4	167	162	180	192
5	308	306	308	349
6	116	119	130	138
7	259	257	271	297
8	273	273	283	307
9	103	105	106	114
10	338	341	281	299
11	250	268	270	295
12	261	271	282	307
13	345	348	341	349
14	262	262	267	278
15	311	318	357	368

Tableau A.7 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 5

PLANCHE 5	Niveau de charge			
Numéro d'essai	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	377	369	346	359
2	201	217	224	246
3	198	190	173	217
4	133	142	169	217
5	211	209	177	215
6	221	225	224	237
7	333	349	341	367
8	260	257	263	266
9	338	284	354	368

Tableau A.8 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 6

PLANCHE 6	Niveau de charge			
Numéro d'essai	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	172	212	238	184
2	222	249	266	233
3	257	258	136	271
4	200	286	289	201
5	229	251	280	238
6	182	251	261	215
7	158	272	293	191
8	169	188	223	188
9	194	205	228	191
10	257	267	283	291
11	155	159	173	192
12	161	170	182	202

Tableau A.9 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 7

PLANCHE 7	Niveau de charge			
Numéro d'essai	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	191	267	291	229
2	160	254	280	197
3	136			164
4	164	190	213	187
5	178	204	233	211
6	171	221	251	196
7	200	262	311	201
8	248	231	254	267
9	201	269	285	237
10	273	286	295	291
11	200	203	218	238

Tableau A.10 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 8

PLANCHE 8	Niveau de charge			
Numéro d'essai	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	232	242	260	288
2	283	295	325	361
3	274	284	307	333
4	416	417	415	445
5	361	365	357	385
6	198	212	227	232
7	239	256	292	329
8	245	268	277	308
9	333	344	379	404
10	369	363	366	385
11	290	293	307	329
12	396	394	398	409
13	383	401	409	422
14	433	399	374	369
15	420	426	433	448

Tableau A.11 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 9

PLANCHE 9	Niveau de charge			
	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	335	306	294	278
2	186	193	204	227
3	192	197	206	227
4	251	258	273	300
5	248	247	251	265
6	207	214	236	262
7	273	272	271	291
8	265	271	281	307
9	236	236	251	269
10	207	214	236	262

Tableau A.12 : Modules de déformation obtenus avec l'analyse statique de la planche 10

PLANCHE 10	Niveau de charge			
	30 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1	233	246	269	299
2	245	248	260	288
3	228	231	237	265
4	276	279	285	310
5	233	240	253	282
6	256	262	267	288
7	181	186	202	221
8	214	224	236	254
9	176	183	196	217
10	243	253	266	290
11	209	216	237	263
12	93	111	125	143
13	219	229	248	277
14	220	235	256	279
15	189	197	208	233
16	216	223	236	259

Légende	
	Emplacement essai PLT
	Aucune donnée pour raison inconnue

A.5 Profils moyens des vitesses de cisaillement des ondes (MMASW)

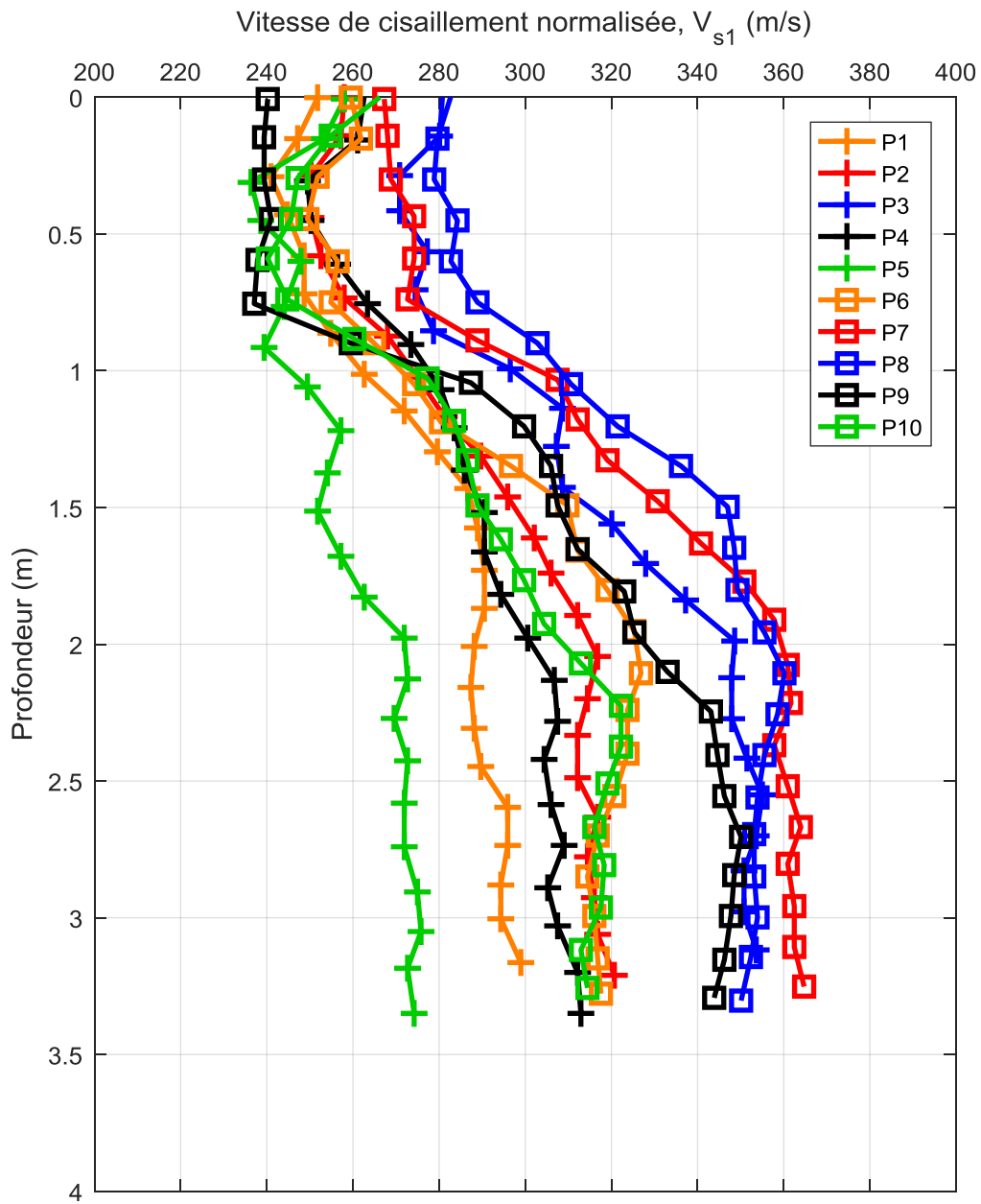


Figure A.3 : Profils des vitesses de cisaillement moyennes des planches d'essai

ANNEXE B. Méthodologie

B.1 Tri préliminaire

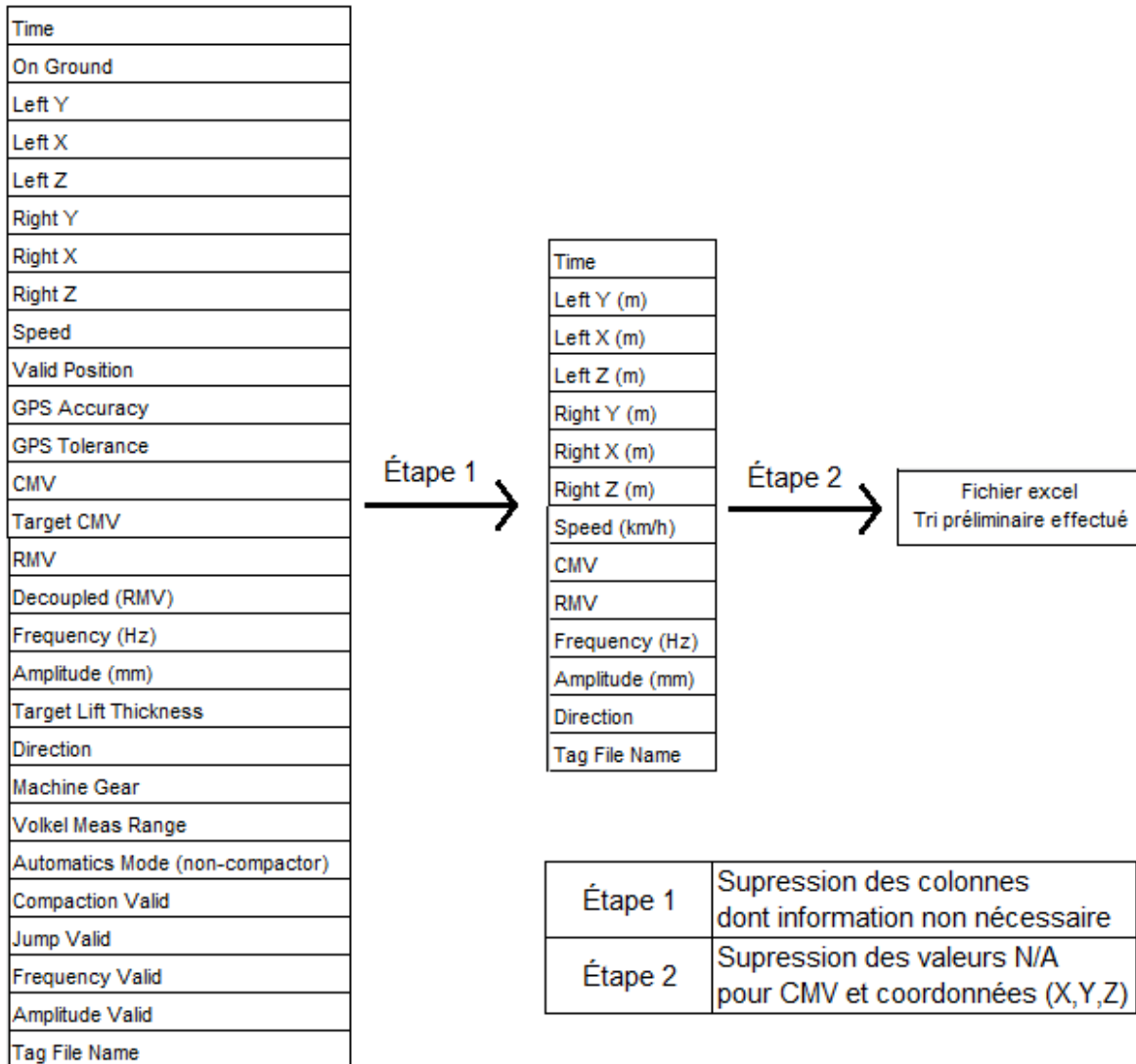


Figure B.1: Étapes du tri préliminaire des données CCC

B.2 Méthode des aires des triangles

La méthode des aires des triangles permet de déterminer si un point se situe à l'intérieur d'un rectangle. L'approche consiste à mesurer l'aire des triangles formés par le point (P) et les extrémités du rectangle. L'aire d'un triangle correspond au déterminant de la matrice formée par les coordonnées des extrémités du triangle multiplié par 0,5. Il est important que les extrémités de la planche et du triangle soient posées dans le sens anti-horaire.

Par exemple, selon la Figure B.2, l'aire du triangle A1 correspond à :

$$A1 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} X1 & Y1 & 1 \\ X2 & Y2 & 1 \\ X0 & Y0 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{Équation 26}$$

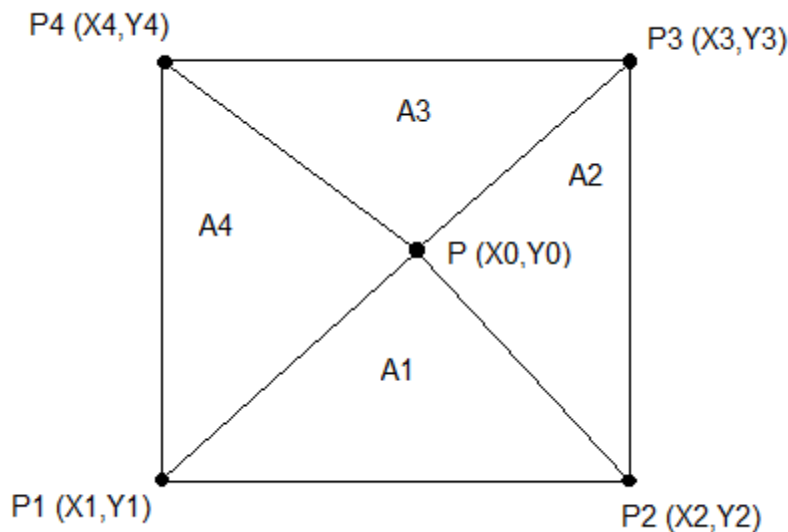


Figure B.2 : Méthode des aires des triangles

Le point P est considéré à l'intérieur du rectangle si toutes les aires calculées (A1, A2, A3 et A4) sont positives.

B.3 Méthode de transformation des coordonnées

La méthode utilisée pour transformer les coordonnées est une méthode matricielle.

Les coordonnées sont multipliées par une matrice permettant la translation des coordonnées, puis la rotation de celles-ci. La matrice de transformation est définie tel que :

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \cdot dx + \sin(\alpha) \cdot dy \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \cdot dx + \cos(\alpha) \cdot dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Équation 27}$$

Où

$\alpha = \text{rotation } (^\circ)$

$dx = \text{translation en } x \text{ (m)}$

$dy = \text{translation en } y \text{ (m)}$

Le calcul matriciel correspond donc à l'Équation 28. Les coordonnées x , y et z sont les coordonnées GPS initiales et x_t , y_t et z les coordonnées transformées selon le nouveau système d'axe.

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \cdot dx + \sin(\alpha) \cdot dy \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \cdot dx + \cos(\alpha) \cdot dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z \end{bmatrix} \quad \text{Équation 28}$$

Pour chaque planche, les paramètres de rotation et de translation en x et en y ont été déterminés à l'aide des plans Autocad des planches d'essai. Ces plans ont été fournis par Daniel Verret d'Hydro-Québec. Le Tableau B.1 donne les paramètres pour toutes les planches d'essai.

Tableau B.1 : Paramètres de rotation et de translation en x et y pour le changement de système d'axe de chaque planche

Planche	Rotation (°)	Translation en X (m)	Translation en Y (m)
P1	23,0	-394772,160	-5609989,620
P2	23,0	-394789,640	-5609997,070
P3	23,0	-394807,120	-5610004,520
P4	-38,0	-394923,710	-5609933,920
P5	-38,0	-394897,420	-5609954,520
P6	23,0	-394785,570	-5609958,160
P7	23,0	-394803,050	-5609965,600
P8	41,0	-395038,540	-5609929,520
P9	44,0	-394987,780	-5609931,590
P10	44,0	-394974,120	-5609918,380

B.4 Résultats du triage par planche et levée

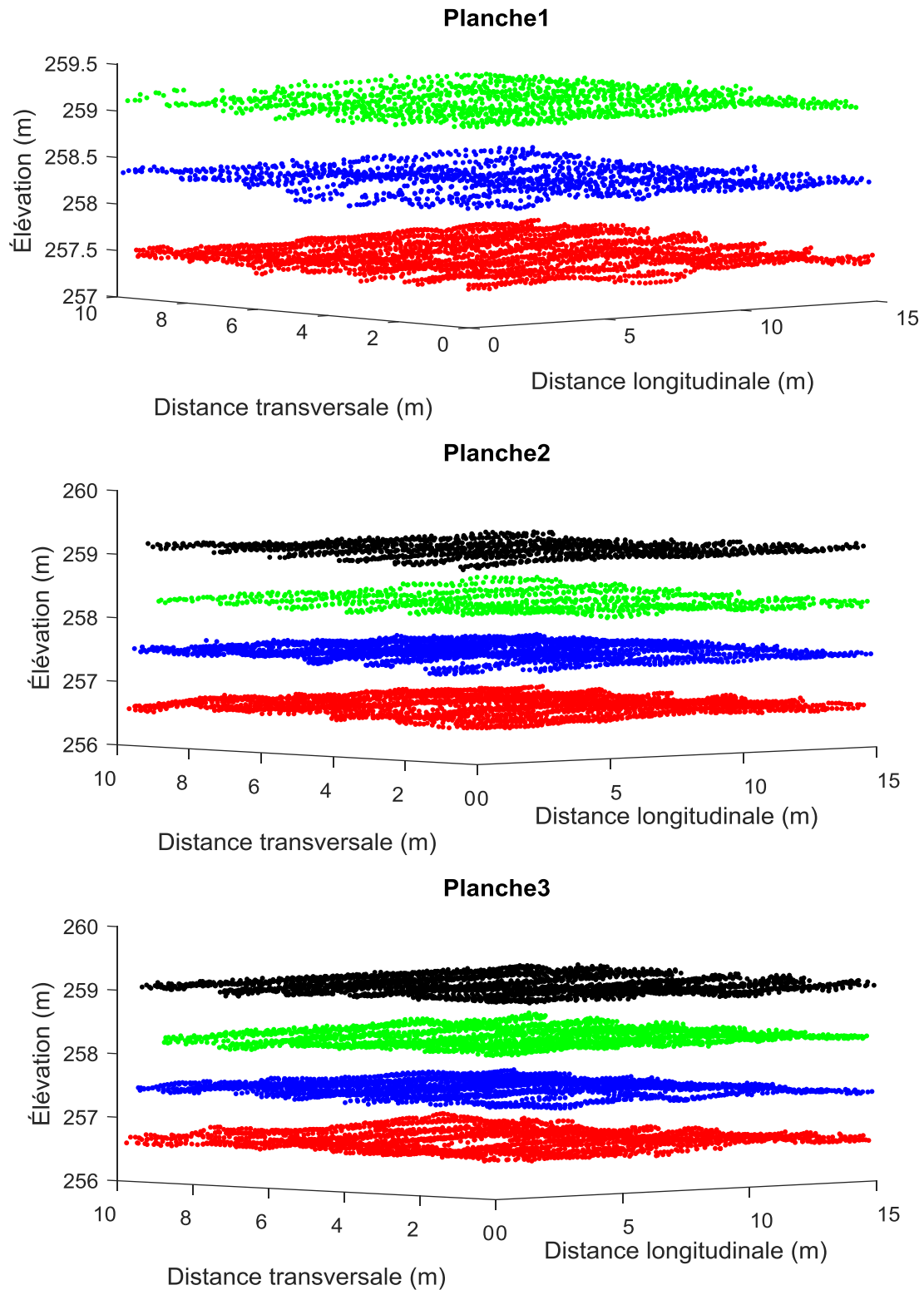


Figure B.3 : Données triées par planche et levée des planches 1 à 3

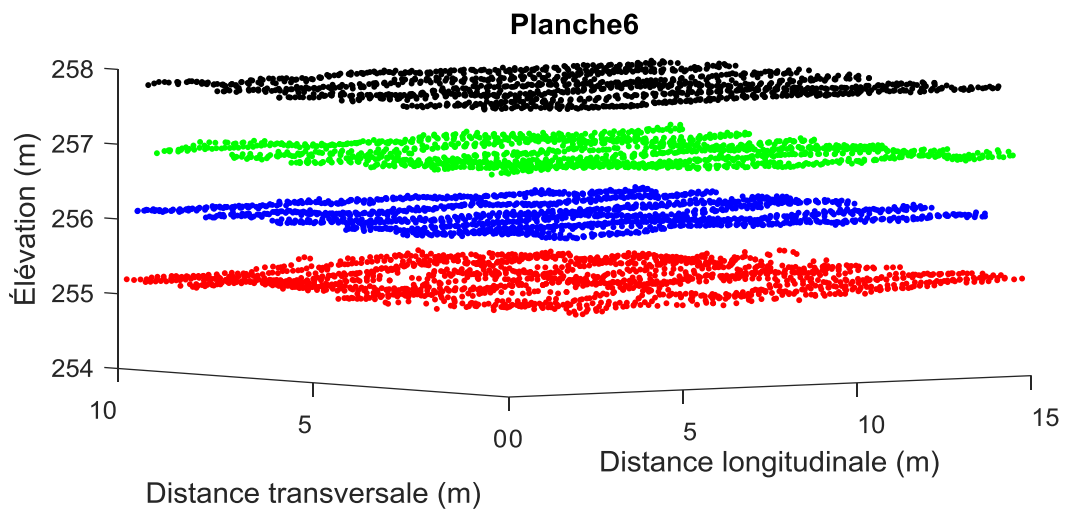
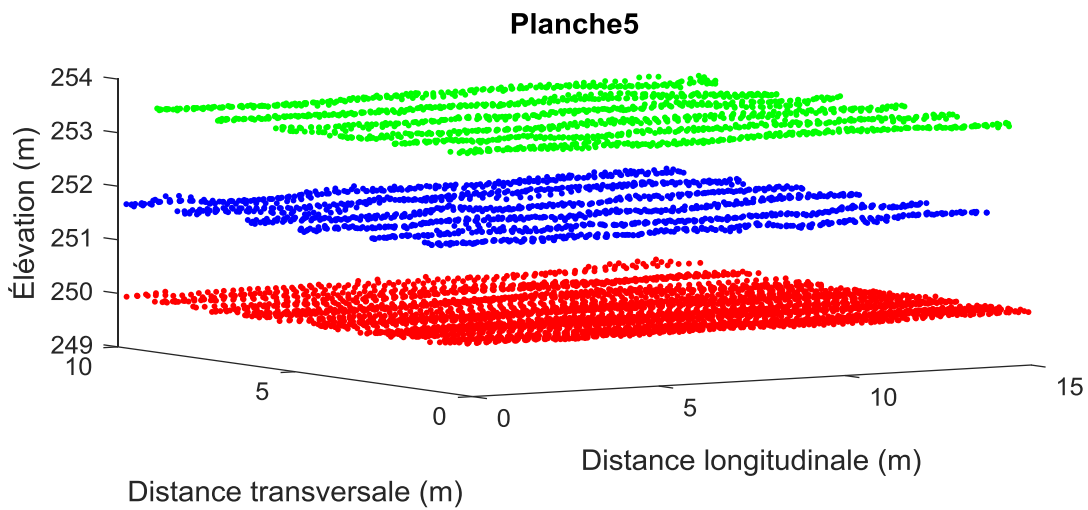
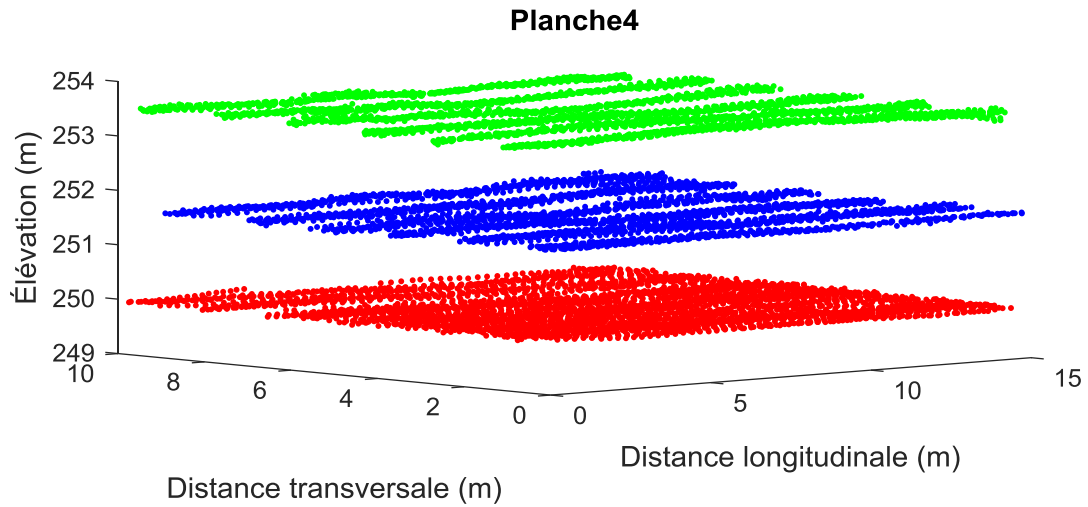


Figure B.4 : Données triées par planche et levée des planches 4 à 6

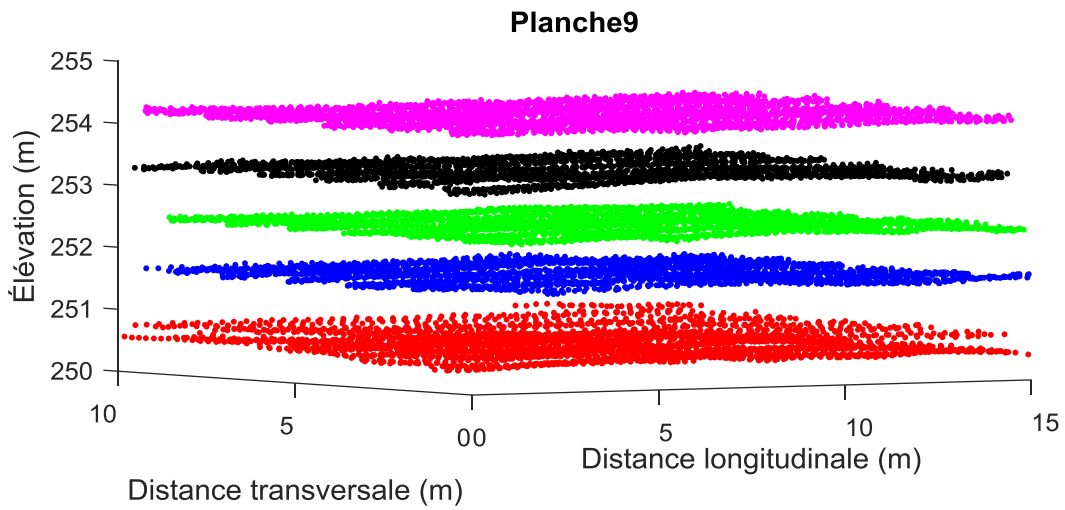
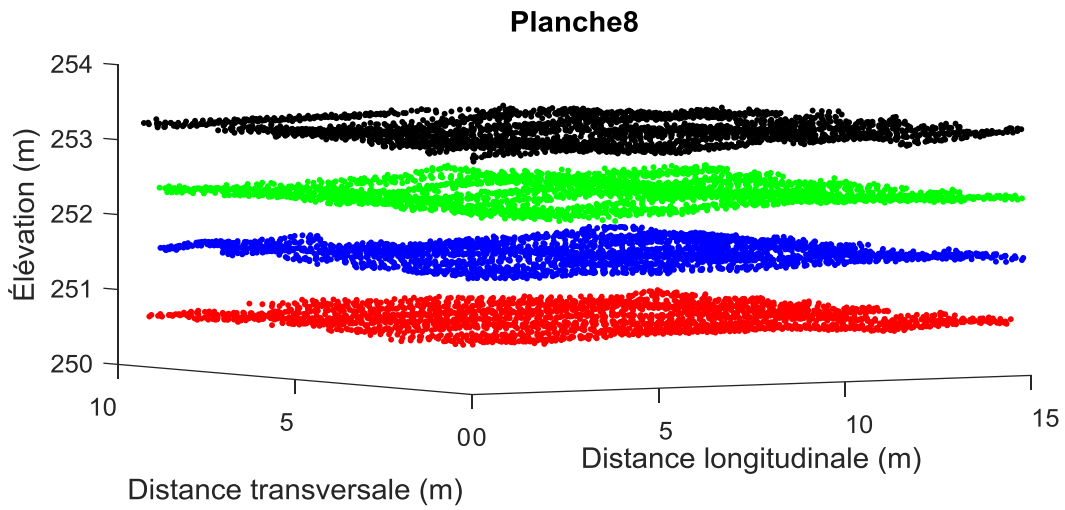
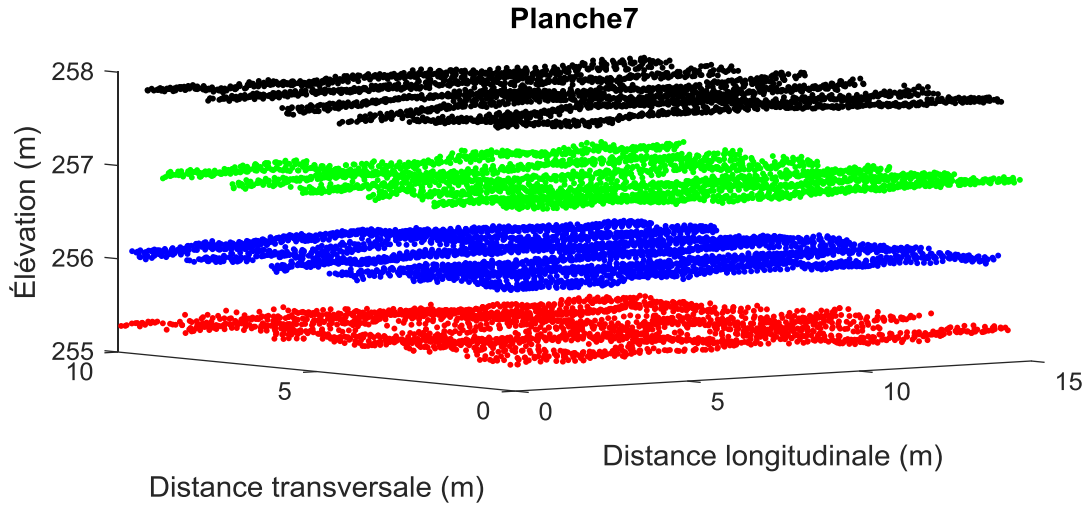


Figure B.5 : Données triées par planche et levée des planches 7 à 9

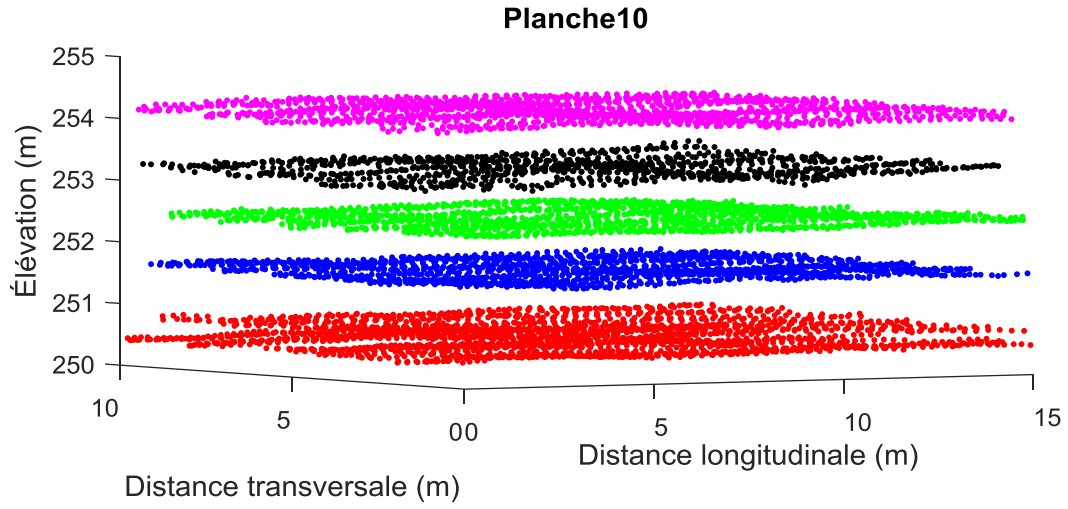


Figure B.6 : Données triées par planche et levée de la planche 10

B.5 Méthode du triage par passe

Tableau B.2 : Description des étapes du triage par passe

Étapes	Méthode tri	Critère de détection	Signification
Étape 1	Tri 1	A & B	Le compacteur retourne sur ses traces une fois rendue à l'extrémité de la planche.
Étape 2	Tri 2	(A & B) E (D & C & F)	Le compacteur retourne sur ses traces une fois rendue à l'extrémité de la planche. OU Le compacteur débute la nouvelle passe à l'autre extrémité de la planche. OU Le compacteur débute la nouvelle passe en recompactant la même trace, mais en gardant la même direction
Étape 3	Tri 3	H & (A G)	Le compacteur atteint l'extrémité de la planche et nouvelle passe est détectée lorsque observe $\Delta t \gg$ ou un changement de direction
Étape 4	Tri 4	H & G	Le compacteur atteint l'extrémité de la planche et nouvelle passe est détectée lorsque observe $\Delta t \gg$
Étape 5	Visuellement	Selon plan Y-temps	Lorsque identifiait nouvelle « droite » le long de l'axe Y en fonction du temps

Légende	
A	changement direction
B	même trace (ΔY faible)
C	Même direction
D	$\Delta X \approx$ longueur planche (8m)
E	$\Delta Y \approx$ largeur planche (6m)
F	Extrémités selon axe Y ($0 < Y < 2$ ou $8 < Y < 10$)
G	Δt significativement grand
H	$\Delta Y \approx$ largeur planche (8m)
&	ET
	OU

B.6 Résultats du triage par passe

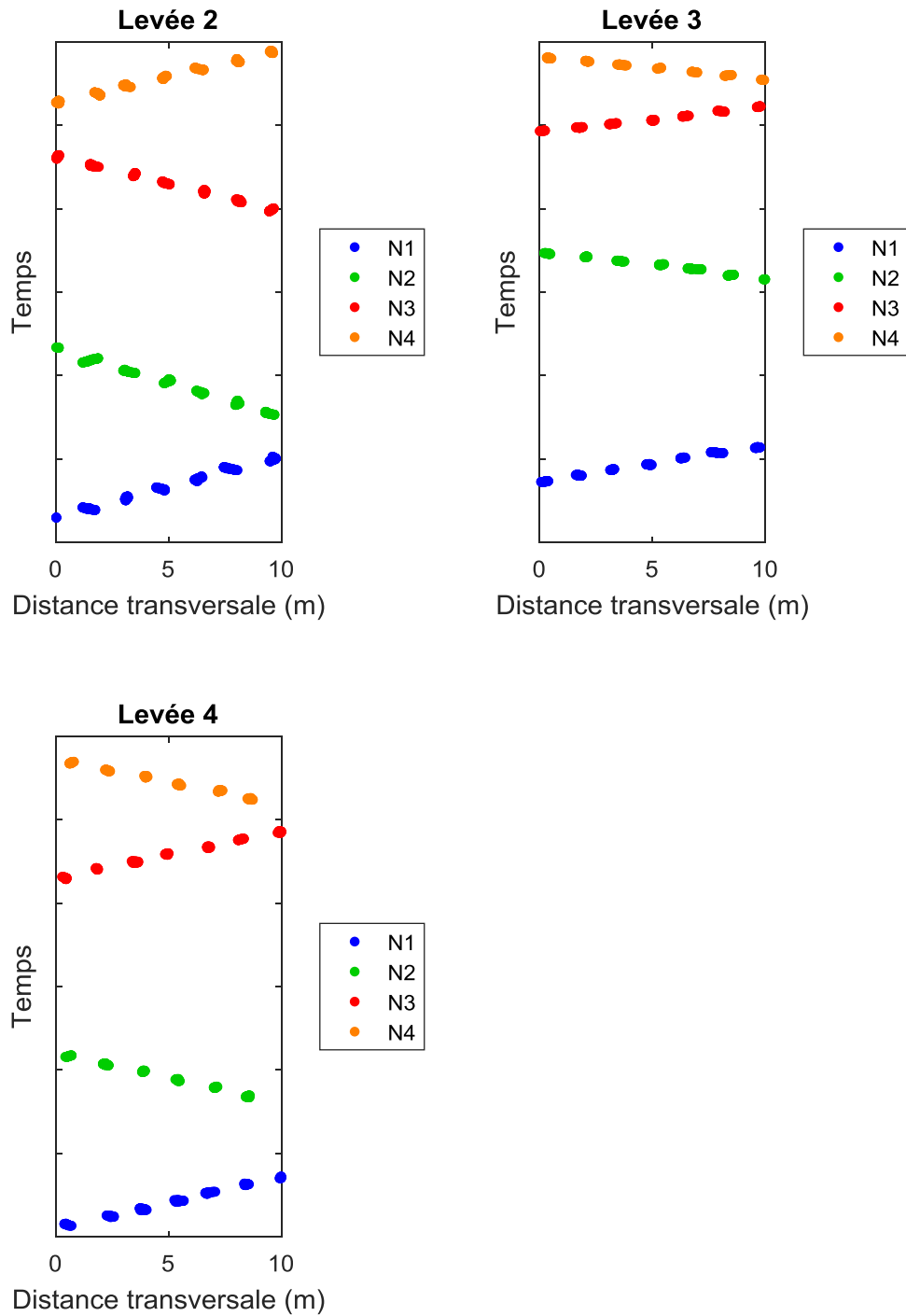


Figure B.7 : Résultats du tri par passe pour la planche 1

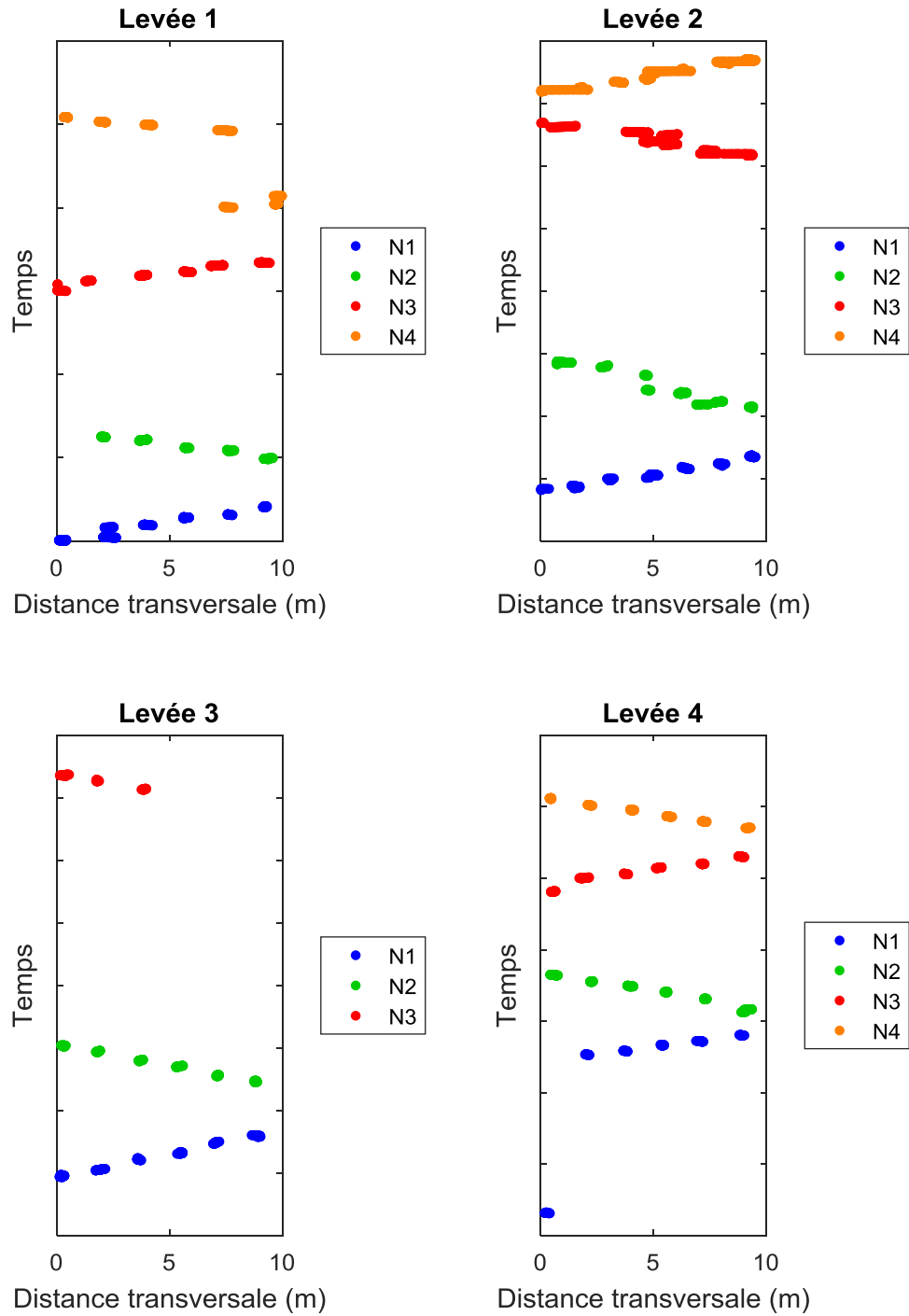


Figure B.8 : Résultats tri par passe pour la planche 2

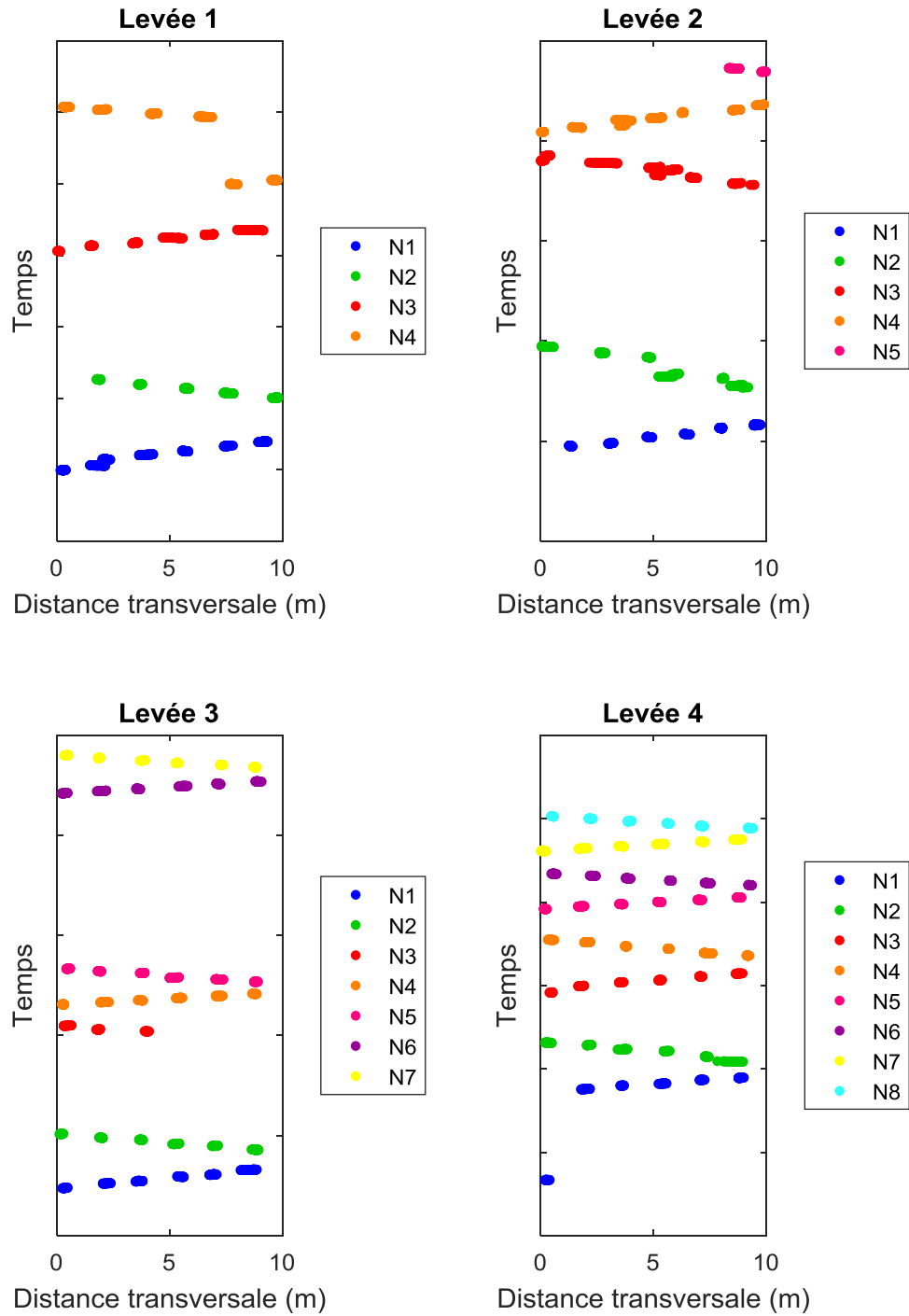


Figure B.9 : Résultats tri par passe pour la planche 3

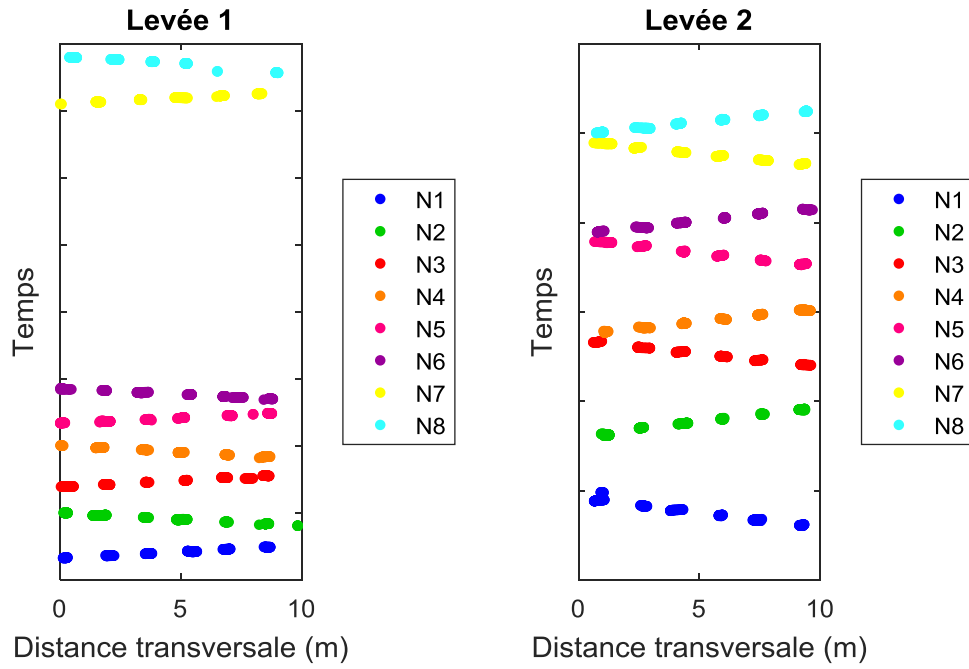


Figure B.10 : Résultats tri par passe pour la planche 4

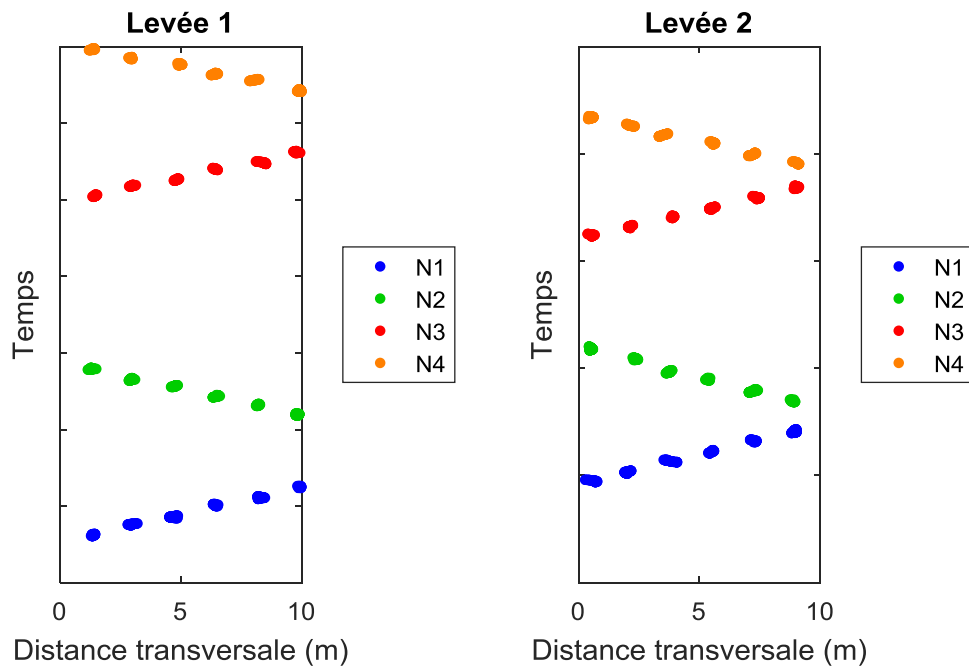


Figure B.11 : Résultats tri par passe pour la planche 5

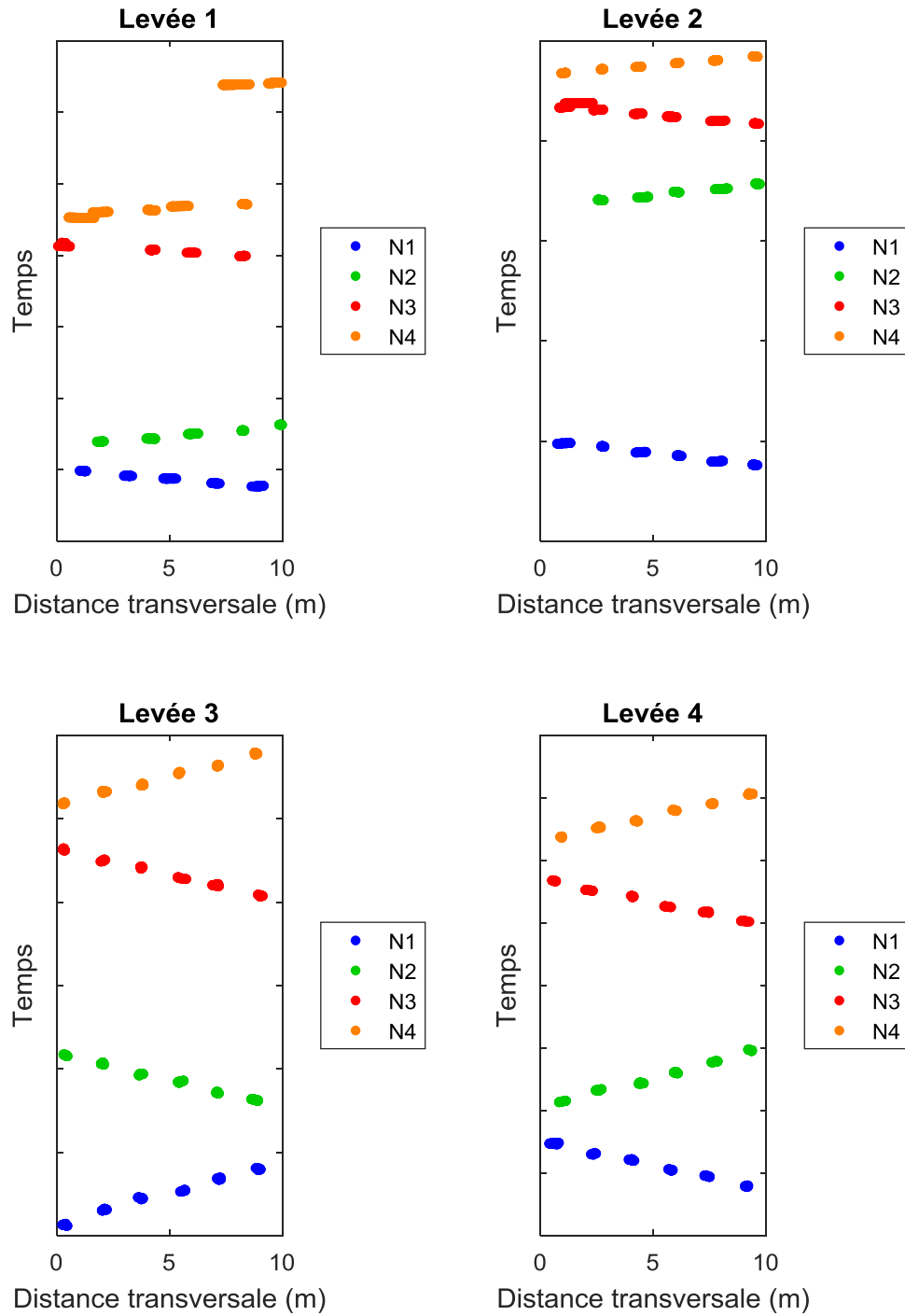


Figure B.12 : Résultats tri par passe pour la planche 6

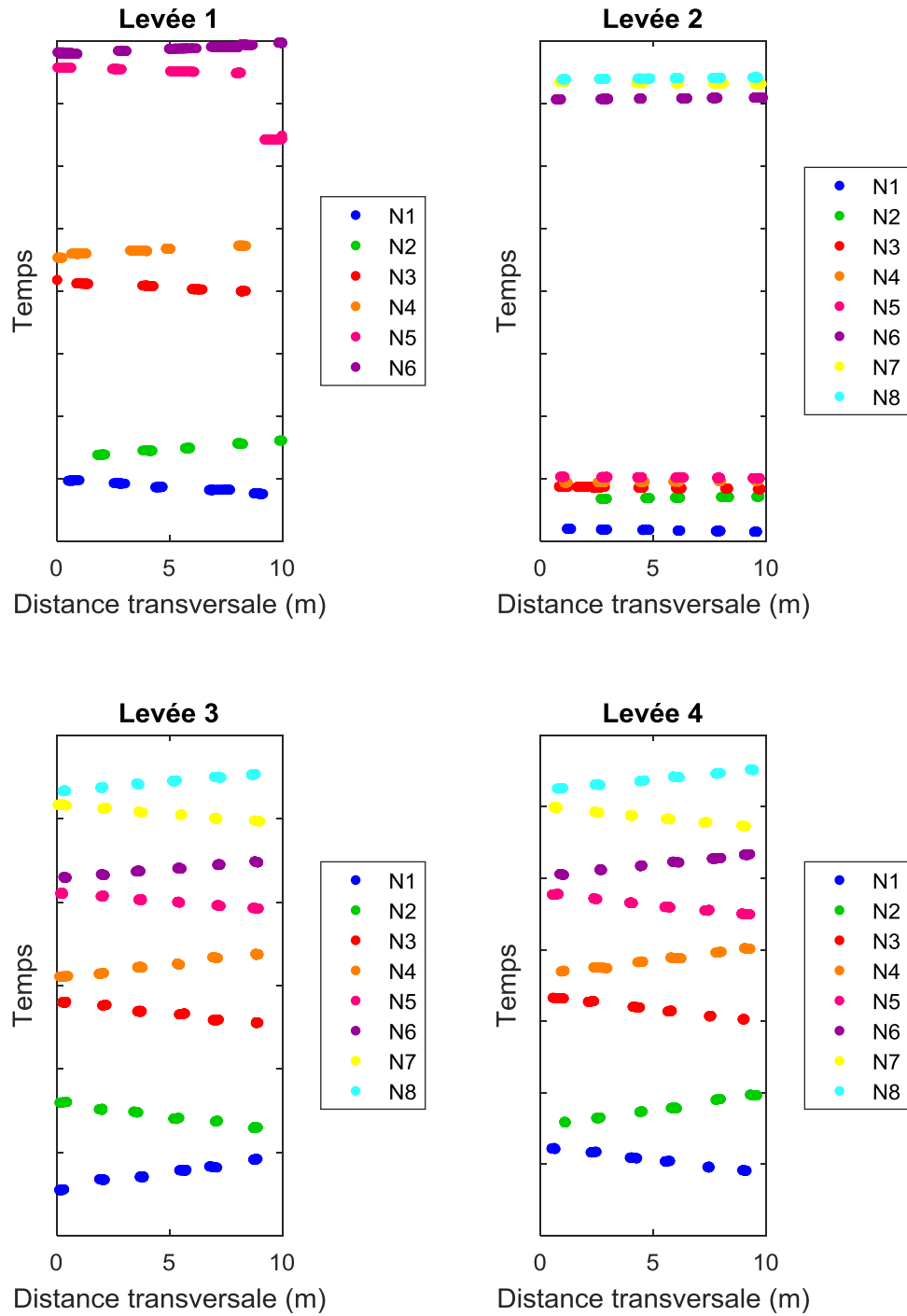


Figure B.13 : Résultats tri par passe pour la planche 7

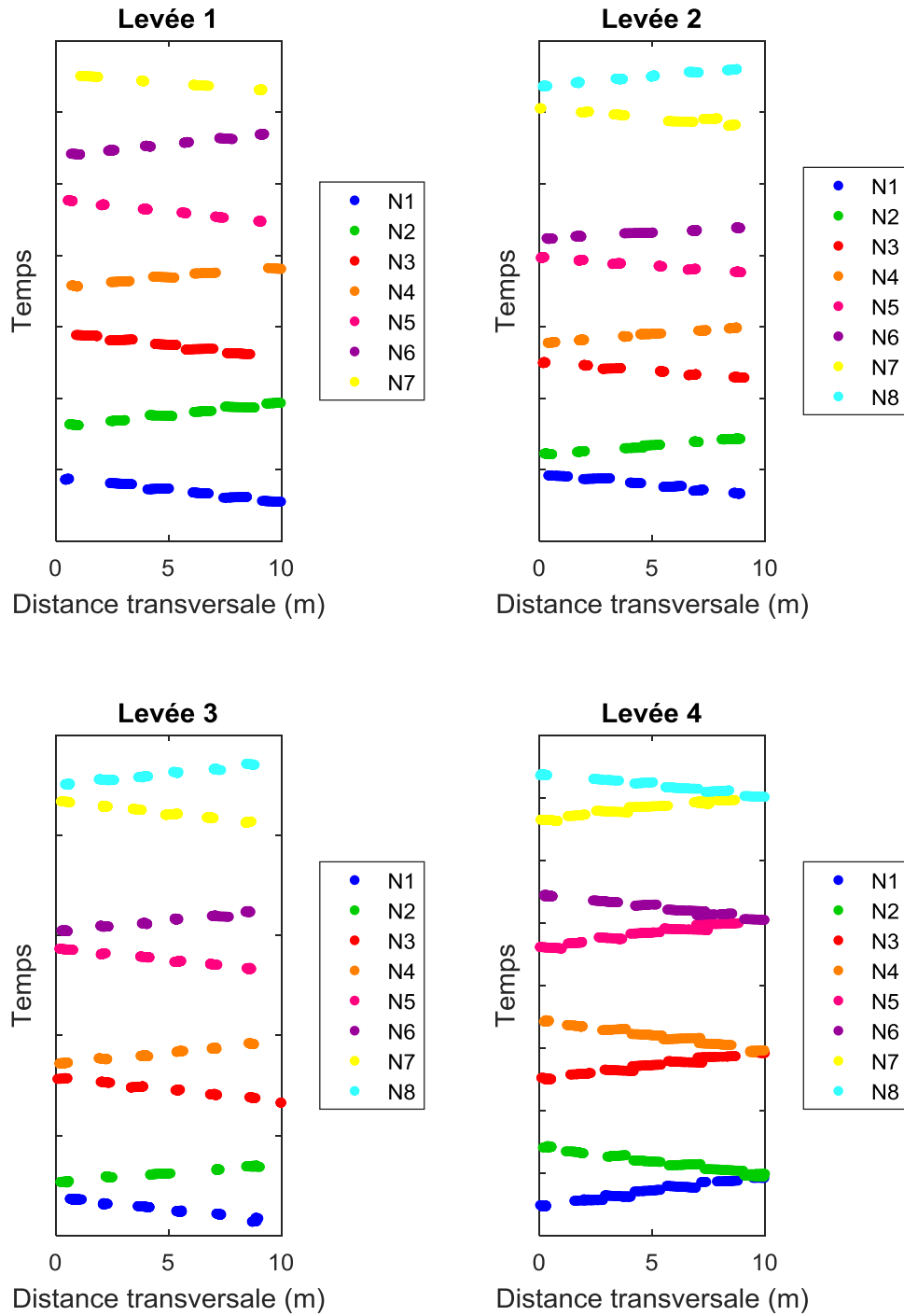


Figure B.14 : Résultats du tri par passe de la planche 8

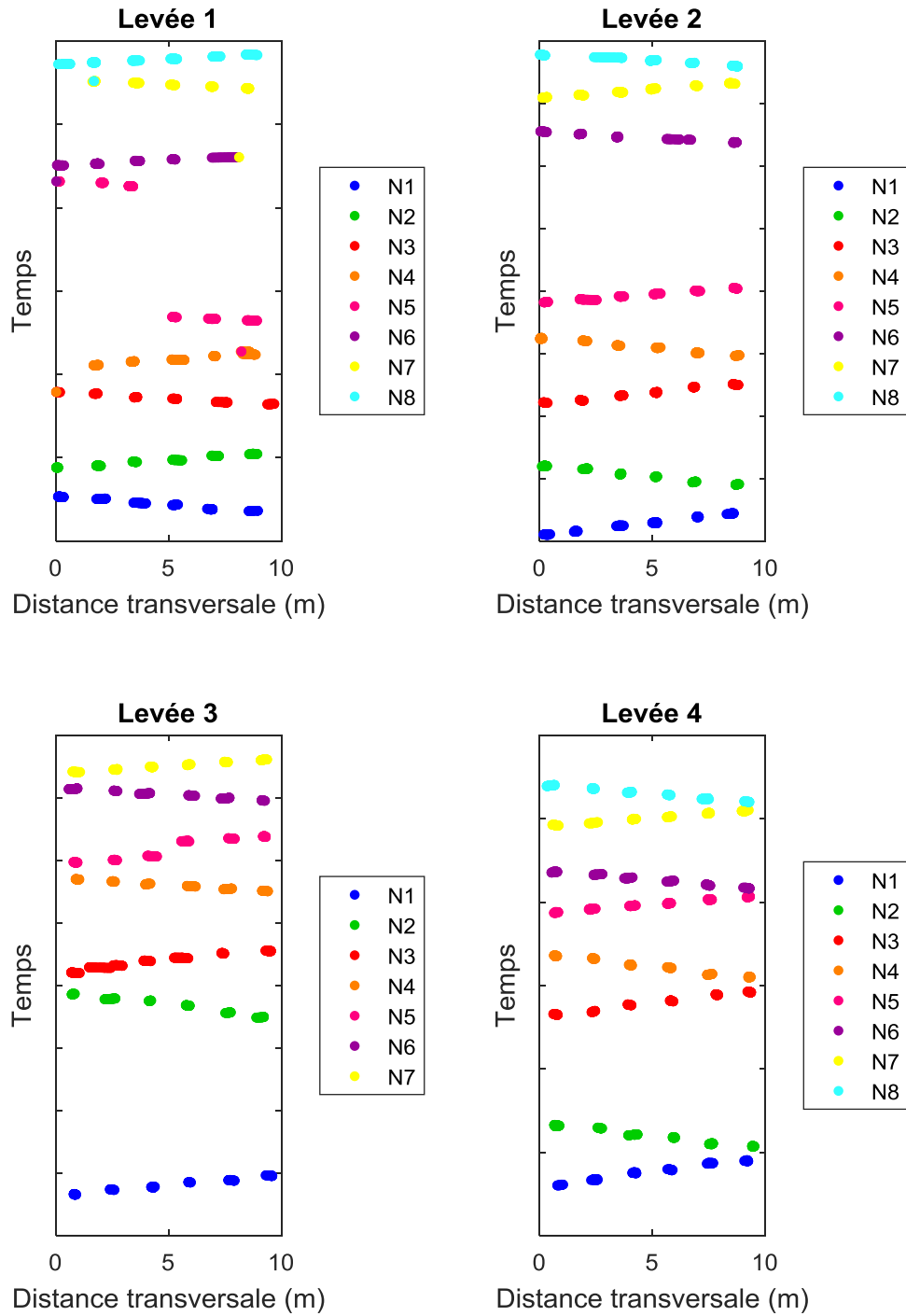


Figure B.15 : Résultats du tri par passe pour la planche 9

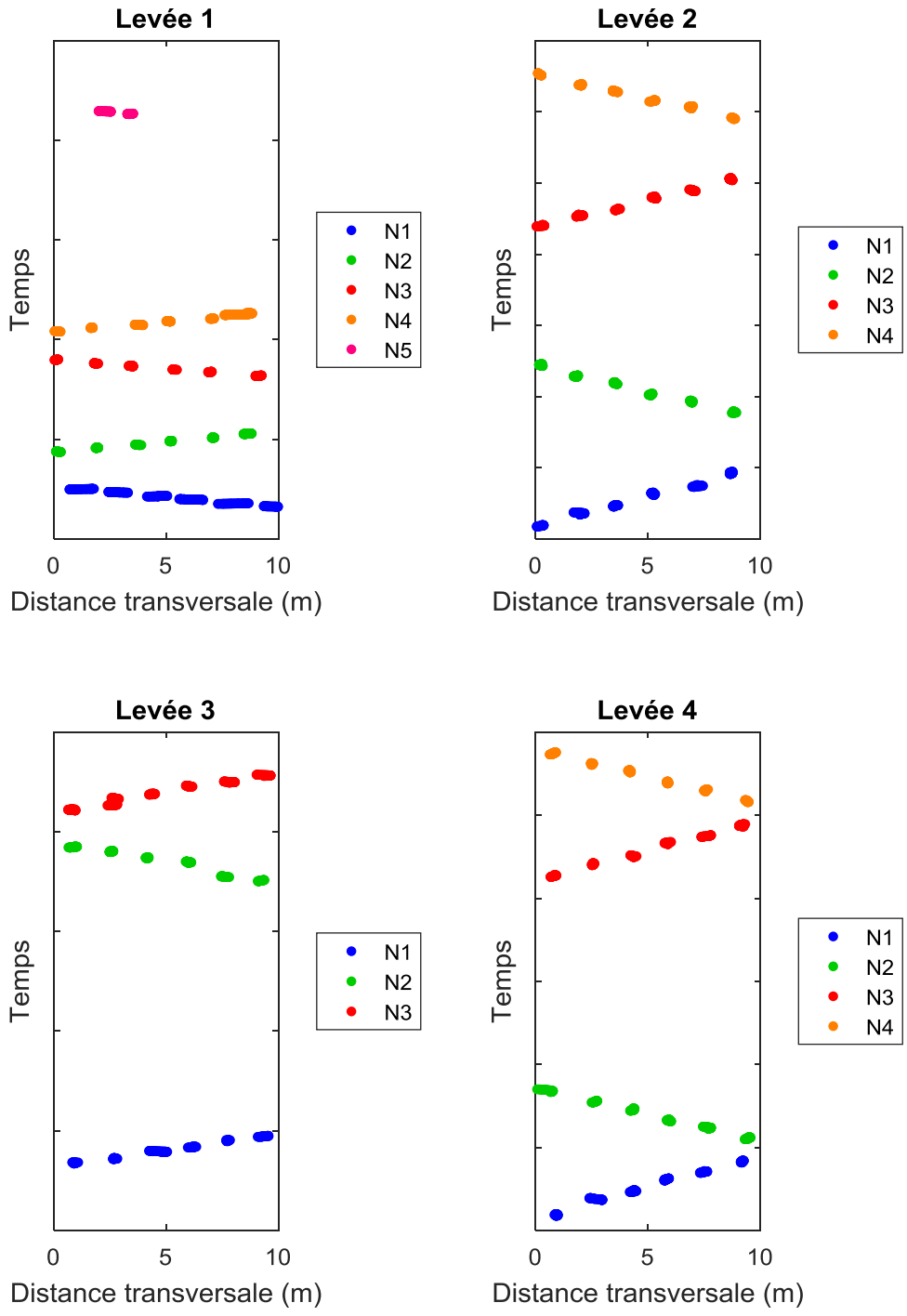


Figure B.16 : Résultats du tri par passe pour la planche 10

B.7 Division des planches d'essai

La division des planches est montrée aux figures suivantes.

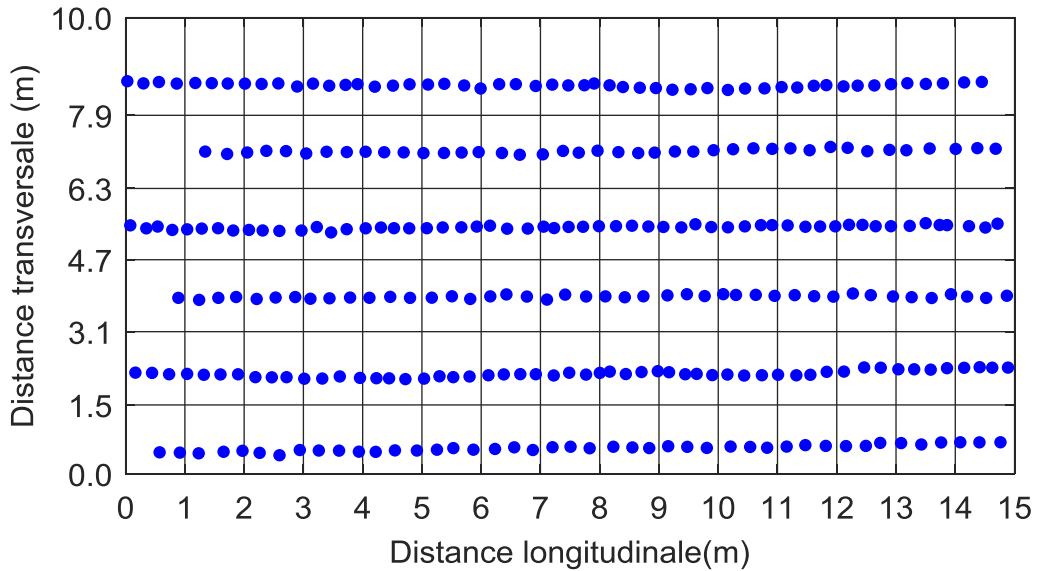


Figure B.17 : Division de la planche 1 avec les positions des données CMV de la deuxième passe de la dernière levée.

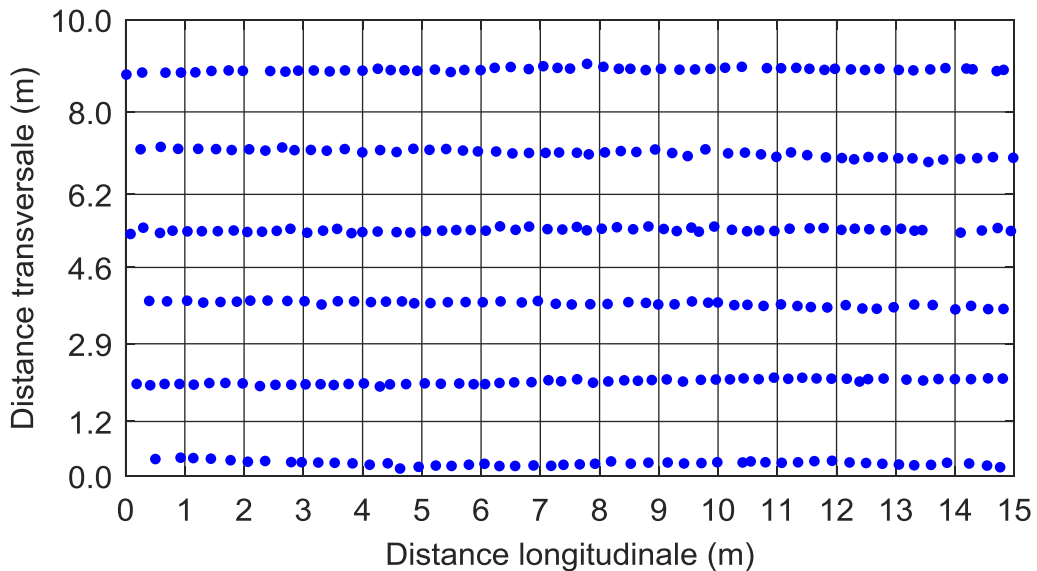


Figure B.18 : Division de la planche 2 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

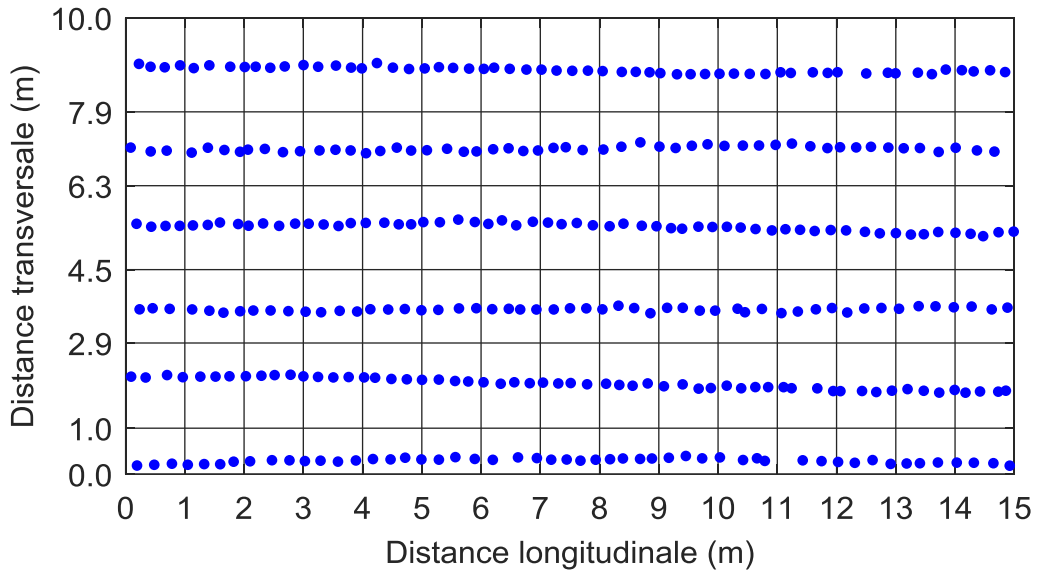


Figure B.19 : Division de la planche 3 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

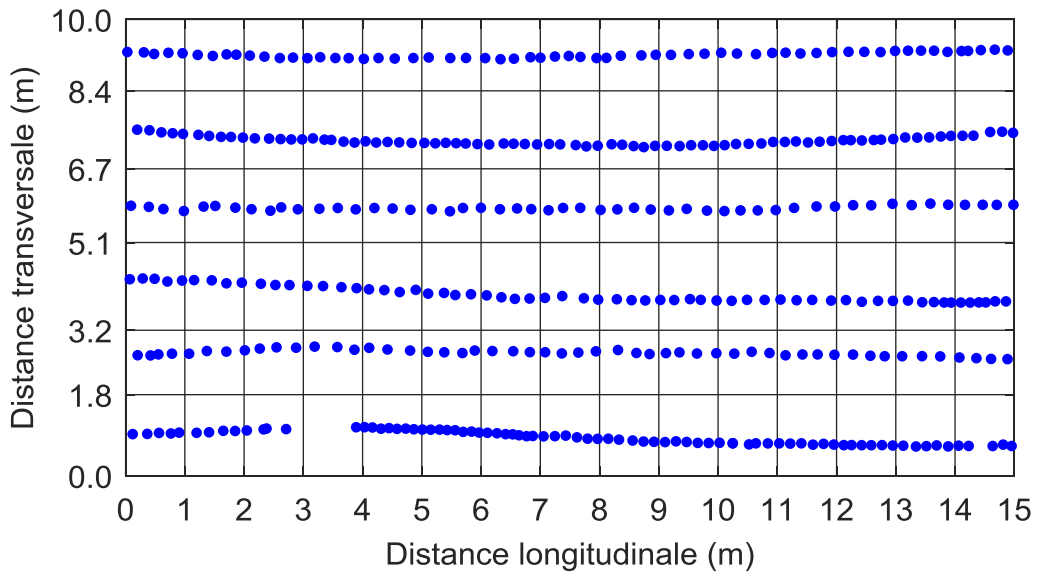


Figure B.20 : Division de la planche 4 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

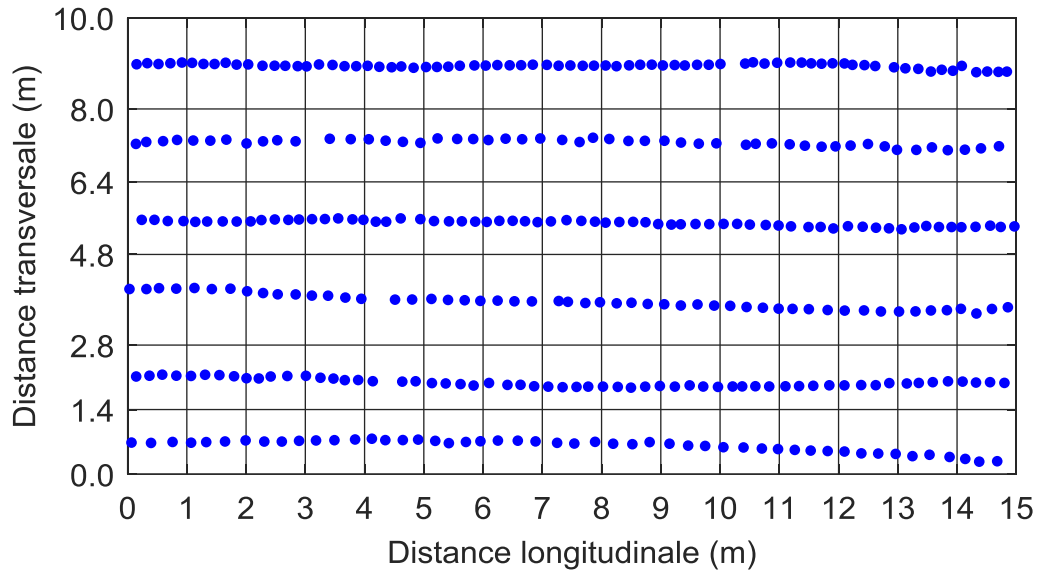


Figure B.21 : Division de la planche 5 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

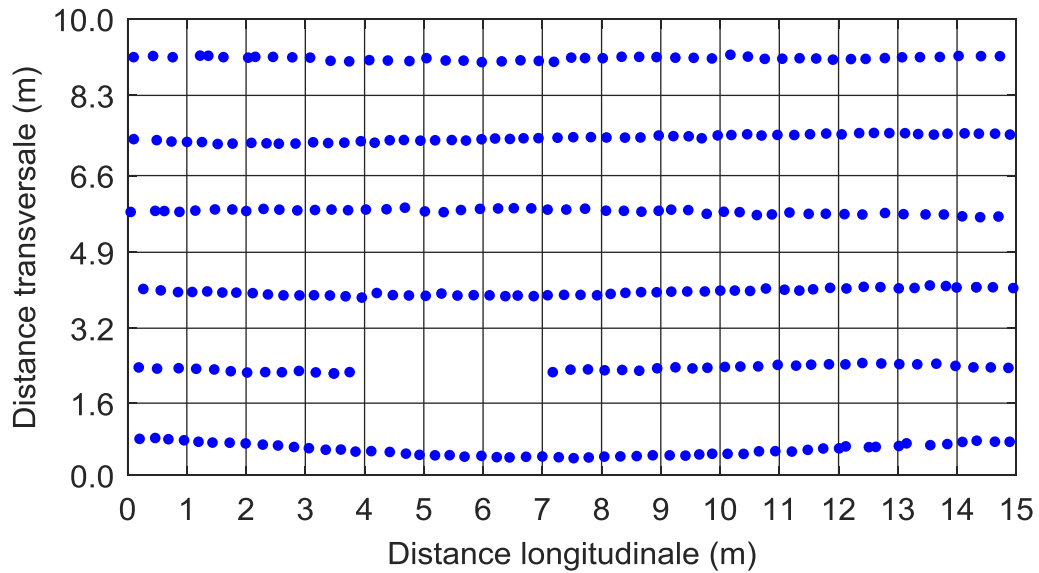


Figure B.22 : Division de la planche 6 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

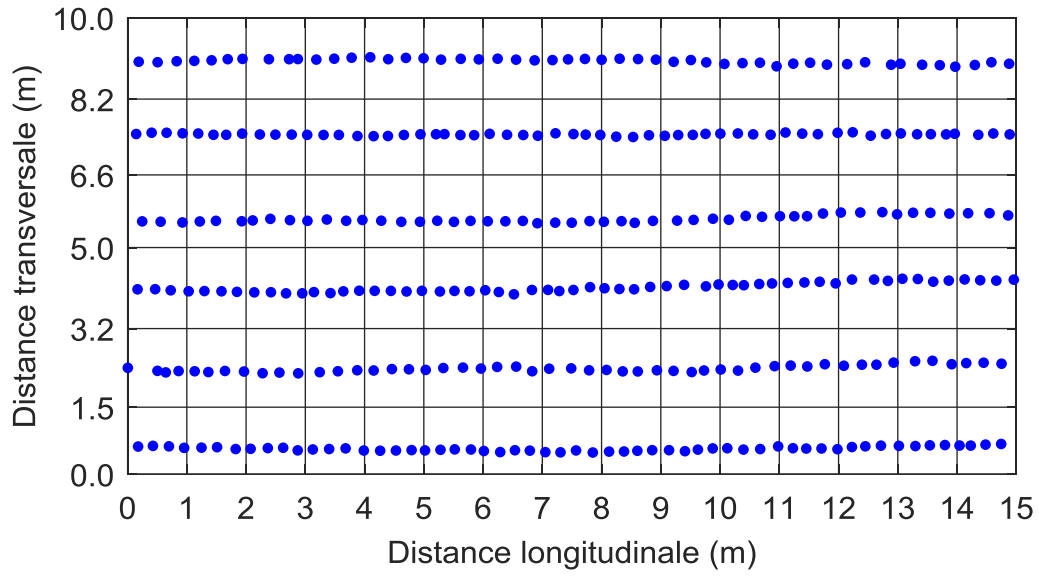


Figure B.23 : Division de la planche 7 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

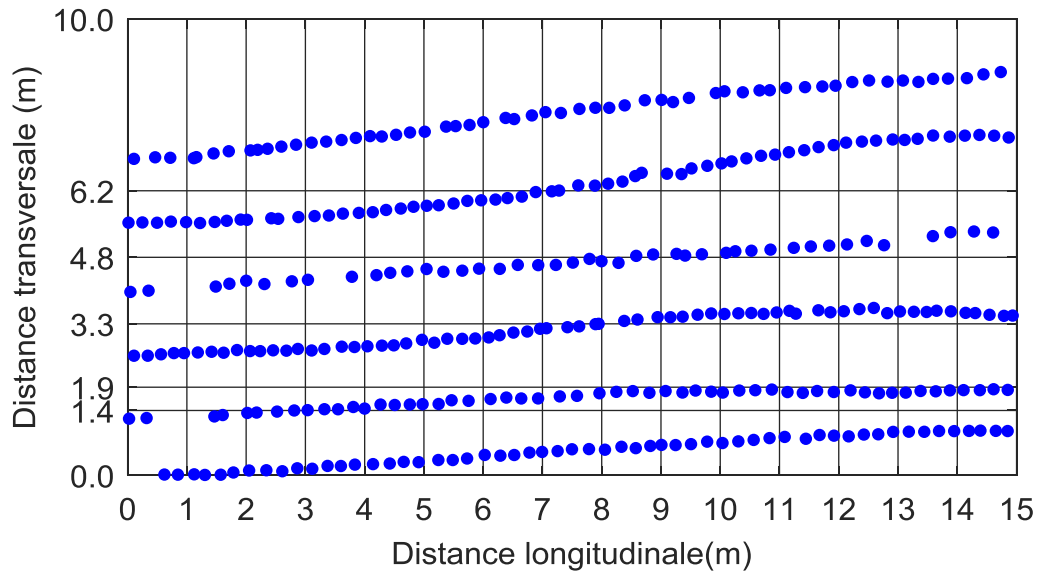


Figure B.24 : Division de la planche 8 avec les positions des données CMV de la cinquième passe de la dernière levée.

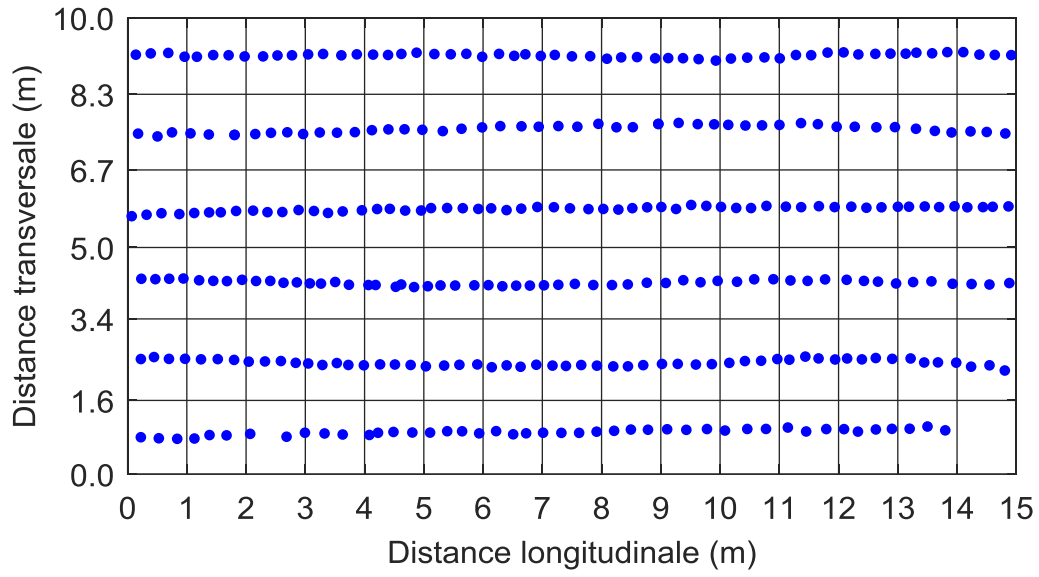


Figure B.25 : Division de la planche 9 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

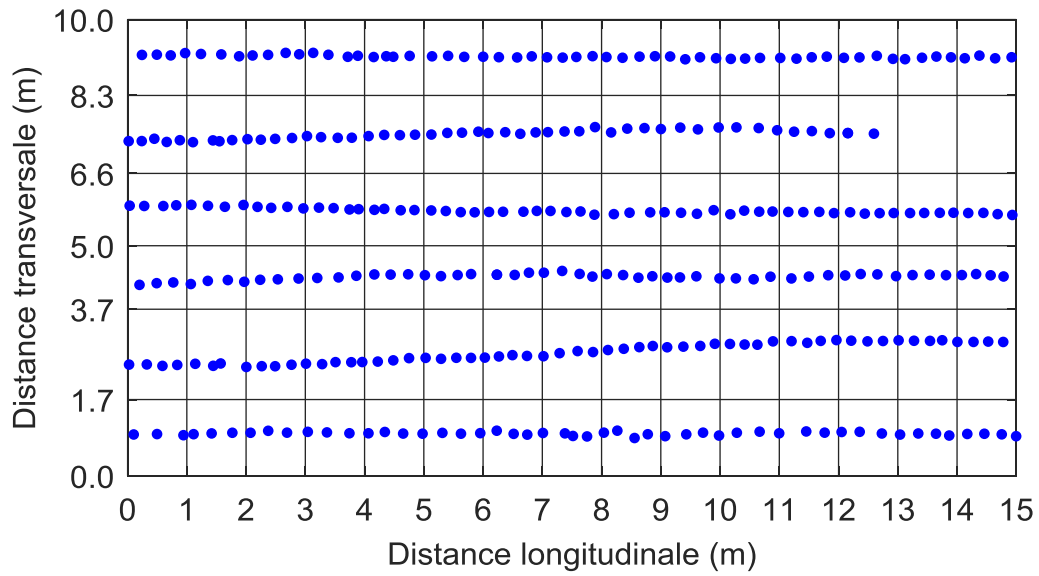


Figure B.26 : Division de la planche 10 avec les positions des données CMV de la première passe de la dernière levée.

B.8 Justification division des planches 1 et 8

Pour la planche 1, la division de la planche selon les traces du compacteur de la première passe faisait en sorte qu'aux passes supérieures, plusieurs sections étaient vides (voir Figure B.27). Il était alors impossible de définir un CMV moyen pour ces sections. Le choix de diviser la planche selon les traces de la deuxième passe permet d'obtenir un CVM moyen pour toutes les sections à chaque passe (voir Figure B.28).

Pour la planche 8, peu importe la division choisie, il était toujours difficile d'obtenir une grille suivant les traces du compacteur puisque celles-ci semblent être en diagonale par rapport à distance longitudinale de la planche (voir Figure B.29). La division selon les traces du compacteur à la cinquième passe était la division qui permettait de définir un CMV moyen pour un maximum de sections possible.

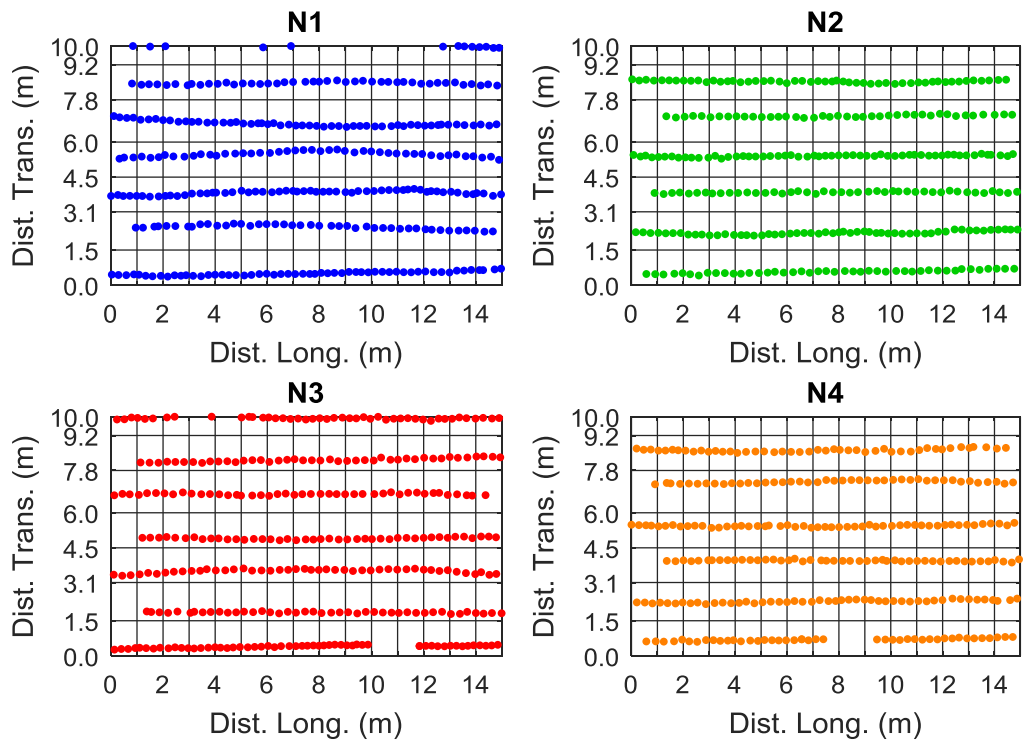


Figure B.27 : Division de la planche 1 (dernière levée) selon les traces du compacteur à la première passe

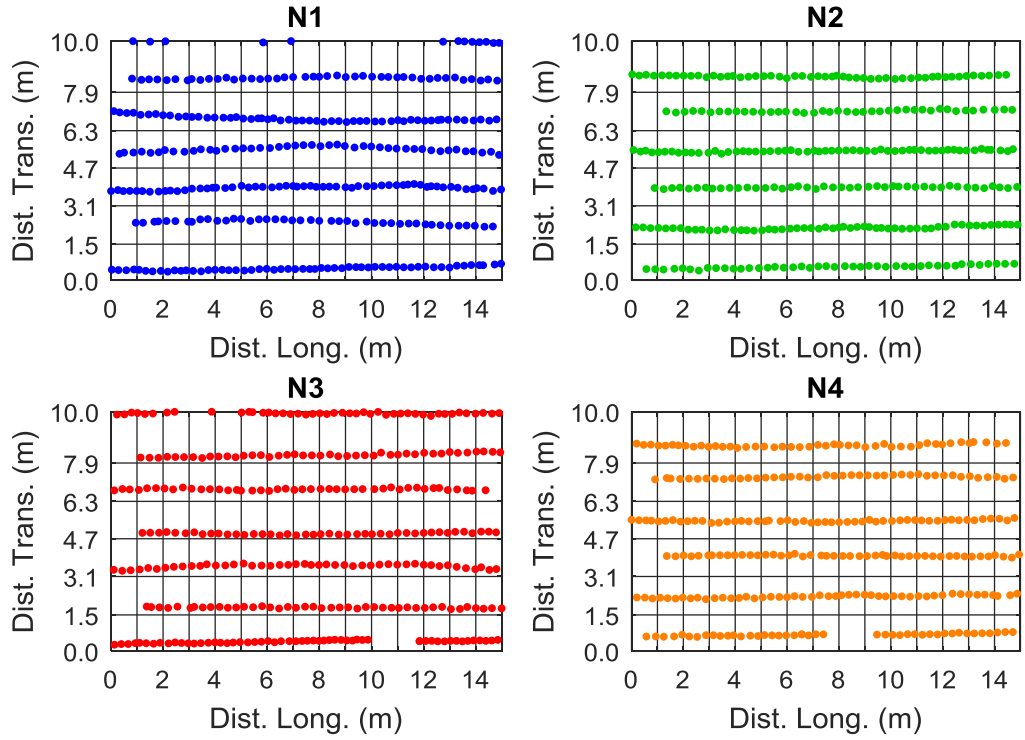


Figure B.28 : Division de la planche 1 (dernière levée) selon les traces du compacteur à la deuxième passe

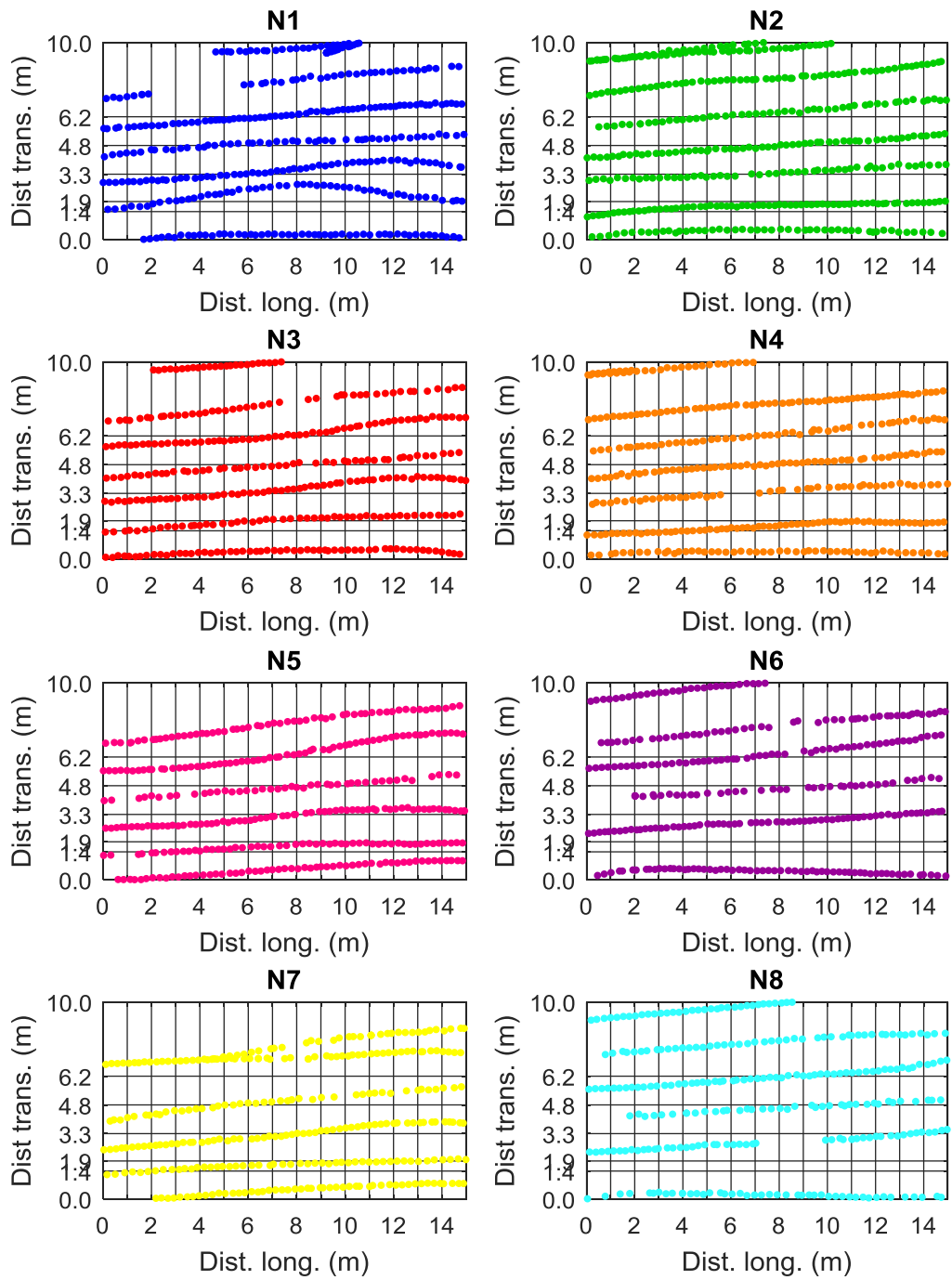


Figure B.29 : Division de la planche 8 (dernière levée) selon les traces du compacteur à la cinquième passe

B.9 Explication de la densité élevée d'observations pour la P1L2

Les statistiques de la vitesse instantanée du compacteur et du temps d'acquisition des données pour chaque levée de la planche 1 sont évaluées afin d'expliquer la densité élevée d'observations pour la deuxième levée de la planche 1. Les résultats sont montrés aux Figure B.30 et Figure B.31 et au Tableau B.3 suivants.

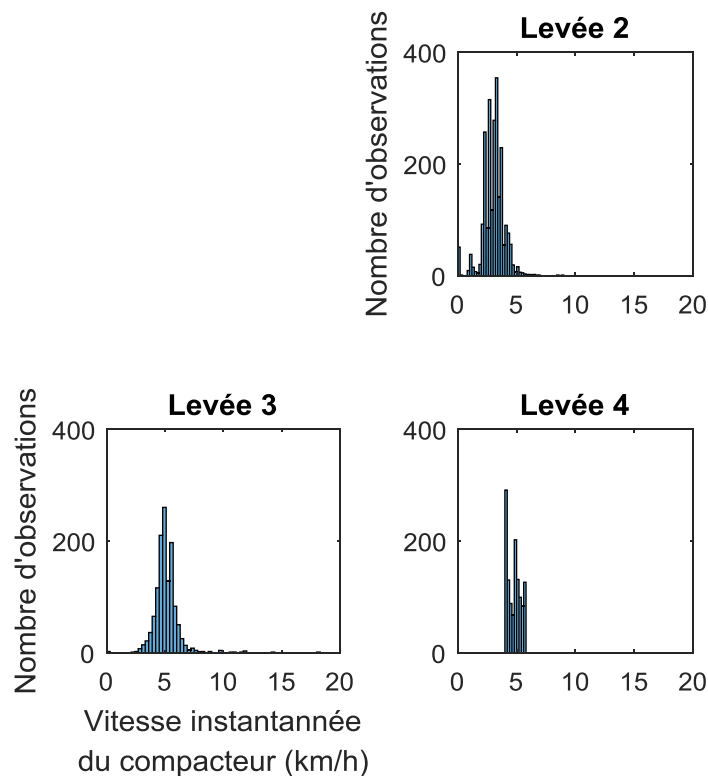


Figure B.30 : Histogrammes de la vitesse instantannée du compacteur des levées 2, 3 et 4 de la planche 1

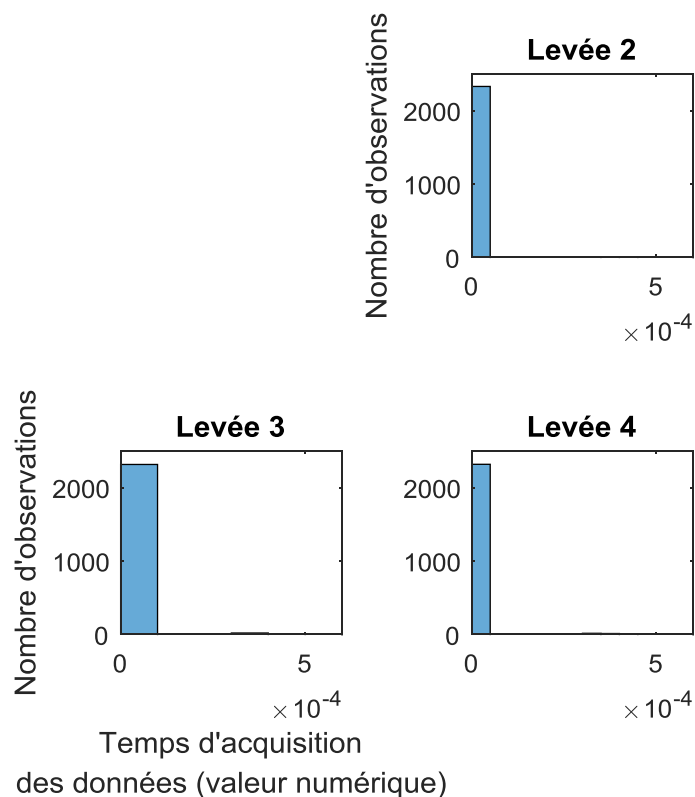


Figure B.31 : Histogrammes du temps d'acquisition des données des levées 2, 3 et 4 de la planche 1

Tableau B.3 : Statistiques des paramètres de vitesse et de temps d'acquisition du compacteur pour chaque levée de la planche 1

	Vitesse instantanée du compacteur (km/h)		Temps d'acquisition des données (valeur numérique)	
	Moyenne	Médiane	Moyenne	Médiane
Levée 2	3	3,1	$0,11888 \times 10^{-4}$	$0,023148 \times 10^{-4}$
Levée 3	5,1	5	$0,25653 \times 10^{-4}$	$0,023148 \times 10^{-4}$
Levée 4	4,8	4,8	$0,15898 \times 10^{-4}$	$0,023148 \times 10^{-4}$

Ainsi, les résultats montrent clairement que la vitesse instantanée du compacteur à la levée 2 est plus faible qu'aux autres levées. Pour ce qui est du temps d'acquisition, les résultats pour toutes les levées sont semblables, soit une distribution des données très concentrée autour d'une valeur (médiane de

$0,023148 \times 10^{-4}$). L'unité «valeur numérique» utilisée pour exprimer le temps correspond en fait à la conversion du temps en valeur numérique par Matlab.

Ce faisant, la densité élevée de données observée à la levée 2 de la planche 1 est due au fait qu'elle a été compactée à une vitesse plus faible, soit 3 km/h plutôt que 5 km/h.

ANNEXE C. Résultats

C.1 Évolution du CMV avec le nombre de passe

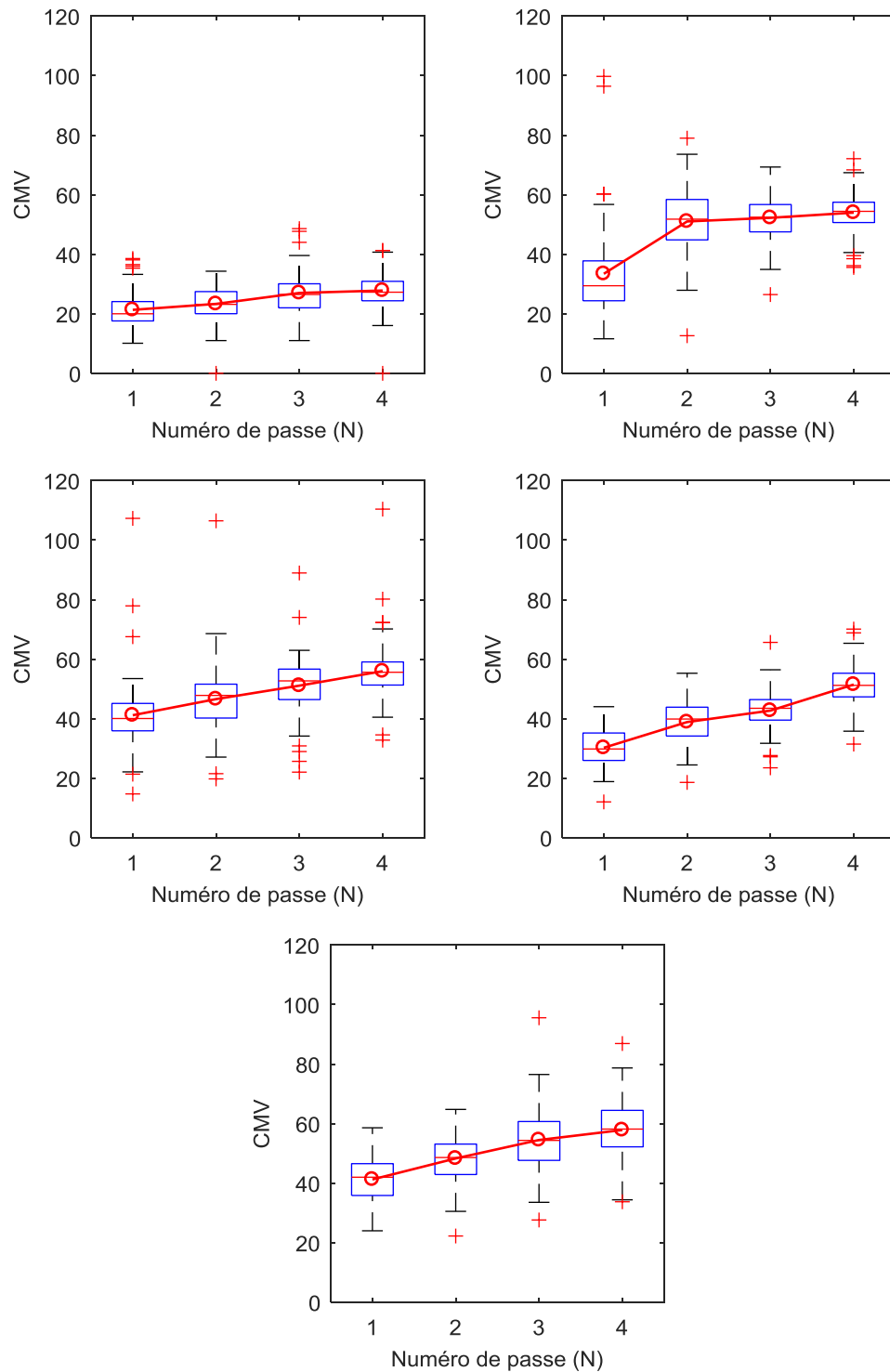


Figure C.1 : Tendence générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes des planches 1, 2, 5, 6 et 10 (de bas en haut, de gauche à droite)

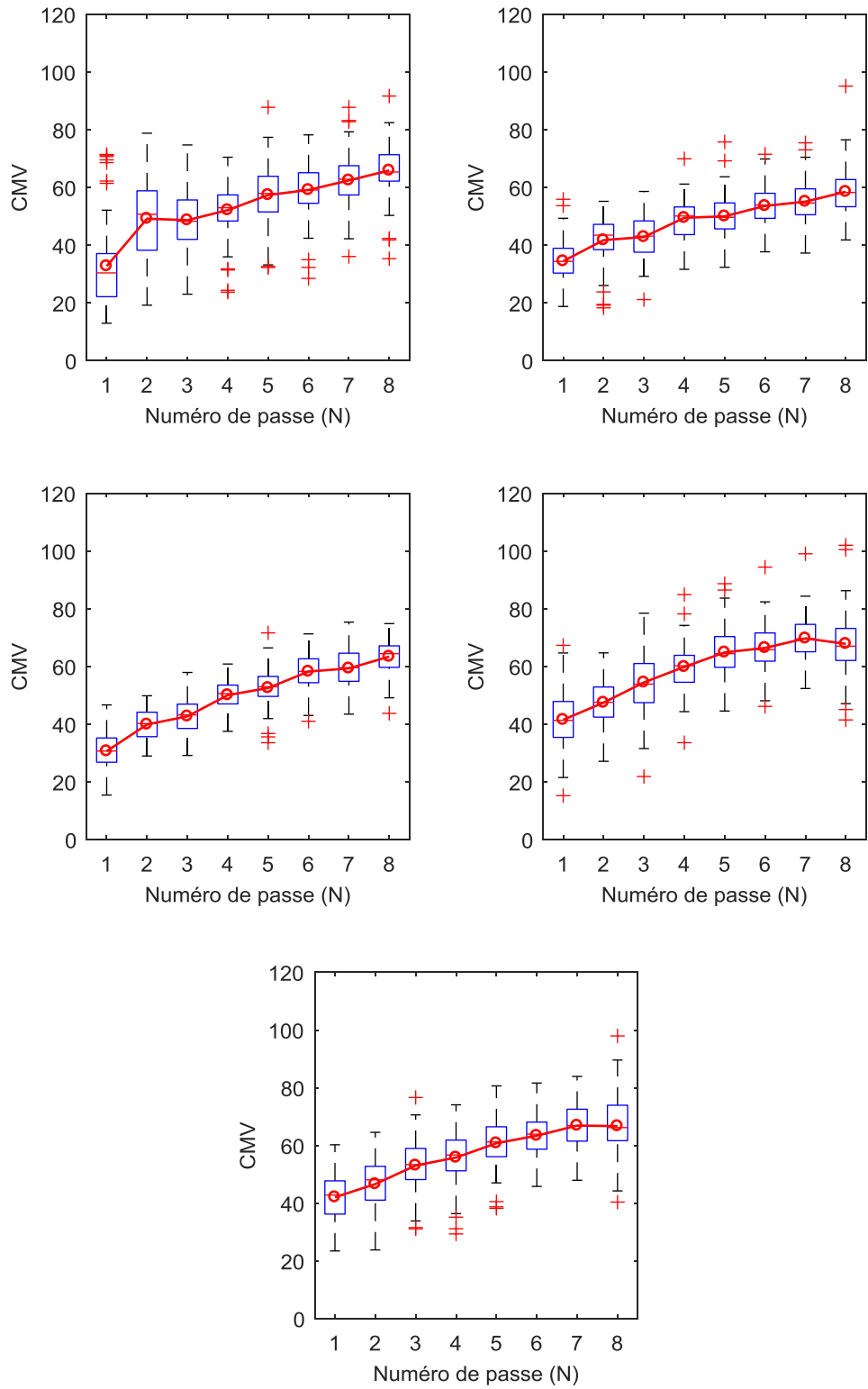


Figure C.2 : Tendence générale de l'évolution du CMV avec le nombre de passes des planches 3, 4, 7, 8 et 9 (de bas en haut, de gauche à droite)