PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Effet de la granulométrie sur le comportement géotechnique de roches stériles concassées utilisées comme surface de roulement sur des routes minières
Auteur: Author:	Antoine Laverdière
Date:	2019
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Laverdière, A. (2019). Effet de la granulométrie sur le comportement géotechnique de roches stériles concassées utilisées comme surface de roulement sur des routes minières [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/3858/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/3858/
Directeurs de recherche: Advisors:	Thomas Pabst, & Benoit Courcelles
Programme: Program:	Génie minéral

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Effet de la granulométrie sur le comportement géotechnique de roches stériles concassées utilisées comme surface de roulement sur des routes minières

ANTOINE LAVERDIÈRE

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie minéral

Mai 2019

© Antoine Laverdière, 2019.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Effet de la granulométrie sur le comportement géotechnique de roches stériles concassées utilisées comme surface de roulement sur des routes minières

présenté par **Antoine LAVERDIÈRE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mamert MBONIMPA, président

Thomas PABST, membre et directeur de recherche

Benoît COURCELLES, membre et codirecteur de recherche

Carlos OVALLE, membre

REMERCIEMENTS

Je veux d'abord remercier mon directeur de recherche Thomas Pabst pour son implication et son support tout au long de ces deux années de maîtrise. Je remercie aussi mon codirecteur Benoît Courcelles pour son aide dans le projet.

Un grand merci à Samuel Chénier et Éric Turgeon pour leur aide au laboratoire, leur flexibilité et leur constante bonne humeur. Je tiens à remercier Pierre-Alain, Abtin et Pier-Luc pour leur aide sur le terrain. Merci à Jeanne Lavoie-Deraspe, de la Mine Canadian Malartic, pour sa collaboration et la coordination des travaux de terrain. Je voudrais aussi remercier tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.

Je remercie tous les collègues de l'IRME avec qui j'ai eu la chance de passer de beaux moments, que ce soit pour le travail ou pour les dîners, les pauses-café, les apéros ou les parties de dés. Finalement, je veux remercier mes parents et Gabrielle pour leur support, leur présence et leurs encouragements constants tout au long de ce projet.

RÉSUMÉ

Les opérations minières produisent de grandes quantités de roches stériles qui sont généralement entreposées dans des haldes à stériles. La gestion et la restauration de ces empilements sont complexes en raison de leur taille (h > 100 m, A > 100 ha) et de leur stabilité géotechnique et géochimique. La valorisation (i.e. réutilisation) des roches stériles permet de réduire l'empreinte des haldes tout en répondant aux besoins de matériaux de construction pour les infrastructures minières.

Les stériles sont couramment utilisés pour la construction des routes sur les sites miniers, mais avec peu ou pas de préparation ou de tri particulier. Il en résulte des routes avec une faible durabilité qui contribuent à l'augmentation des crevaisons et à la génération de poussières. L'utilisation dans la surface de roulement de roches stériles concassées dont les propriétés sont optimisées pourrait permettre de réduire l'apparition de défectuosités sur la route et permettre une conduite plus confortable et sécuritaire pour les usagers.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était de déterminer les propriétés géotechniques optimales pour l'utilisation des roches stériles concassées comme surface de roulement dans les routes minières.

Dans un premier temps, une caractérisation (analyses granulométriques, densité relative des grains solides, compaction Proctor standard et modifié, perméabilité) a été réalisée sur des stériles concassés provenant d'une mine partenaire de l'IRME (Mine Canadian Malartic). La rigidité est un indice important de la performance du matériau utilisé dans la surface de roulement. L'essai de l'indice de portance californien (California bearing ratio test ou CBR) a été utilisé comme indicateur de la rigidité du matériau en fonction de différentes distributions granulométriques, énergies de compaction et teneurs en eau.

Des mesures de densités ont été réalisées sur le terrain afin de confirmer si la compaction étudiée au laboratoire correspond à celle observée en place. Les résultats issus du programme de laboratoire ont ensuite été utilisés dans le logiciel SIGMA/W (Geo-Slope Intl. 2018) afin d'évaluer les déformations induites par le passage des véhicules extra-lourds selon les différentes caractéristiques de la surface de roulement. Les résultats des simulations numériques ont permis d'estimer la résistance au roulement correspondant aux différents matériaux modélisés.

Les résultats obtenus au laboratoire ont permis de proposer quelques recommandations pour maximiser la rigidité et la densité du matériau destiné à la construction de la surface de roulement de route minière, notamment en modifiant sa distribution granulométrique et l'énergie de compaction employée. Pour le matériau testé, 10% de particules fines (d<0,08 mm) et une énergie de compaction élevée ont permis d'obtenir des CBR supérieurs à 250%.

Les résultats ont également montré que les particules les plus grossières du matériau contribuaient significativement à sa rigidité. Les travaux de terrain ont en outre permis de vérifier que l'intervalle des densités mesurées au laboratoire correspondait bien à ce qui est observé sur le terrain. Une certaine hétérogénéité de la distribution des densités et de la distribution granulométrique des roches stériles concassées utilisées dans la surface de roulement a été observée.

Finalement, les simulations numériques ont montré que la résistance au roulement pouvait être réduite d'au plus 0,26% grâce à l'augmentation de la rigidité du matériau étudié pour des valeurs de résistance au roulement initiale d'environ 3%.

Les résultats de cette étude ont montré que l'optimisation du choix et de la préparation des roches stériles concassées utilisées dans la construction de la surface de roulement des routes minières pouvait améliorer les performances du matériau et ainsi favoriser sa valorisation.

ABSTRACT

Mining operations generate large volume of waste rocks, which are usually disposed of in piles. Management and reclamation of waste rock piles can be a challenge because of their size (h > 100 m and A > 100 ha) and their geochemical and geotechnical stability. The valorization (i.e. reuse) of these materials reduces their footprint while meeting the needs of construction materials for mine infrastructures.

Waste rock is commonly used for road construction at mine sites. However, current practice usually consists of using waste rock directly, without any particular preparation or selection, thus resulting frequently in punctures, dust generation and low durability. Optimizing properties of crushed waste rocks used in the surface course of mine haul roads could reduce the occurrence of road defects and provide a more comfortable and safer ride for users.

The main objective of this research project was to determine the optimal geotechnical properties for the use of crushed rock as a running surface in mining roads.

First, a characterization (particle size distribution analysis, specific density, standard and modified Proctor compaction, permeability) was performed on crushed waste rock from a partner mine of RIME (Canadian Malartic Mine). Stiffness is an important index of the performance of the material used in the surface course. The California bearing ratio test (CBR) was used as an indicator of the stiffness of the material for different particle size distributions, compaction energies and water contents.

Densities were measured in the field to confirm whether the compaction studied in the laboratory corresponded to what is observed in situ. The results from the laboratory program were then used in the SIGMA/W (Geo-Slope Intl. 2018) numerical code to evaluate the deformations induced by the traffic of extra-heavy vehicles according to the different characteristics of the running surface. The rolling resistance corresponding to the different rolling surface materials modelled was evaluated using numerical simulations.

Laboratory results showed that it was possible to maximize the stiffness and density the mining road surface by modifying the particle size distribution and the compaction energy used for its construction. For the tested material, 10% fine particle content (d <0.08 mm) and a high compaction energy yielded CBR results greater than 250%.

The results also showed that the coarser particles of the material contributed significantly to increase its rigidity. Fieldwork has shown that the range of density measured in the laboratory corresponded well to field conditions. Heterogeneity of density distribution and particle size distribution of the crushed sterile rocks used in the surface course was observed in the field.

Finally, the numerical simulations have shown that the increase of the stiffness of the studied material could contribute to decreasing the rolling resistance by a maximum of 0.26% for initial rolling resistance of around 3%.

The results of this study showed that the optimization of the crushed waste rocks used in the construction of the surface course of mining roads could improve the performance of the material and thus promote its valorization.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XVII

LISTE DES ANNEXES XXI

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Généralités 1

1.2 Objectifs du projet de recherche 2

1.3 Contenu du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 4

2.1 Roches stériles 4

2.1.1 Production, entreposage et utilisation 4

2.1.2 Granulométrie 5

2.1.3 Densité relative des grains solides 6

2.1.4 Porosité 6

2.1.5 Conductivité hydraulique 7

2.1.6 Angle de friction et cohésion 7

2.1.7 Angle de repos 9

2.1.8 Modules de rigidité et d'élasticité 9

2.2 Routes minières 10

2.2.1 Généralités 10
2.2.2 Dimensionnement géométrique 12
2.2.3 Structure des routes minières 14
2.2.4 Méthode de dimensionnement empirique 16
2.2.5 Méthode de dimensionnement mécaniste-empirique 17
2.2.6 Capacité portante 23
2.2.7 Autres considérations lors du dimensionnement 26
2.3 Dimensionnement fonctionnel de la surface de roulement 27
2.3.1 Matériaux de construction 28
2.3.2 Génération de poussières 31
2.3.3 Résistance au roulement 32
2.4 Simulations numériques 36
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX 38
3.1 Échantillonnage 38
3.2 Préparation des matériaux au laboratoire 39
3.3 Caractérisation des roches stériles concassées 40
3.3.1 Analyses granulométriques 40
3.3.2 Densité relative des grains solides 40
3.3.3 Essais de compaction 41
3.3.4 Essai de conductivité hydraulique saturée 42
3.3.5 Caractérisation minéralogique par diffraction des rayons X 42
3.4 Essais de portance californien (CBR) 42
3.4.1 Principe de l'essai et interprétation 42
3.4.2 Essais CBR réalisés sur les roches stériles concassées 45

3.4.3 Influence de la compaction 45

3.4.4 Influence de la distribution granulométrique 45

3.5 Densité in-situ et caractérisation sur le terrain 47

3.5.1 Essai au nucléodensimètre 49

3.5.2 Essai au cône de sable 49

3.5.3 Analyses granulométriques complémentaires 50

3.6 Évaluation des déformations dans une structure de route minière type à l'aide d'analyses numériques 50

3.6.1 Géométrie, maillage et application des contraintes 50

3.6.2 Définition des propriétés des matériaux 51

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : LABORATORY CHARACTERIZATION OF CRUSHED WASTE ROCK TO IMPROVE VALORIZATION IN MINE HAUL ROAD SURFACE COURSE……..... 53

4.1 Introduction 54

4.2 Material characterisation and laboratory program 57

4.3 Results 61

4.3.1 Dry density and compaction energy 64

4.3.2 Maximum particle size 64

4.3.3 Fine content 66

4.4 Analysis and discussion 67

4.4.1 Relation between CBR and dry density 67

4.4.2 Influence of compaction energy 69

4.4.3 Influence of maximum grain size 69

4.4.4 Effect of fine content 70

4.4.5 Discussion and final remarks 71

4.5 Conclusion 72
4.6 Acknowledgements 73
4.7 References 73
CHAPITRE 5 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES ET DISCUSSION 78
5.1 Résultats de terrain 78
5.1.1 Analyses granulométriques 78
5.1.2 Densité en place 79
5.2 Résultats complémentaires de laboratoire 82
5.2.1 Effet du niveau compaction sur les bris de particules 82
5.2.2 Courbes de compaction 83
5.3 Évaluation préliminaire des contraintes et déformations dans une structure de route minière 85
5.3.1 Évaluation des déplacements verticaux maximum 85
5.3.2 Évaluation de la résistance au roulement 87
5.4 Valorisation des roches stériles concassées dans la surface de roulement des routes minières 88
5.4.1 Augmentation des performances par modification de la composition granulométrique du matériau de la surface de roulement 88
5.4.2 Évaluation de la résistance au roulement à partir de la variation de rigidité 90
5.4.3 Discussion 91
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 93
RÉFÉRENCES 97
ANNEXES 105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Largeur minimale des routes minières (adapté de Thompson, 2011). 13

Tableau 2.2: Critères filtres (tiré de Douglas, 2016). 16

Tableau 2.3: Capacités portantes typiques pour différents matériaux (Tannant et Regensburg, 2001) d'après Monenco (1989). 26

Tableau 2.4: Propriétés recommandées pour le choix d'un matériau pour la construction de la surface de roulement (Thompson et Visser, 2006b), Sp : Produit de rétrécissement, Gc : Coefficient de gradation, DR : Ratio des poussières, LL : Limite de liquidité, PL : Limite de plasticité, PI : Indice de plasticité, CBR : Résultat de l'essai CBR, d_{max} : Diamètre maximal des grains. 30

Tableau 3.1: Énergies de compaction utilisées, les essais ont été effectués dans des moules ayant un diamètre de 152,4 mm et une hauteur de 116,4 mm. 41

Tableau 3.2: Essais CBR réalisés sur les roches stériles concassées selon la teneur en eau et l'énergie de compaction, * : Essais trempés 96 h, STD : 600 kN-m/m^3, MOD: 2700 kN-m/m^3, STD : 3900 kN-m/m^3. 46

Tableau 4.1: Original crushed material properties. 59

Tableau 4.2: CBRs for material tested, water content, dry density and compaction energy 63

Tableau 4.3: CBR results for original and PF10 materials. Presented results are the mean values calculated on at least two measurements. 67

Tableau 5.1: Résultats des essais au cône de sable. 80

Tableau 5.2: Résultats des essais au nucléodensimètre, moyennes de 2 à 4 mesures par point. ... 81

Tableau 5.3: Propriétés des matériaux. 85

Tableau 5.4: Déplacements verticaux maximums (cm) à la surface selon les matériaux étudiés et l'épaisseur de la surface de roulement. 87

Tableau 5.5: Évaluation de la résistance au roulement (%) à partir des résultats de laboratoire... 88

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Fuseau granulométrique typique pour des mines métalliques (Tiré de Barbour et al. (2001), adapté de James et al. (2013). 6

Figure 2.2: Corrélation entre l'angle de friction en compression triaxiale et la masse volumique du sol sec, l'indice de densité relative et la porosité pour les matériaux granulaires (Tiré de Holtz et Kovacs 1991 , d'après l'US Navy, 1971). 8

Figure 2.3: Évolution de la capacité (tonnes courtes, 1 ton = 907 kg) des camions de transport minier (tiré de Thompson et al. (2019). 11

Figure 2.4: a) Courbures verticales et b) courbures horizontales sécuritaires selon les distances de freinage et de visibilité (tiré de Thompson, 2015). 13

Figure 2.5: Structure de route minière typique (Kumar, 2000). 15

Figure 2.6: Courbes de dimensionnement CBR (Thompson, 2015). 18

Figure 2.7: Distribution des contraintes normales sous une surface circulaire uniformément chargée dans un milieu élastique linéaire (tiré de Tannant et Regensburg, 2001). 20

Figure 2.8: Mesure du module de résilience (Bowles, 1984). 21

Figure 2.9: Relations entre le CBR et le module de résilience (Tiré de Thompson, 2015). 22

Figure 2.10: Processus de dimensionnement mécaniste-empirique (adapté de Thompson, 2015). 24

Figure 2.11: Facteurs de capacité portante pour la formule de Terzaghi (Bowles, 1984). 25

Figure 2.12: Valeur optimale (gris foncé) et sub-optimale (gris clair) pour le produit de rétrécissement et le coefficient de gradation (Thompson et Visser, 2000a). 31

Figure 2.13: Influence de la résistance au roulement sur les performances (Tannant et Regensburg, 2001). 35

Figure 2.14: Coûts opérationnels d'un camion transportant 250 kt/jour dans une fosse de 500 m de profondeur (Thompson, 2015). 36

Figure 3.1: Pile de réserve de roches stériles concassées (19 septembre 2017). 38

Figure 3.2: Pile de roches stériles concassées et emplacement des points d'échantillonnage (13 février 2018). 39

Figure 3.3: Exemple d'une étape de la séparation de l'échantillon CCM-1 par quartage. 40

Figure 3.4: Essai de portance californien CBR (adapté de ASTM D1883) LVDT: Linear variable differential transformer. 43

Figure 3.5: Montage de l'essai CBR au laboratoire à Polytechnique Montréal. 43

Figure 3.6: Courbe contrainte-pénétration obtenue suite à un essai CBR effectué sur le matériau original avec une compaction MOD et une teneur en eau initiale w=7%. 44

Figure 3.7: Correction appliquée à l'essai CBR effectué sur le matériau original avec une compaction MOD et une teneur en eau initiale w=7%. La correction étant x=0,89 mm, la contrainte correspondant à une pénétration de 5,97 mm (ici ≈12,75 MPa) a été utilisée pour calculer le CBR de cet échantillon. 44

Figure 3.8: Distribution granulométrique (a) du matériau original et DMAX10 (b) des échantillons PF2 à PF14, le matériau PF6 correspondant au matériau original. 47

Figure 3.9: Zone d'essai (rectangle rouge) sur le site de la mine Canadian Malartic (Source: Canadian Malartic, 2018). 48

Figure 3.10: Tronçon de route minière étudié sur une largeur de 17,5 m et une longueur de 24 m. 48

Figure 3.11: Disposition des essais de terrain (pas à l'échelle). 49

Figure 3.12: Modèle de route minière avec une surface de roulement de 60 cm d'épaisseur. 50

Figure 3.13: Application des contraintes induites par le passage d'un camion de type CAT 793F. Le chargement est indiqué par les flèches bleues (voir texte pour détails). 51

Figure 4.1: CBR test (adapted from ASTM D1883). LVDT: Linear variable differential transformer, measuring displacements. 60

Figure 4.2: Grain size distribution curves of (a) original material and DMAX10 (b) original material with various fine particle contents (see text for more details regarding sample preparation). 61

Figure 4.3: Typical CBR test result obtained for the original material with MOD compaction and a water content w = 7%. The stress corresponding to a penetration of 5,08 mm (indicated by an arrow) was compared to the standard (ASTM D1883, 2016)) and corrected to obtain the CBR value of the tested sample. 62

Figure 4.4: CBR results (in %) as a function of dry density. Results are presented for all samples, including original material, material sieved at 10 mm (DMAX10) and for fine contents comprised between 2 and 14% (PF2 to PF14). 65

Figure 4.5: CBR results (in %) as a function of dry density and compaction energy: STD: 600 kN-m/m^3, MOD: 2700 kN-m/m^3 and MOD81: 3900 kN-m/m^3 65

Figure 4.6: CBR and dry density results as a function of fine particle content. All samples were prepared with MOD compaction. 66

Figure 4.7: CBR results as a function of material (Original: unaltered crushed waste rock, DMAX10: maximum diameter of 10 mm, PF10: 10% of fine particles) and compaction energy (STD: 600 kN-m/m^3, MOD: 2700 kN-m/m3, MOD81: 3900 kN-m/m^3). Presented values are averages of up to 6 measurements. Error bars indicate the range of measurements. 71

Figure 5.1: Plan des essais de densité en place réalisés sur le terrain. 78

Figure 5.2: Courbes granulométriques des échantillons prélevés sur le terrain. La courbe granulométrique de la roche stérile concassée étudiée au laboratoire est indiquée en noir... 79

Figure 5.3: Densité sèche selon l'axe transversale à la route. 80

Figure 5.4: Courbes granulométriques mesurées sur les stériles concassés originaux et huit échantillons compactés avec les énergies STD, MOD et MOD81. 83

Figure 5.5: Essais de compaction selon les énergies de compaction STD, MOD et MOD81..... 84

Figure 5.6: Isocontours des contraintes (kPa) avec une surface de roulement constituée du matériau PF10 avec compaction MOD81. 86

Figure 5.7 : Isocontours des déformations verticales (m.m^{-1}) avec une surface de roulement constituée du matériau PF10 avec compaction MOD81 86

Figure 5.8 Isocontours des déplacements verticaux (m) avec une surface de roulement constituée du matériau PF10 avec compaction MOD81. 87

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire [L^2]
a	Rayon d'une surface de chargement circulaire [L]
AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
c	Cohésion [$ML^{-1}T^{-2}$]
CBR	Indice de portance californien (*California Bearing Ratio*) [%]
C_C	Coefficient de courbure [-]
CPT	Essai de pénétration au cône (*Cone penetration test*)
CSRA	*Committee of State Road Authorities* (Afrique du Sud)
C_U	Coefficient d'uniformité [-]
D	Profondeur de fondation [L]
D*	Jours depuis le dernier entretien de la route (Thompson et Visser, 2006) [T]
D_{10}	Diamètre des grains à 10% de passant [L]
D_{15}	Diamètre des grains à 15% de passant [L]
D_{30}	Diamètre des grains à 30% de passant [L]
D_{50}	Diamètre des grains à 50% de passant [L]
D_{60}	Diamètre des grains à 60% de passant [L]
D_{85}	Diamètre des grains à 85% de passant [L]
d_{max}	Diamètre maximal des grains [mm]
D_r	Densité relative des grains solides [-]
DR	Ratio des poussières (*Dust Ratio*) [-]
DRX	Diffraction des rayons X
e	Indice des vides [-]

E	Module de Young ou d'élasticité [$ML^{-1}T^{-2}$]
E_{eff}	Module d'élasticité effectif, ou de résilience [$ML^{-1}T^{-2}$]
ESWL	Charge équivalente par roue simple (*Equivalent Single Wheel Load*)
G	Module de rigidité [$ML^{-1}T^{-2}$]
Gc	Coefficient de gradation (*grading coefficient*) [-]
GR	Résistance de la pente (*Grade resistance*) [%]
G_s	Densité relative des grains solide [-]
H	Hauteur [L]
IRME	Institut de recherche en mines et environnement
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée [LT^{-1}]
KT	Tonnage journalier [M]
LL	Limite de liquidité [%]
LS	Rétrécissement linéaire (*Linear Shrinkage*) [%]
LVDT	Capteur de déplacement linéaire (*Linear Variable Differential Transformer*)
MOD	Énergie de compaction de 2700 kN-m/m^3
MOD81	Énergie de compaction de 3900 kN-m/m^3
M_R	Module de résilience [$ML^{-1}T^{-2}$]
MTQ	Ministère des transports du Québec
N	Nombre quotidien de passages de camion (Thompson et Visser, 2006) [-]
n	Porosité [-]
N*	Nombre de passages estimé pour la durée de vie d'une route (Knapton,1988) [-]
N_i	Facteurs de capacité portante [-]
p	Contrainte appliquée [$ML^{-1}T^{-2}$]
P	Pression des pneus [$ML^{-1}T^{-2}$]

P2	Passant du tamis de 2 mm [%]
P265	Passant du tamis de 26,5 mm [%]
P425	Passant du tamis de 0,425 mm [%]
P475	Passant du tamis de 4,75 mm [%]
PF	Pourcentage de particules fines (d<0,08 mm) [%]
PI	Indice de plasticité [%]
PL	Limite de plasticité [%]
QDMR	*Queensland Department of Main Roads*
q_{ult}	Capacité portante [$ML^{-1}T^{-2}$]
R	Rayon d'une surface de contrainte [L]
RDS	Pointage de défectuosité (*Roughness defect score*) [-]
RDSI	Taux d'augmentation du pointage de défectuosité (*rate of roughness defect score increase*) [-]
RDSMAX	Pointage de défectuosité maximal [-]
RDSMIN	Pointage de défectuosité minimal [-]
RIME	*Research Institute on Mine and Environment*
RR	Résistance au roulement [%]
RR*	Résistance au roulement (Thompson et Visser, 2006) [$MLT^{-2}M^{-1}$]
RRI	Taux d'augmentation de la résistance au roulement (*Rolling resistance rate of increase*) [-]
RRMIN	Résistance au roulement minimale [$MLT^{-2}M^{-1}$]
Sp	Produit de rétrécissement (*Shrinkage product*) [-]
STD	Énergie de compaction de 600 kN-m/m^3
t_w	Charge d'une roue [M]
URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale

USCS	*United Soil Classification System*
V	Vitesse [LT^{-1}]
w	Diamètre d'une surface de chargement circulaire [L]
w	Teneur en eau massique [%]
w_{opt}	Teneur en eau massique optimale [%]
z	Profondeur [L]
Z_{CBR}	Profondeur minimale d'une couche selon son indice CBR [L]
Z_{ESWL}	Profondeur minimale d'une couche selon la charge équivalente par roue simple [L]
β	Angle de repos [°]
γ	Poids volumique [$(MLT^{-2})L^{-3}$]
$\Delta\varepsilon$	Variation de déformation [-]
$\Delta\sigma$	Variation de contrainte [$ML^{-1}T^{-2}$]
ε	Déformation [-]
$\varepsilon_{critique}$	Déformation critique [-]
ε_h	Déformation horizontale [-]
ε_v	Déformation verticale [-]
ν	Coefficient de Poisson [-]
ρ	Masse volumique [ML-3]
ρ_d	Masse volumique sèche [ML-3]
σ_0	Contrainte initiale [$ML^{-1}T^{-2}$]
σ_n	Contrainte normale [$ML^{-1}T^{-2}$]
σ_z	Contrainte verticale [$ML^{-1}T^{-2}$]
τ	Résistance au cisaillement [$ML^{-1}T^{-2}$]
ϕ	Angle de frottement interne [°]

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Analyses granulométriques 105

Annexe B : Densité relative des grains solides 125

Annexe C : Essais de compaction 128

Annexe D : Essais de perméabilité 133

Annexe E : Essais de portance californien (CBR) 135

Annexe F : Essais au cône de sable 214

Annexe G : Résultats des analyses numériques 215

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Généralités

Les opérations minières à travers le monde génèrent des milliards de tonnes de minerai et de roches stériles chaque année (Lottermoser, 2010). En 2008, plus de 250 millions de tonnes de roches stériles ont été produites uniquement au Canada (Statistique-Canada, 2012). La très grande majorité de ces roches stériles sont généralement entreposées dans des haldes à stériles (Aubertin et al., 2002), mais elles peuvent aussi être utilisées comme matériau de construction pour les différentes infrastructures minières.

La réutilisation de ces matériaux pour la construction de digues ou d'inclusions de roches stériles dans les parcs à résidus (Blight, 2009; Aubertin et al., 2015), dans le remblayage de chantier minier sous-terrain (Yang, 2016), dans des recouvrements lors de la restauration de site (Pabst, 2011; Kalonji, 2014; Larochelle, 2018) et dans les routes de transport minier (Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2015) sont des exemples de valorisation de ces matériaux directement sur les sites miniers. Il est à la fois économiquement et environnementalement souhaitable de réutiliser les roches stériles puisqu'elles sont disponibles directement sur le site et que leur utilisation permet de réduire le volume de matériaux entreposé dans les haldes (Lottermoser, 2011; Benarchid et al., 2018).

Plusieurs kilomètres de routes sont construits sur les sites miniers. La taille des camions employés sur les sites varie selon le type d'exploitation et la planification de la mine. Afin d'effectuer des économies d'échelles, le domaine minier utilise depuis les années 1960 des camions de transport de matériaux de plus en plus gros (Kumar, 2000; Dotto, 2014). Ces camions extra-lourds peuvent aujourd'hui transporter plus de 300 tonnes de matériaux par voyage et leur masse à pleine capacité peut atteindre jusqu'à 600 tonnes (Thompson et al., 2019). Par contre, alors que la taille des véhicules progressait à un rythme rapide, la technologie liée à la construction des routes de transport minier a peu évolué (Kaufman et Ault, 1977). Les véhicules extra-lourds constituent d'importants investissements initiaux ainsi que de grandes dépenses en entretien et en approvisionnement en carburant (Atkinson, 1992). Il est donc primordial de construire des routes adéquates et optimisées afin de permettre l'utilisation de ces équipements à leur plein potentiel.

De plus, le transport de matériau représente souvent plus de 50% des coûts totaux d'une exploitation minière (Thompson, 2009). Il constitue aussi une des activités les plus polluantes et représente jusqu'à plus de 50% des gaz à effet de serre générés lors de l'extraction et la transformation de certains minéraux (Norgate et Haque, 2010). La construction de routes de bonne qualité pourrait donc avoir un impact environnemental et économique important tout en contribuant à valoriser les roches stériles et à diminuer la quantité de matériaux empruntés dans le milieu naturel.

Bien que l'absence complète de conception structurale et fonctionnelle de la route présente l'option la moins coûteuse initialement, les coûts d'entretien des véhicules augmentent lorsque la structure de route n'a pas été dimensionnée de façon optimale et que le matériau de la surface de roulement n'a pas été bien choisi (Kaufman et Ault, 1977). Il en résulte des routes avec plus de défectuosités qui ont impact à la fois sur le confort de conduite, mais aussi sur la productivité et les coûts en composantes de véhicules et en baisse de productivité (Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2015). L'investissement représenté par la caractérisation, le choix des matériaux de construction et la planification des routes minières est donc justifiable (Atkinson, 1992).

Le choix du matériau de la surface de roulement des routes minières pour véhicules extra-lourds permet de prévenir l'apparition des différents défauts qui dégradent la qualité de la route, comme les nids-de-poule, les tassements, les bosses et les ondulations. Un matériau plus performant permet aussi de réduire la résistance au roulement qui contrôle en partie la consommation de carburant des véhicules (Thompson, 2015). Puisqu'il est souhaitable de réutiliser les matériaux en place, une majorité de mines utilisent des roches stériles concassées pour construire la surface de roulement. Toutefois, les stériles concassés utilisés pourraient être optimisés pour offrir de meilleures performances et ainsi réduire les coûts opérationnels, diminuer les émissions de gaz à effet de serre et limiter l'empreinte des haldes à stérile.

1.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche était de définir les propriétés optimales du matériau utilisé dans la surface de roulement des routes minières pour maximiser leurs performances. La rigidité du matériau évaluée au moyen de l'essai de portance californien (CBR) a été utilisée

comme principal indicateur de la rigidité du matériau. Les objectifs spécifiques du projet consistaient à :

- Caractériser les roches stériles concassées utilisées comme surface de roulement à la Mine Canadian Malartic.
- Évaluer l'impact de différentes distributions granulométriques sur la rigidité du matériau.
- Évaluer l'impact de l'énergie de compaction sur la densité et la rigidité du matériau.
- Évaluer la représentativité des essais de laboratoire et comparer les propriétés de densité et de teneur en eau au laboratoire et en place.
- Évaluer l'impact des variations de la rigidité du matériau de la surface de roulement sur la résistance au roulement.

1.3 Contenu du mémoire

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres. Suite au chapitre d'introduction, le chapitre 2 présente l'état des connaissances sur les routes minières et l'utilisation des roches stériles pour leur construction. Les principaux thèmes abordés dans la revue de littérature sont les caractéristiques des roches stériles et les principales méthodes de conception de la structure et de la surface de roulement des routes minières. Le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée à la fois pour les essais au laboratoire, sur le terrain ainsi que lors des simulations numériques. Les principaux résultats de laboratoires sont présentés sous forme d'un article (chapitre 4). Le manuscrit de cet article a été soumis à la revue *Transportation Geotechnics*. Le chapitre 5 présente certains résultats complémentaires obtenus au laboratoire, sur le terrain et au moyen de simulations numériques et qui n'ont pas été présentés dans l'article. Leur analyse ainsi qu'une discussion sur la valorisation des roches stériles concassées dans la surface de roulement des routes minières sont également discutées. Le chapitre 6 présente les principales conclusions du projet et quelques recommandations pour la poursuite des travaux sur ce sujet.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Roches stériles

2.1.1 Production, entreposage et utilisation

Extraire un grand volume de roches stériles est nécessaire afin d'atteindre les zones minéralisées et exploitables d'une mine. La proportion de roches stériles par rapport au volume total de roche extraite peut dépasser 60% dans le cas des mines à ciel ouvert (Aubertin et al., 2008). Pour les mines souterraines, ce ratio se situe habituellement entre 5 et 15%. Ces matériaux sont généralement entreposés dans des haldes à stériles qui peuvent atteindre des volumes de plus 50 millions de m^3 et des hauteurs dépassant 400 m.

Les dimensions importantes des haldes à stériles complexifient leur restauration au niveau de leur stabilité géotechnique et géochimique (Aubertin, 2013). La réutilisation (ou valorisation) des roches stériles peut donc contribuer à réduire la taille des aires d'accumulation et faciliter la restauration (Franks et al., 2011; Lottermoser, 2011).

La construction des haldes à stériles peut se faire selon quatre méthodes principales (Piteau, 1991; Aubertin et al., 2002; Fala, 2008; McLemore et al., 2009). La méthode de déversement à la benne (*end-dumping*) consiste à déposer les stériles depuis la crête de la halde le long des pentes. Dans la méthode du déversement et épandage au butoir (*push-dumping*), les camions déversent les stériles en retrait de la crête et un bulldozer les pousse dans la pente. Une autre méthode consiste à réaliser des empilements individuels de petites dimensions qui sont ensuite nivelés et compactés par la machinerie (*free-dumping*). La méthode de la benne traînante est principalement utilisée dans les exploitations de charbon ou de sables bitumineux de grandes dimensions (Fala, 2008). Le choix de la méthode de mise en place dépend de plusieurs considérations, dont la topologie du site, les équipements disponibles ainsi que le volume de roches stériles produites lors de l'exploitation. Le choix de la méthode de construction a un impact direct sur la ségrégation des particules dans la halde. La méthode du déversement à la benne entraîne par exemple une ségrégation des particules plus prononcée et favorise l'accumulation de particules grossières en bas de pente et la formation d'un système hétérogène et stratifié (Aubertin et al., 2002; Azam et al., 2006; McLemore et al., 2009) L'arrangement hétérogène des particules dans

les haldes provoque l'apparition de chemins préférentiels pour le transport de l'eau et des couches de différentes compositions granulométriques avec des résistances mécaniques variables (Azam et al., 2009; McLemore et al., 2009; Amos et al., 2015; Lahmira et al., 2016). La composition granulométrique des roches stériles est en soi hétérogène et varie à chaque dynamitage selon la nature de la roche excavée, la géométrie de l'excavation et le plan de dynamitage. Cette hétérogénéité du matériau complexifie sa caractérisation puisque les stériles prélevés à différents endroits et à différents moments lors de l'exploitation d'une mine présentent différentes caractéristiques (Azam et al., 2009).

Les roches stériles peuvent être utilisées de plusieurs manières sur les sites miniers. Lors des opérations, elles peuvent servir de structure de route et de matériau de construction pour des digues ou des inclusions dans les parcs à résidus (Tannant et Regensburg, 2001; Blight, 2009; Aubertin et al., 2015). Dans les mines sous-terraines, elles peuvent être renvoyées dans les chantiers et être utilisées pour augmenter leur stabilité ou dans la construction de barricades qui servent de support structurel aux chantiers remblayés avec des résidus miniers (Yang, 2016). Elles peuvent aussi servir directement dans les méthodes de restauration comme les recouvrements monocouche ou multicouche (Pabst, 2011; Kalonji, 2014). L'utilisation du stérile tout-venant est souvent favorisée, mais des manipulations comme le concassage ou le tamisage peuvent être nécessaires afin d'obtenir le matériau adéquat (Aubertin et al., 2015).

2.1.2 Granulométrie

Les roches stériles ont généralement une granulométrie étalée qui comprend des particules allant du micromètre jusqu'au mètre (Figure 2.1). La fraction des sables (d>0,08 mm) et graviers (d>4,75 mm) constitue typiquement la fraction dominante (Aubertin, 2013). Le coefficient d'uniformité, c'est-à-dire le rapport entre les diamètres correspondants à 10% et 60% passant des particules ($C_U = d_{10}/d_{60}$), se situe le plus souvent entre 20 et 100 (Aubertin, 2013), mais peut parfois atteindre 300 (Aubertin et al., 2002; Lévesque, 2015). La granulométrie des roches stériles a un impact direct sur leurs propriétés mécaniques et hydrogéologiques. Une granulométrie plus grossière augmentera généralement la résistance du matériau ainsi que sa conductivité hydraulique (Holtz et Kovacs, 1991; Piteau, 1991). À l'inverse, une proportion significative de particules fines (c'est-à-dire plus de 10% des particules de moins de 0,08 mm de diamètre) réduira leur conductivité hydraulique (Piteau, 1991).

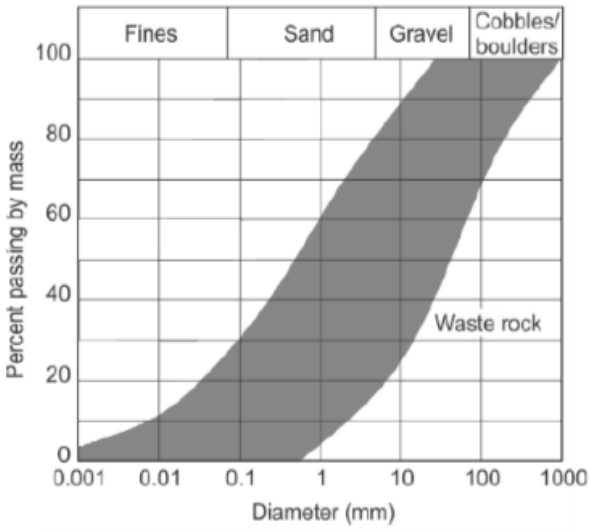


Figure 2.1: Fuseau granulométrique typique pour des mines métalliques (Tiré de Barbour et al. (2001), adapté de James et al. (2013).

2.1.3 Densité relative des grains solides

La densité relative des grains solides, ou densité spécifique des solides, des matériaux granulaires est généralement comprise entre 2,60 et 2,75, mais peut varier selon la minéralogie (Bowles, 1984). Les roches stériles provenant de mines de charbon peuvent avoir des densités relatives aux environs de 1,80 (McLemore et al., 2009), tandis que les roches stériles issues de mines de roches dures ont généralement des densités relatives entre 2,60 et 4,00 (Aubertin et al., 2002). Des roches stériles ayant des fortes teneurs en minéraux plus denses peuvent dépasser des valeurs de 4, par exemple, des stériles ayant une forte teneur en ilménite peuvent atteindre des densités relatives de 4,23 (Peregoedova, 2012).

2.1.4 Porosité

La porosité des stériles dans les haldes est généralement comprise entre 0,3 et 0,5 selon leur degré de compaction (Aubertin, 2013). La compaction des roches stériles est contrôlée principalement par le passage des équipements roulants ainsi que par la compression sous son poids propre. La réduction de la porosité réduit la conductivité hydraulique et augmente généralement la résistance au cisaillement (Aubertin, 2013).

2.1.5 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est directement liée à la granulométrie d'un matériau et à sa porosité (McCarthy, 1977). Un matériau ayant une granulométrie plus grossière aura tendance à avoir une perméabilité plus grande qu'un matériau ayant une granulométrie plus fine. La conductivité hydraulique saturée k_{sat} des roches stériles est typiquement supérieure 10^{-5} m/s (Aubertin, 2013). La conductivité est également influencée par l'état de compaction et la porosité du matériau, et peut donc varier selon l'emplacement dans la halde. De plus, la présence de macroporosité peut augmenter la conductivité hydraulique en place jusqu'à 10^{-3} m/s (Aubertin, 2013).

2.1.6 Angle de friction et cohésion

La loi de comportement de Mohr-Coulomb (équation 2-1) est couramment utilisée pour définir la résistance au cisaillement des roches stériles (McLemore et al., 2009).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \qquad (2\text{-}1)$$

Où

τ : Résistance au cisaillement (kPa)

c : Cohésion (kPa)

σ_n : Contrainte normale au plan de rupture (kPa)

ϕ : Angle de friction interne (°)

La loi de comportement est basée sur la cohésion c (kPa) et l'angle de frottement ϕ (°) et met en relation la résistance au cisaillement τ (kPa) et la contrainte normale au plan de rupture σ_n (kPa). La résistance au cisaillement d'un matériau est influencée par la forme et la rugosité des particules, la qualité de la roche, la distribution granulométrique, la taille maximale des particules, leur densité relative des grains solides, leur compaction, le degré de saturation et la contrainte appliquée (Holtz et Kovacs, 1991; McLemore et al., 2009).

L'angle de friction interne augmente généralement pour des matériaux plus grossiers, une augmentation de la densité en place et une réduction de l'indice des vides ou de la porosité (Figure 2.2).

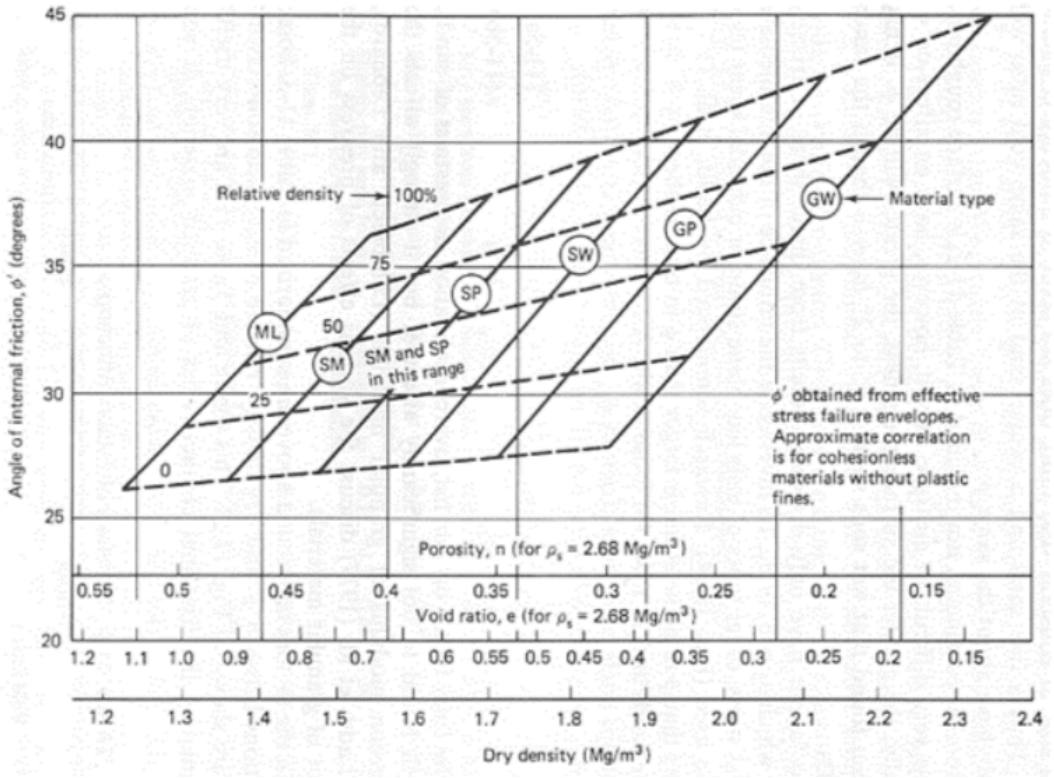


Figure 2.2: Corrélation entre l'angle de friction en compression triaxiale et la masse volumique du sol sec, l'indice de densité relative et la porosité pour les matériaux granulaires (Tiré de Holtz et Kovacs 1991 , d'après l'US Navy, 1971).

L'angle de friction interne des stériles miniers provenant de mines de roches dures peut être compris entre 29° et 51°, mais est généralement de l'ordre de 38° à 45° (McLemore et al., 2009). La cohésion des roches stériles est typiquement faible (<10 kPa) bien qu'une cohésion apparente puisse être mesurée en conditions non-saturées (Aubertin, 2013). L'angle de friction résiduel représente la résistance à haute déformation d'un matériau, soit lorsque la résistance au pic a été dépassée et que la contrainte provoquant le déplacement tend vers une valeur constante (Holtz et Kovacs, 1991). Les stériles ont généralement un angle de friction résiduel environ 5° inférieur à l'angle de friction au pic (Aubertin, 2013). Le phénomène de dégradation du matériau en raison des contraintes élevées dans les haldes provoque souvent la fracturation et l'arrondissement des particules, ce qui a pour effet de réduire l'angle de friction de 10° environ (Aubertin, 2013). La dégradation des particules au cours du temps peut aussi contribuer à réduire l'angle de friction d'environ 10° pour certaines roches stériles dont la minéralogie est plus sensible à l'effet du temps, comme par exemple les stériles de mines de charbon (McLemore et al., 2009).

L'évaluation de l'angle de friction de roches stériles en laboratoire est complexe étant donné la taille limitée des équipements utilisés pour les essais triaxiaux ou les essais de cisaillement direct par rapport à la taille maximale des roches stériles (Fox et Carraro, 2011; Ovalle et al., 2014). Différents essais *in-situ*, au laboratoire ou à partir des propriétés granulométriques ou de confinement du matériau sont donc couramment utilisés pour estimer les angles de friction interne (Leps, 1970; Okamoto, 2004; Barton, 2008; Oyanguren et al., 2008; Williams et al., 2015; Andjelkovic et al., 2018). Des essais triaxiaux à large diamètre peuvent également être réalisés, mais ces équipements sont rares et leur utilisation coûteuse (Linero et al., 2007; Frossard et al., 2012; Ovalle et al., 2014).

2.1.7 Angle de repos

L'angle de repos β est l'angle naturel que prend un matériau lorsqu'il est déposé en vrac. Il correspond à la pente la plus abrupte que peut former ce matériau dans son état le plus lâche (Holtz et Kovacs, 1991). Dans le cas des stériles miniers, cet angle est habituellement autour de 37° (±3°) (Piteau, 1991; Aubertin, 2013), mais dépend de la granulométrie du matériau, de sa teneur en eau, de la forme des particules, de la densité relative des grains solides, de la géométrie de la pente ainsi que de la méthode de déposition utilisée (Aubertin, 2013).

2.1.8 Modules de rigidité et d'élasticité

Le module d'élasticité est le rapport entre la variation de contrainte ($\Delta\sigma$) et la déformation ($\Delta\varepsilon$) correspondante à cette contrainte pour un matériau (Bowles, 1984).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{2-2}$$

Le module d'élasticité d'un matériau peut être déterminé au moyen d'essais de chargement à la plaque, d'essais triaxiaux ou d'essais de cisaillement direct (McCarthy, 1977; Duncan et Bursey, 2013; Maknoon, 2016). Il peut aussi être déterminé à partir d'essais réalisés sur le terrain tel que les essais SPT et CPT. Cependant, ces essais peuvent être compliqués dans des matériaux constitués de blocs comme les roches stériles (Duncan et Bursey, 2013). Le module d'élasticité est influencé à la fois par les propriétés du matériau tel que sa granulométrie et la résistance de

ses grains, mais aussi par ses conditions de mise en place telles que sa porosité et son niveau de compaction (Sawangsuriya et Edil, 2016).

Le coefficient de Poisson est le rapport entre la déformation horizontale (ε_h) et la déformation verticale (ε_v) :

$$\nu = \frac{-\varepsilon_h}{-\varepsilon_v} \tag{2-3}$$

E et ν permettent d'obtenir le module de cisaillement G, aussi appelé module de rigidité :

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)} \tag{2-4}$$

Les modules d'élasticité et de cisaillement des matériaux permettent d'évaluer les déformations correspondant à une contrainte pour un sol donné. Le module de rigidité des roches stériles peut dépasser 50 MPa (Aubertin, 2013) et leur module de Young E peut être supérieur à 100 MPa (Maknoon et Aubertin, 2013).

2.2 Routes minières

2.2.1 Généralités

Une opération minière comporte un réseau routier complexe où circule une grande variété de véhicules sur des routes ayant différentes fonctions et qui peut s'étendre sur plus d'une centaine de kilomètres (Kumar, 2000). Ces routes peuvent être classées à la fois en termes de volume de trafic, de durée de vie prévue et d'importance pour la productivité d'une mine (Thompson, 2015). Dans le cas d'une mine à ciel ouvert, la rampe menant à la fosse est un exemple de tronçon critique et demandera donc un niveau de design plus détaillé en raison d'un trafic plus important, d'un tracé permanent ou semi-permanent et de son impact direct sur la production (Thompson, 2015).

L'augmentation de la capacité des véhicules extra-lourds augmente aussi le niveau de conception nécessaire. La capacité des véhicules a augmenté de manière significative au cours des 70 dernières années entraînant ainsi des contraintes de plus en plus élevées sur les structures de route (Figure 2.3). De plus gros équipements permettent en effet de faire des économies d'échelle lors

de la production (Dotto, 2014). Des camions d'une capacité de 30 tonnes étaient couramment utilisés dans les années 1950, mais ils disposent aujourd'hui une capacité atteignant 450 tonnes (Thompson et al., 2019).

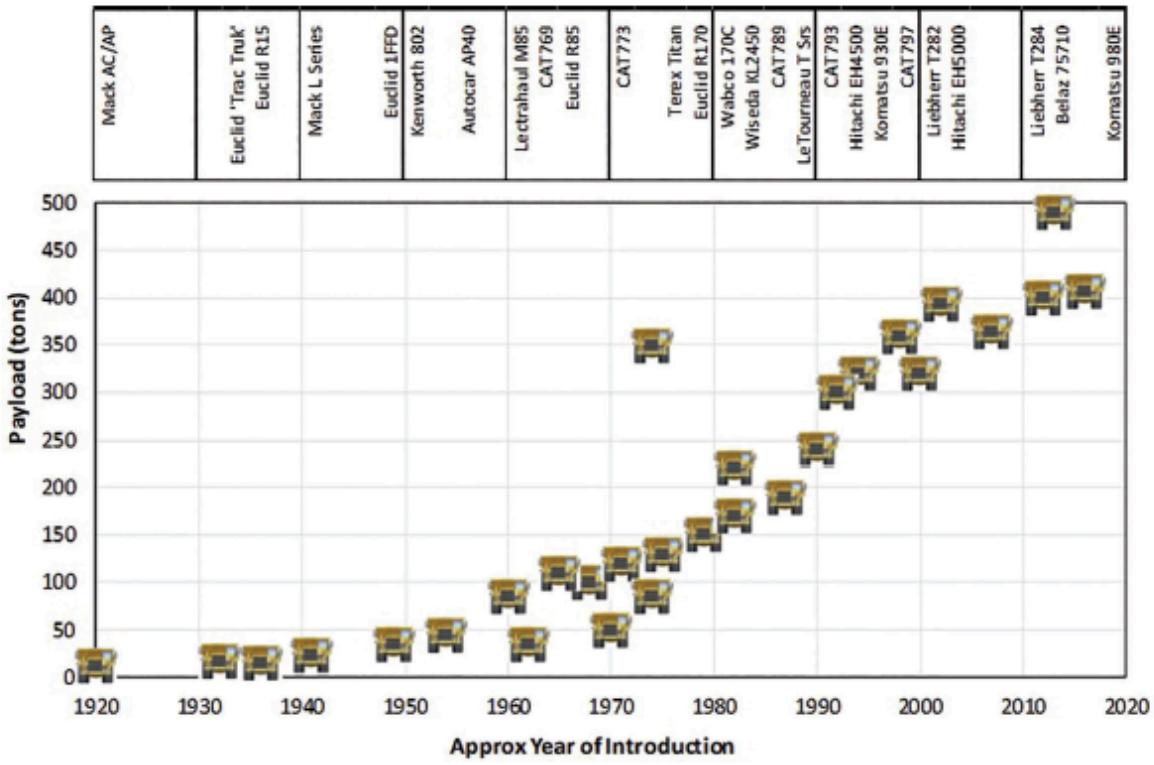


Figure 2.3: Évolution de la capacité (tonnes courtes, 1 ton = 907 kg) des camions de transport minier (tiré de Thompson et al. (2019).

Par exemple, pour les camions CAT793F, utilisés à la mine Canadian Malartic, la capacité de chargement maximale recommandée est de 226 tonnes pour un poids nominal brut du véhicule de plus de 386 tonnes (Caterpillar, 2012). Des pneus 40.00R57 sont utilisés pour ces véhicules avec une pression maximale recommandée d'environ 700 kPa (Bridgestone, 2016).

Les causes principales de la détérioration des chemins miniers sont les précipitations et le ruissellement, le trafic élevé, les périodes de gel-dégel, la mauvaise compaction ainsi que les débordements de véhicules (Kumar, 2000; Tannant et Regensburg, 2001). L'eau de ruissellement peut créer des ravines qui affaiblissent la structure de route, ce phénomène est accentué lors de la période de dégel. Un volume de trafic extra-lourd élevé ou une compaction inadéquate peut provoquer l'apparition d'ornières. Les débordements ont lieu lorsque les camions sont chargés à

capacité maximale et qu'un mouvement du véhicule provoque la chute de blocs, entraînant l'endommagement de la surface de la route. La présence de blocs sur la route nécessitera également l'intervention d'un véhicule d'entretien pour déplacer les débris (Tannant et Regensburg, 2001). Ces différents éléments sont aussi responsables de l'apparition de nids-de-poule, de tassements et d'ondulations à la surface d'une route minière. Une conception adéquate permet de limiter la détérioration des routes en évacuant efficacement l'eau et en limitant les déformations dans la structure (Thompson, 2015).

L'étude des routes minières peut être séparée en quatre catégories distinctes : le dimensionnement géométrique, le dimensionnement structurel, le dimensionnement fonctionnel et l'entretien (Atkinson, 1992; Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2011). Ces différents aspects de la conception d'une route minière visent à produire des routes sécuritaires pour les usagers tout en augmentant leur durabilité selon leur durée de vie prévue.

2.2.2 Dimensionnement géométrique

L'étude géométrique d'un réseau routier d'une mine étudie les tracés qui seront utilisés entre les zones d'extraction de la mine, de traitement du minerai, de stockage des rejets et tous les autres endroits sur une mine nécessitant un accès routier (Thompson, 2015). Elle se déroule principalement lors de la planification du projet et est adaptée durant les phases d'exploration et d'exploitation. Les pentes et la largeur des routes sont des caractéristiques importantes. La pente maximale recommandée varie selon les auteurs, mais se situe généralement autour de 10% (Kaufman et Ault, 1977; Atkinson, 1992; Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2011). La pente maximale dépend de plusieurs facteurs tels que les matériaux de construction utilisés, la résistance au roulement, le type et la masse des véhicules employés et le climat. Une pente plus raide peut permettre des économies de temps lors d'un cycle de transport, mais doit aussi permettre une distance de freinage adéquate et sécuritaire lors des descentes (Tannant et Regensburg, 2001).

La largeur des routes est calculée en fonction du nombre de voies et de la largeur maximale du plus gros camion qui utilisera la route (Thompson, 2011). À la largeur obtenue en multipliant la largeur du véhicule avec un facteur dépendant du nombre de voies (Tableau 2.1), il faut additionner la largeur nécessaire pour la construction des bermes de sécurité (si nécessaires) et des fossés de drainage.

Tableau 2.1: Largeur minimale des routes minières (adapté de Thompson, 2011).

Nombre de voies	Facteur × Largeur du véhicule le plus large sur la route
1	2
2	3,5
3	5
4	6

Les courbures horizontales et verticales maximales dans le réseau routier d'une mine sont définies selon la distance de freinage des camions dans les conditions les moins favorables et la distance de visibilité (Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2015). La distance de visibilité doit être supérieure à la distance de freinage en tout temps afin d'être sécuritaire (Figure 2.4).

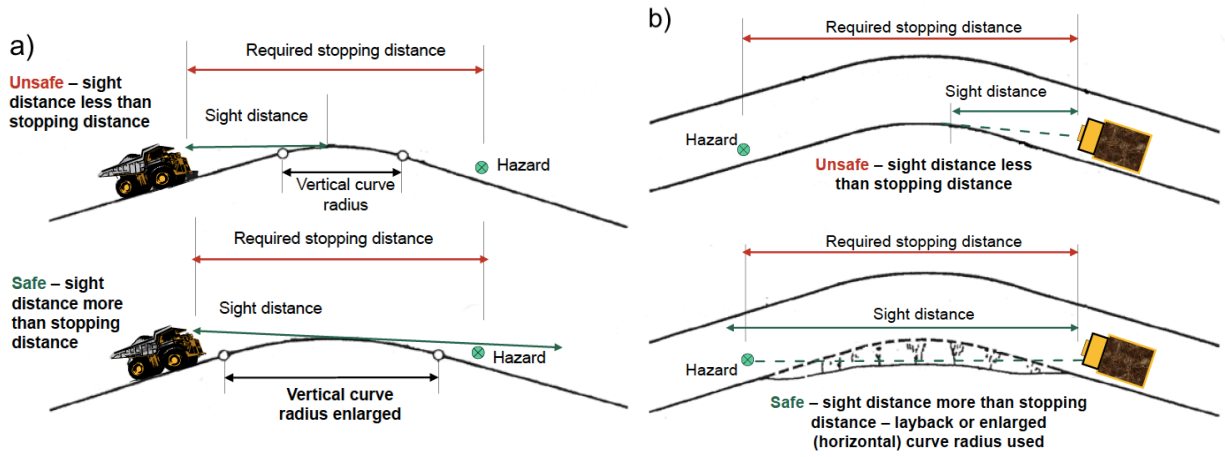


Figure 2.4: a) Courbures verticales et b) courbures horizontales sécuritaires selon les distances de freinage et de visibilité (tiré de Thompson, 2015).

La mise en place d'infrastructures de sécurité est nécessaire lors de la planification du réseau routier minier. Ces infrastructures comportent des bermes, souvent construites avec des roches stériles, dont la hauteur est généralement comprise entre 2/3 et 3/4 du diamètre maximal des pneus utilisés dans la mine (Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2011) (Figure 2.5). Ces

bermes servent à rediriger un camion vers la route en cas d'incident (Tannant et Regensburg, 2001). D'autres infrastructures de sécurité peuvent être construites, comme des voies de sécurité avec une pente inverse élevée (de l'ordre de 20%) ou des bermes de collision construite avec des matériaux lâches au centre des routes où les camions peuvent se diriger pour ralentir en cas de perte de contrôle (Atkinson, 1992).

Des infrastructures spécifiques doivent aussi être prévues pour la gestion des eaux de surfaces. Des niveaux d'eau élevés risqueraient de réduire à la fois la rigidité et la capacité portante de la structure de route (Tannant et Regensburg, 2001). Les infiltrations dans la structure de route peuvent entraîner la migration de particules fines et favoriser l'apparition de défauts dans la route et accroître sa détérioration, particulièrement en période de gel-dégel (Kumar, 2000). Des « drains en v » sont généralement placés à l'extérieur de la route pour recueillir l'eau de ruissellement. Des ponceaux permettent d'évacuer l'eau et d'éviter les accumulations (Atkinson, 1992). Une pente transversale (couronne) de 2 à 4% est recommandée pour que l'eau puisse ruisseler vers l'extérieur de la chaussée et limiter l'infiltration (Kaufman et Ault, 1977; Atkinson, 1992; Tannant et Regensburg, 2001).

2.2.3 Structure des routes minières

La structure d'une route minière est composée de plusieurs couches (généralement entre 2 et 4) d'épaisseurs et de propriétés différentes (Figure 2.5). Les principales couches incluent généralement (du bas vers le haut) le sol d'infrastructure (*subgrade*), la sous-fondation (*sub-base*), la fondation (*base course*) et la surface de roulement (*surface course*) (Figure 2.5).Le dimensionnement structurel consiste à optimiser le choix des matériaux et l'épaisseur de chacune des couches (Thompson et Visser, 1997). L'épaisseur totale de la structure de route est généralement de quelques mètres, mais peut dépasser la dizaine de mètres lorsque des élévations élevées doivent être atteintes ou que le sol d'infrastructure est de très mauvaise qualité (Tannant et Regensburg, 2001). La rigidité de chacune des couches doit être croissante du bas vers la surface de la route (Kumar, 2000).

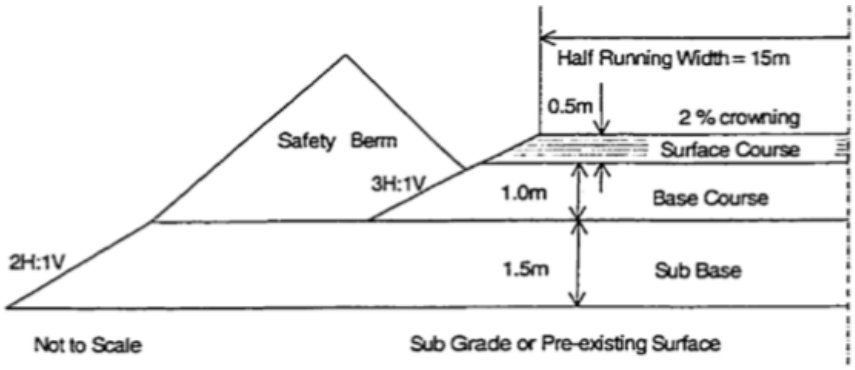


Figure 2.5: Structure de route minière typique (Kumar, 2000).

Sol d'infrastructure

Le sol d'infrastructure est le matériau présent naturellement sur le site où la route doit être aménagée. Il est souvent nécessaire de remblayer ou déblayer du matériel afin d'atteindre l'élévation désirée. L'épaisseur de la structure de route sus-jacente dépend de la rigidité du sol d'infrastructure. Moins le matériau *in situ* est rigide, plus l'épaisseur de la structure de route sera importante (Tannant et Regensburg, 2001). Le sol d'infrastructure doit avoir une capacité portante suffisante pour supporter la charge de la route et des véhicules les plus lourds qui y circulent (Kaufman et Ault, 1977).

Couches de sous-fondation (sub-base) et de fondation (base)

Les couches de sous-fondation sont habituellement construites à l'aide de stériles tout-venant sélectionnés pour leur rigidité, les plus rigides étant utilisés comme fondation et les moins rigides comme sous-fondation (Kumar, 2000). Ces couches sont le support structural de la route et servent principalement à supporter les contraintes induites par les véhicules lourds (Tannant et Regensburg, 2001). La granulométrie grossière des matériaux utilisés permet de diriger les eaux d'infiltrations vers les drains en bord de route, et une pente transversale de 2 à 4% est recommandée pour faciliter la déviation (Douglas, 2016). Un meilleur drainage de l'eau permet de réduire les volumes d'eau présents dans la structure et ainsi de limiter les déformations lors des périodes de gel-dégel, mais aussi la formation de lentille de glaces (Tannant et Regensburg, 2001). La granulométrie de ces couches doit aussi permettre d'éviter la migration des particules de la surface de roulement. Le matériau doit donc être assez grossier pour permettre à l'eau d'être évacuée, mais assez fin pour empêcher les particules fines de migrer à travers la couche (Douglas, 2016). Les critères filtres peuvent être utilisés pour réduire les risques de migration des

particules (Tableau 2.2). Les couches de sous-fondations et de fondations ont généralement une épaisseur de 1 à 2 m (Tannant et Regensburg, 2001).

Tableau 2.2: Critères filtres (tiré de Douglas, 2016).

Critère granulométrique	Condition
$D_{15}/d_{85} < 5$ $D_{50}/d_{50} < 20$ $D_{15}/d_{85} < 25$	Sauf si le sol est uniforme ou étalé
$D_{15}/d_{85} < 6$	Si le sol est uniforme (i.e., $d_{60}/d_{10} \leq 1{,}5$)
$D_{15}/d_{15} < 40$	Si le sol est étalé (i.e., $d_{60}/d_{10} \geq 4$)

Note : D fait référence à la taille de grains du filtre (i.e. les couches de sous fondation et de fondation), d fait référence à la taille des grains du sol qui doit être filtré (i.e. la surface de roulement), le chiffre en indice représente le pourcentage passant

Surface de roulement

La surface de roulement est critique pour la qualité de la route. Elle est en contact direct avec les camions et doit contribuer à faciliter la conduite, réduire les poussières et distribuer les charges dans les couches inférieures (Thompson et Visser, 2000b; Tannant et Regensburg, 2001). Son épaisseur est généralement comprise entre 0,3 et 1 mètre (Tannant et Regensburg, 2001). Les caractéristiques de la surface de roulement, centrale dans ce projet de recherche, sont abordées plus en détail à section 2.3.

2.2.4 Méthode de dimensionnement empirique

La méthode de dimensionnement utilisant l'essai de portance californien (California bearing Ratio, CBR) a d'abord été proposée pour la construction des autoroutes au début du 20ème siècle (Caicedoa et Mendozaa, 2015). Elle a ensuite été adaptée aux routes minières par Kaufman & Ault (1977). Dans cette approche, l'épaisseur de chacune des couches et l'épaisseur totale de la chaussée peuvent être déterminées à partir des résultats de l'essai CBR pour chacun des matériaux et de la charge maximale par roue (Kaufman et Ault, 1977).

La charge maximale peut être obtenue auprès des manufacturiers, mais en pratique, sa valeur réelle peut être plus élevée sur le terrain (Tannant et Regensburg, 2001). L'essai CBR peut être réalisé au laboratoire ou sur le terrain. l'épaisseur minimale de chaque couche (Z_{CBR}) est déterminée à partir de courbes de dimensionnement (Figure 2.6) ou de l'équation suivante (Thompson, 2015) :

$$Z_{CBR} = \frac{9{,}81 t_w}{P}\left[0{,}104 + 0{,}331 e^{(-0{,}0287 t_w)}\right]\left[(2\times10^{-5})^{\left(\frac{CBR}{P}\right)}\right]\left[\left(\frac{CBR}{P}\right)^{-(0{,}415+P\times10^{-4})}\right] \quad (2\text{-}5)$$

Où t_w est la charge d'une roue en tonnes, P est la pression des pneus (kPa) et CBR est le résultat de l'essai CBR (%).

L'épaisseur minimale de la couche de roulement est déterminée de la même manière, mais doit toutefois demeurer supérieure à 150 mm pour des raisons fonctionnelles (Thompson, 2015).

La valeur de la charge utilisée peut être augmentée de 20% afin de simuler l'effet de roues jumelées (Kaufman et Ault, 1977). La formule suivante peut aussi être utilisée afin de corriger l'épaisseur des couches pour des roues jumelées (Thompson, 2015) :

$$Z_{ESWL} = Z_{CBR} + \left[0{,}184 + \left(0{,}086 CBR + \frac{17{,}76 CBR}{t_w}\right)\right]^{-1} \quad (2\text{-}6)$$

Où t_w est la charge d'une roue en tonnes et CBR est le résultat de l'essai CBR (%). ESWL : *equivalent single wheel load* : charge équivalente par roue simple

2.2.5 Méthode de dimensionnement mécaniste-empirique

La méthode de dimensionnement utilisant le CBR comme outil de dimensionnement est progressivement remplacée depuis quelques décennies par des modèles mécanistes-empiriques basés sur le module de résilience et la déformation verticale maximale (Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2011). Ces méthodes nécessitent le calcul des contraintes et des déformations dans chacune des couches de la route et la définition d'un critère de déformation limite (Thompson et Visser, 1996).

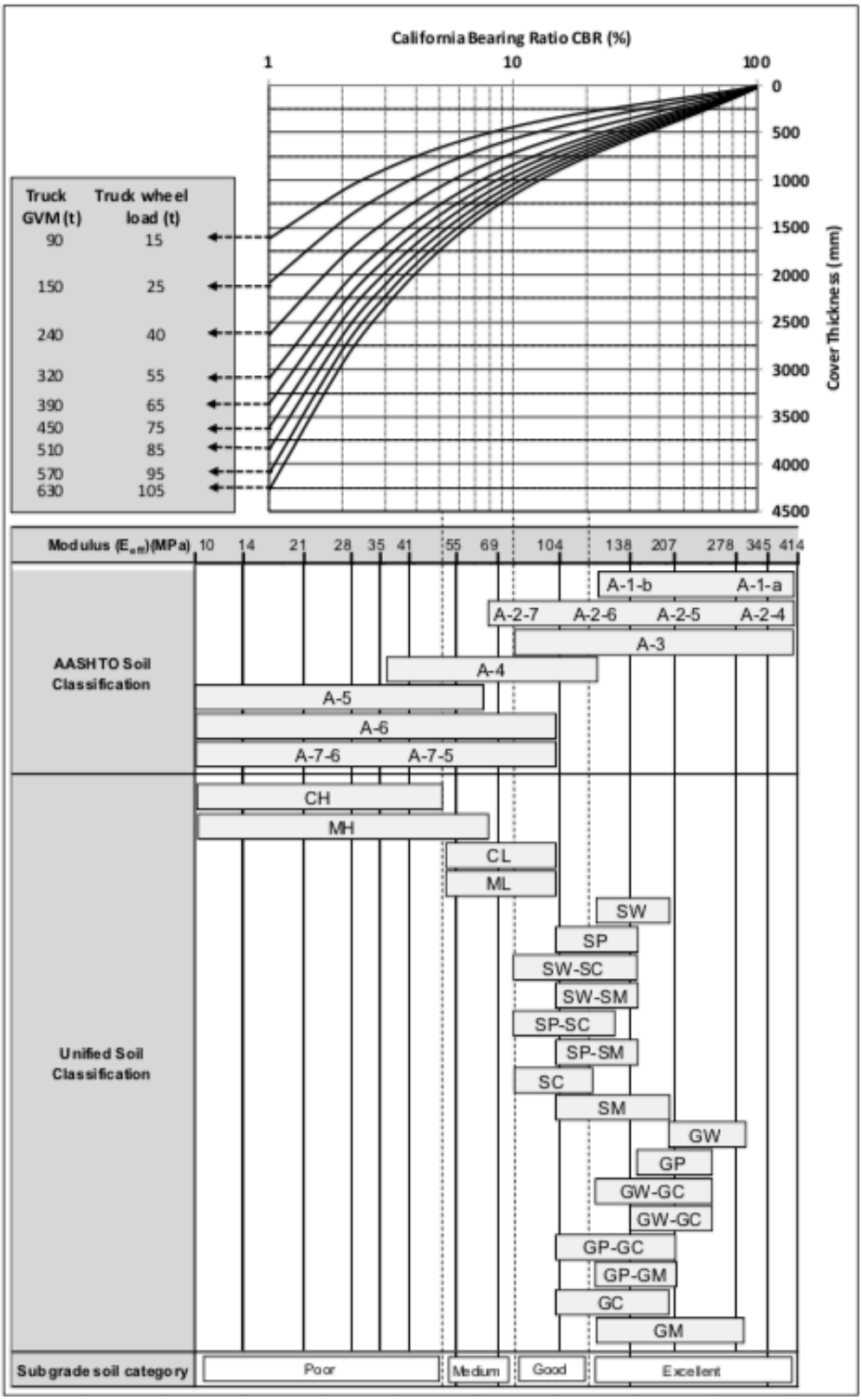


Figure 2.6: Courbes de dimensionnement CBR (Thompson, 2015).

Les contraintes exercées par un pneu sont généralement considérées comme distribuées uniformément sur une surface circulaire ayant un rayon égal à la moitié de la largeur du pneu (Tannant et Regensburg, 2001). Les équations suivantes, dérivées de la formule de Boussinesq (1885) pour une charge unique dans un milieu élastique continu, sont utilisées pour définir les contraintes sous le centre d'une charge circulaire uniforme (Mallick et El-Korchi, 2017) :

Contrainte verticale σ_z à la profondeur z :

$$\sigma_z = \sigma_0 \left[1 - \frac{1}{\{1 + (a/z)^2\}^{3/2}}\right] \tag{2-7}$$

Déformation verticale ε_z à la profondeur z :

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)\sigma_0}{E}\left[\frac{(z/a)}{\{1 + (z/a)^2\}^{3/2}} - (1-2\nu)\left\{\frac{(z/a)}{\sqrt{1 + (z/a)^2}} - 1\right\}\right] \tag{2-8}$$

Où

σ_0 : la contrainte à la surface

E : le module élastique

ν : le coefficient de Poisson

a : le rayon de la surface circulaire de contrainte (a=w/2)

z : la profondeur

Les équations 2-7 et 2-8 permettent de tracer les isocontours de contraintes sous une charge circulaire en fonction de la contrainte appliquée p, du diamètre de la surface de chargement w et de la profondeur (Figure 2.7).

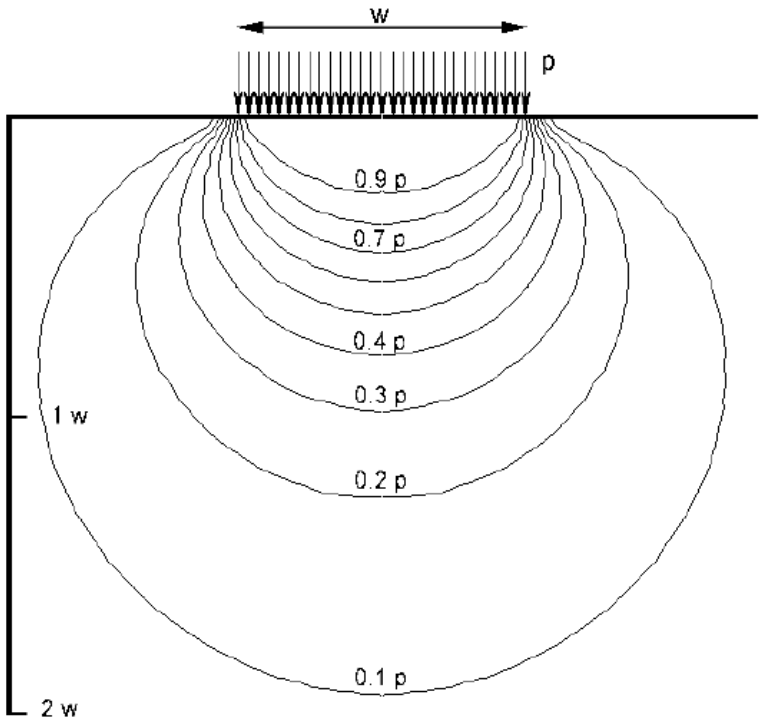


Figure 2.7: Distribution des contraintes normales sous une surface circulaire uniformément chargée dans un milieu élastique linéaire (tiré de Tannant et Regensburg, 2001).

Ces équations ont été développées pour un milieu élastique, isotrope et continu, ce qui n'est pas le cas pour la majorité des structures de route, mais qui reste une hypothèse adéquate pour une analyse préliminaire (Tannant et Regensburg, 2001).

Les déformations sont calculées selon la théorie élastique au moyen du module d'élasticité ou du module de résilience (Thompson, 2015). Le module de résilience est défini comme le module d'élasticité d'un sol suite à un chargement cyclique (Bowles, 1984). Lors d'un essai du module de résilience, la charge appliquée à chaque cycle est sous la limite de rupture du matériau. Lors des cycles chargement-déchargement, il y a un réarrangement des particules qui permet à la structure de sol d'être plus stable, et une contrainte plus élevée est alors nécessaire pour obtenir une même déformation (Figure 2-8). Le nombre de cycles varie selon les normes. Le module de résilience est la pente de la courbe contrainte-déformation lors du dernier cycle ou une moyenne des derniers cycles de l'essai (Anochie-Boateng et al., 2009).

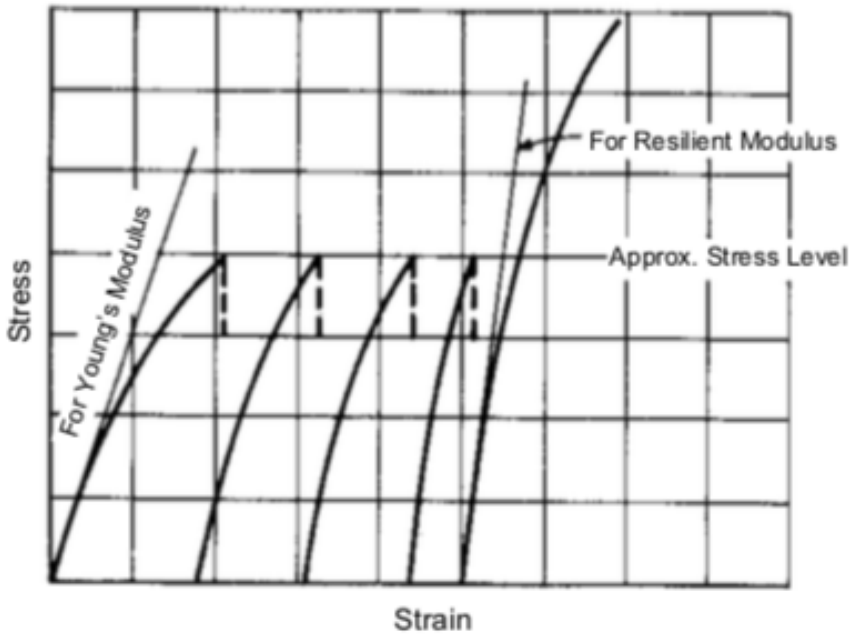


Figure 2.8: Mesure du module de résilience (Bowles, 1984).

L'essai du module de résilience étant coûteux et fastidieux, plusieurs corrélations (Figure 2.9) ont été proposées pour estimer le module de résilience E_{eff} en fonction de l'essai CBR, plus rapide et couramment utilisé à la fois dans le domaine civil et minier (Anochie-Boateng et al., 2009; Mendoza et Caicedo, 2018). Les équations suivantes ont été développées par Austroads, le Queensland Department of Main Roads (QDMR) et l'American Association of State Highway and Transportations Officials (AASHTO) et sont quelques exemples du type de relations proposées pour estimer le module de résilience E_{eff} à partir du CBR:

(Austroads, 1992) $$E_{eff} = 10CBR \ (CBR < 15)$$ (2-9)

(QDMR, 1990) $$E_{eff} = 21{,}1 \ CBR^{0{,}64} \ (CBR < 15)$$ (2-10)

(QDMR, 1990) $$E_{eff} = 19CBR^{0{,}68} \ (CBR > 15)$$ (2-11)

(AASHTO 1992) $$E_{eff} = 17{,}63CBR^{0{,}64}$$ (2-12)

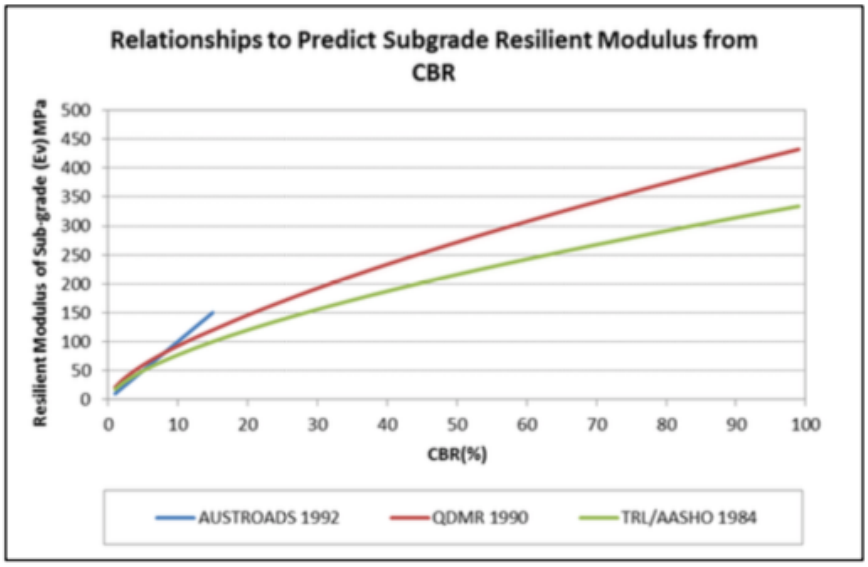


Figure 2.9: Relations entre le CBR et le module de résilience (Tiré de Thompson, 2015).

La validité de ces formules empiriques a été évaluée en comparant des valeurs mesurées, prédites à l'aide de logiciels d'éléments finis et prédites à l'aide de corrélations (Sukumaran et al., 2002). La formule utilisant la valeur de CBR qui s'est rapprochée le plus des résultats mesurés était celle du TRRL (Transportation and Road Research Laboratory) qui a ensuite été adaptée par l'AASHTO et correspond à l'équation 2-12.

Dans la méthode mécaniste-empirique, l'utilisation de logiciels d'éléments finis (voir aussi section 2.4) ou utilisant les formules dérivées de Boussinesq est recommandée afin d'obtenir les contraintes et les déformations dans la structure de route (Thompson et Visser, 1997; Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2015; Douglas, 2016; Mallick et El-Korchi, 2017). Ces logiciels peuvent simuler différentes géométries, différents comportements de matériaux et différents paramètres d'entrée. Un modèle de matériau élastique linéaire est couramment utilisé avec le module de Young ou le module de résilience, le coefficient de Poisson ainsi que la masse volumique du matériau comme valeurs d'entrée (Tannant et Regensburg, 2001).

Dans le dimensionnement mécaniste-empirique, une déformation verticale limite doit être fixée. Les dommages observés sur les routes minières peuvent être corrélés avec la déformation verticale dans les différentes couches de la structure de route (Morgan et al., 1994; Thompson et Visser, 1997). Des critères de déformation limite de 1500 microdéformations (Morgan et al., 1994) ou de 2000 microdéformations (Thompson, 2011) sont couramment utilisés. Des formules empiriques ont également été proposées pour évaluer les microdéformations maximales. Celle

proposée ci-dessous a d'abord été employée pour les véhicules lourds utilisés dans l'industrie pétrolière (Knapton, 1988) :

$$\varepsilon_{critique} = 80\ 000/N^{0,27} \quad (2\text{-}13)$$

Où,

$\varepsilon_{critique}$: Limite de déformation (microdéformation)

N : nombre de passages estimé lors de la durée de vie prévue de la route

L'utilisation du nombre de passages pour évaluer la déformation maximale permet de prendre en compte la durée de vie utile d'une route (Tannant et Regensburg, 2001).

Le dimensionnement mécaniste-empirique est un processus itératif (Figure 2.10) (Thompson, 2015). Lorsque la déformation verticale limite est définie et que les propriétés des matériaux et du véhicule de conception sont connues, une première structure peut être modélisée numériquement à l'aide d'un code par éléments finis. Si les déformations sont supérieures à la limite posée, l'épaisseur des couches de fondations et de sous-fondations est augmentée. Si les déformations sont largement sous la limite, l'épaisseur de matériau pourra être réduite. Le processus recommence et se poursuit jusqu'à l'atteinte d'une structure de route optimale.

2.2.6 Capacité portante

La capacité portante ultime d'un sol correspond à la contrainte limite à laquelle le sol atteindra la rupture pour une surface donnée (Bowles, 1984). Pour la méthode de dimensionnement mécaniste présentée à la section 2.2.5, la contrainte calculée au droit de chacune des couches de la structure de route doit rester sous la limite de la capacité portante (Tannant et Regensburg, 2001).

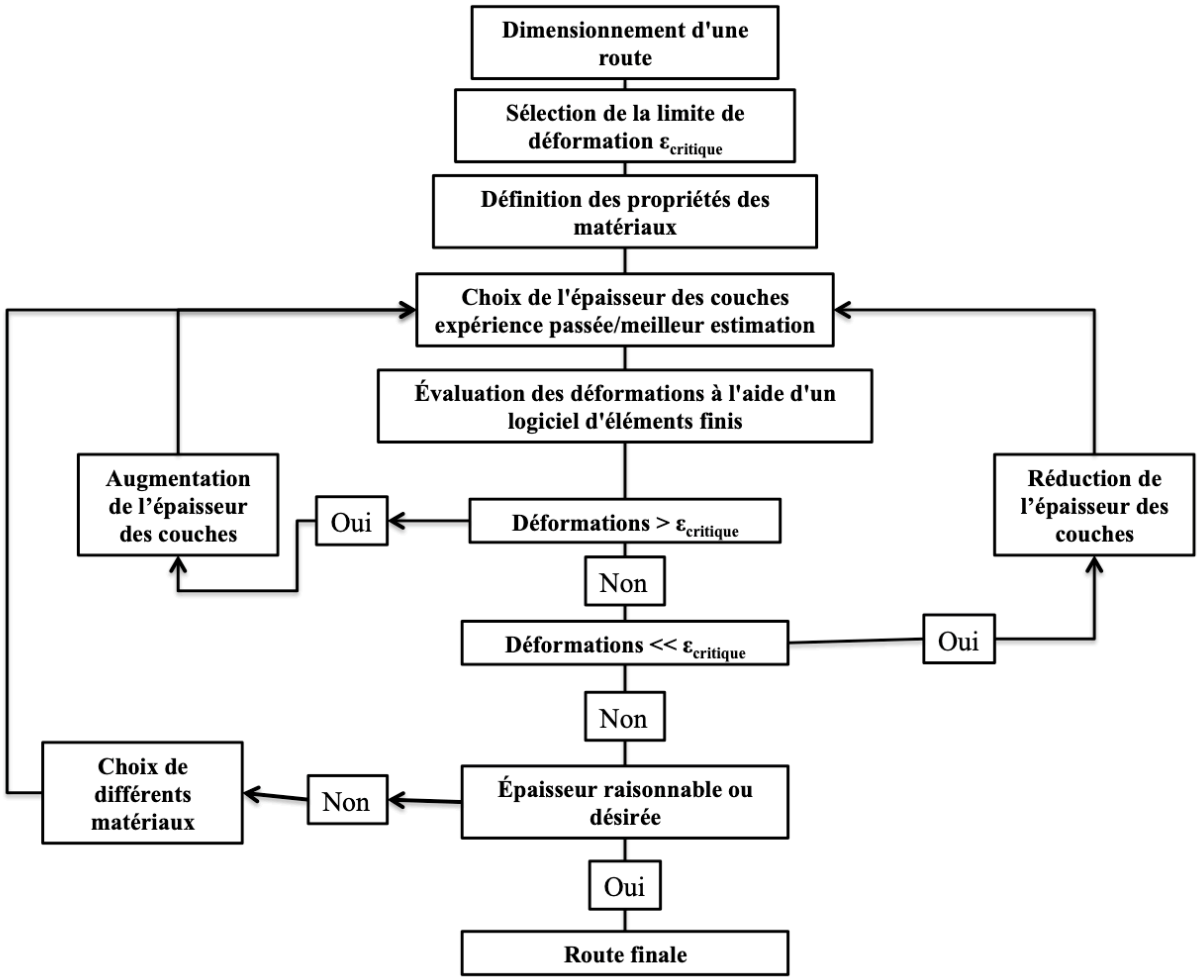


Figure 2.10: Processus de dimensionnement mécaniste-empirique (adapté de Thompson, 2015).

La capacité portante peut être calculée à partir de l'angle de friction interne et de la cohésion d'un sol et les caractéristiques géométriques de la contrainte exercée. L'équation 2-14 permet d'obtenir la capacité portante (q_{ult}) d'un sol avec une contrainte appliquée sur une fondation circulaire (Terzaghi, 1943) :

$$q_{ult} = 1{,}3cN_c + \gamma DN_q + 0{,}6\gamma RN_\gamma \qquad (2\text{-}14)$$

Où

q_{ult} : Capacité portante (kPa)

R: rayon de la surface de contrainte (m)

D : profondeur de la fondation (m)

γ : poids volumique du sol (kN/m^3)

N_i : facteurs de capacité portante dépendant de l'angle de friction interne (Figure 2.11)

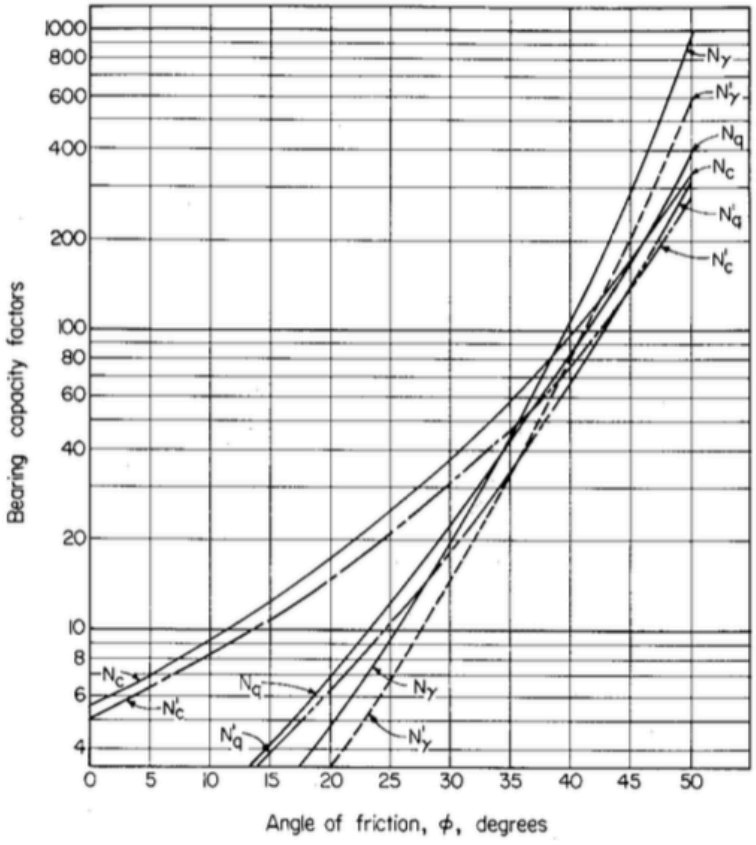


Figure 2.11: Facteurs de capacité portante pour la formule de Terzaghi (Bowles, 1984).

Dans le cas d'une route, la charge exercée par le pneu peut être approximée comme circulaire avec un rayon égal à la moitié de la largeur du pneu. La profondeur D peut être considérée comme nulle (Tannant et Regensburg, 2001).

La capacité portante augmente avec l'angle de friction (Das, 2017). Le Tableau 2.3 résume les intervalles de capacité portante typique pour différents matériaux rencontrés dans le domaine minier.

Tableau 2.3: Capacités portantes typiques pour différents matériaux (Tannant et Regensburg, 2001) d'après Monenco (1989).

Matériaux	Capacité portante (kPa)
Roc dur	5500+
Roc moyennement dur	2750-4150
Gravier dense, gravier et sable très dense	830-1100
Roc mou	700-830
Sable et gravier moyennement dense à dense	550-700
Croûte dure sur une argile surconsolidée	410-550
Sable moyen à grossier lâche, sable fin moyennement dense	205-410
Sable et argile compacts	205-275
Sable fin lâche, sable et silts moyennement denses	100-205
Argile ferme à rigide	70-140
Sable lâche saturé, argile moyennement molle	35-70
Muskeg, tourbes, sols de marais	0-35
Rejets miniers lâches à moyennement dense	35-520

2.2.7 Autres considérations lors du dimensionnement

Certaines contraintes opérationnelles doivent aussi être prises en compte pour adapter le dimensionnement aux matériaux disponibles sur le site d'une mine. Par exemple, la taille maximale des blocs ne devrait pas dépasser 50% de l'épaisseur d'une couche pour que la compaction soit adéquate. Les roches stériles disponibles étant généralement très grossières, cela pourrait amener à un dimensionnement avec des couches plus épaisses que nécessaire (Thompson, 2011). Les matériaux sélectionnés ne devraient également pas être excessivement

susceptibles à l'altération ou à l'érosion, mais en pratique les compagnies minières doivent s'adapter aux matériaux présents sur le site. L'utilisation de matériaux altérés induit cependant des tassements supplémentaires et détériore l'intégrité de la route (Thompson, 2011).

Les opérations minières utilisent principalement des équipements roulants lourds pour effectuer la compaction contrairement aux routes civiles où ce sont des rouleaux compresseurs (Kaufman et Ault, 1977). La charge de ces véhicules est généralement suffisante pour effectuer la compaction, mais peut entraîner une compaction hétérogène où des ornières se formeront rapidement (Tannant et Regensburg, 2001).

2.3 Dimensionnement fonctionnel de la surface de roulement

La surface de roulement est une composante critique d'une route minière (Tannant et Regensburg, 2001) qui subit les contraintes les plus élevées et où l'usure et les dommages ont le plus d'impact sur la traficabilité, la sécurité et l'efficacité du transport (Coffey et al., 2018). Les nids-de-poule, les ondulations, les tassements, les rigoles et les ornières sont les principales défectuosités qui peuvent apparaître dans une surface de roulement (Thompson, 2015). Le dimensionnement fonctionnel vise à choisir le matériau et l'épaisseur de la surface de roulement qui fournira une bonne traficabilité tout en minimisant la résistance au roulement (Thompson et Visser, 2006b). De mauvaises performances fonctionnelles d'une route minière ont pour résultat une baisse de la traficabilité de la route, une augmentation de la résistance de roulement et une usure accrue des composantes des véhicules, et donc une réduction de la productivité et une augmentation des coûts (Thompson et Visser, 2000b).

La qualité de la surface de roulement d'une route minière peut être évaluée selon sa capacité à offrir une conduite confortable et sécuritaire en condition sèche et humide, sa rigidité qui permet d'augmenter sa durabilité et réduit l'apparition de défectuosité, sa capacité à dévier l'eau de ruissellement et sa production de poussière limitée (Paige-Green, 1989). Le dimensionnement fonctionnel est aussi réalisé en considérant la disponibilité de matériaux sur le site permettant ainsi une diminution des coûts et l'optimisation de l'approvisionnement pour l'entretien (Atkinson, 1992).

2.3.1 Matériaux de construction

Les opérations minières utilisent principalement des roches stériles concassées pour la construction de la surface de roulement des routes minières (Kumar, 2000; Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2011). Ces matériaux offrent généralement de bonnes performances à faible coût (Kaufman et Ault, 1977).

2.3.1.1 Granulométrie

La granulométrie recommandée pour la surface de roulement est généralement composée principalement de gravier et de sable avec une fraction moindre de particules fines (d<0,08mm) (Kaufman et Ault, 1977; Tannant et Regensburg, 2001; Thompson, 2011). Un sol ayant une granulométrie étalée permettra d'augmenter les performances en termes de rigidité et de résistance l'érosion (Thompson et Visser, 2000b; Thompson, 2011). La taille maximale des particules recommandée varie selon les auteurs, et peut-être de 25 mm (Kumar, 2000), 40 mm (Kaufman et Ault, 1977; Thompson et Visser, 2006b) ou 76 mm (Monenco, 1989). L'augmentation de la taille maximale des particules permet généralement d'augmenter la résistance et la rigidité, mais il en résulte aussi une augmentation des crevaisons (Thompson et Visser, 2006b).

Un coefficient de gradation granulométrique Gc (équation 2-15) a été proposé par Thompson et Visser (2000b) afin d'établir si la granulométrie d'un matériau est adéquate pour une surface de roulement. La granulométrie est optimale lorsque le coefficient Gc est situé entre des valeurs de 25 et 32 et acceptable entre 20 et 35 (Figure 2.12).

$$Gc = \frac{(P265 - P2) \times P475}{100} \tag{2-15}$$

Où P2, P475 et P265 sont les pourcentages passant massique de tamis ayant des ouvertures de 2; 4,75 et 26,5 mm respectivement.

Certaines recommandations ont également été spécifiquement proposées pour les milieux froids ou arides (Kaufman et Ault, 1977; Tannant et Regensburg, 2001). Par exemple, le pourcentage de particules fines doit être limité à 10% dans le cas de milieux froids afin d'éviter les problèmes de boues au dégel (Kaufman et Ault, 1977).

2.3.1.2 Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion et la durabilité des grains doivent aussi être prises en compte dans le choix des matériaux de la surface de roulement. Tannant et Regensburg (2001) recommandent que les critères établis par l'AASHTO (American association of state highway and transportation officials) pour les routes non pavées civiles soient aussi appliqués pour les routes minières. Ces recommandations suggèrent notamment que la fraction retenue au tamis 2 mm soit constituée de particules dures et durables qui ne se fragmentent pas suite à des cycles gel-dégel et qu'elle offre un pourcentage de pertes à l'essai d'abrasion Los Angeles de moins de 50 % (AASHTO, 1993). Les essais Los Angeles (ASTM C131/C131M, 2014) ou Micro Deval (ASTM D6928, 2017) sont généralement également recommandés (Tannant et Regensburg, 2001).

2.3.1.3 Limites de plasticité et rétrécissement linéaire

La plasticité des particules ayant un diamètre inférieur à 0,425 mm peut être évaluée à partir des essais des limites de liquidité et de plasticité (Holtz et Kovacs, 1991). Thompson et Visser (2006b) recommandent que la limite de liquidité des matériaux de la surface de roulement soit située entre 17 et 24%, que la limite de plasticité soit située entre 12 et 17% et que l'indice de plasticité soit compris entre 4 et 8. Des valeurs inférieures aux intervalles recommandés augmenteraient la présence de matériaux lâches et de rigoles à la surface de la route tandis que des valeurs plus élevées augmenteraient la tendance à générer des poussières (Thompson et Visser, 2006b). L'essai de rétrécissement linéaire (*bar linear shrinkage* ; (CSRA, 1986) permet d'obtenir le produit de rétrécissement (équation 2-16)(Paige-Green, 1989).

$$Sp = LS \times P425 \tag{2-16}$$

Où

Sp : Produit de rétrécissement (*Shrinkage Product*)

P425 : Passant massique du tamis ayant une ouverture de 0,425 mm

LS : Rétrécissement linéaire (*Linear Shrinkage;* CSRA,1986)

L'intervalle recommandé de produit de rétrécissement est de 95 à 130, mais des valeurs allant de 80 à 200 restent acceptables (Paige-Green, 1989; Thompson et Visser, 2006b). Des valeurs sous les recommandations augmenteront la présence d'ondulation et de rigoles tandis que des valeurs

plus élevées augmenteront la génération de poussières et réduiront la résistance au dérapage (Figure 2.12) (Thompson et Visser, 2006b).

2.3.1.4 Propriétés optimales du matériau de la surface de roulement

Le Tableau 2.4 et la Figure 2.12 résument les différents paramètres abordés dans la section 2.3.1 ainsi que les recommandations de valeurs visées tant au niveau de la granulométrie que de la plasticité et de la rigidité des matériaux (Thompson et Visser, 2006b). Les effets potentiels positifs et négatifs d'un matériau dont les propriétés seraient inférieures ou supérieures aux critères sont aussi présentés.

Tableau 2.4: Propriétés recommandées pour le choix d'un matériau pour la construction de la surface de roulement (Thompson et Visser, 2006b), Sp : Produit de rétrécissement, Gc : Coefficient de gradation, DR : Ratio des poussières, LL : Limite de liquidité, PL : Limite de plasticité, PI : Indice de plasticité, CBR : Résultat de l'essai CBR, d_{max} : Diamètre maximal des grains.

Impact de valeurs inférieures aux recommandations	Intervalle recommandé pour les propriétés du matériau	Impact de valeurs supérieures aux recommandations
- Surface moins glissante - Augmentation des rigoles - Augmentation des ondulations	Sp= 85-200	- Augmentation des poussières - Réduction de la résistance au dérapage (milieu humide)
- Augmentation de matériaux grossiers lâche -Dommage potentiel aux pneus	Gc=20-35	- Présence de rigoles - réduction de la résistance au dérapage (milieu sec) - Agrégat non étalé
- Réduit les poussières - Enclin à générer des rigoles	DR= 0,4-0,6	- Augmentation des poussières
- Matériaux lâches	LL=17-24%	- Enclin à générer des poussières - Réduit la présence de rigoles
- Matériaux lâches	PL=12-17%	- Enclin à générer des poussières - Réduit la présence de rigoles

- Enclin à générer des rigoles - Matériaux lâches	PI=4-8	- Enclin à générer des poussières - réduction de la résistance au dérapage (milieu sec)
- Baisse de la traficabilité (milieu humide) - Déformation excessive - Nécessite de plus d'entretien	CBR>80%	- Augmente la résistance à l'érosion, aux ornières - Augmente la traficabilité
- Facilité d'entretien - Conduite agréable - Réduction des dommages aux pneus	d_{max}= 40 mm	- Mauvaise finition de la surface après entretien - Augmentation des nids-de-poule -Dommage potentiel aux pneus

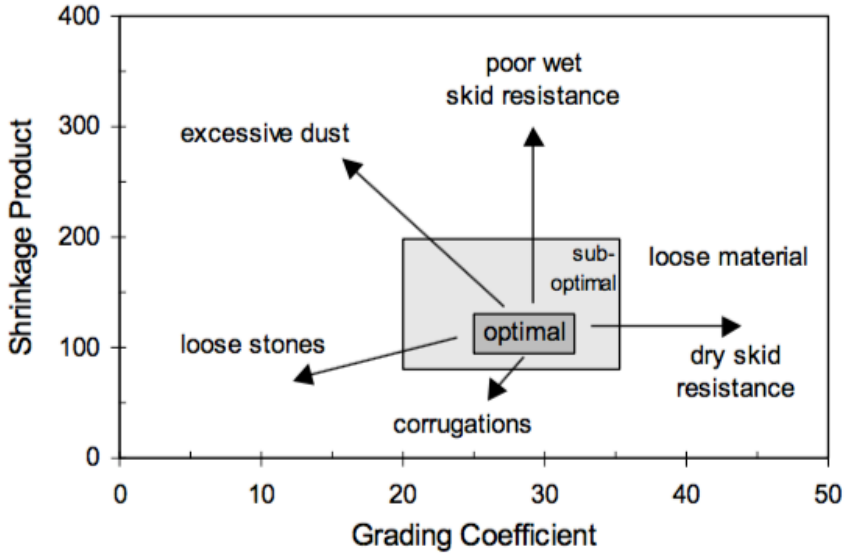


Figure 2.12: Valeur optimale (gris foncé) et sub-optimale (gris clair) pour le produit de rétrécissement et le coefficient de gradation (Thompson et Visser, 2000a).

2.3.2 Génération de poussières

La production de poussières peut diminuer la visibilité et augmenter l'endommagement des équipements. Atkinson (1992) recommande que les particules de moins de 0,08 mm ne constituent pas plus de 10% du matériau afin de limiter la génération de poussières. Dans les milieux très secs, les particules fines devraient représenter moins de 5% afin d'éviter une

génération excessive de poussières (Kaufman et Ault, 1977). Il est cependant préférable de conserver une légère proportion de fines afin de favoriser le ruissellement et d'améliorer la compaction. Thompson et Visser (2007) proposent d'utiliser un ratio des poussières DR, calculé comme la proportion du passant 0,08 mm divisé par le passant 0,425 mm. Un ratio compris entre 0,4 et 0,6 permettrait de fixer les matériaux fins dans la structure du sol de la surface de roulement tout en limitant leur arrachement lors du passage de véhicule ou lors de précipitations (Thompson et Visser, 2007).

Un meilleur contrôle de la distribution granulométrique permet de réduire la génération de poussières, mais ne peut pas complètement l'éliminer. Il est donc pratique courante d'effectuer des arrosages afin de garder les particules fines au sol (Kaufman et Ault, 1977; Tannant et Regensburg, 2001; Thompson et Visser, 2007). Différents produits existent, mais des solutions à base de lignosulfates de calcium ou de chlorure de calcium sont parmi les plus employées (Tannant et Regensburg, 2001). L'utilisation d'eau est une solution simple et moins coûteuse, mais qui nécessite des arrosages plus fréquents, ce qui peut accroître les risques de migration des particules fines (Thompson et Visser, 2007).

2.3.3 Résistance au roulement

La résistance au roulement correspond au ratio de la force horizontale nécessaire pour garder un véhicule à une vitesse constante sur la force verticale générée par le poids du véhicule (Thompson, 1996; Coffey et al., 2018). Dans le secteur minier, la résistance au roulement est généralement exprimée par une pente équivalente en pourcentage (Caterpillar, 1999; Tannant et Regensburg, 2001), mais peut aussi être exprimé en kg/tonne du poids nominal brut du véhicule de dimensionnement (Douglas et Lawrence, 2014) ou en N/kg (Thompson, 1996). La résistance au roulement est influencée par les propriétés du matériau de la surface de roulement, et par l'état général de la route (Thompson et Visser, 2000b). Une faible rigidité ou la présence de défectuosités telles que des nids-de-poule, ondulations, tassements ou ornières augmenteront significativement la force nécessaire pour déplacer un véhicule et augmenteront la résistance au roulement (Douglas et Lawrence, 2014).

2.3.3.1 Calcul et estimation de la résistance au roulement

La résistance au roulement RR peut être estimée directement sur le terrain (Tannant et Regensburg, 2001), mais nécessite la mobilisation de beaucoup de ressources (Tannant et Regensburg, 2001). Des équations empiriques ont donc été développées afin d'estimer la résistance au roulement à partir de données de terrain plus facilement mesurables ou d'essais de laboratoire. Par exemple, Atkinson (1992) et Caterpillar (1999) proposent d'utiliser l'amplitude de la pénétration d'un pneu dans la surface de roulement pour estimer la résistance au roulement (équations 2-17 et 2-18):

Atkinson (1992) $$RR = 2 + 0{,}7\ par\ cm\ de\ penetration\ du\ pneu \quad (2\text{-}17)$$

Caterpillar (1999) $$RR = 2 + 0{,}6\ par\ cm\ de\ penetration\ du\ pneu \quad (2\text{-}18)$$

Où la résistance au roulement RR est exprimée en (%)

Afin d'obtenir la résistance totale ou la pente effective, la résistance au roulement est généralement additionnée à la pente des différents tronçons (Tannant et Regensburg, 2001) :

$$Pente\ effective\ (\%) = RR(\%) + \mathrm{GR}(\%) \quad (2\text{-}19)$$

Où RR est la résistance au roulement et GR est la pente (*grade resistance*).

La rugosité d'une route et la présence de défectuosités, le volume, la masse et la vitesse du trafic, les propriétés granulométriques et de rigidité du matériau utilisé pour la surface de roulement ainsi que la fréquence des entretiens ont une influence sur la résistance au roulement (Thompson et Visser, 2000b). Un modèle a été développé afin de considérer ces différents paramètres dans l'estimation de la résistance au roulement (Thompson et Visser, 2000b, 2006b; Thompson, 2015).

Les données de la surface de roulement qui sont nécessaires pour utiliser ce modèle sont :

SP : Produit de rétrécissement obtenu à partir de l'équation 2-16

GC: Coefficient de gradation obtenu à partir de l'équation 2-15

CBR: Résultat de l'essai CBR (%)

PI: Indice de plasticité des particules sous 0,425 mm du sol

Les informations sur l'utilisation de la route nécessaires sont :

V: Vitesse des véhicules utilisant la route (km/h)

KT: Tonnage journalier moyen passant sur la route (kt)

D: Nombre de jours depuis le dernier entretien de la route

La formulation principale de ce modèle est exprimée par l'équation suivante :

$$RR = RRMIN + RDS\ exp^{(RRI)} \tag{2-20}$$

Où RR (N/kg) est la résistance au roulement et RRMIN la résistance au roulement minimale, RDS est le pointage de défectuosité (roughness defect score), et RRI est la variation de résistance au roulement (Rolling resistance rate of increase).

RRMIN est exprimé par :

$$RRMIN = exp^{(-1{,}8166+0{,}0028V)} \tag{2-21}$$

RDS est exprimé par :

$$RDS = RDSMIN + \left[\frac{RDSMAX - RDSMIN}{1 + exp^{(RDSI)}}\right] \tag{2-22}$$

Où RDSMIN et RDSMAX sont les pointages de défectuosité minimal et maximal :

$$RDSMIN = 31{,}1919 - 0{,}05354SP - 0{,}0152CBR \tag{2-23}$$

$$RDSMAX = 7{,}6415 + 0{,}4214KT + 0{,}3133GC + 0{,}4952\ RDSMIN \tag{2-24}$$

Où RDSI (rate of roughness defect score increase) représente la variation de RDS en fonction des propriétés du sol, caractéristiques de transport et du temps depuis le dernier entretien de la route :

$$RDSI = 1{,}768 + 0{,}001D\times(2{,}69KT - 72{,}75PI - 2{,}59CBR - 9{,}35GC + 1{,}67SP) \tag{2-25}$$

Et RRI est exprimé par:

$$RRI = -6{,}068 - 0{,}00385RDS + 0{,}0061V \tag{2-26}$$

Les équations 2-17, 2-18 et 2-20 indiquent qu'une rigidité élevée, ou un CBR élevé, permettra de réduire la résistance au roulement. De plus, une rigidité plus élevée du matériau constituant la

surface de roulement réduit l'apparition de défectuosité dans la structure de route (Thompson et Visser, 2006b; Mallick et El-Korchi, 2017). Une baisse de défauts dans la route entraînera la diminution de la résistance au roulement ainsi qu'une baisse de l'usure des véhicules et une baisse du nombre de crevaisons (Tannant et Regensburg, 2001; Thompson et Visser, 2006a).

2.3.3.2 Impact et contrôle de la résistance au roulement

Une résistance au roulement élevée sur une route minière entraîne principalement une hausse de la consommation de carburant et une baisse de la productivité (Figure 2.1) (Tannant et Regensburg, 2001; Douglas, 2016; Coffey et al., 2018).

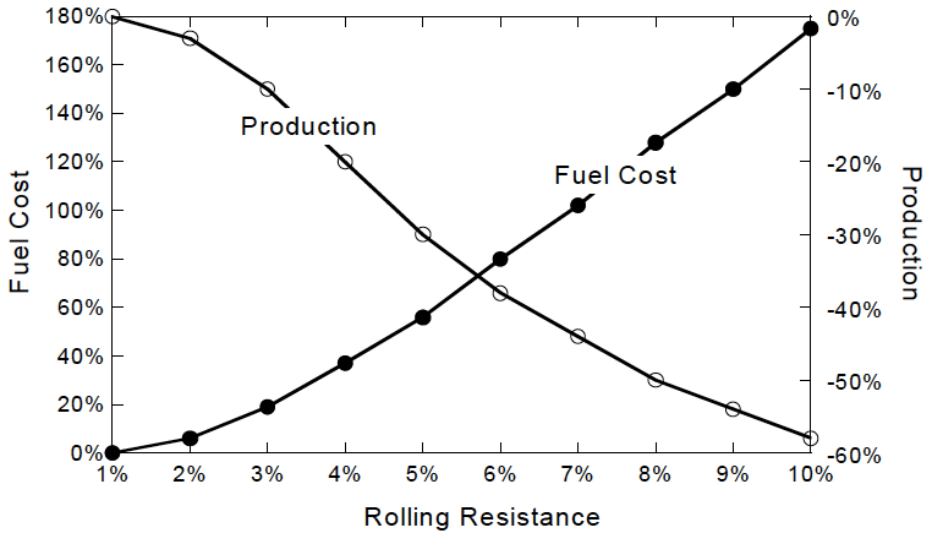


Figure 2.13: Influence de la résistance au roulement sur les performances (Tannant et Regensburg, 2001).

Une augmentation de la résistance au roulement réduit également la durée de vie des équipements roulants. Les différents chocs induits pas une rugosité élevée, et donc une résistance au roulement élevée, sur les cadres métalliques des véhicules provoquent de la fatigue et augmentent l'usure des véhicules (Tannant et Regensburg, 2001). L'usure et la fréquence des crevaisons sont aussi augmentées lorsque la résistance au roulement augmente (Thompson, 2015). La résistance au roulement peut avoir un impact significatif sur les coûts puisque le carburant, les réparations, l'usure et les pneus représentent généralement plus de 50% des coûts opérationnels associés aux camions (Figure 2.14) (Thompson, 2015).

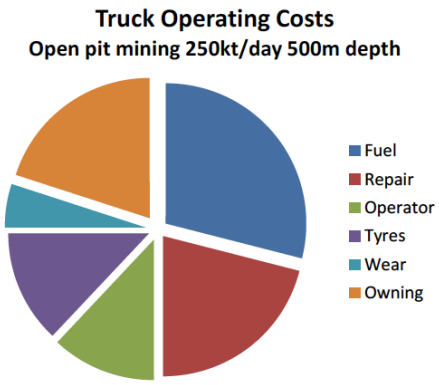


Figure 2.14: Coûts opérationnels d'un camion transportant 250 kt/jour dans une fosse de 500 m de profondeur (Thompson, 2015).

2.4 Simulations numériques

L'étude de la distribution des contraintes et des déformations dans une structure de route minière peut être réalisée au moyen de simulations numériques. Deux types de codes sont principalement employés : des logiciels de dimensionnement analytique de chaussées utilisant la théorie élastique multicouche et les logiciels utilisant les éléments finis (Korkiala-Tanttu, 2009).

Le logiciel australien CIRCLY (Mincad system), l'américain MEPDG (AASHTO) ou le québécois CHAUSSÉE 2 (MTQ) sont des exemples de logiciels de dimensionnement de chaussées qui permettent à la fois d'obtenir une structure de route recommandée et les contraintes et déformations attendues. Le logiciel CIRCLY propose notamment une section complète consacrée aux véhicules extra-lourds hors routes et les propriétés des principaux véhicules miniers rencontrés dans l'industrie sont déjà intégrées dans le code (Thompson, 2015). Les logiciels d'éléments finis, tels que PHASE2 (Rocscience inc.), PLAXIS 2D (PLAXIS) et SIGMA/W (Geo-Slope Int.), offrent une plus grande flexibilité au niveau de la géométrie des problèmes, des lois de comportement des matériaux (Korkiala-Tanttu, 2009).

Le logiciel Sigma/W (Geo-Slope Int., 2018) a été utilisé dans le cadre de la présente étude. Le logiciel Sigma/W a déjà été employé dans le domaine minier pour la modélisation de parcs à résidus et d'inclusions de roches stériles (L. Bolduc et Aubertin, 2014; Coulibaly et al., 2016; Boudrias, 2018), de haldes à stériles (Maknoon, 2016), de remblayage de chantiers (El Mkadmi et al., 2013; Zheng et al., 2018) et de routes minières (Abraha, 2005).

La loi de comportement de matériau élastique linéaire a été utilisée et relie les contraintes et les déformations en utilisant la formulation suivante (Geo-Slope, 2013) :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2\text{-}27)$$

Où

$\sigma_x,\ \sigma_y, \sigma_z$: Contraintes verticales, horizontales et perpendiculaires au plan xy

τ_{xy} : Contrainte de cisaillement dans le plan xy

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: Déformations horizontales, verticales et perpendiculaires au plan xy

γ_{xy} : Déformation de cisaillement dans le plan xy

E : Module d'élasticité du matériau

υ : Coefficient de Poisson

Les contraintes et les déformations sont calculées pour chaque nœud du maillage. Comme il s'agit d'un modèle strictement élastique, le relâchement des contraintes implique un retour aux volumes initiaux.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

3.1 Échantillonnage

Les roches stériles concassées utilisées dans la couche de surface des routes de la mine Canadian Malartic ont été échantillonnées par la mine le 13 février 2018. Les matériaux provenaient de la pile de réserve de matériaux concassés utilisée pour les différentes infrastructures routières et minières. Le concassage des roches stériles est réalisé selon les besoins de la mine. Les volumes et la nature des stériles concassés entreposés varient en fonction de la production. En date du 19 septembre 2017, la pile de réserve avait des dimensions d'environ 25 m de hauteur, 35 m de largeur et 50 m de longueur (Figure 3.1).

Figure 3.1: Pile de réserve de roches stériles concassées (19 septembre 2017).

Trois points d'échantillonnage ont été choisis pour prélever les matériaux (Figure 3.2). Les stériles concassés ont été mélangés à l'aide d'une pelle mécanique puis séparés en deux barils

(CCM-1 et CCM2) de 55 gallons (208 L). Ces barils ont ensuite été expédiés au laboratoire de l'Institut de recherche mines et environnement (IRME) à Polytechnique Montréal.

Figure 3.2: Pile de roches stériles concassées et emplacement des points d'échantillonnage (13 février 2018).

3.2 Préparation des matériaux au laboratoire

Les échantillons CCM-1 et CCM-2 ont été homogénéisés par quartage au laboratoire selon la norme ASTM C702 (1998) (Figure 3.3) et divisés entre plusieurs contenants de masse comprise entre 20 et 30 kg. Les courbes granulométriques de plusieurs échantillons après la séparation ont été analysées afin de s'assurer de la qualité de l'homogénéisation. Chaque échantillon testé dans ce projet était donc représentatif du matériel échantillonné sur le terrain.

Figure 3.3: Exemple d'une étape de la séparation de l'échantillon CCM-1 par quartage.

3.3 Caractérisation des roches stériles concassées

3.3.1 Analyses granulométriques

Des analyses granulométriques ont été réalisées sur les échantillons CCM-1 et CCM-2 après l'homogénéisation au moyen de la norme ASTM C136 (2006). L'ouverture des tamis utilisés lors du tamisage mécanique variait de 0,08 mm (tamis No. 200) à 40 mm. Au total, 8 essais ont été réalisés lors de la caractérisation initiale du matériau. Des essais supplémentaires ont également été réalisés après les essais de compactions afin d'évaluer les éventuelles modifications dans la distribution granulométrique.

3.3.2 Densité relative des grains solides

La mesure de la densité relative des grains solides (D_r ou G_s) a été réalisée au moyen de pycnomètre à eau suivant la norme ASTM D854 (2014b) pour les grains ayant un diamètre inférieur à 4,75 mm (tamis No. 4) et avec la norme ASTM C127 (2015a) pour les grains ayant une taille supérieure à 4,75 mm. Au total, 6 essais ont été réalisés, 3 pour les grains ayant un

diamètre inférieur à 4,75 mm et 3 pour les grains ayant un diamètre supérieur à 4,75 mm. Le détail de ces essais est présenté à l'annexe B.

3.3.3 Essais de compaction

Des essais des compactions ont été réalisés afin de déterminer la densité sèche maximale (ρ_{dmax}) ainsi que la teneur en eau optimale (w_{opt}) du matériau concassé original. Différents niveaux d'énergie ont été employés afin d'évaluer l'influence de l'énergie de compaction sur les propriétés du matériau. Des essais Proctor avec une énergie de compaction standard (STD) et modifiée (MOD) ont été réalisés selon la méthode C des normes ASTM D698 (2012a) et ASTM D1157 (2012b) respectivement. Lors de ces essais, le matériel était compacté en plusieurs couches dans un moule de 152,4 mm de diamètre et d'une hauteur de 116,4 mm. Le nombre de couches, la masse du marteau utilisé et le nombre de coups sont spécifiés dans chacune des normes. Un niveau d'énergie supérieur a également été utilisé afin d'obtenir les propriétés de compaction à un niveau d'énergie plus élevé qui correspondait mieux aux conditions d'une mine où des véhicules extra-lourds circulent. Pour ce niveau d'énergie, la méthode C de la norme ASTM D1157 (2012b) a été utilisée, mais avec 81 coups par couche, plutôt que 56 pour la norme originale. Les abréviations STD, MOD et MOD81 indiquent les niveaux d'énergie employés dans cette étude avec la norme du Proctor standard, modifié et modifié avec 81 coups par couche respectivement (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Énergies de compaction utilisées, les essais ont été effectués dans des moules ayant un diamètre de 152,4 mm et une hauteur de 116,4 mm.

	Nombre de couches	**Nombre de coups par couche**	**Masse du marteau (kg)**	**Hauteur de chute (mm)**	**Énergie totale (kN-m/m^3)**
STD	3	25	2,5	304,8	600
MOD	5	56	4,54	457,2	2700
MOD81	5	81	4,54	457,2	3900

3.3.4 Essai de conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée des roches stériles concassées a été mesurée par essai à charge constante dans un perméamètre à paroi rigide d'approximativement 15 cm de diamètre et 25 cm de hauteur (ASTM D2434, (2006c). Quatre mesures ont été réalisées sur un échantillon dont la porosité était de 0,3 avec des gradients hydrauliques compris entre 0,08 et 0,13. Les détail de cet essai sont présentés à l'annexe D.

3.3.5 Caractérisation minéralogique par diffraction des rayons X

Deux essais de diffraction des rayons X (DRX) ont été réalisés par le laboratoire de l'URSTM à Rouyn-Noranda afin d'obtenir la minéralogie du matériau original. Deux échantillons de 70 g ont été analysés, le premier constitué de grains de plus de 4,75 mmde diamètre et l'autre de grains inférieur 4,75 mmde diamètre. L'appareil utilisé était le modèle D8 Advance (Bruker) avec la méthode semi-quantitative Rietveld.

3.4 Essais de portance californien (CBR)

3.4.1 Principe de l'essai et interprétation

L'essai de portance californien, plus souvent appelé essai CBR (Californa Bearing Ratio) a été utilisé dans cette étude comme indicateur de la rigidité et de la résistance des matériaux testés. Les essais CBR ont été réalisés selon la norme ASTM D1883 (2016).

L'essai CBR est un essai de pénétration à vitesse constante (1,3 mm/min) dans lequel un piston de 49,63 mm de diamètre pénètre un échantillon préalablement compacté (Figure 3.4). L'échantillon compacté mesure 152,4 mm de diamètre et 127 mm de hauteur. La préparation de l'échantillon peut être réalisée selon une norme spécifique, par exemple avec l'essai Proctor standard ou modifié, ou adaptée pour atteindre une densité cible pour laquelle l'indice CBR est désiré. Cet essai nécessite l'utilisation d'une presse hydraulique, de capteurs de force et de déplacements ainsi qu'un système d'acquisition (Figure 3.4 et Figure 3.5).

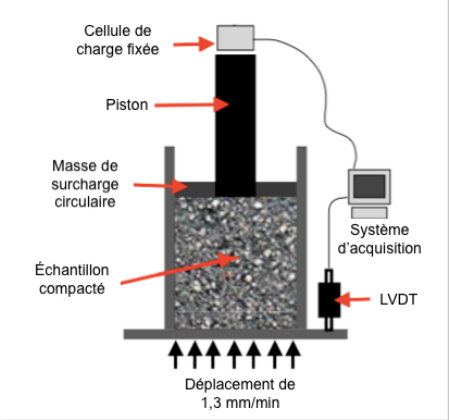


Figure 3.4: Essai de portance californien CBR (adapté de ASTM D1883) LVDT: Linear variable differential transformer.

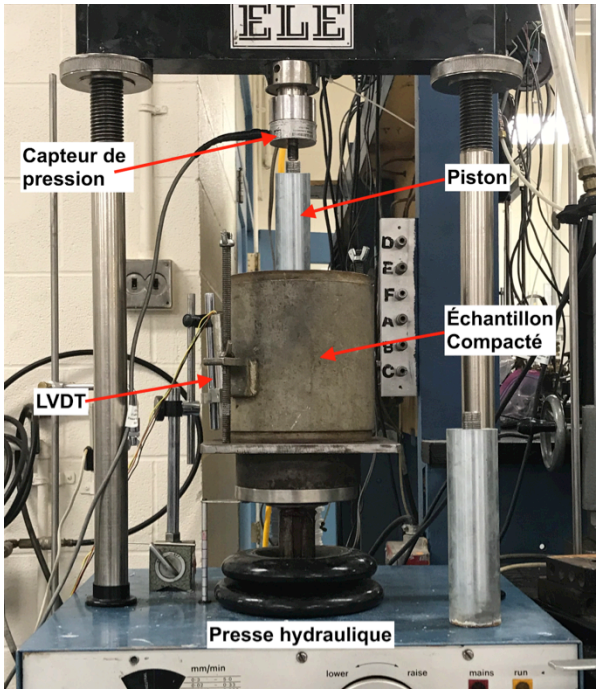


Figure 3.5: Montage de l'essai CBR au laboratoire à Polytechnique Montréal.

Les déplacements et la force nécessaire pour maintenir un déplacement constant doivent être mesurés lors de l'essai CBR. Une courbe contrainte-déplacement peut alors être tracée (Figure 3.6). La contrainte correspondant à une pénétration de 5,08 mm est divisée par 10 MPa, soit la contrainte de référence prescrite par la norme ASTM. La courbe a été corrigée lorsqu'une courbure était présente au début de l'essai. Cette correction consiste à prendre le croisement de l'axe des abscisses avec la partie linéaire de la courbe contrainte-pénétration (Figure 3.7) et

d'ajouter cette valeur à la pénétration de 5,08 mm qui doit être utilisée pour obtenir la contrainte correspondante.

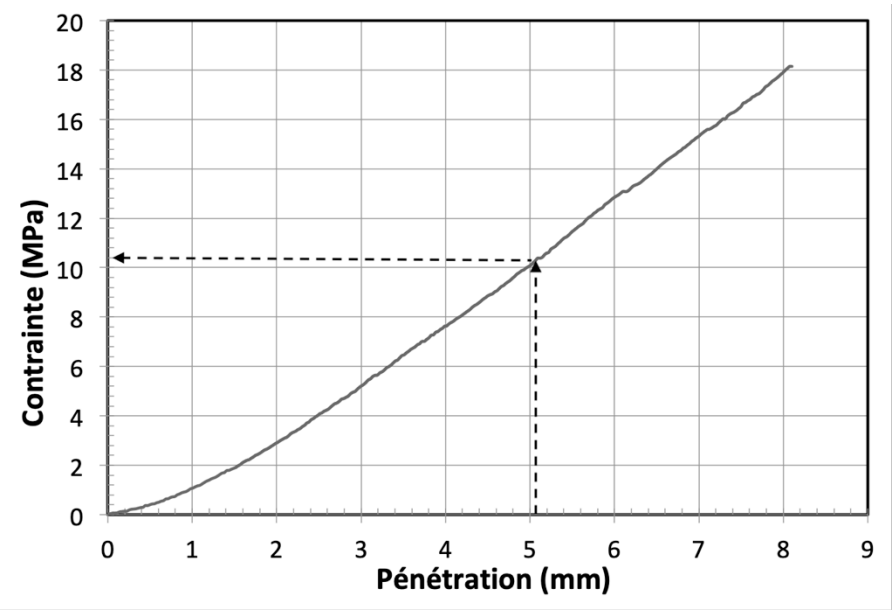


Figure 3.6: Courbe contrainte-pénétration obtenue suite à un essai CBR effectué sur le matériau original avec une compaction MOD et une teneur en eau initiale w=7%.

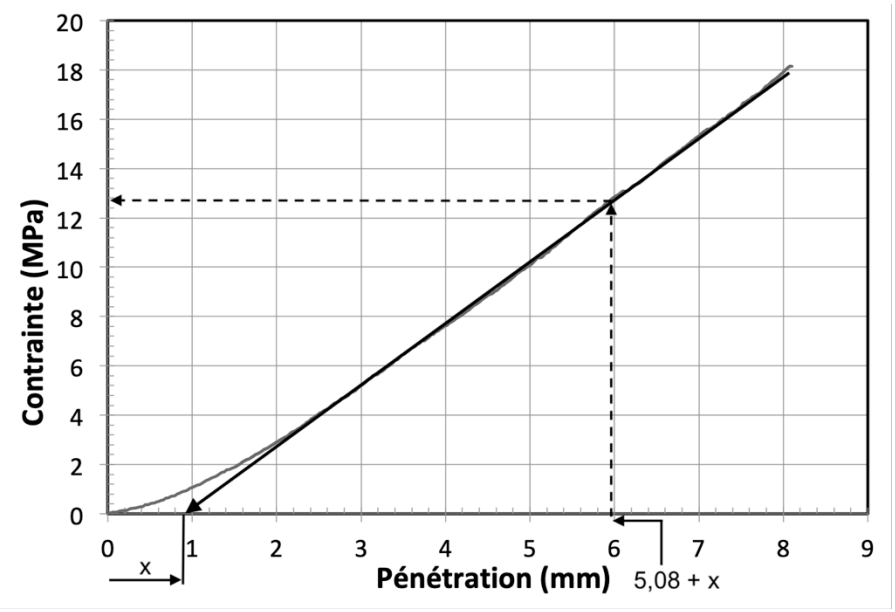


Figure 3.7: Correction appliquée à l'essai CBR effectué sur le matériau original avec une compaction MOD et une teneur en eau initiale w=7%. La correction étant x=0,89 mm, la contrainte correspondant à une pénétration de 5,97 mm (ici ≈12,75 MPa) a été utilisée pour calculer le CBR de cet échantillon.

La contrainte ainsi obtenue et exprimée en MPa est comparée à la valeur de référence (10 MPa pour 5,08mm de pénétration) et multipliée par 100 pour obtenir un indice CBR (en %). La densité sèche et la teneur en eau finale de l'échantillon ont été calculées selon les procédures décrites dans la norme ASTM D1883 (2016).

3.4.2 Essais CBR réalisés sur les roches stériles concassées

Au total, 39 essais CBR ont été réalisés dans le cadre de cette étude sur le matériau original et sur d'autres matériaux désignés par DMAX10 et PF2 à PF14 (Tableau 3.2). Ces matériaux sont décrits à la section 3.4.4 et le détail des essais CBR est présenté à l'annexe E.

3.4.3 Influence de la compaction

L'utilisation des énergies de compaction STD, MOD et MOD81 avec des teneurs en eau passant de 3,0 à 8,0% a permis d'évaluer l'impact de l'énergie de compaction sur la densité et l'indice CBR. L'intervalle de teneurs en eau initiales et les différents niveaux d'énergie ont permis d'étudier en grande partie le spectre des densités atteignables avec les matériaux analysés. Sur les 39 essais effectués, 6 ont été réalisés au moyen de la compaction STD, 25 au moyen de la compaction MOD et 8 au moyen de la compaction MOD81 (Tableau 3.2).

3.4.4 Influence de la distribution granulométrique

L'influence du diamètre maximal des grains et de la teneur en particules fines sur l'indice CBR a été étudiée. Les particules fines sont définies selon la classification de l'USCS comme étant les particules dont le diamètre est inférieur à 0,08 mm (silts et argiles).

Une partie des roches stériles concassées ont été séparées en différentes fractions granulométriques par tamisage et reconstituées selon les objectifs de l'étude. La minéralogie de ces spécimens était identique au matériau original, et les différences de CBR observées pouvaient donc être attribuées aux changements de granulométrie ou de l'énergie de compaction.

Le matériau DMAX10 (Figure 3.8a) a été obtenu à partir des roches stériles concassées (matériau original) en retirant (tronquant) les particules ayant un diamètre supérieur à 10 mm. La teneur en particules fines PF et le coefficient d'uniformité étaient identiques au matériau original (PF≈6%, C_U=21). Au total, 6 essais CBR ont été réalisés sur ce matériau, soit 2 pour chaque niveau de compaction (STD, MOD, MOD81) avec des teneurs en eau comprises entre 6,0 et 8,0%.

Tableau 3.2: Essais CBR réalisés sur les roches stériles concassées selon la teneur en eau et l'énergie de compaction, * : Essais trempés 96 h, STD : 600 kN-m/m^3, MOD: 2700 kN-m/m^3, STD : 3900 kN-m/m^3.

No.	Matériau	w (%)	Compaction	No.	Matériau	w (%)	Compaction
1	Original	6,0	STD	20	DMAX10	6,0	MOD81
2	Original	6,0	STD	21	DMAX10	6,0	MOD81
3	Original	3,0	MOD	22	PF2	6,5	MOD
4	Original	3,0	MOD	23	PF2	6,5	MOD
5	Original	5,5	MOD	24	PF4	6,5	MOD
6	Original	5,5	MOD	25	PF4	6,5	MOD
7	Original	7,0	MOD	26	PF6	6,5	MOD
8	Original	7,0	MOD	27	PF6	6,5	MOD
9*	Original	7,0	MOD	28	PF8	6,5	MOD
10*	Original	7,3	MOD	29	PF8	6,5	MOD
11*	Original	7,3	MOD	30	PF10	6,5	STD
12	Original	6,0	MOD81	31	PF10	6,5	STD
13	Original	6,0	MOD81	32	PF10	6,5	MOD
14	Original	6,3	MOD81	33	PF10	6,5	MOD
15	Original	6,3	MOD81	34	PF10	6,5	MOD81
16	DMAX10	7,0	STD	35	PF10	6,5	MOD81
17	DMAX10	7,0	STD	36	PF12	6,5	MOD
18	DMAX10	8,0	MOD	37	PF12	6,5	MOD
19	DMAX10	8,0	MOD	38	PF14	6,5	MOD
				39	PF14	6,5	MOD

L'effet de la teneur en particules fines a été étudié en faisant varier le contenu en particules dont le diamètre est inférieur à 0,08 mm entre 2% et 14% (Figure 3.8b). Ces matériaux ont été

nommés de PF2 à PF14, selon la teneur en particules fines. La proportion en gravier (65%) et la taille maximale (25 mm) des particules correspondaient au matériau original. La proportion des particules de sable (0,08mm < d < 4,75mm) a été définie afin que les courbes granulométriques soient les plus parallèles possible pour des diamètres inférieurs à 4,75 mm (Figure 3.8b). Deux essais CBR ont été réalisés pour chacune des teneurs en particules fines, ces échantillons ont été compactés au moyen de l'énergie MOD. Au total, 14 essais CBR ont donc été réalisés sur les spécimens PF2 à PF14. Quatre essais supplémentaires ont été réalisés pour le matériau PF10 avec les compactions STD et MOD81.

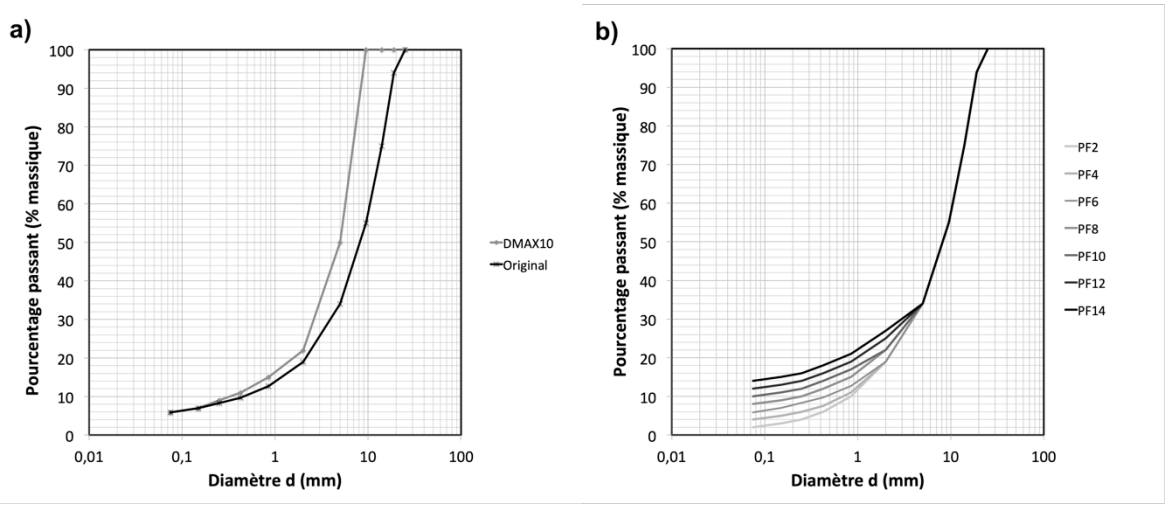


Figure 3.8: Distribution granulométrique (a) du matériau original et DMAX10 (b) des échantillons PF2 à PF14, le matériau PF6 correspondant au matériau original.

3.5 Densité in-situ et caractérisation sur le terrain

La densité du matériau de la surface de roulement à la Mine Canadian Malartic a été mesurée par deux approches. Un tronçon secondaire menant à une zone de décharge de roches stériles de la halde principale a été choisi pour procéder à des tests de terrain en raison de l'achalandage des chemins principaux de la mine (Figure 3.9). Ce tronçon n'avait pas été utilisé par des véhicules lourds lors des semaines précédant la caractérisation, mais des camions-bennes avaient effectués des dizaines de passage au cours des mois précédents.

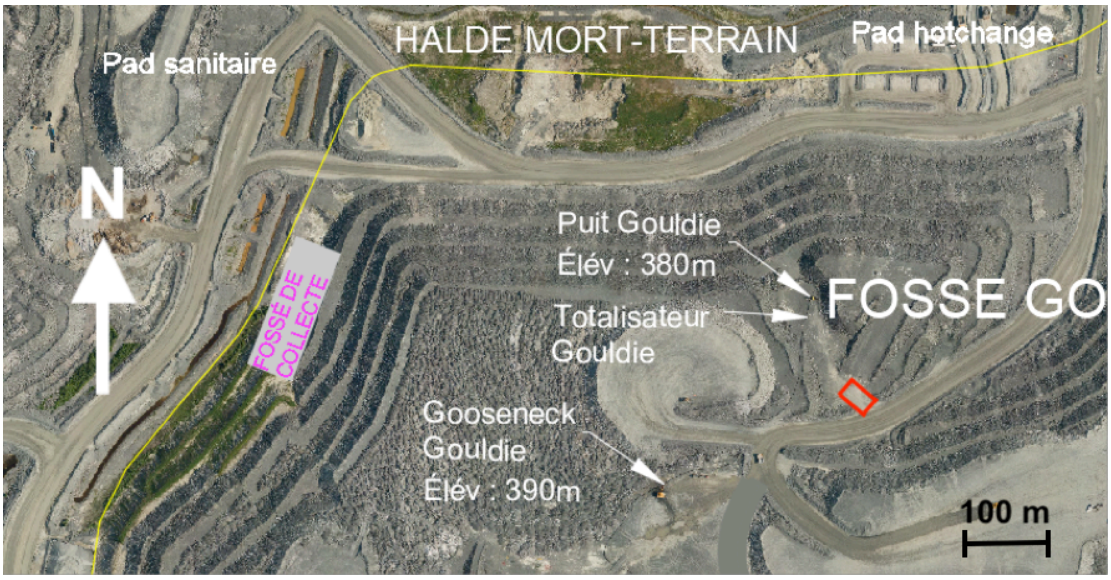


Figure 3.9: Zone d'essai (rectangle rouge) sur le site de la mine Canadian Malartic (Source: Canadian Malartic, 2018).

Figure 3.10: Tronçon de route minière étudié sur une largeur de 17,5 m et une longueur de 24 m.

Une section plate de 17,5 m de largeur et de 24 m de longueur a été sélectionnée pour cette étude (Figure 3.10). Au total, 24 essais au nucléodensimètre et 3 essais au cône de sable ont été réalisés (Figure 3.11). Un échantillon de 2 kg a été prélevé jusqu'à une profondeur de 10 à 15 cm à

l'emplacement de chaque essai au cône de sable. Un échantillon de taille supérieur (≈ 30 kg) a également été prélevé jusqu'à une profondeur de 25 cm afin d'évaluer l'effet du volume d'échantillonnage.

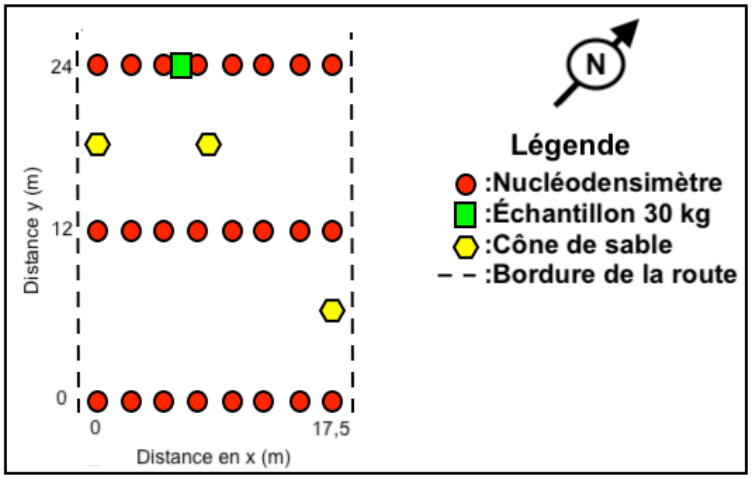


Figure 3.11: Disposition des essais de terrain (pas à l'échelle).

3.5.1 Essai au nucléodensimètre

L'essai au nucléodensimètre utilise la transmission de radiations gamma entre une source et une série de capteurs intégrés à l'appareil afin d'estimer la densité sèche et humide en place, et la teneur en eau du milieu. La procédure A (transmission directe) de la norme ASTM D6938 (2017b) a été utilisée avec un nucléodensimètre Troxler 3440 (Troxler). Les résultats obtenus et présentés sont des moyennes sur les premiers 30 cm de profondeur. 24 essais ont été réalisés selon trois lignes transversales à la route étudiée (Figure 3.11).

3.5.2 Essai au cône de sable

L'essai au cône de sable consiste à remplacer un sol par un sable calibré afin de mesurer le volume excavé et la masse correspondante au sol excavé. L'essai a été réalisé selon la norme ASTM D1556 (2015b). Deux essais ont été réalisés sur les côtés de la route et un au centre (Figure 3.11). Pour chaque essai, un échantillon a été prélevé et sa teneur en eau mesurée.

3.5.3 Analyses granulométriques complémentaires

La distribution granulométrique des échantillons (3 cônes de sable, un échantillon 30 kg) a été mesurée au laboratoire. La procédure décrite à la section 3.3.1 a été utilisée pour les échantillons des essais au cône de sable. La norme ASTM C136 (2006a) avec une série de tamis compris entre 0,08 mm et 100 mm a été utilisée pour l'échantillon de 30 kg.

3.6 Évaluation des déformations dans une structure de route minière type à l'aide d'analyses numériques

Le logiciel d'éléments finis SIGMA/W (Geo-Slope Intl., 2018) a été utilisé afin d'évaluer les déformations dans une structure de route en deux dimensions à partir des mesures de laboratoire pour les matériaux étudiés ici. Le modèle élastique linéaire a été utilisé pour ces analyses.

3.6.1 Géométrie, maillage et application des contraintes

Le modèle utilisé simulait une route plate dont la surface de roulement était constituée des roches stériles concassées étudiées au laboratoire (Figure 3.12). Son épaisseur était de 20, 60 ou 100 cm et elle était placée sur une couche de fondation de 4 m d'épaisseur. La condition frontière inférieure ne permettait aucun déplacement vertical ou latéral. La ligne horizontale y=0 a été définie comme contact entre la surface de roulement et la couche de fondation. Ce modèle est basé sur une route minière où la surface de roulement est construite sur une fondation de quelques mètres d'épaisseur et où le sol d'infrastructure est le socle rocheux rigide.

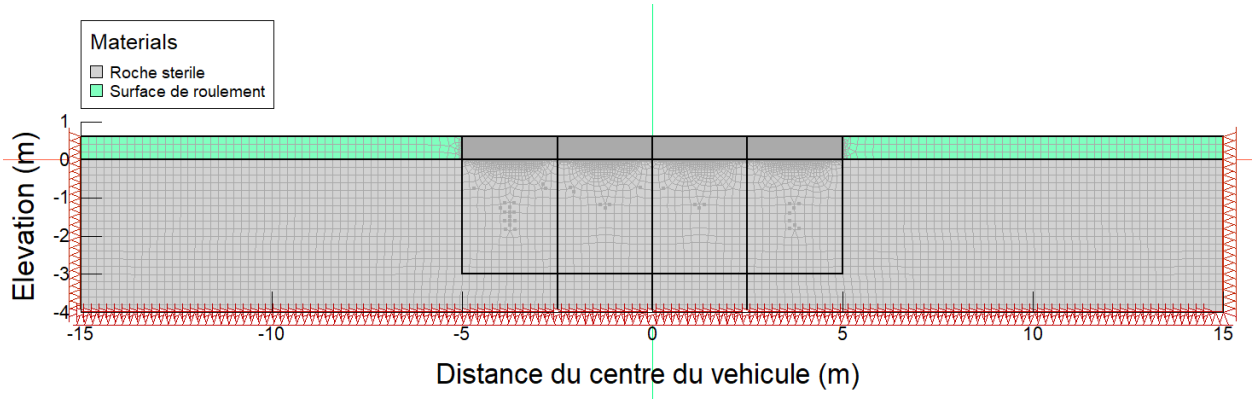


Figure 3.12: Modèle de route minière avec une surface de roulement de 60 cm d'épaisseur.

La largeur du modèle (30 m) a été définie afin de minimiser l'effet des conditions frontière sur les simulations. Les bords du modèle (x= ±15 m) permettaient les déplacements verticaux, mais étaient fixés selon l'axe x. Le maillage du modèle est mixte (principalement rectangulaire) avec des éléments de 0,2 m, sauf dans la section centrale de la surface de roulement (x = [-5,5] m, y > 0 m) où ils ont une taille de 0,02 m (Figure 3.12).

La première étape du modèle consistait à simuler les contraintes initiales dans les matériaux en place. Pour cette étape, aucune contrainte extérieure n'était simulée, seule la contrainte gravitationnelle était prise en compte. Dans une seconde étape, la contrainte induite par un véhicule était ajoutée (Figure 3.13). Cette contrainte (700 kPa) correspond à l'essieu arrière du camion le plus lourd utilisé à la mine Canadian Malartic, soit un CAT 793F (Caterpillar, 2012). Quatre zones d'application de la contrainte d'une largeur de 1264 mm ont été simulées et représentaient l'aire de contact entre les pneus et la surface de roulement. Les pneus étaient couplés deux par deux. Une distance de 47 mm séparait les deux pneus rapprochés et une distance de 4963 mm sépare le centre des deux paires de pneus.

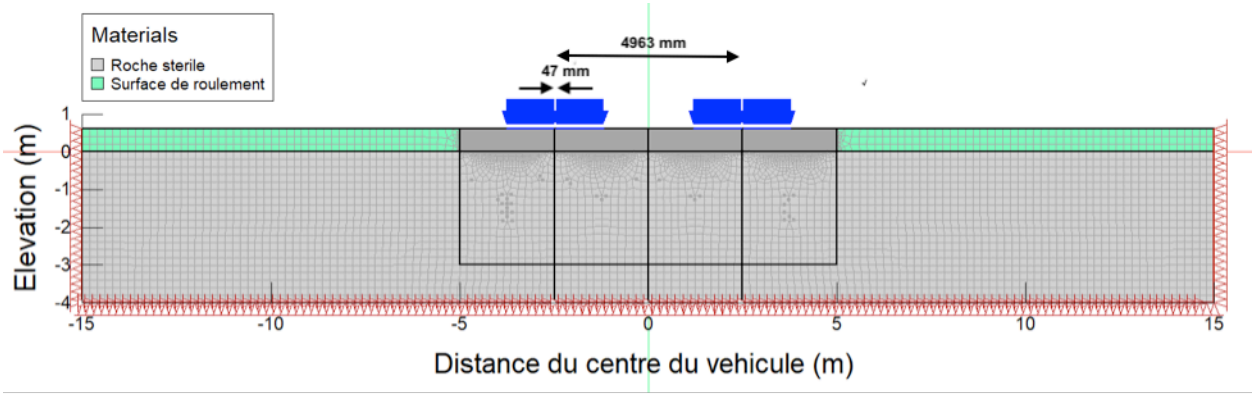


Figure 3.13: Application des contraintes induites par le passage d'un camion de type CAT 793F. Le chargement est indiqué par les flèches bleues (voir texte pour détails).

3.6.2 Définition des propriétés des matériaux

Les propriétés de la surface de roulement correspondaient à celles mesurées au laboratoire. Trois matériaux ont été utilisés : le matériau DMAX10 à une compaction STD (CBR_{moy} =50%); le matériau original avec une compaction MOD81 (CBR_{moy} =177%) et le matériau PF10% avec une compaction MOD81 (CBR_{moy} =258%). Le module d'élasticité E_{eff} (MPa) a été estimé à partir de l'équation 2-12 (voir la section 2.2.5 de la revue de littérature).

La masse volumique des matériaux de la surface de roulement a été déterminée à partir des résultats des essais CBR et de la mesure de densité sèche et humide. Le module d'élasticité des roches stériles de la couche de fondation a été fixé à une valeur de 80 MPa qui correspond bien à des stériles miniers typiques (Maknoon et Aubertin, 2013). Le coefficient de Poisson pour tous les matériaux a été fixé à 0,35, une valeur typique dans les routes minières (Thompson, 1996).

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : LABORATORY CHARACTERIZATION OF CRUSHED WASTE ROCK TO IMPROVE VALORIZATION IN MINE HAUL ROAD SURFACE COURSE

Antoine Laverdière[1,2], Thomas Pabst[1,2], Benoît Courcelles[2]

[1] RIME (Research Institute on Mine and Environment)

[2] Polytechnique Montreal

Submitted to: Transportation Geotechnics

Abstract

Open-pit mining operations generate large volumes of waste rocks, which are usually disposed of in piles. Management and reclamation of waste rock piles can be challenging because of their size (usually height > 100 m and surface area > 100 ha) and their geochemical and geotechnical stability. It can therefore be both economically and environmentally attractive for a mine to valorize (reuse) waste rock on site, like for example in roads. However, current practice usually consists in using waste rock directly in road structures, without any particular preparation or selection, thus frequently resulting in punctures, dust generation and low durability. The aim of this study was to determine optimal geotechnical properties of crushed waste rocks for use in surface course of mine haul roads. Crushed waste rock was sampled at a partner mine site and characterized in the laboratory. Their potential use in haul roads was evaluated using California bearing ratio (CBR) tests. The effect of grain-size distribution and density on the surface course layer stiffness was more specifically assessed. The results show that these parameters have a significant impact on the performance of the material. The stiffness (CBR ratio) of the studied material was maximum for an optimum fine particle content of around 10%, a high density and the presence of coarser particles (>10 mm).

Keywords:

Valorization; Mine Waste rocks; Mine haul road; Surface course; California bearing ratio (CBR)

4.1 Introduction

Mining operations, and especially open pit mines, generate large volumes of waste rocks that are usually disposed of on the surface in piles. Waste rocks are heterogeneous coarse-grained materials without economic value which are excavated to reach the ore (Aubertin et al., 2002). Reuse (or valorization) of these materials in mining structures (such as dams, haul roads, backfill or rock fill) could contribute to reduce the size of waste rock piles. It could also provide useful materials and reduce the needs to borrow and transport natural materials, thus decreasing construction costs and environmental footprint.

One example of potential reuse is the construction of mine haul roads. Most mines already use waste rocks, crushed or not, in their road systems (Tannant and Regensburg, 2001). Waste rocks are easily available on sites at low-cost and their mechanical properties, in the case of hard-rock mines, are usually suitable for road construction (Tannant and Regensburg, 2001). Waste rocks also have a good drainage capacity and a relatively high strength because of their large maximum grain size and their well graded grain size distribution (McLemore et al., 2009).

Mine haul roads usually comprise one or two base layers built over the subgrade (typically in situ material) and covered by a surface course made of crushed rock or gravel. The road structure usually has a thickness of a few meters with 1 to 2 m thick base layers and a 0,3 to 1 m thick surface course (Tannant and Regensburg, 2001). The surface course is the uppermost layer of the road structure which is directly in contact with the tires. The characterisation and the choice of the material properties for each layer is an important part of the design of a mine haul road.

Loading and hauling account for a significant part of operation costs and greenhouse gas emissions of a mine (de la Vergne, 2003; Norgate and Haque, 2010). The optimization of road materials could therefore improve performances in terms of fuel consumption and structure sustainability. A road that offers peak performances would have a positive impact on the vehicle component lifetime, especially tires. Maximizing surface course stiffness could, for example, have a positive and significant impact on the structural and functional design of the road and reduces the rolling resistance while providing an increased trafficability (Thompson and Visser, 2006b; Douglas and Lawrence, 2014; Coffey et al., 2018). However, material properties are

usually not particularly assessed in practice and waste rocks are typically used in roads with little preparation (Thompson, 2015).

Structural design of a road consists in the choice of the material and thickness of each layer with the objective to distribute loads so the bearing capacity is maximized and the strains minimized (Tannant and Regensburg, 2001). Structural design for mine roads has evolved during the last decades from an empirical method (based on the results of the California Bearing ratio (CBR) test; (Kaufman and Ault, 1977)) to a mechanistic approach (Thompson, 2015). In the mechanistic design, material properties are used to evaluate the strain under specific loads and a maximum strain criterion is fixed to design the pavement layer's thickness. The material stiffness is the principal parameter in mechanistic design: a stiffer material will reduce the stresses transferred to the underlying layers and thus the strains and damages to the whole structure (Mallick and El-Korchi, 2017).

Each layer of the structure can have an influence on the road performance, but the surface layer has the most significant impact on trafficability and rolling resistance (Coffey, 2015). Trafficability can be described as the ability of a surface course to provide a safe and smooth ride to the vehicles using the road, under wet and dry conditions (Thompson and Visser, 2000a). The rolling resistance can be expressed as the ratio of the horizontal force corresponding to a moving vehicle at constant speed on the vertical load generated by this vehicle (Thompson, 1996; Coffey et al., 2018). The functional design aims to select the surface layer material and thickness that will provide a good trafficability while minimizing rolling resistance (Thompson and Visser, 2006b).

The surface course material needs to drain water without excessive erosion, have enough strength to resist the repeated loads induced by traffic and it should not generate excessive dust or be too slippery when wet to increase trafficability (Thompson and Visser, 2000a). Trafficability and rolling resistance are also influenced by the presence of defects in the road, such as potholes, bumps and washboards (Tannant and Regensburg, 2001). Increasing surface course stiffness improves trafficability because a higher stiffness reduces stresses and strains in the road structure, reduces roughness and limits the risks for defects in the surface course (Mallick and El-Korchi, 2017; Coffey et al., 2018).

In the mining industry, the rolling resistance is usually expressed as an equivalent grade (in %) (Caterpillar, 1999; Tannant and Regensburg, 2001) but it can also be expressed in kg/t of the gross vehicle mass (GVM) (Douglas and Lawrence, 2014) or in N/kg (Thompson, 1996). Measuring the rolling resistance can be time consuming and requires detailed information on road material and vehicle specification. Many authors therefore proposed empirical relations based on field or laboratory measurements (Thompson and Visser, 2006a). For example, Atkinson (1992) and Caterpillar (1999) proposed to use the tire penetration in the surface course to evaluate the rolling resistance (Atkinson, 1992; Caterpillar, 1999) :

Caterpillar (1999) $$RR = 2 + 0{,}6\ per\ cm\ tire\ penetration \quad (4\text{-}1)$$

Atkinson (1992) $$RR = 2 + 0{,}7\ per\ cm\ tire\ penetration \quad (4\text{-}2)$$

With RR the rolling resistance expressed in (%)

Thompson and Visser (2006b) proposed a model based on the roughness and defects of the haul road where the rolling resistance varies with time. The equation to determine the rolling resistance can be expressed as (Thompson and Visser, 2006b):

$$RR = RRMIN + RDS\ exp^{(f)} \quad (4\text{-}3)$$

Where RR is expressed in (N/kg); RRMIN : minimal rolling resistance (N/kg), which mainly depends on the speed of the vehicle; RDS : roughness defect score (-) which depends on material properties (CBR results, grading coefficient and shrinkage product) and mine operation (daily tonnage and time since the last maintenance); and f : regression function (-).

The discussion of the model of Thompson and Visser (2006b) exceeds the scope of the present study, but it can be noticed that, in this model, the roughness defect score (RDS) decreases when the CBR increases. Since the CBR and the tire penetration are related to the stiffness of the surface course material, equations 4-1, 4-2 and 4-3 all indicate that a stiffer material, with a high CBR, contributes to a better performance and a smaller rolling resistance (Coffey et al., 2018) and thus decrease fuel consumption and increase productivity (Tannant and Regensburg, 2001).

The CBR test is generally used to evaluate the bearing capacity and mechanical strength of a road material during the empirical design of layer thicknesses (González Farias et al., 2018), but it can

also be used as an indicator to assess and compare the shear strength and stiffness of materials (Taskiran, 2010; Caicedoa and Mendozaa, 2015). It is also often used in mine haul road structural and functional design (Kaufman and Ault, 1977; Thompson and Visser, 2006b). CBR test results are strongly correlated with the Young's modulus and can therefore be used to estimate material stiffness (Mendoza and Caicedo, 2018).

Several correlations were proposed in the literature to link the CBR and the Young's and resilient moduli (Hajiannia et al., 2016), but their precision is not always satisfactory (Sukumaran et al., 2002). The purpose of this study was, however, not to accurately measure the material modulus but to identify the properties of the material that have a positive impact on the soil performances. The CBR also has the advantage of being relatively quick and inexpensive and is commonly used by practitioners (Anochie-Boateng et al., 2009; Mendoza and Caicedo, 2018).

This paper presents the results of an extensive laboratory investigation carried out on crushed waste rocks to evaluate their potential valorization in surface course of haul road. Stiffness of crushed waste rocks was evaluated in the laboratory using CBR tests. The effect of grain size distribution, compaction and strength properties are discussed here. Recommendations are also proposed in terms of material selection and preparation to optimize surface course performance.

4.2 Material characterisation and laboratory program

The studied material was obtained from Canadian Malartic Mine, an open-pit gold mine located in the Abitibi region, in western Quebec, Canada. The mine uses different types of crushed waste rocks and run-of-mine for the construction of its infrastructures. Crushed waste rock was sampled on Canadian Malartic mine site in February 2018 and sent to the laboratory in several barrels. The material had been crushed recently and was temporarily stored in a small pile; it was considered representative of the material typically used for haul road construction at the mine. Crushed waste rock was homogenized in the laboratory using ASTM C702 (1998) standard. Characterization of the material included grain size analysis (ASTM C136, 2006a), constant head permeability test in rigid wall permeameters (ASTM D2434, 2006b) and specific gravity of particles under and over 4,75 mm (ASTM D854, 2014; ASTM C127, 2015). Two samples, one with particles under 4,75 mm and the other with particles over 4,75 mm, were sent to URSTM

laboratories in Rouyn-Noranda to determine their mineralogy. X-ray diffraction tests were conducted on these samples using a Bruker apparatus model D8 Advance.

Compaction tests were carried out on crushed waste rock using standard effort (ASTM D698, 2012a) and modified effort (ASTM D1557, 2012b). Additional compaction tests were carried out using the modified effort hammer (10 lb), but with 81 hits by layer (the rest of the test was identical to ASTM D1557). The objective was to simulate a higher compacting energy which was more representative of field conditions where compaction is achieved using heavy trucks. In this paper, the symbols STD, MOD and MOD81 are used to refer to these different compaction energies , i.e. 600, 2 700 and 3 900 kN-m/m^3 respectively.

The original crushed waste rock was composed of 66% of gravel with a maximum diameter of 25 mm, 28% of sand and 6% of fine particles (<0,08mm; Tableau 4.1). It had a uniformity coefficient $C_U = d_{60}/d_{10} = 21$ and a curve coefficient $C_C = d_{30}^2/d_{60} \times d_{10} = 3$ (Figure 4.2). It was a well-graded gravel with more then 5% fine particles and was classified as GW-GM (USCS classification; ASTM D2487, 2017). X-ray diffraction (XRD) characterization showed that the studied crushed waste rock was mainly composed of albite (35-38%), and quartz (25-31%), with the presence of biotite (8-10%), orthoclase (7-8%), corundum (5-9%), chlorite (5-8%), calcite (≈ 3 %), anhydrite (2-3%) and traces of pyrite (<1%).

Tableau 4.1: Original crushed material properties.

Properties	**Results (min-max)**	**Standard**
Specific gravity (G_s) of particles with d < 4,75 mm	2,75 (2,73-2,77)	ASTM D854-14 (2014b)
Specific gravity (G_s) of particles with d > 4,75 mm	2,74 (2,72-2,76)	ASTM C127-15 (2015a)
Saturated hydraulic conductivity k_{sat}	$1x10^{-4}$ (m/s)	ASTM D2434-68 (2006b)

Compaction properties			
Compaction energy	**STD**	**MOD**	**MOD81**
Maximum dry density	2200 kg/m^3	2320 kg/m^3	2340 kg/m^3
Optimum water content	9,0 %	7,2 %	6,8 %
Standard	ASTM D698-12 (2012a)	ASTM D1557-12 (2012b)	Study specific (see text for details)

California Bearing Ratio (CBR) tests (ASTM D1887, 2016) were carried out to assess the mechanical properties of the material. In this test, a circular piston penetrates a compacted specimen of 152,4 mm diameter and 127 mm height (Figure 4.1). The equipment used in this study was setup so that the load cell and pistons were fixed while the whole mold was moving upwards The penetration rate was maintained constant during the test at a speed of 1,3 mm/min while the applied load and displacements were registered. The test continued until 13 mm of penetration or until the load limit of the equipment was reached (with a minimum of 5,08 mm penetration). The stress corresponding to a penetration of 5,08 mm was then compared to the standard value given in the standard (ASTM-D1883). Displacements were measured with a LVDT (Linear Variable Differential Transformer) HP model 24DCDT-1000 and loads were measured with a Omega load cell model LC204-10K. The load frame used in this study was a ELE Tritest50 with a capacity of 50 kN.

Soaked specimens were also prepared and tested to evaluate the CBR corresponding to the most unfavorable field conditions *in situ*. Three soaked CBR tests were conducted in this study but no

significant swell was observed after four days of submersion. Soaked and unsoaked tests also showed similar results and the difference between the measured CBR remained smaller than 3% (i.e. below the precision of the test). It was therefore decided to conduct the rest of the test program with unsoaked specimens only.

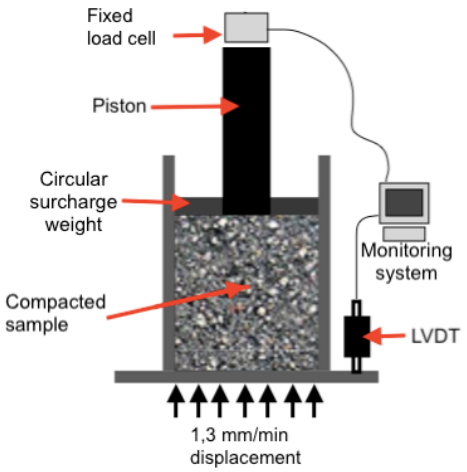


Figure 4.1: CBR test (adapted from ASTM D1883). LVDT: Linear variable differential transformer, measuring displacements.

The influence of the dry density, the maximum grain size of the material and the fine particle content on CBR results was also evaluated in this study.

Initial material specimens were compacted using STD, MOD and MOD81 energy and with various water contents to determine the influence of the density on the CBR. Fifteen CBR tests were carried out in total on the original material, with water contents ranging between 3,0 and 7,3 % (w_{opt} = 7,2%).

The impact of the maximum grain size and the fine particle content was evaluated using specimens prepared with specifically chosen grain size distribution. Fine grained particles (d < 0,08 mm) and coarse grained particles (d > 10 mm) were added or removed from the original material, depending on the objective of the tests.

To evaluate the contribution of the coarser grains, a material with a maximum grain diameter of 10 mm, with the same uniformity coefficient and the same fine particle content as the initial material was prepared (Figure 4.2a). This material was named DMAX10. Six CBR tests were

carried out in total on this material, i.e. two for each compaction energy (STD, MOD and MOD81). The water content of these specimens ranged between 6,0 and 8,0 %.

Specimens with a fine particle content ranging from 2% to 14% were also prepared (Figure 4.2b). These materials were named PF2 to PF14 depending on the fine content. Two CBR tests were carried out on each specimen using the modified compaction energy (MOD). Two additional tests with compaction energy STD and MOD81 were carried out on the specimen with 10% fine particles The maximum particle size and the gravel content were the same as in the original material and the proportion of the fine fractions was chosen so that the grain size distribution curves were as parallel as possible for the fraction <4,75 mm. The water content for these tests was fixed to 6,5%. Material PF6 corresponded to the original material.

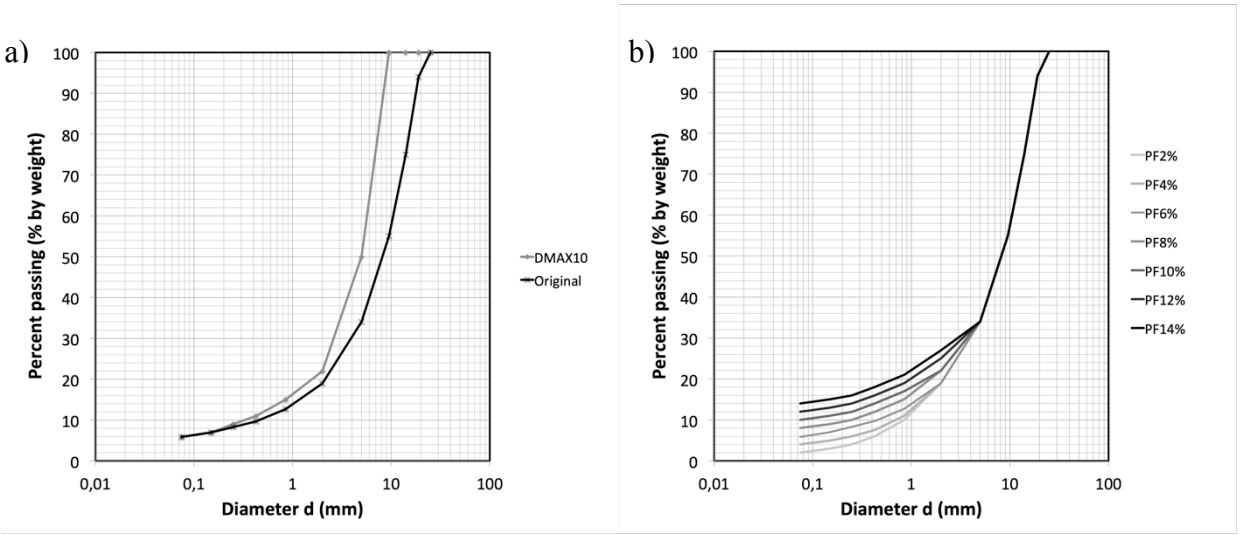


Figure 4.2: Grain size distribution curves of (a) original material and DMAX10 (b) original material with various fine particle contents (see text for more details regarding sample preparation).

In total, 39 CBR tests were conducted, including 15 tests on the initial material, 6 on DMAX10 and 18 on the materials with a different fine particle content (Tableau 4.2).

4.3 Results

For each CBR test, a curve of the vertical stress (expressed in MPa) was drawn as a function of the penetration (in mm) (Figure 4.3). The stress corresponding to the penetration of 5,08 mm was obtained for each test, and the CBR ratio was calculated. The obtained CBRs were then compared

according to the density, grain-size distribution characteristic or compaction energy used for each specimen (Tableau 4.2).

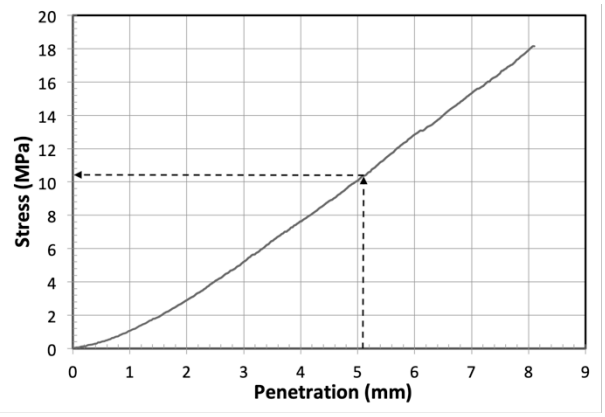


Figure 4.3: Typical CBR test result obtained for the original material with MOD compaction and a water content w = 7%. The stress corresponding to a penetration of 5,08 mm (indicated by an arrow) was compared to the standard (ASTM D1883, 2016)) and corrected to obtain the CBR value of the tested sample.

Tableau 4.2: CBRs for material tested, water content, dry density and compaction energy
*: 4 days soaked sample, STD: 600 kN-m/m^3, MOD: 2700 kN-m/m^3 and MOD81: 3900 kN-m/m^3.

No.	Material	w (%)	Compaction energy	ρ_d (kg/m^3)	CBR (%)
1	Original	6,0	STD	2054	48
2	Original	6,0	STD	2100	68
3	Original	3,0	MOD	2090	67
4	Original	3,0	MOD	2119	78
5	Original	5,5	MOD	2199	104
6	Original	5,5	MOD	2231	125
7	Original	7,0	MOD	2194	89
8	Original	7,0	MOD	2220	128
9*	Original	7,0	MOD	2195	125
10*	Original	7,3	MOD	2285	119
11*	Original	7,3	MOD	2232	95
12	Original	6,0	MOD81	2286	205
13	Original	6,0	MOD81	2271	230
14	Original	6,3	MOD81	2321	159
15	Original	6,3	MOD81	2300	115
16	DMAX10	7,0	STD	2034	52
17	DMAX10	7,0	STD	2049	47
18	DMAX10	8,0	MOD	2259	122
19	DMAX10	8,0	MOD	2213	92
20	DMAX10	6,0	MOD81	2235	132
21	DMAX10	6,0	MOD81	2228	126
22	PF2	6,5	MOD	2190	142
23	PF2	6,5	MOD	2205	127
24	PF4	6,5	MOD	2264	138
25	PF4	6,5	MOD	2234	149
26	PF6	6,5	MOD	2308	170
27	PF6	6,5	MOD	2316	160
28	PF8	6,5	MOD	2351	197
29	PF8	6,5	MOD	2380	170
30	PF10	6,5	STD	2239	88
31	PF10	6,5	STD	2209	110
32	PF10	6,5	MOD	2384	197
33	PF10	6,5	MOD	2394	225
34	PF10	6,5	MOD81	2531	267
35	PF10	6,5	MOD81	2541	250
36	PF12	6,5	MOD	2380	174
37	PF12	6,5	MOD	2395	217
38	PF14	6,5	MOD	2399	180
39	PF14	6,5	MOD	2372	205

4.3.1 Dry density and compaction energy

Results indicate that the CBR tends to increase linearly with the dry density (Figure 4.4). For the original material, CBRs are comprised between 50 and 230% for a dry density comprised between 2 050 and 2 320 kg/m^3. The highest CBR (around 260%) and the highest density (approximately 2 550 kg/m^3) were obtained for a fine fraction of around 10%. The CBR of the original material (fine fraction = 6%) was significantly smaller (around 150%). The CBR and dry density measured on the original material varied significantly depending on the compaction energy. For example, measured CBRs were comprised between 50% and 70% (ρ_d = 2 050 ;2 100 kg/m^3) with STD compaction, between 70% and 130% (ρ_d = 2 090 ; 2 280 kg/m^3) with MOD compaction and between 115% and 230% (ρ_d = 2 270; 2 320 kg/m^3) for MOD81 compaction (Figure 4.5). The range of dry densities measured for a same compaction energy could be explained by the various initial water contents used for the specimen preparation. For example, the specimens prepared with a water content of 3% and the MOD compaction showed significantly lower dry density around 2 100 kg/m^3 (Figure 4.5).

4.3.2 Maximum particle size

Material DMAX10 showed significantly smaller stiffness and density than other materials, independently of the compaction energy. For example, the maximum CBR measured on DMAX10 with MOD81 compaction did not exceed 140% while it was around 240% for the original material, and even greater for higher contents of fine grained particles (Figure 4.4). The density of DMAX10 is also lower than with other materials, with minimum values around 2 050 kg/m^3 and maximum values around 2 250 kg/m^3 (Figure 4.4).

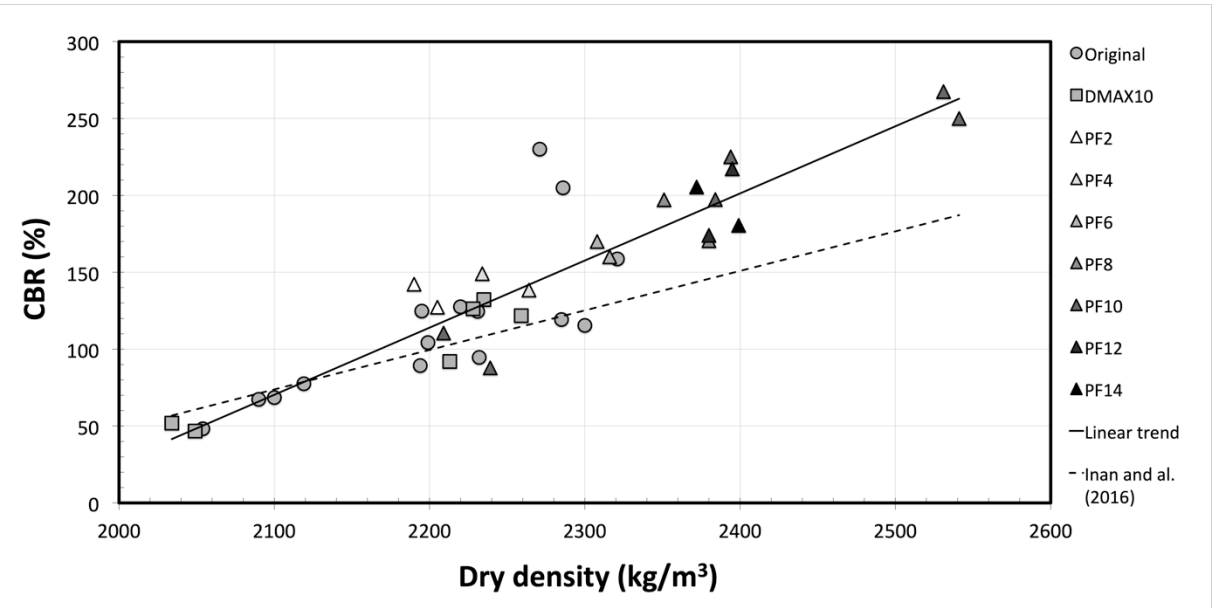


Figure 4.4: CBR results (in %) as a function of dry density. Results are presented for all samples, including original material, material sieved at 10 mm (DMAX10) and for fine contents comprised between 2 and 14% (PF2 to PF14).

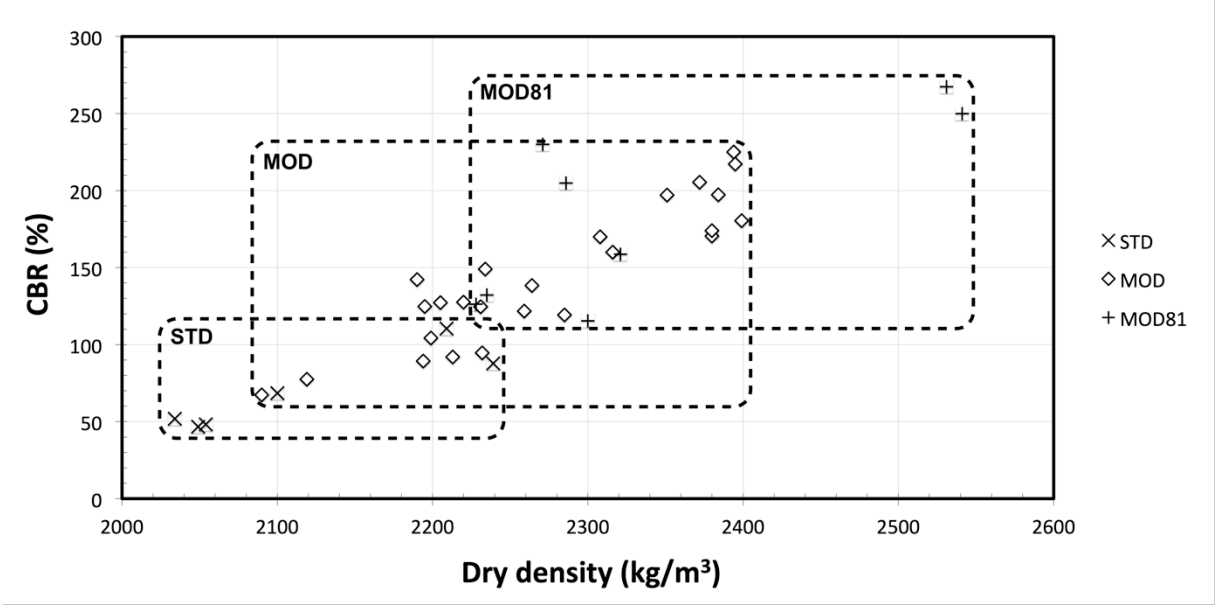


Figure 4.5: CBR results (in %) as a function of dry density and compaction energy: STD: 600 kN-m/m^3, MOD: 2700 kN-m/m^3 and MOD81: 3900 kN-m/m^3.

4.3.3 Fine content

The effect of fine particle content was evaluated by comparing CBR results and dry density measurements for various fine-grained particles content (Figure 4.6). The compaction energy (MOD) and the initial water content (w = 6,5%) were the same for all these samples, so results were only affected by the fine fraction content. CBR tended to increase with the fine particle content until an optimum of 210% was reached for a fine content of around 10%. The CBR value then slightly decreased for greater fine contents. The dry density also increased with the fine particle content, until it reached an optimum of 2 370 kg/m^3 for around 10% fines (Figure 4.6). The maximum density then became relatively constant (ρ_d = 2 370 kg/m^3) and independent of fine content for greater contents of fine-grained particles. In other words, the decrease of CBR observed for fine content greater than 10% was not related to a decrease of density (Figure 4.6).

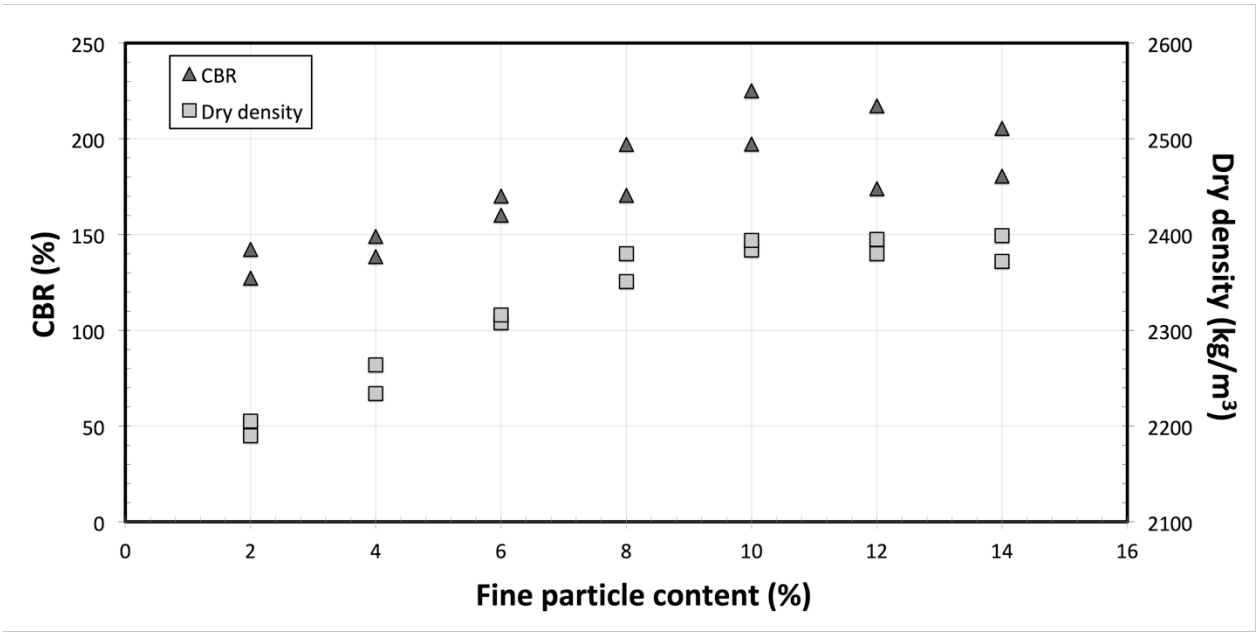


Figure 4.6: CBR and dry density results as a function of fine particle content. All samples were prepared with MOD compaction.

Additional CBR tests were carried out to further investigate the behaviour of PF10. Specimens were prepared using STD and MOD81 compaction and CBR tests were performed following the same methodology as previously. Maximum densities (2 531 kg/m^3 and 2 541 kg/m^3) and maximum CBR (250% and 267%) were obtained for PF10 (Figure 4.4), and for all compaction

energies. The CBR was almost doubled for STD and MOD compactions and increased by almost 50% for MOD81 (Tableau 4.3) compared to the results obtained on the original material.

Tests showed a relatively good repeatability and CBR results for a same density were close. Differences of density between duplicates were usually smaller than 30 kg/m^3 and CBR results were usually less than 25% different. However, result variability depended on compaction level. Differences for the samples compacted with MOD81 were in general larger. For example, the two specimens of original material compacted at a water content of 6,3% with MOD81 had a dry density difference of only 20 kg/m^3 but a CBR difference of 45%. Variability of CBR measurements also tended to increase as the fine content increased. For example, the variation of CBR between duplicates for specimens with 2 to 6% fines was less than 15% but exceeded 25% or 45% for materials with higher fine content. The measured dry densities showed less variability, and the maximum difference between two duplicates never exceeded 50 kg/m^3 (i.e. less than 2,5% of the dry density).

Tableau 4.3: CBR results for original and PF10 materials. Presented results are the mean values calculated on at least two measurements.

	Original material (6% fines)		**PF10 (10% fines)**	
Compaction	CBR	Dry density	CBR	Dry density
STD	58 %	2080 kg/m^3	99%	2220 kg/m^3
MOD	112%	2220 kg/m^3	211%	2390 kg/m^3
MOD81	177%	2300 kg/m^3	259%	2540 kg/m^3

4.4 Analysis and discussion

4.4.1 Relation between CBR and dry density

CBRs of the studied crushed waste rock seem to increase linearly with the dry density (within the range of conditions tested in this laboratory program) (Figure 4.4). This linear relationship seems

to apply to the initial material but also for DMAX10 and for the different contents of fine particles.

Several studies have shown that the dry density has a significant impact on CBR results for fine or coarse materials and for soaked and unsoaked tests (Taskiran, 2010; Ramasubbarao and Sankar, 2013). Many studies on alluvial materials or subbase materials (mainly constituted of sand, silt and clay, therefore finer than the materials tested in this study), have shown a linear relationships between CBR and dry density (Patel and Desai, 2010; Shirur and Hiremath, 2014; Talukdar, 2014; Inan et al., 2016). Results presented in this paper seem to confirm that a similar behaviour is also observed for crushed waste rock.

Inan et al. (2016) studied a subbase material containing relatively high proportions of gravel and sand content (67% to 98%), which was relatively similar to the material tested in the present study (94% gravel and sand). They obtained the following relation between the CBR and the maximum dry density with a correlation coefficient R^2 of 0,936 (Inan et al., 2016):

$$CBR = 257{,}0\ MDD - 465{,}9 \quad (4\text{-}4)$$

With CBR in %

And Maximum dry density (MDD) in t/m^3

This relationship (4-4) shows relatively accurate match for the dry densities measured under 2 250 kg/m^3 but underestimates significantly the CBR for higher densities (Figure 4.4). A similar relationship is proposed for the crushed waste rock tested in this study with a correlation coefficient R^2 of 0,82:

$$CBR = 436{,}6\ MDD - 846{,}5 \quad (4\text{-}5)$$

The increasing strength of the material with the density has, however, a limit. The density is limited by the specific gravity of the material and the minimum void ratio physically achievable.

For a mine haul road a stiffer material, with a high CBR, will contribute to increase performances and decrease rolling resistance (Coffey et al., 2018) and at the same time decrease fuel consumption and increase productivity (Tannant and Regensburg, 2001). It is therefore

recommended to improve the CBR of the surface course and thus its performance, to maximize its density.

4.4.2 Influence of compaction energy

The purpose of increasing compaction energy is usually to densify the construction materials and increase their strength and stiffness (Holtz and Kovacs, 1991). But it can be a challenge to reproduce in the laboratory equivalent densities to field conditions. The impact of compaction on dry density (and thus CBR) depends on the material grain size distribution. CBR results on each material almost doubled when MOD compaction was used compared to STD. Increase of CBR was also substantially greater with MOD81 compaction than with MOD (Figure 4.7). These results could indicate that some materials, like PF10 for example, are more easily compacted and that a higher compaction energy is not necessary to achieve higher performances.

The CBR of the original material increased as the compaction energy increased from STD to MOD to MOD81 (Figure 4.7). CBR results for DMAX10 also increased when the compaction increased from STD to MOD. However, the dry density obtained with MOD81 was not significantly greater than with MOD, (Tableau 4.2), which could indicate that the material reached it's maximum density. Compaction energy MOD81 also had less effect on PF10 dry density.

Additional tests would be required to extrapolate these observations to *in situ* conditions and propose recommendation to optimize compaction procedure on haul roads.

4.4.3 Influence of maximum grain size

The CBRs obtained with DMAX10 are 5 to 50% lower than with the other materials, depending on the compaction energy used to prepare the samples (Figure 4.7). The maximum dry density achieved was also significantly smaller than with the other materials (Figure 4.4). It appears therefore that the coarser particles can have a significant contribution to the mechanical strength of the material. These observations are consistent with previous studies showing that shear strength of both sands (Islam et al., 2011; Li, 2013) and sandy gravels (Wang et al., 2013; Alias et al., 2014) increases with maximum particle size. Materials with larger particles (up to 1 m diameter, like rockfill) were also shown to follow the same trend for round to sub-rounded particles. Angular to sub-angular materials usually show, however, a different behaviour because

of the influence of higher confinement pressure and higher particle breakage (Varadarajan et al., 2003).

In this study, particles with diameter from 10 to 25 mm contributed to significantly increase the density and stiffness of the material. A coarser material seems therefore more suitable to increase the performance and durability of surface course in haul roads and it could be beneficial for mines to keep some coarser particle in surface course materials (either by limiting crushing or mixing crushed materials with some coarser particles). Nevertheless, common practice usually recommends to keep maximum particle diameter size below 40 mm to avoid puncture and provide a comfortable ride for the road users (Thompson and Visser, 2000b). A maximum particle size greater than 40 mm could also makes road maintenance less efficient and increases the presence of potholes (Thompson and Visser, 2006b).

4.4.4 Effect of fine content

Results showed that CBR was maximum for a fine (i.e. particles with d<0,08 mm) content of approximately 10% (Figure 4.6). The CBR of PF10 was approximately 40, 100 and 80% greater compared to the original crushed waste rock (6% fines) for STD, MOD and MOD81 compactions respectively (Figure 4.7). These results correspond well to other studies carried out on unbound granular material with over 35% gravel and where the optimum CBR was obtained for a fine content comprised between 8 and 10% of non-plastic fines (Siswosoebrotho et al., 2005; González Farias et al., 2018).

The dry density also increased with the fine content in this study (Figure 4.6), so fine particles seem to contribute to fill the voids between coarser particles to a certain extent. However, CBR decreased for fine content greater than the optimum, while the density remains relatively constant. The grain-to-grain contact of coarser material that offers a structural strength seems therefore less effective for greater fine particle content and could explain the lower performance of the material (Yoder and Witczak, 1975).

A lesser compaction energy also seemed to be needed to reach higher performances with an optimum fine content. For example, PF10 compacted with MOD compaction reached around 80% of the CBR obtained with MOD81 compaction (Tableau 4.3 and Figure 4.7).

The increase of fine particle content in the crushed waste rock appears therefore to have a positive impact on the surface coarse stiffness. However, it should not exceed a certain optimum, otherwise road stiffness may decrease again. Also, it should be reminded that a greater fine content may enhance dust problems depending on the climate where the mine operates (Thompson, 2011). Finally, dry density measurement alone is not necessarily a good indicator (or criteria) of stiffness for fine content above the optimum, as it may remain maximum for decreasing CBR.

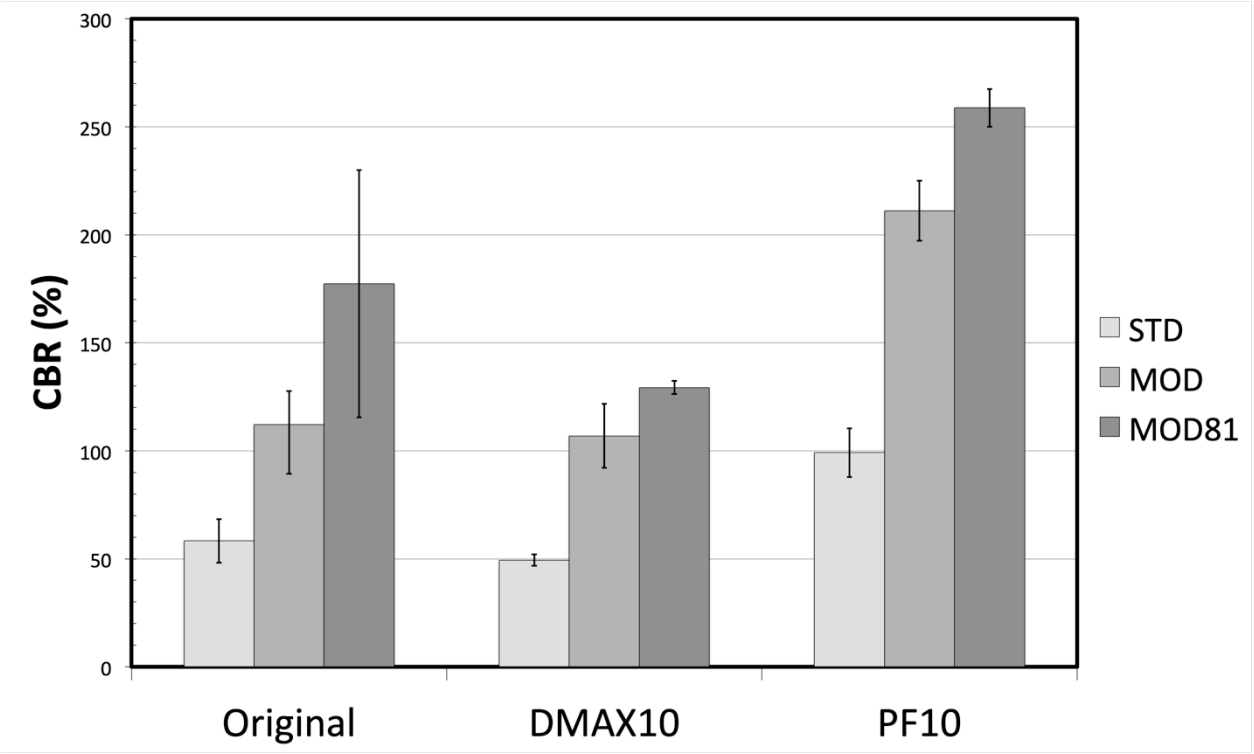


Figure 4.7: CBR results as a function of material (Original: unaltered crushed waste rock, DMAX10: maximum diameter of 10 mm, PF10: 10% of fine particles) and compaction energy (STD: 600 kN-m/m^3, MOD: 2700 kN-m/m3, MOD81: 3900 kN-m/m^3). Presented values are averages of up to 6 measurements. Error bars indicate the range of measurements.

4.4.5 Discussion and final remarks

This study confirmed several behaviour and trends that were observed for other types of materials used in civil engineering. However, results are only valid for the tested crushed waste rock and may not be representative of other waste rocks.

One of the main limitations of this study was that the stiffness and the strength of the surface course material were evaluated only using the unsoaked CBR. Other laboratory or field tests are therefore recommended to estimate the Young's modulus, resilient modulus, and friction angle and to better evaluate the mechanical properties of the material. Such tests are currently ongoing in the authors' research team. More soaked CBRs should also be carried out to validate the results for more conservative conditions.

Also, only the mechanical properties of the material were considered here. In practice, operational aspects such as dust, hydraulic conductivity and production constraints should also be taken into account. The mineralogy of the material is also critical when using crushed waste rocks. The samples studied in this paper were considered non-reactive (<1% pyrite and 3% calcite) but this should be further investigated.

The maximum grain size in this study was 25 mm, which is representative of the crushed waste rock produced at the Canadian Malartic mine. The effect of coarser particles should also be investigated. Because of the limited maximum size of particles tested in the CBR, other laboratory tests or field approaches should be considered. Cyclic tests should be considered to evaluate the performances through time and repeated loads that are present on the field. Weathering could also have an influence on the material strength properties over time and should be evaluated.

4.5 Conclusion

Valorizing waste rocks in mine infrastructures is economically and environmentally attractive. Crushed waste rock could be used in haul road surface course. Improved CBR, and thus greater stiffness and strength, of the surface course can have a positive impact on mine haul road performances. Rolling resistance can be reduced with decreased strains and a higher trafficability, resulting in operational gains, reduced fuel consumption and reduced greenhouse gas emissions. An exhaustive laboratory characterization was conducted on mine haul road surface course material used by a partner mine. The CBR test was used as an indicator of the performance of the material. The effect of the dry density of the material, the maximum grain diameter size and the fine particle content was investigated. The main conclusions of this study were:

- The CBR test is suitable to evaluate the strength properties of crushed waste rocks intended to be used in the surface course of mine haul roads.
- The CBR results increases linearly with the dry density with the material studied and within the range of densities encountered.
- A greater maximum grain size increases the CBR results for the test with material passing the 25 mm sieve and the 10 mm sieve.
- An optimum of fine particle (<0,08mm) content of 10% offers better performances and higher density for the material studied.

It is recommended to complement this study with additional laboratory and field tests to improve our understanding of waste rock materials in haul road construction. Not only the crushed waste rock intended for the surface course can be optimized, but waste rocks could also be used for the other layers of the road structure. Ongoing work at the Research Institute on Mines and the Environment (RIME) aim to optimize their properties and propose comprehensive recommendations to the end users.

4.6 Acknowledgements

This work had been carried out with the financial support from FRQNT and the industrial partners of the Research Institute on Mines and the Environment (http://irme.ca/). The authors also gratefully acknowledge support from the personnel at the Canadian Malartic Mine and Samuel Chénier from Polytechnique Montreal geotechnical laboratory.

4.7 References

Alias, R., Kasa, A., & Taha, M. (2014). Particle size effect on shear strength of granular materials in direct shear test. *International Journal of Civil, Environmental, and Structural, Construction and Architectural Engineering, 8*(11), 1098-1011.

Anochie-Boateng, J., Paige-Green, P., & Mgangira, M. (2009). *Evaluation of test methods for estimating resilient modulus of pavement geomaterials.* Paper presented at the Proceedings of the 28th Southern African Transport Conference (SATC 2009).

ASTM. (1998). C702-98 Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2006a). C136-06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2006b). D2434-68 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2012a). D698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2012b). D1557-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)). In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2014). D854-14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2015). C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2016). D-1883 Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils. In (Vol. 4). American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2017). D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). In. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

Atkinson, T. (1992). Design and layout of haul roads. In *Chapter 13.4-SME Mining Engineering Handbook* (pp. 1334-1342).

Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers: manual sur cédérom;* : Presses International Polytechnique.

Caicedoa, B., & Mendozaa, C. (2015). *Geotechnical behaviour of unpaved roads: understanding the CBR test.* Paper presented at the From Fundamentals to Applications in Geotechnics: Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15–18 November 2015, Buenos Aires, Argentina.

Caterpillar. (1999). *Caterpillar Performance Handbook, edition 30*. Peoria IL, USA.

Coffey, J., Nikraz, H., & Leek, C. (2018). Haul road rolling resistance and pavement condition. *Australian Journal of Civil Engineering, 16*(1), 12-22. doi:10.1080/14488353.2018.1443376

Coffey, J. P. (2015). *Mine haul road rolling resistance: influences and impacts.* Ph. D. Thesis, Curtin University.

de la Vergne, J. (2003). Hard Rock Miner's Handbook, Edition 5. North Bay: McIntosh Engineering.

Douglas, R. A., & Lawrence, K. (2014). *Optimizing haul road design–a challenge for resource development in Northern Canada.* Paper presented at the Transportation 2014: Past, Present, Future-2014 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada//Transport 2014: Du passé vers l'avenir-2014 Congrès et Exposition de'Association des transports du Canada.

González Farias, I., Araujo, W., & Ruiz, G. (2018). Prediction of California Bearing Ratio from Index Properties of Soils Using Parametric and Non-parametric Models. *Geotechnical and Geological Engineering, 36*(6), 3485-3498. doi:10.1007/s10706-018-0548-1

Hajiannia, A., Dorobati, M., Kasaeian, S., & Baghbadorani, S. (2016). Correlation between the results of the PLT and CBR tests to determine the elasticity modulus.

Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*: Presses inter Polytechnique.

Inan, I., Mampearachchi, W., & Udayanga, P. (2016). Effect of Fine Percentage on the Properties of Sub-base Material. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, 49*(4).

Islam, M. N., Siddika, A., Hossain, M. B., Rahman, A., & Asad, M. A. (2011). Effect of particle size on the shear strength behaviour of sands. *Australian Geomechanics, 46*(3), 75-86.

Kaufman, W. W., & Ault, J. C. (1977). *Design of surface mine haulage roads - a manual*. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Information Circular 8758.

Li, Y. (2013). Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72*(3-4), 371-381.

Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2017). *Pavement Engineering: Principles and Practice, Third Edition ; Rajib B. Mallick* (Third ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

McLemore, V. T., Fakhimi, A., van Zyl, D., Ayakwah, G. F., Anim, K., Boakye, K., . . . Gutierrez, L. A. (2009). Literature review of other rock piles: characterization, weathering, and stability. *New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, Socorro, NM*.

Mendoza, C., & Caicedo, B. (2018). Elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for granular material. *Road Materials and Pavement Design, 19*(8), 1796-1815.

Norgate, T., & Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production, 18*(3), 266-274.

Patel, R. S., & Desai, M. (2010). *CBR predicted by index properties for alluvial soils of South Gujarat.* Paper presented at the Proceedings of the Indian geotechnical conference, Mumbai.

Ramasubbarao, G., & Sankar, G. S. (2013). Predicting soaked CBR value of fine grained soils using index and compaction characteristics. *Jordan Journal of Civil Engineering, 159*(3164), 1-7.

Shirur, N. B., & Hiremath, S. G. (2014). Establishing relationship between CBR value and physical properties of soil. *IOSR journal of mechanical and civil engineering, 11*(5), 26-30.

Siswosoebrotho, B. I., Widodo, P., & Augusta, E. (2005). *The influence of fines content and plasticity on the strength and permeability of aggregate for base course material.* Paper presented at the Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.

Sukumaran, B., Kyatham, V., Shah, A., & Sheth, D. (2002). *Suitability of using california bearing ratio test to predict resilient modulus.* Paper presented at the Airport Technology Transfer Conference.

Talukdar, D. K. (2014). A Study of correlation between California Bearing Ratio (CBR) value with other properties of soil. *international Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4*(1), 59-562.

Tannant, D., & Regensburg, B. (2001). *Guidelines for mine haul road design*. Edmonton, Canada:School of Mining and Petroleum Engineering, University of Alberta.

Taskiran, T. (2010). Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Advances in Engineering Software, 41*(6), 886-892.

Thompson, R. J. (1996). *The design and management of surface mine haul roads*. (Ph.D. thesis), University of Pretoria,

Thompson, R. J. (2011). Design, construction, and maintenance of haul roads. *SME mining engineering handbook, 1*, 957-977.

Thompson, R. J. (2015). Principles of mine haul road design and construction. Version 2.0.15. http://mineravia.com/yahoo_site_admin/assets/docs/Principles_of_mine_haul_road_design_and_construction_v5_Sep_2015_RJTs.28192929.pdf.

Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2000a). The functional design of surface mine haul roads. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 100*(3), 169-180.

Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2000b). Selection parameters for mine haul road wearing course materials. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 14*(1), 1-17.

Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2006a). The impact of rolling resistance on fuel, speed and costs. *Continuous improvement case study, 2*(1), 68-75.

Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2006b). Selection and maintenance of mine haul road wearing course materials. *Mining Technology, 115*(4), 140-153.

Varadarajan, A., Sharma, K. G., Venkatachalam, K., & Gupta, A. K. (2003). Testing and Modeling Two Rockfill Materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129*(3), 206-218.

Wang, J.-J., Zhang, H.-P., Tang, S.-C., & Liang, Y. (2013). Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139*(11), 1994-1997.

Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*: John Wiley & Sons.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES ET DISCUSSION

5.1 Résultats de terrain

5.1.1 Analyses granulométriques

En plus des échantillons prélevés lors des trois essais au cône de sable, un échantillon de 30 kg a été prélevé à la position x= 6 m, y= 24 m (Figure 5.1). L'excavation réalisée pour cet échantillonnage était de forme conique avec une profondeur maximale de 25 cm. Des analyses granulométriques ont été réalisées sur ces quatre échantillons (Figure 5.2). Le détail des analyses granulométriques est présenté à l'annexe A.

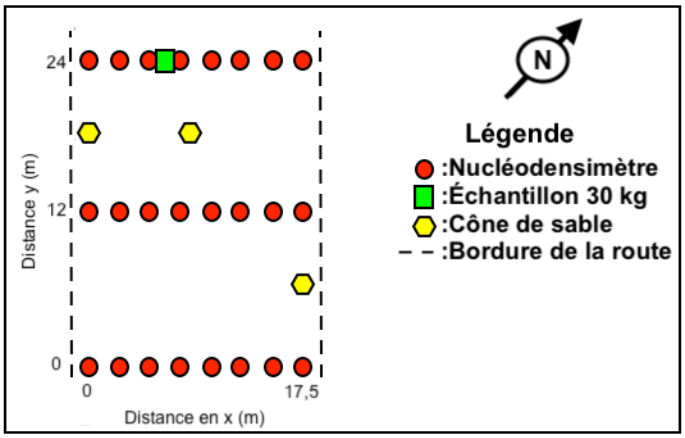


Figure 5.1: Plan des essais de densité en place réalisés sur le terrain.

Les analyses granulométriques indiquaient que le matériel prélevé sur les 10 cm supérieurs de la route (Cône de sable 1 à 3; Figure 5.2) était composé principalement de sable (40 à 45%) et de gravier avec un diamètre maximal de 37,5 mm (45 à 52%) et avec 8 à 12% de particules fines (d<0.08 mm). L'échantillon prélevé jusqu'à une profondeur de 25 cm était composé principalement de gravier (47%), de sable (26%) et de cailloux d'une taille maximale de 100 mm (21%). La teneur en particules fines était de 6%.

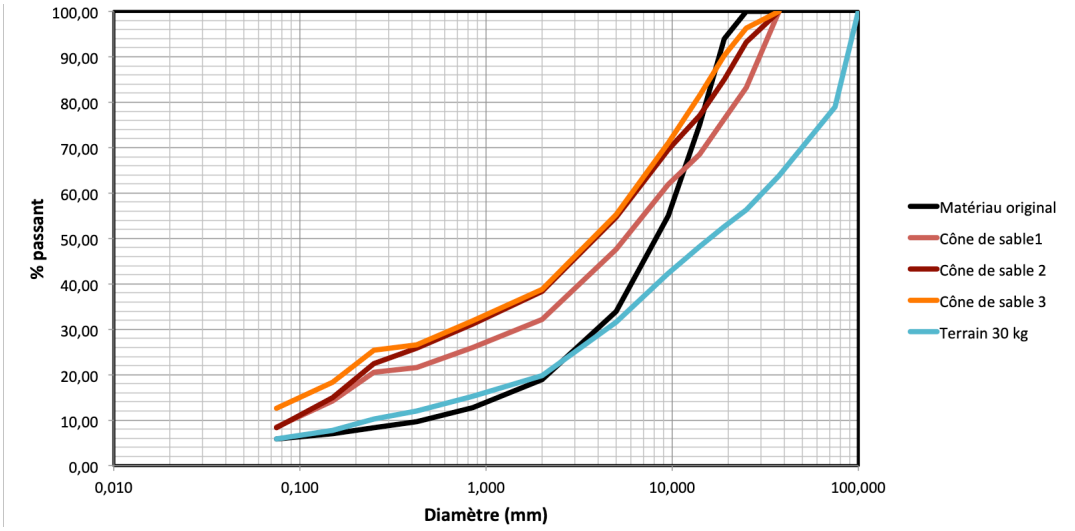


Figure 5.2: Courbes granulométriques des échantillons prélevés sur le terrain. La courbe granulométrique de la roche stérile concassée étudiée au laboratoire est indiquée en noir.

La distribution granulométrique des échantillons prélevés directement sur la structure de route était sensiblement différente de celle étudiée au laboratoire et prélevée dans la réserve de matériaux concassés (Matériau original, Figure 5.2). Les échantillons de la route avaient un diamètre maximal plus important, soit 37,5 mm pour les essais au cône de sable et 100 mm pour l'échantillon de 30 kg alors que les échantillons testés au laboratoire n'excédaient pas 25 mm de diamètre. Les échantillons prélevés lors des essais au cône de sable étaient représentatifs des 10 premiers centimètres à la surface de la structure de route. La proportion de sable et de particules fines dans cette couche superficielle était plus élevée que pour l'échantillon de 30 kg (Figure 5.2). L'échantillon de 30 kg (d_{max}=100 mm) représentait plus globalement la surface de roulement sur les premiers 25 cm de la structure de route et montrait une distribution granulométrique qui correspondait assez bien à celle du matériau original testé au laboratoire. Par contre, la taille maximale des grains de l'échantillon du terrain était plus élevée et son coefficient d'uniformité était d'environ 150 (contre 21 pour le matériau original étudié au laboratoire).

5.1.2 Densité en place

La densité sèche et humide ainsi que la teneur en eau ont été mesurées en 24 points (Figure 5.1) sur le tronçon de route étudiée et sur une profondeur de 30 cm au moyen d'un nucléodensimètre (section 3.5.1).

La densité sèche mesurée sur le terrain était généralement comprise entre 2250 et 2375 kg/m^3. Cependant, des valeurs de densité sèche plus faibles ont été mesurées sur les côtés de la route (x=0 m et x=17,5 m; Figure 5.3). Des densités plus importantes étaient à l'inverse observées à 2,5 m des bords ($\rho_{d\ moyen}$ = 2350 kg/m^3 pour x=2,5 m et 15 m; Figure 5.3). Les densités mesurées au centre de la route (x = 5 à 12,5 m) étaient plus faibles qu'à x = 2,5 m et x = 15 m, mais plus élevées qu'aux bords de la route et se rapprochaient de la moyenne observée de 2310 kg/m^3.

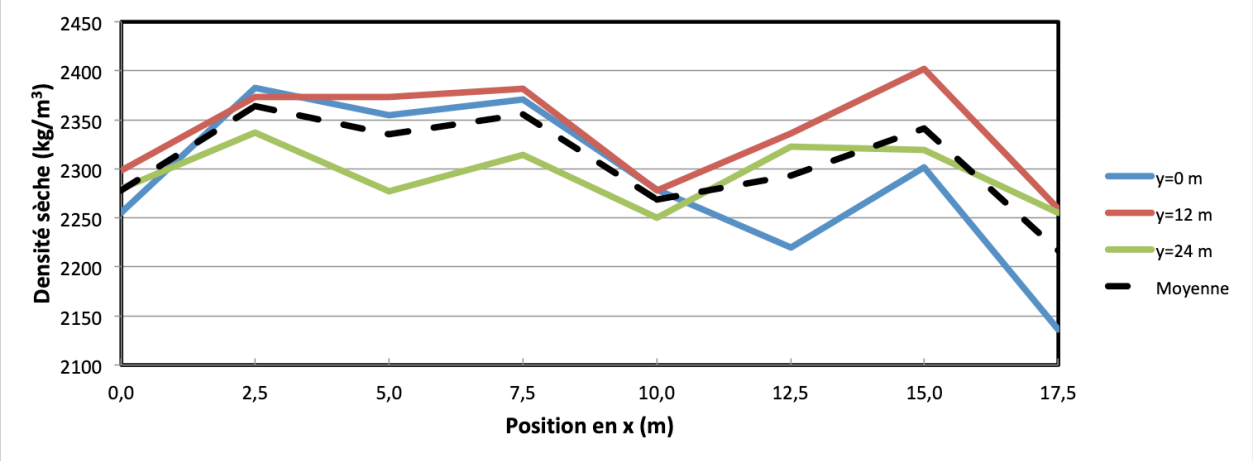


Figure 5.3: Densité sèche selon l'axe transversale à la route.

Trois essais au cône de sable ont également été réalisés aux positions (x=0m ; y=18m), (x=8,75m ; y=18m), (x=17,5m ; y=6m) (Figure 5.1; voir aussi section 3.5.2). Le détail de ces essais est présenté à l'annexe F. La densité sèche, humide et la teneur en eau ont été évaluées pour chaque échantillon (Tableau 5.1). Les volumes excavés étaient compris entre 750 et 975 cm^3 qui sont sensiblement plus faibles que le volume minimal recommandé pour le matériau étudié selon la norme ASTM D1556 (2015b) de 2125 cm^3. Les trois essais ont été réalisés jusqu'à une profondeur d'environ 10 cm.

Tableau 5.1: Résultats des essais au cône de sable.

No.	x (m)	y (m)	Densité sèche (kg/m^3)	Densité humide (kg/m^3)	Teneur en eau (%)
1	0,0	18	2132	2199	3,1
2	8,75	18	2240	2316	3,4
3	17,5	6	2298	2401	4,5

Tableau 5.2: Résultats des essais au nucléodensimètre, moyennes de 2 à 4 mesures par point.

x (m)	y (m)	Densité sèche (kg/m^3)	Densité humide (kg/m^3)	Teneur en eau (%)
0,0	0	2255	2291	2,5
2,5	0	2383	2449	2,8
5,0	0	2355	2426	3,0
7,5	0	2371	2431	2,6
10,0	0	2279	2348	3,0
12,5	0	2220	2282	2,8
15,0	0	2302	2382	3,5
17,5	0	2136	2205	3,3
0,0	12	2298	2363	2,9
2,5	12	2373	2430	2,4
5,0	12	2373	2445	3,1
7,5	12	2382	2448	2,8
10,0	12	2278	2351	3,2
12,5	12	2336	2412	3,3
15,0	12	2402	2501	4,1
17,5	12	2260	2331	3,2
0,0	24	2280	2355	3,3
2,5	24	2337	2417	3,4
5,0	24	2277	2337	2,7
7,5	24	2314	2365	2,2
10,0	24	2250	2307	2,6
12,5	24	2323	2390	2,9
15,0	24	2319	2383	2,8
17,5	24	2255	2316	2,7
Moyenne		2307	2373	3,0
Valeur minimale		2136	2205	2,2
Valeur maximale		2402	2501	4,1

Les densités sèches obtenues sur le terrain à partir de l'essai au nucléodensimètre étaient comprises entre des valeurs de 2136 et 2402 kg/m^3 (Tableau 5.2), celles mesurées au cône de sable entre 2132 et 2298 kg/m^3 (Tableau 5.1) et celles mesurées au laboratoire lors des essais CBR se situaient entre 2034 et 2541 kg/m^3 (section 4.3). Les deux méthodes utilisées sur le terrain ont permis d'obtenir des densités similaires, mais elles indiquaient aussi une certaine hétérogénéité de la compaction de la couche de roulement dans la zone étudiée. Le passage répété des camions au centre de la route (après sa construction et sa mise en service) semblait contribuer à augmenter significativement la densité en place des matériaux. Les différentes méthodes de compactions utilisées au laboratoire (STD, MOD et MOD81; section 3.3.3) ont permis de couvrir le spectre de densités mesurées sur le terrain.

5.2 Résultats complémentaires de laboratoire

5.2.1 Effet du niveau compaction sur les bris de particules

Huit analyses granulométriques ont été réalisées suite à des essais de compaction avec les niveaux d'énergie STD (2 analyses), MOD (4 analyses) et MOD81 (2 analyses) et comparées à la courbe granulométrique des roches stériles concassées du matériau original (Figure 5.4).

La différence entre les distributions granulométriques post-compaction pour les différentes énergies de compaction utilisée n'était pas significative et généralement inférieure à 5%. Les courbes granulométriques obtenues après compaction demeuraient ainsi proches et se croisaient parfois (Figure 5.4). La proportion de gravier composant le matériau original est passée de 66 à 58% lors de la compaction (indépendamment de l'énergie de compaction utilisée) alors que la proportion de sables est passée de 28 à 35%. La proportion de fines est restée stable et est passée de 6 à 7%. La compaction des roches stériles concassées lors des essais Proctor ou la préparation des essais CBR a donc entraîné une certaine diminution de la taille des grains et en particulier ceux de la taille des graviers. L'éloignement entre les deux courbes granulométriques était au maximum d'environ 10% pour un diamètre d'environ 10 mm, indiquant que c'était principalement les particules plus grossières qui se brisaient lors de la compaction. Cependant, les différences granulométriques restaient limitées et les échantillons testés ont été considérés représentatifs de la roche stérile concassée prélevée sur le terrain.

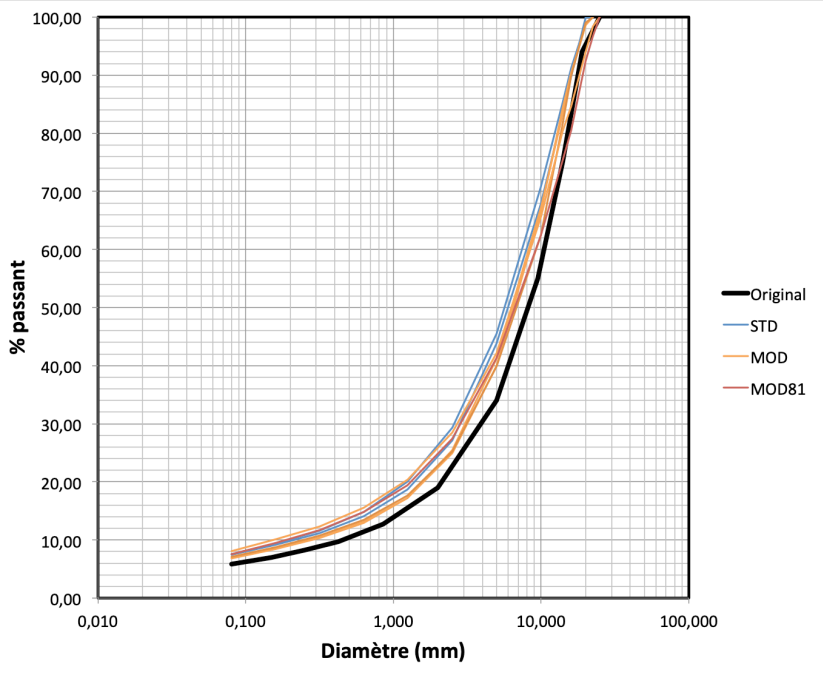


Figure 5.4: Courbes granulométriques mesurées sur les stériles concassés originaux et huit échantillons compactés avec les énergies STD, MOD et MOD81.

5.2.2 Courbes de compaction

Des essais de compaction Proctor Standard ASTM D698 (2012a), modifié ASTM D1557 (2012b) et avec l'énergie de compaction MOD81 (spécifique au projet) ont été réalisés et ont permis d'obtenir les teneurs en eau optimales ainsi que la densité sèche maximale (Tableau 4.1). Le détail des essais de compaction est présenté à l'annexe C. L'allure très angulaire et les pentes relativement élevées des courbes de compaction après l'optimum (Figure 5.5) sont typiques des matériaux grossiers comme les graviers, de même que les densités sèches maximales élevées et les relativement faibles teneurs en eau optimales (Horpibulsuk et al., 2008). Il a été difficile d'atteindre des teneurs en eau supérieures à 6-7% pendant les essais et le matériau avait tendance à perdre une partie de leur eau lors de la compaction. De nombreux essais ont donc été nécessaires afin de tracer la partie descendante des courbes Proctor du stérile concassé.

Les courbes Proctor pour les compactions MOD et MOD81 présentaient certains points qui dépassent légèrement la courbe de saturation maximale (Sr=100%). Cette ligne de saturation est évaluée à partir de la densité relative moyenne des grains solides du matériau et représente la masse volumique sèche du sol saturé pour une teneur en eau donnée. Cette ligne ne peut

physiquement pas être dépassée (Holtz et Kovacs, 1991). La faible différence entre les points expérimentaux et la courbe théorique (<0,6% de teneur en eau ou <1,5% de la densité sèche) pourrait être attribuée en partie aux incertitudes et éventuelles erreurs expérimentales. La méthodologie expérimentale employée pourrait aussi avoir eu un impact sur ces résultats. en effet, les essais Proctor Standard ASTM D698 (2012a) et modifié ASTM D1557 (2012b) ont été développés pour des matériaux dont le diamètre maximal est de 19 mm, soit plus petit que le diamètre maximal des grains des roches stériles concassées testées dans cette étude (d_{max} = 25 mm). Les essais Proctor tolèrent généralement une proportion de 30% de particules surdimensionnées (5% dans la présente étude) mais leur présence pourrait avoir diminué la précision des mesures.

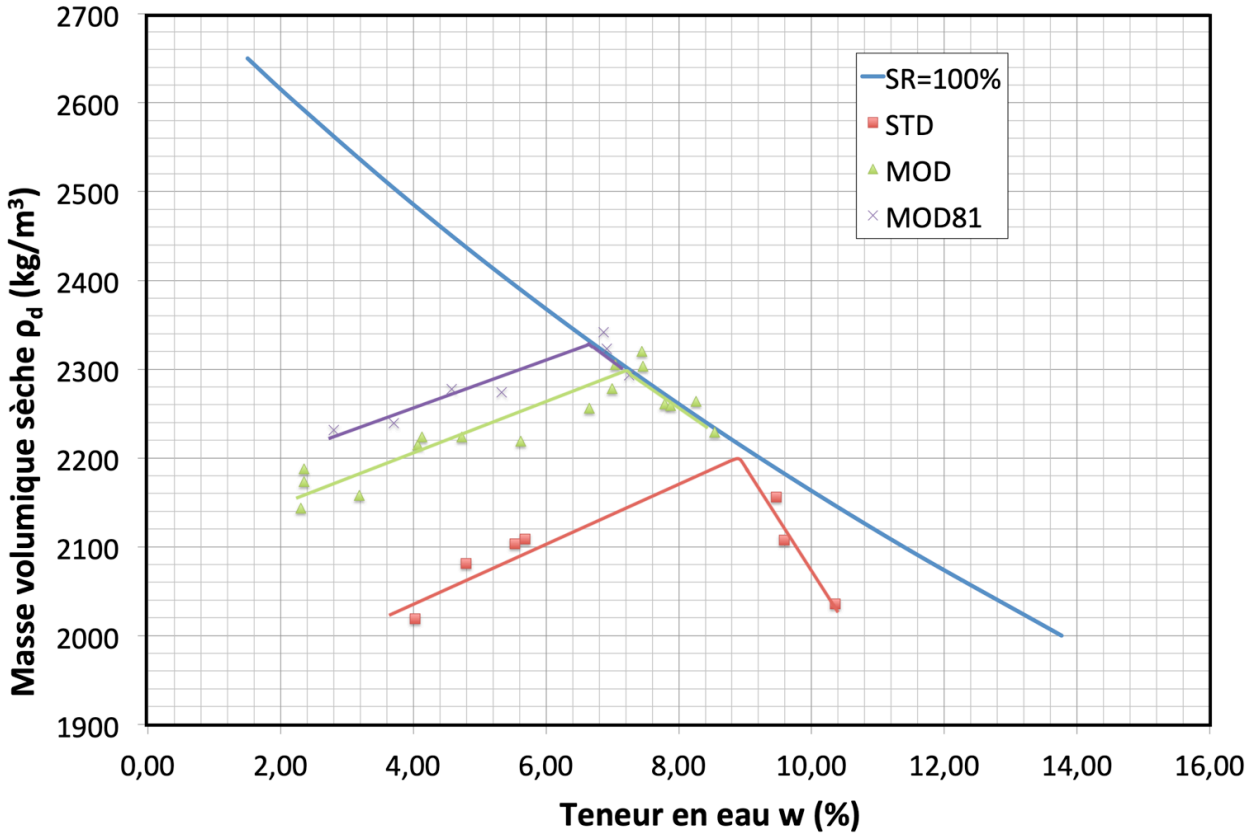


Figure 5.5: Essais de compaction selon les énergies de compaction STD, MOD et MOD81.

5.3 Évaluation préliminaire des contraintes et déformations dans une structure de route minière

5.3.1 Évaluation des déplacements verticaux maximum

L'estimation de la résistance au roulement des routes minières peut être réalisée à partir des déplacements verticaux sous les pneus d'un camion (Atkinson, 1992; Caterpillar, 1999). Le logiciel d'éléments finis Sigma/W (Geo-Slope Intl, 2018) a été utilisé afin d'évaluer les déplacements verticaux maximums sous un camion CAT 793F dans une route minière ayant une surface de roulement d'une épaisseur comprise entre 0,2 et 1 m et une couche de fondation de 4 m d'épaisseur. La condition frontière à la base du modèle simulait un sol d'infrastructure non-déformable (déplacements verticaux et horizontaux nuls).

Trois matériaux de surface de roulement ont été utilisés dans les simulations, soit le matériau DMAX10 avec une compaction STD (CBR_{moy} = 50%), le stérile concassé original avec une compaction MOD81 (CBR_{moy} = 177%) et le matériau PF10 avec une compaction MOD81 (CBR_{moy} = 258%). Leurs propriétés ont été déterminées à partir des essais réalisés au laboratoire (Tableau 5.3). La distribution des contraintes, des déformations verticales et des déplacements verticaux sous un véhicule de modèle CAT 793F ont été simulées (Figure 5.6, Figure 5.69 et Figure 5.8).

Tableau 5.3: Propriétés des matériaux.

Matériau, compaction	Poids unitaire (kN/m^3)	Coefficient de poisson ν (-)	Module E_{eff} (MPa)
DMAX10, STD	21,4	0,35	216
Original, MOD81	23,9	0,35	552
PF10, MOD81	26,5	0,35	616
Roche stérile	25	0,35	80

Seuls certains résultats, obtenus pour une surface de roulement de 60 cm d'épaisseur constituée du matériau PF10 avec une compaction MOD81 sont présentés ici. Les résultats pour les autres combinaisons de matériaux et de compaction indiquent les mêmes tendances et sont présentés à l'annexe G. Les contraintes simulées les plus élevées étaient observées dans la surface de

roulement et se dissipaient rapidement dans la couche de fondation (Figure 5.8). Cependant, les déformations étaient généralement maximales dans le matériau de fondation (Figure 5.7) puisque le matériau de la surface de roulement était significativement plus rigide dans les simulations présentées ici ($E_{Surface\ roulement}$= 616 MPa pour le matériau PF10 et $E_{fondation}$= 80 MPa). Les déplacements verticaux maximum ont été déterminés pour chacune des simulations et pour les différentes épaisseurs de surface de roulement et matériaux (Tableau 5.4). L'augmentation de la rigidité a généralement permis de réduire sensiblement les déplacements verticaux, mais la différence entre le pire et le meilleur cas étudié ne dépassait pas 0,37 cm.

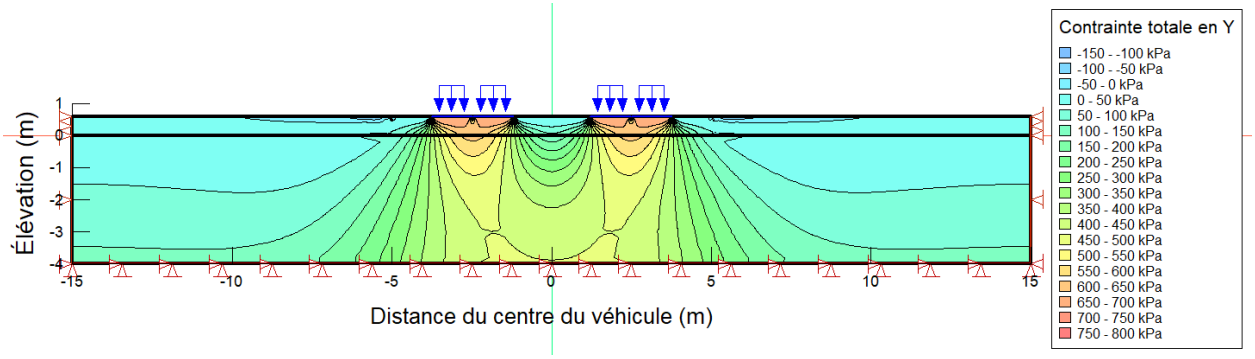


Figure 5.6: Isocontours des contraintes (kPa) avec une surface de roulement constituée du matériau PF10 avec compaction MOD81.

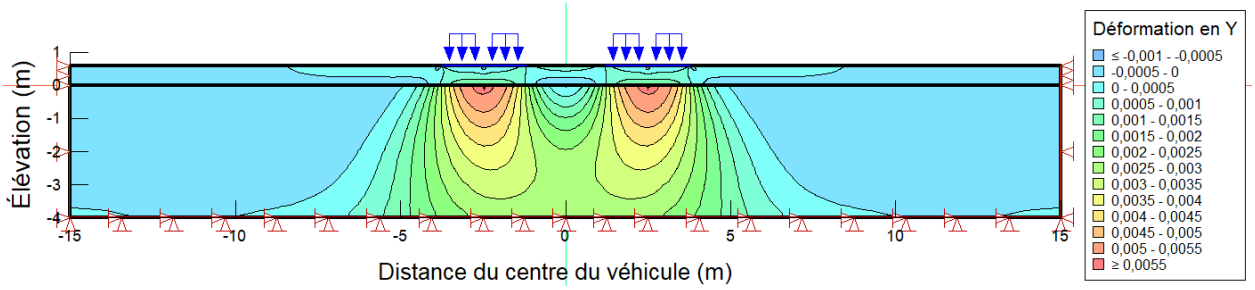


Figure 5.7 : Isocontours des déformations verticales ($m.m^{-1}$) avec une surface de roulement constituée du matériau PF10 avec compaction MOD81.

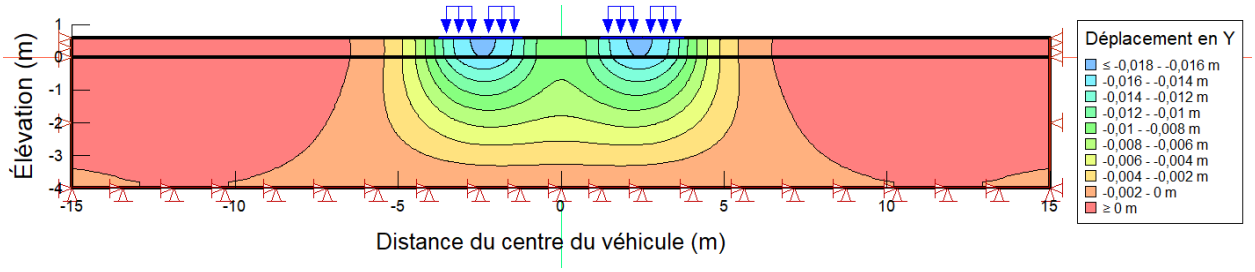


Figure 5.8 Isocontours des déplacements verticaux (m) avec une surface de roulement constituée du matériau PF10 avec compaction MOD81.

Tableau 5.4: Déplacements verticaux maximums (cm) à la surface selon les matériaux étudiés et l'épaisseur de la surface de roulement.

	Matériaux, compaction utilisée		
Épaisseur de la surface de roulement (cm)	**DMAX10, STD**	**Original, MOD81**	**PF10, MOD81**
20	-1,84	-1,81	-1,81
60	-1,80	-1,66	-1,64
100	-1,72	-1,49	-1,47

5.3.2 Évaluation de la résistance au roulement

La résistance au roulement pour les structures de route simulées a été estimée à partir des déplacements verticaux maximums (Tableau 5.4) et au moyen des équations 2-17 et 2-18 présentées à la section 2.3.3.1, (Tableau 5.5). La méthode de Thompson et Visser (2006) (équations 2-20 à 2-26) a également été employée pour obtenir des valeurs de résistance au roulement (Tableau 5.5). La vitesse des véhicules a été fixée à 40 km/h pour ces calculs, et le tonnage journalier a été estimé à 100kt pour une route venant d'être entretenue (D=0 jour). Les valeurs de coefficient de graduation (GC) ont été obtenues à partir des courbes granulométriques des matériaux et étaient respectivement de 39, 28 et 27 pour les matériaux DMAX10, original et PF10.

Les résistances au roulement ont été évaluées entre 2,64 et 3,29%. L'augmentation de la rigidité et les différences granulométriques entre les matériaux étudiés ont permis de réduire la résistance au roulement d'un minimum de 0,08% pour la méthode de Thompson et Visser (2006) et d'un maximum de 0,26% avec la formule proposée par Atkinson (1992).

Les résultats obtenus par la méthode de calcul de Thompson et Visser (2006) doivent toutefois être considérés avec précaution, car le modèle est fortement influencé par le produit de rétrécissement (Sp) et l'indice de plasticité et que son applicabilité pour des matériaux non-plastiques (comme ceux simulés ici) n'a pas été démontrée.

Tableau 5.5: Évaluation de la résistance au roulement (%) à partir des résultats de laboratoire.

	Matériaux, épaisseur, compaction utilisée		
Méthode d'évaluation de la résistance au roulement	**DMAX10, 20cm, STD**	**Original, 60cm, MOD81**	**PF10, 100cm, MOD81**
Atkinson (1992)	3,29	3,16	3,03
Caterpillar (1999)	3,10	3,00	2,88
Thompson et Visser (2006)	2,72	2,67	2,64

*le modèle de Thompson a été utilisé avec une vitesse V=40 km/h, un tonnage journalier kt=100kt pour une route directement après l'entretien soit D=0 jour

5.4 Valorisation des roches stériles concassées dans la surface de roulement des routes minières

5.4.1 Augmentation des performances par modification de la composition granulométrique du matériau de la surface de roulement

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude indiquent qu'il est possible d'améliorer la performance et d'augmenter la rigidité d'un matériau destiné à la surface de roulement en modifiant sa composition granulométrique et sa compaction. La rigidité d'un matériau est principalement liée à sa densité qui peut notamment être augmentée en employant une énergie de

compaction plus élevée (Figure 4.5). Cependant, dans les opérations minières, la compaction est généralement effectuée par les passages répétés des véhicules construisant et utilisant la route. La teneur en eau, le nombre de passages pour obtenir une compaction adéquate, la compaction en couches plus minces pour assurer une meilleure homogénéité sont rarement contrôlés en pratique (Tannant et Regensburg, 2001). L'hétérogénéité de la compaction de la surface de roulement a ainsi été constatée sur le tronçon de route étudié ici (section 5.1.2). Cette hétérogénéité pourrait être attribuée aux passages plus fréquents de véhicules à des endroits spécifiques ou être liée à l'utilisation d'un matériau de surface plus grossier dont les propriétés de compaction n'ont pas été analysées dans cette étude. Une autre façon d'améliorer la densité et donc la rigidité de la couche de roulement consisterait à utiliser des matériaux avec une teneur optimale en particules fines et une taille maximale des grains plus grossière. Un matériau comme PF10 (10% de particules fines) a ainsi permis d'augmenter significativement la densité du stérile concassé et donc sa performance attendue. L'utilisation d'un matériau dont les particules fines sont plastiques pourrait aussi contribuer à augmenter les performances de la surface de roulement tant au niveau de la rigidité que de la présence de défectuosités (Coffey et al., 2018). Toutefois, la valorisation des roches stériles sur un site limite le choix des matériaux à la nature géologique des formations et toutes les mines n'exploitent pas nécessairement des lithologies qui permettraient de produire des particules fines plastiques lors du concassage.

La variabilité de la granulométrie de la surface de roulement au cours de la vie de la route peut aussi avoir un impact sur ses performances. Ainsi, les analyses granulométriques réalisées après les essais Proctor (section 5.2.1) indiquent que les particules les plus grossières tendent à se briser lors de la compaction. Ce phénomène peut aussi être observé lors des passages d'équipements lourds. Par exemple, des couches horizontales dont les propriétés hydrogéologiques avaient été modifiées par le passage répété de la machinerie ont été observées dans des haldes à stériles (Aubertin et al., 2005). Les analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés sur une route en opération ont montré que les matériaux n'étaient pas homogènes dans les premiers 25 cm de profondeur du tronçon étudié. La taille maximale des grains dans les premiers 10 cm était d'environ 37,5 mm, mais pouvait atteindre 100 mm plus en profondeur. Une des explications pourrait être le bris des particules lors du passage répété de véhicules lourds. Dans le cas des routes, ce changement granulométrique pourrait être bénéfique en contribuant à

augmenter naturellement la teneur en particules fines et la densité d'une surface de roulement au cours de son utilisation.

Les résultats de laboratoire présentés au Chapitre 4 ont également suggéré qu'une augmentation de la taille maximale des grains pourrait permettre d'augmenter la densité sèche du matériau. Les résultats des essais de terrain suggèreraient cependant une limite à ce comportement puisque l'intervalle de densité mesurée in situ était semblable à celui mesuré au laboratoire même si les matériaux en place étaient significativement plus grossiers ($d_{max\ (in\ situ)}$ = 100 mm et $d_{max\ (laboratoire)}$ = 25 mm). D'autres raisons pourraient également expliquer cette différence de densité sèche, comme une minéralogie différente ou une compaction hétérogène.

5.4.2 Évaluation de la résistance au roulement à partir de la variation de rigidité

La résistance au roulement a été évaluée à partir des déplacements verticaux simulés au moyen du code par éléments finis Sigma/W (Geo-Slope Intl., 2018). Les propriétés des matériaux de la surface de roulement utilisés dans les simulations provenaient des résultats de laboratoire. La variation de résistance au roulement s'est révélée assez faible (<1%) entre les matériaux les plus rigides et les matériaux les moins rigides. Cependant, la résistance au roulement est aussi influencée par la rugosité de la route, c'est-à-dire la présence de défectuosités, qui contribuerait au moins autant que les déformations à l'augmentation de la résistance au roulement (Coffey et al., 2018). L'évaluation de la rugosité est toutefois plus subjective et qualitative et peu de méthodes permettent de quantifier son impact sur la résistance au roulement. L'évolution de la rugosité est également difficile à prédire et nécessite des observations régulières sur le terrain. Le choix d'un matériau avec une rigidité élevé aura cependant un effet positif en limitant l'apparition de défectuosités dans la route (Thompson et Visser, 2006b; Mallick et El-Korchi, 2017). Cet effet est toutefois difficilement quantifiable. Thompson et Visser (2000) ont proposé une approche visuelle pour évaluer le pointage de défectuosité (RDS : Roughness defect score) où la rugosité de la route est quantifiée par un système de points attribués à la fréquence et à la taille des différents types de défauts observés sur un tronçon de route (Thompson et Visser, 2000b; Thompson, 2015). L'évaluation directe de la résistance au roulement sur le terrain est une option généralement coûteuse (Tannant et Regensburg, 2001).

5.4.3 Discussion

Les résultats obtenus au laboratoire et sur le terrain lors de cette étude confirment les comportements observés dans des matériaux couramment utilisés dans les domaines du génie civil et minier. Les résultats obtenus sont toutefois valables uniquement pour les roches stériles concassées étudiées ici et ne peuvent être directement transposés pour d'autres roches stériles.

L'essai utilisé lors du programme de laboratoire pour définir la rigidité du matériau était le CBR non-trempé (*unsoaked CBR*). Les résultats de l'essai CBR peuvent être utilisés pour définir les propriétés de déformation et de rigidité du matériau, mais des essais complémentaires devraient être réalisés afin d'obtenir les modules d'élasticité et de résilience du matériau. Des essais de cisaillement direct, triaxiaux et triaxiaux cycliques pourraient par exemple compléter l'étude. De plus, des essais trempés permettraient de simuler des conditions moins optimistes. Des essais d'indice des vides minimum et maximum permettraient de compléter les informations obtenues sur les propriétés de compaction. Les essais de laboratoire se sont également concentrés sur la résistance mécanique des matériaux ; les comportements hydrogéologiques, la capacité de drainage des matériaux ou leur capacité de déviation de l'eau sont également des propriétés importantes qui devraient être prises en compte dans le choix d'un matériau destiné à la surface de roulement d'une route minière. Les résultats du chapitre 4 ont montré que l'augmentation de la teneur en particules fines jusqu'à un optimum de 10% permettait d'augmenter la rigidité. Une augmentation de la teneur en particules fines contribuerait cependant aussi à diminuer la perméabilité du matériau. Une surface de roulement moins perméable permettrait de dévier plus efficacement l'eau vers les infrastructures de drainage dans le cas où une pente transversale à la route serait présente. Sinon, la baisse de perméabilité du matériau de la surface de roulement entrainerait probablement des accumulations d'eau qui favoriserait la détérioration de la route. Les critères filtres devraient aussi être vérifiés afin de limiter la migration des particules fines dans la couche de fondation, ce qui pourrait réduire la conductivité hydraulique du matériau de la fondation dont une des fonctions principales et d'évacuer l'eau.

Les roches stériles étudiées provenaient de la mine Canadian Malartic et ne sont donc pas représentatives de toutes les roches stériles concassées. Les propriétés des stériles peuvent aussi changer lors des opérations, selon la lithologie de la roche et le sautage. La caractérisation des matériaux prélevés lors de la compagne de terrain montre une certaine variabilité selon les

besoins et la disponibilité des matériaux. Des essais devraient notamment être réalisés sur des matériaux concassés plus grossièrement puisque ce type de roches stériles est utilisé sur certains tronçons. De plus, les stériles étudiés sont considérés non-réactifs (<1% pyrite et 3% calcite), mais l'utilisation de roches stériles réactives dans les infrastructures routières pourraient avoir des impacts négatifs significatifs pour l'environnement et devrait être évitée.

Les conditions climatiques et les contraintes opérationnelles n'ont pas non plus été considérées dans cette étude. Les variations climatiques saisonnières peuvent avoir un impact significatif sur les conditions des routes minières. Les périodes de dégel en particulier sont critiques pour l'endommagement et l'affaiblissement des routes en climat froid (Simonsen et Isacsson, 1999; Tannant et Regensburg, 2001). L'altération des matériaux due aux intempéries pourrait aussi réduire la résistance des roches stériles et devrait être mieux étudiée.

Enfin, plusieurs hypothèses ont été posées dans cette étude afin de réaliser les simulations numériques utilisées pour prédire la résistance au roulement. D'abord, la prédiction de la résistance au roulement a été réalisée uniquement à partir des déplacements verticaux à la surface de la structure de route en négligeant la rugosité de la route (c'est-à-dire la présence de défectuosité dans la surface de roulement). Ensuite, le modèle de comportement des matériaux utilisé était élastique linéaire. L'utilisation de ce modèle simple permet de prédire des déformations directes sous une charge, mais ne considère pas les changements qui peuvent se produire dans la structure interne du sol, comme un réarrangement des grains suite aux passages répétés des véhicules. Des modèles plus avancés pourraient permettre de prendre en compte ces phénomènes.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La valorisation des roches stériles dans la construction d'infrastructures minières pourrait permettre de réduire la taille des haldes à stériles tout en répondant aux besoins des opérations minières en matériaux de construction. Les roches stériles concassées sont souvent utilisées pour construire la surface de roulement des routes minières puisque c'est un matériau disponible en grande quantité et peu coûteux. Le matériau utilisé doit permettre de minimiser l'apparition de défectuosités sur la route et favoriser la réduction des déformations sous les charges. Un matériau de surface de roulement performant permet la construction de routes minières durables où la conduite est confortable et sécuritaire et la consommation de carburant réduite.

L'objectif principal de cette étude était de définir les propriétés optimales de roches stériles concassées afin de maximiser les performances de la surface de roulement. Des roches stériles concassées ont été échantillonnées sur le site de la mine Canadian Malartic (Abitibi, Québec) et caractérisées au laboratoire. La granulométrie, la densité relative des grains solides, et la conductivité hydraulique saturée ont été mesurées. La densité sèche maximale et la teneur en eau optimale ont été déterminées pour trois niveaux d'énergie de compaction (STD, MOD et MOD81). L'essai de portance californien (CBR) a été utilisé comme indicateur de la rigidité. Le matériau original et différentes variantes granulométriques ont été testés. Des mesures de densités ont également été réalisées sur le terrain et comparées aux densités obtenues au laboratoire. Enfin, des simulations ont été réalisées au moyen du code Sigma/W (Geo-Slope Intl., 2018) afin d'estimer les déplacements verticaux à la surface d'une route minière et la résistance au roulement.

La roche stérile concassée testée dans cette étude était un gravier sableux bien étalé (GW-GM; ASTM D2487, 2017) avec une teneur en particules fines (d<0,08mm) d'environ 6% et un diamètre des grains maximal de 25 mm. Le coefficient d'uniformité (C_U) était égal à 21 et le coefficient de courbure (C_C) à 3. La densité relative des grains solides (D_r ou G_s) était comprise entre 2,73 et 2,77 pour les grains ayant un diamètre inférieur à 4,75 mm et entre 2,72 et 2,76 pour les grains ayant un diamètre supérieur à 4,75 mm. La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) était d'environ 1×10^{-4} m/s. Les densités sèches maximales (ρ_{dmax}) et les teneurs en eau optimales (w_{opt}) mesurées étaient respectivement de 2200, 2320 et 2340 kg/m^3 et de 9,0, 7,2 et 6,8% pour les compactions STD, MOD et MOD81.

Des essais CBR ont été réalisés sur le matériau original avec des teneurs en eau variant entre 3,0 et 7,3% et des énergies de compaction STD, MOD et MOD81. Un matériau dont les grains ont un diamètre maximal de 10 mm (DMAX10) a été reconstitué à partir du matériau original et testé avec l'essai CBR avec les trois mêmes niveaux d'énergie. Des essais CBR ont également été réalisés sur des échantillons de roches stériles concassées avec une teneur en particules fines comprise entre 2 et 14%. Les modules d'élasticité ont été estimés à partir des résultats de l'essai CBR et au moyen des corrélations proposées dans la littérature, pour ensuite être utilisés dans le logiciel Sigma/W (Geo-Slope Intl., 2018) afin d'obtenir les déplacements verticaux maximum dans une structure de route minière typique. Ces résultats ont permis d'obtenir des estimations de la résistance au roulement d'une surface de roulement constituée des différents matériaux étudiés. Lors de la campagne d'investigation sur le terrain, des essais au cône de sable et au nucléodensimètre ont été réalisés afin de confirmer la validité de l'intervalle de densité sèche mesurée au laboratoire.

Suite aux travaux de laboratoire, sur le terrain et les simulations numériques, les principales conclusions du projet sont :

- L'essai CBR est adéquat pour évaluer la variation de la rigidité du matériau destiné à être utilisé dans la surface de roulement de routes minières.
- Les techniques de compaction utilisées au laboratoire ont permis d'obtenir des densités sèches comparables à celles mesurées sur le terrain
- Les résultats de l'essai CBR augmentent de manière linéaire avec la densité sèche pour le matériau étudié dans les intervalles de densités testés.
- L'augmentation de la taille maximale des grains de 10 à 25 mm contribue à augmenter l'indice CBR.
- L'augmentation de la teneur en particules fines ($d<0,08mm$) permet d'augmenter la densité et la rigidité du matériau étudié jusqu'à un optimum de 10%. La rigidité diminue et la densité atteint une valeur stable pour des teneurs en particules fines dépassant l'optimum.
- La résistance au roulement calculée à partir des déplacements verticaux obtenus à l'aide de simulations numériques peut être réduite d'une valeur maximale de 0,26% en

optimisant la distribution granulométrique et la compaction parmi les différents matériaux étudiés.

Cette étude s'est concentrée sur les propriétés mécaniques du matériau utilisé dans la surface de roulement des routes minières. Afin d'optimiser les performances, le matériau doit être dense, rigide et constitué de grains résistants qui permettront une bonne durabilité de la route. Il doit aussi permettre de drainer efficacement l'eau et de réduire la génération de poussières. L'essai CBR a été utilisé dans cette étude comme critère de performance et a permis d'analyser plusieurs paramètres (teneur en particules fines, taille maximale des grains, degré de compaction). L'essai CBR reproduit cependant difficilement les conditions de terrain. Les essais suivants sont donc également recommandés afin d'améliorer les connaissances sur les roches stériles concassées utilisées dans la surface de roulement des routes minières afin d'en optimiser la réutilisation:

- Des essais CBR trempés supplémentaires pourraient être réalisés afin d'obtenir les résultats pour les conditions les moins favorables.
- Des essais triaxiaux, triaxiaux cycliques et de cisaillement direct devraient être réalisés afin d'obtenir le module de Young et le module de résilience directement pour le matériau étudié et pour valider les corrélations proposées dans la littérature.
- Des essais sur des matériaux concassés provenant d'autres mines et avec des diamètres des grains maximaux allant jusqu'à 40 mm permettraient d'évaluer l'effet de la minéralogie et de granulométries plus étalées sur la performance de la surface de roulement.
- Des essais de terrain, par exemple le CBR de terrain ou le déflectomètre à masse tombante, pourraient permettre d'obtenir des propriétés de résistance mécanique des matériaux en considérant l'hétérogénéité et les conditions observées sur les différents sites.

Par ailleurs, il est également recommandé d'étudier les aspects suivants afin d'optimiser les structures de route dans leur ensemble :

- Caractériser les stériles tout-venant utilisés dans les couches de fondations et de sous-fondation des routes minières, plus précisément définir leur module de Young ou de résilience directement à partir d'essais de laboratoire.
- Étudier le comportement de la structure pendant la période de dégel sur le terrain afin d'évaluer l'impact de l'augmentation de la teneur d'eau sur la variation de la composition

granulométrique de la surface de roulement, de ses propriétés géotechniques et de l'apparition de défauts sur la route.

RÉFÉRENCES

AASHTO. (1993). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part 1 Specifications*. Washington D.C. USA: Sixteenth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Abraha, D. G. (2005). *Sulfur Concrete Haul Roads at SUNCOR Oil Sands Mines.* (Mémoire de maitrise, University of Alberta).

Alias, R., Kasa, A. et Taha, M. (2014). Particle size effect on shear strength of granular materials in direct shear test. *International Journal of Civil, Environmental, and Structural, Construction and Architectural Engineering, 8*(11), 1098-1011.

Amos, R. T., Blowes, D. W., Bailey, B. L., Sego, D. C., Smith, L. et Ritchie, A. I. M. (2015). Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry, 57*, 140-156.

Andjelkovic, V., Pavlovic, N., Lazarevic, Z. et Radovanovic, S. (2018). Modelling of shear strength of rockfills used for the construction of rockfill dams. *Soils and Foundations, 58*(4), 881-893.

Anochie-Boateng, J., Paige-Green, P. et Mgangira, M. (2009). *Evaluation of test methods for estimating resilient modulus of pavement geomaterials*. Communication présentée à Proceedings of the 28th Southern African Transport Conference (SATC 2009) (vol. 6, p. 9).

ASTM. (1998). *C702-98 Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2006a). *C136-06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2006b). *D2434-68 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2006c). *D2434-68 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)* American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2012a). *D698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3))*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2012b). *D1557-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3))*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2014a). *C131/C131M Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2014b). *D854-14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2015a). *C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2015b). *D1556/D1556M-15e1 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2016). *D-1883 Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2017a). *D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2017b). *D6938-17a Standard Test Methods for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

ASTM. (2017c). *D-6928 Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.

Atkinson, T. (1992). Design and layout of haul roads. Dans *Chapter 13.4-SME Mining Engineering Handbook* (p. 1334-1342).

Aubertin, M. (2013). *Waste rock disposal to improve the geotechnical and geochemical stability of piles.* Communication présentée à Proceedings of the world mining congress, 11-15 août 2013, Montreal, Canada.

Aubertin, M., Bussière, B. et Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers: manual sur cédérom;* : Presses International Polytechnique.

Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Chouteau, M., Anterrieu, O., Hernandez, M. A., Chapuis, R. P., Bussière, B., Lahmira, B. et Lefebvre, R. (2008). *Caractérisation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles*. Comptes Rendus du Symposium 2008 sur l'environnement et les mines. Montréal: CIM.

Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussière, B., Chapuis, R. P. et Chouteau, M. (2005). *Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles.* Communication présentée à Proceedings of the Symposium sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, CD-Rom, CIM.

Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B. et James, M. (2015). *Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA.* Communication présentée à Symposium 2015 sur l'environnement et les mines, 14-17 juin 2017, Rouyn-Noranda.

Azam, S., Wilson, G. W., Fredlund, D. G. et Van Zyl, D. (2009). *Geotechnical characterization of mine waste rock.* Communication présentée à Proceedings of the Seventh International

Conference Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Octobre 2009, Alexandrie, Égypte.

Azam, S., Wilson, G. W., Herasymuik, G., Nichol, C. et Barbour, L. S. (2006). Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66*(3), 259-268.

Barbour, S., Hendry, M., Smith, J., Beckie, R. et Wilson, G. (2001). A research partnership program in the mining industry for waste rock hydrology. *University of Saskatchewan, Canada*.

Barton, N. (2008). Shear strength of rockfill, interfaces and rock joints, and their points of contact in rock dump design. *Rock dumps*, 3-17.

Benarchid, Y., Taha, Y., Argane, R. et Benzaazoua, M. (2018). Application of Quebec recycling guidelines to assess the use feasibility of waste rocks as construction aggregates.

Blight, G. (2009). *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities* : CRC Press.

Boudrias, G. (2018). *Évaluation numérique et expérimentale du drainage et de la consolidation de résidus miniers à proximité d'une inclusion de roches stériles.* (École Polytechnique de Montréal).

Bowles, J. E. (1984). *Physical and geotechnical properties of soils*. Second edition. McGraw-Hill Book Company. New York, USA.

Bridgestone. (2016). *Off-The-Road data book*. Off-The-Road Department, Bridgestone Corporation, Tokyo, Japon.

Caicedoa, B. et Mendozaa, C. (2015). *Geotechnical behaviour of unpaved roads: understanding the CBR test.* Communication présentée à From Fundamentals to Applications in Geotechnics: Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15–18 November 2015, Buenos Aires, Argentina (p. 95).

Caterpillar. (1999). *Caterpillar Performance Handbook, edition 30*. Peoria IL, USA.

Caterpillar. (2012). Tombereau pour applications minières 793F. Peoria, IL: Caterpillar.

Coffey, J., Nikraz, H. et Leek, C. (2018). Haul road rolling resistance and pavement condition. *Australian Journal of Civil Engineering, 16*(1), 12-22.

Coffey, J. P. (2015). *Mine haul road rolling resistance: influences and impacts.* (Thèse de Doctorat, Curtin University).

Coulibaly, Y., Belem, T. et Cheng, L. Z. (2016). *Numerical analysis of Westwood Mine tailings embankment stability during the restoration phase.* Communication présentée à 3rd International Symposium on Mine Safety Science and Engineering (p. 419-425).

CSRA. (1986). TMH1: Standard Methods of Testing Road Construction Materials : Committee of State Road Authorities, National Institute for Transport and Road Research Pretoria.

Das, B. M. (2017). *Shallow foundations: bearing capacity and settlement* : CRC press.

de la Vergne, J. (2003). Hard Rock Miner's Handbook, Edition 5. North Bay: McIntosh Engineering.

Dotto, M. S. (2014). *Impact of hauler scale in mine planning.* (Mémoire de maitrise, University of Alberta).

Douglas, R. A. (2016). *Low-volume road engineering: design, construction, and maintenance* : CRC Press.

Douglas, R. A. et Lawrence, K. (2014). *Optimizing haul road design–a challenge for resource development in Northern Canada.* Communication présentée à Transportation 2014: Past, Present, Future-2014 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada//Transport 2014: Du passé vers l'avenir-2014 Congrès et Exposition de'Association des transports du Canada.

Duncan, J. M. et Bursey, A. (2013). Soil modulus correlations. Dans *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty: Honoring Fred H. Kulhawy* (p. 321-336).

El Mkadmi, N., Aubertin, M. et Li, L. (2013). Effect of drainage and sequential filling on the behavior of backfill in mine stopes. *Canadian Geotechnical Journal, 51*(1), 1-15.

Fala, O. (2008). *Analyses des conditions d'écoulement non saturé dans les haldes à stériles.* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal).

Fox, Z. et Carraro, J. A. H. (2011). *Peak and critical-state shear strength of mine waste rock.* Communication présentée à 14th International Conference on Tailings and Mine Waste'10, October 17, 2010 - October 20, 2010, Vail, CO, United states (p. 79-90).

Franks, D. M., Boger, D. V., Côte, C. M. et Mulligan, D. R. (2011). Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy, 36*(2), 114-122.

Frossard, É., Hu, W., Dano, C. et Hicher, P. Y. (2012). Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects. *Géotechnique, 62*(5), 415-427.

Geo-Slope. (2013). Stress-deformation modeling with SIGMA/W 2007: An Engineering Methodology. *GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alta*.

González Farias, I., Araujo, W. et Ruiz, G. (2018). Prediction of California Bearing Ratio from Index Properties of Soils Using Parametric and Non-parametric Models. *Geotechnical and Geological Engineering, 36*(6), 3485-3498.

Hajiannia, A., Dorobati, M., Kasaeian, S. et Baghbadorani, S. (2016). Correlation between the results of the PLT and CBR tests to determine the elasticity modulus.

Holtz, R. D. et Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique* : Presses Polytechnique.

Horpibulsuk, S., Katkan, W. et Naramitkornburee, A. (2008). Modified Ohio's curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse-and fine-grained soils. *Geotechnical Testing Journal, 32*(1), 64-75.

Inan, I., Mampearachchi, W. et Udayanga, P. (2016). Effect of Fine Percentage on the Properties of Sub-base Material. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, 49*(4).

Islam, M. N., Siddika, A., Hossain, M. B., Rahman, A. et Asad, M. A. (2011). Effect of particle size on the shear strength behaviour of sands. *Australian Geomechanics, 46*(3), 75-86.

James, M., Aubertin, M. et Bussière, B. (2013). *On the use of waste rock inclusions to improve the performance of tailings impoundments.* Communication présentée à Proceedings of

the 18th International Conference Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France (p. 2-6).

Kalonji, A. K. (2014). *Étude du comportement hydrogéologique de couvertures avec effet de barrière capillaire faites entièrement de matériaux miniers.* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).

Kaufman, W. W. et Ault, J. C. (1977). *Design of surface mine haulage roads - a manual*. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Information Circular 8758.

Knapton, J. (1988). *The sructural design of heavy duty pavements for ports and other industries*. British Ports Federation. London, England.

Korkiala-Tanttu, L. (2009). *Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials*. [Tierakenteen sitomattomien materiaalien pysyvien muodonmuutosten laskentamenetelmä]. Espoo 2008. VTT Publications 702. 92

Kumar, V. (2000). *Design and construction of haul roads using fly ash.* (Mémoire de maitrise, University of Alberta).

L. Bolduc, F. et Aubertin, M. (2014). Numerical investigation of the influence of waste rock inclusions on tailings consolidation. *Canadian Geotechnical Journal, 51*(9), 1021-1032.

Lahmira, B., Lefebvre, R., Aubertin, M. et Bussière, B. (2016). Effect of heterogeneity and anisotropy related to the construction method on transfer processes in waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology, 184*, 35-49.

Larochelle, C. (2018). *Utilisation de stériles générateurs d'acide comme couche de bris capillaire dans une couverture avec effets de barrière capillaire.* (École Polytechnique de Montréal).

Leps, T. M. (1970). Review of shearing strength of rockfill. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM 4, 1159-1170

Lévesque, I. (2015). *Caractérisation hydrogéotechnique des roches stériles tamisées et compactées à l'aide d'essais de laboratoire à une échelle intermédiaire.* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).

Li, Y. (2013). Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72*(3-4), 371-381.

Linero, S., Palma, C. et Apablaza, R. (2007). *Geotechnical characterization of waste material in very high dumps with large scale triaxial testing.* Communication présentée à Proceedings of International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics (p. 59-75).

Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts* (3^{e} éd.). Berlin: Springer.

Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *Elements, 7*(6), 405-410.

Maknoon, M. (2016). *Slope Stability Analyses of Waste Rock Piles Under Unsaturated Conditions Following Large Precipitations.* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal).

Maknoon, M. et Aubertin, M. (2013). *An investigation of the slope stability of unsaturated waste rock piles*. Communication présentée à GeoMontreal 2013: Geosciences for Sustainability, 66th CGS Conference, Montréal, Qc.

Mallick, R. B. et El-Korchi, T. (2017). *Pavement Engineering: Principles and Practice, Third Edition ; Rajib B. Mallick* (Third[e] éd.). Boca Raton, FL: CRC Press.

McCarthy, D. F. (1977). *Essentials of soil mechanics and foundations* : Reston Publishing Company.

McLemore, V. T., Fakhimi, A., van Zyl, D., Ayakwah, G. F., Anim, K., Boakye, K., Ennin, F., Felli, P., Fredlund, D. et Gutierrez, L. A. (2009). Literature review of other rock piles: characterization, weathering, and stability. *New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, Socorro, NM*.

Mendoza, C. et Caicedo, B. (2018). Elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for granular material. *Road Materials and Pavement Design, 19*(8), 1796-1815.

Morgan, J., Tucker, J. et McInnes, D. (1994). *A mechanistic design approach for unsealed mine haul roads*. Communication présentée à 17th ARRB conference, Gold Coast, Queensland, 15-19 August 1994; Proceedings; volume 17, part 2.

Norgate, T. et Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production, 18*(3), 266-274.

Okamoto, T. (2004). *Evaluation of in-situ strength of rock fill material taking into account of in-situ density and strength by laboratory test.* Communication présentée à Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering - New Developments in Dam Engineering, October 18, 2004 - October 20, 2004, Nanjing, China (p. 693-704).

Ovalle, C., Frossard, E., Dano, C., Hu, W., Maiolino, S. et Hicher, P.-Y. (2014). The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data. *Acta Mechanica, 225*(8), 2199-2216.

Oyanguren, P. R., Nicieza, C. G., Fernandez, M. I. A. et Palacio, C. G. (2008). Stability analysis of Llerin Rockfill Dam: An in situ direct shear test. *Engineering Geology, 100*(3-4), 120-130.

Pabst, T. (2011). *Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés.* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal).

Paige-Green, P. (1989). *The influence of geotechnical properties on the performance of gravel wearing course materials.* (Thèse de Doctorat, University of Pretoria).

Patel, R. S. et Desai, M. (2010). *CBR predicted by index properties for alluvial soils of South Gujarat.* Communication présentée à Proceedings of the Indian geotechnical conference, Mumbai (p. 79-82).

Peregoedova, A. (2012). *Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire.* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).

Piteau, A. E. L. (1991). *Mined Rock and Overburden Piles, Investigation and Design Manual, Interim Guidelines*. prepared for the B.C. Mine Dump Committee. Piteau Associates Engineering Ltd.

Ramasubbarao, G. et Sankar, G. S. (2013). Predicting soaked CBR value of fine grained soils using index and compaction characteristics. *Jordan Journal of Civil Engineering, 159*(3164), 1-7.

Sawangsuriya, A. et Edil, T. (2016). Evaluation of Soil Stiffness and Strength for Quality Control of Compacted Earthwork. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, 10*(2), 114-118.

Shirur, N. B. et Hiremath, S. G. (2014). Establishing relationship between CBR value and physical properties of soil. *IOSR journal of mechanical and civil engineering, 11*(5), 26-30.

Simonsen, E. et Isacsson, U. (1999). Thaw weakening of pavement structures in cold regions. *Cold regions science and technology, 29*(2), 135-151.

Siswosoebrotho, B. I., Widodo, P. et Augusta, E. (2005). *The influence of fines content and plasticity on the strength and permeability of aggregate for base course material.* Communication présentée à Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (vol. 5, p. 845-856).

Statistique-Canada. (2012). *L'activité humaine et l'environnement: La gestion des déchets au Canada*. : Statistique Canada. Division des comptes et de la statistique de l'environnement.

Sukumaran, B., Kyatham, V., Shah, A. et Sheth, D. (2002). *Suitability of using california bearing ratio test to predict resilient modulus.* Communication présentée à Airport Technology Transfer Conference (p. 1-9).

Talukdar, D. K. (2014). A Study of correlation between California Bearing Ratio (CBR) value with other properties of soil. *international Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4*(1), 59-562.

Tannant, D. et Regensburg, B. (2001). *Guidelines for mine haul road design*. Edmonton, Canada:School of Mining and Petroleum Engineering, University of Alberta.

Taskiran, T. (2010). Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Advances in Engineering Software, 41*(6), 886-892.

Thompson, R. (2009). Haul Road Design Considerations. *Engineering and Mining Journal, 210*(5), 36-37,40-43.

Thompson, R., Peroni, R. et Visser, A. T. (2019). *Mining Haul Roads: Theory and Practice* : CRC Press.

Thompson, R. et Visser, A. (1996). An overview of the structural design of mine haulage roads. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 96*(1), 29-37.

Thompson, R. J. (1996). *The design and management of surface mine haul roads.* (Ph.D. thesis, University of Pretoria).

Thompson, R. J. (2011). Design, construction, and maintenance of haul roads. *SME mining engineering handbook, 1*, 957-977.

Thompson, R. J. (2015). Principles of mine haul road design and construction. Version 2.0.15. http://mineravia.com/yahoo_site_admin/assets/docs/Principles_of_mine_haul_road_design_and_construction_v5_Sep_2015_RJTs.28192929.pdf.

Thompson, R. J. et Visser, A. T. (1997). A mechanistic structural design procedure for surface mine haul roads. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 11*(3), 121-128.

Thompson, R. J. et Visser, A. T. (2000a). The functional design of surface mine haul roads. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 100*(3), 169-180.

Thompson, R. J. et Visser, A. T. (2000b). Selection parameters for mine haul road wearing course materials. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 14*(1), 1-17.

Thompson, R. J. et Visser, A. T. (2006a). The impact of rolling resistance on fuel, speed and costs. *Continuous improvement case study, 2*(1), 68-75.

Thompson, R. J. et Visser, A. T. (2006b). Selection and maintenance of mine haul road wearing course materials. *Mining Technology, 115*(4), 140-153.

Thompson, R. J. et Visser, A. T. (2007). Selection, performance and economic evaluation of dust palliatives on surface mine haul roads. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 107*(7), 435-450.

Varadarajan, A., Sharma, K. G., Venkatachalam, K. et Gupta, A. K. (2003). Testing and Modeling Two Rockfill Materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129*(3), 206-218.

Wang, J.-J., Zhang, H.-P., Tang, S.-C. et Liang, Y. (2013). Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139*(11), 1994-1997.

Williams, D. J., Taylor, G. et Herbert, D. (2015). *An attempt to estimate waste rock and soil shear strengths based upon strengths of intact rock cores.* Communication présentée à Tailings and mine Waste 2015.

Yang, P. (2016). *Investigation of the Geomechanical Behavior of Mine Backfill and its Interaction with Rock Walls and Barricades.* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal).

Yoder, E. J. et Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design* : John Wiley & Sons.

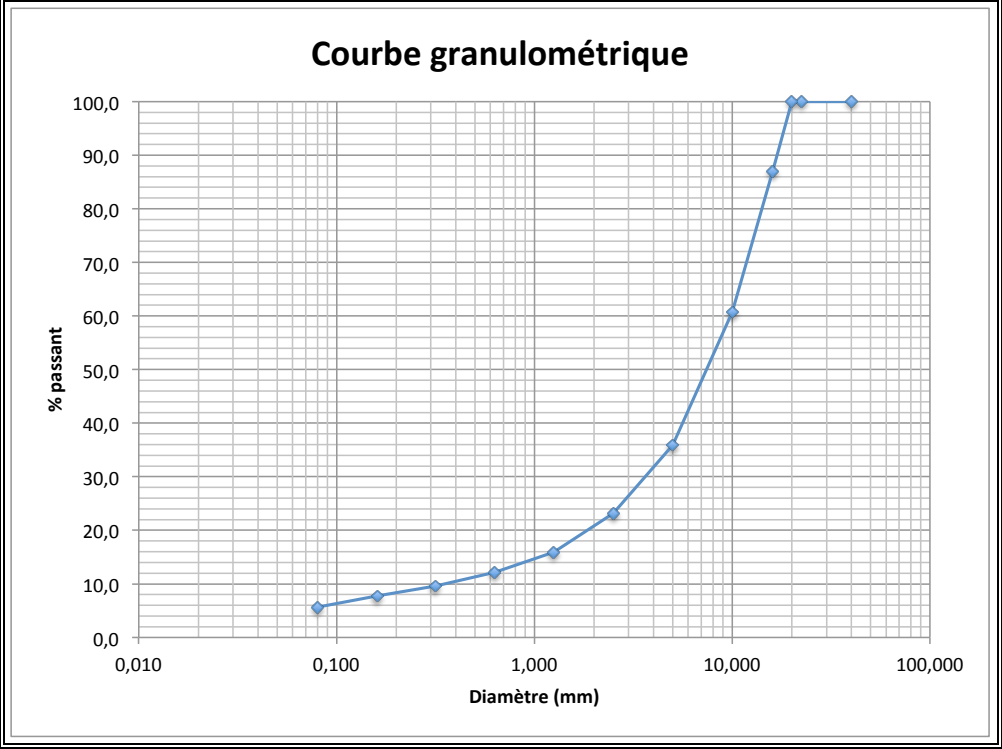
Zheng, J., Li, L., Mbonimpa, M. et Pabst, T. (2018). An Analytical Solution of Gibson's Model for Estimating the Pore Water Pressures in Accreting Deposition of Slurried Material Under One-Dimensional Self-Weight Consolidation. Part I: Pervious Base. *Indian Geotechnical Journal, 48*(1), 72-83.

ANNEXE A : ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

A.1 : Matériau original

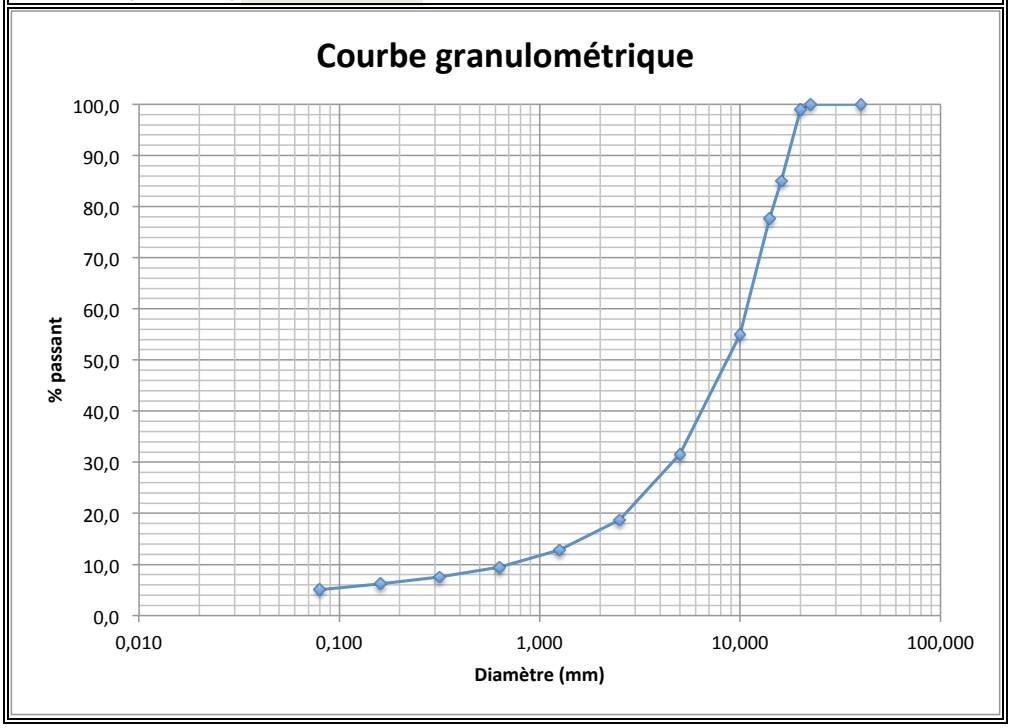
Date	23-févr	À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière	
Nom échantillon	Concassé Malartic B1-1	

Masse sèche (g)	1171,9		
Tamis (mm)	Retenu cumul(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
40,000	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
20,000	0,0	0,0	100,0
16,000	152,7	13,0	87,0
10,000	460,1	39,3	60,7
5,000	751,4	64,1	35,9
2,500	900,4	76,8	23,2
1,250	985,0	84,1	15,9
0,630	1029,7	87,9	12,1
0,315	1059,5	90,4	9,6
0,160	1080,7	92,2	7,8
0,080	1105,5	94,3	5,7
Contenant (<0,08mm)	1171,5	100,0	0,0



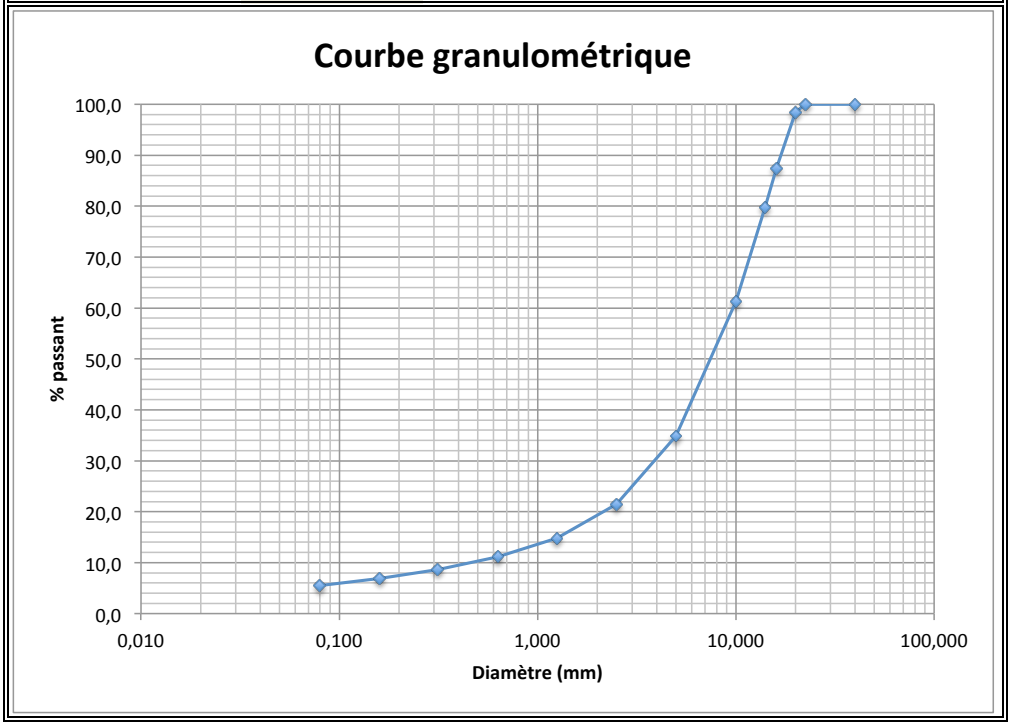
Date	27-févr	À remplir
Testé par	Antoine Laverdière	
Nom échantillon	Concassé malartic B1-2	

Masse sèche (g)	1201,6		
Tamis (mm)	Retenu cumul(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
40,000	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
20,000	13,1	1,1	98,9
16,000	180,7	15,0	85,0
14,000	269,6	22,4	77,6
10,000	541,1	45,0	55,0
5,000	821,7	68,4	31,6
2,500	976,5	81,3	18,7
1,250	1047,7	87,2	12,8
0,630	1087,3	90,5	9,5
0,315	1111,0	92,5	7,5
0,160	1126,8	93,8	6,2
0,080	1140,8	94,9	5,1
Contenant (<0,08mm)	1199,8	99,9	0,1

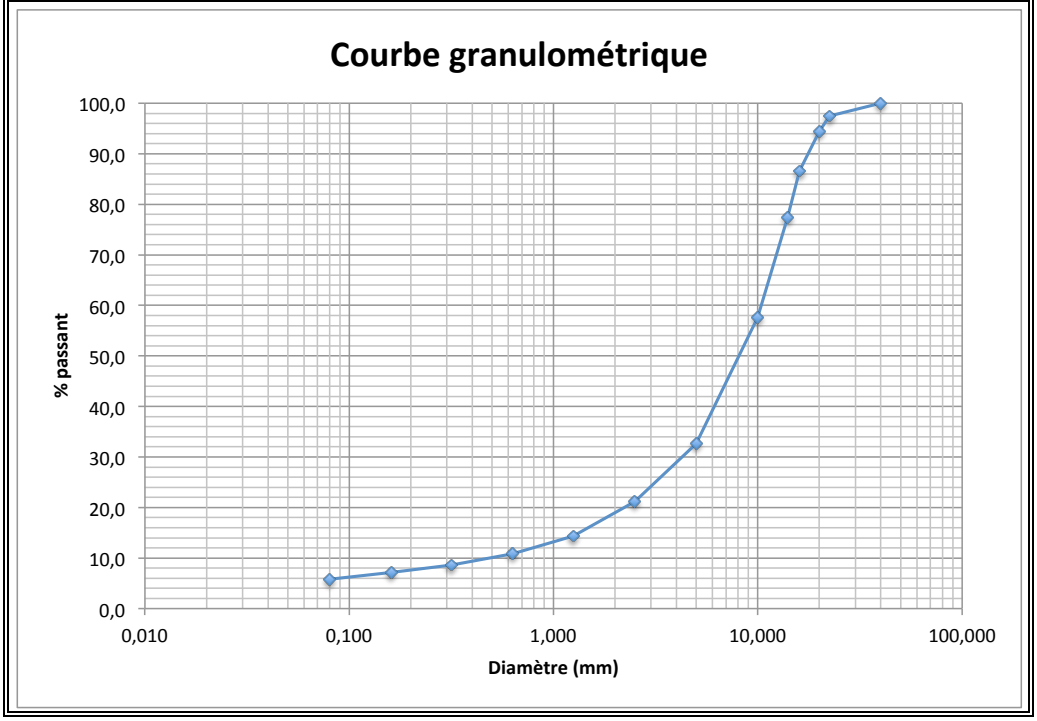


Date	12-mars 1de4	À remplir
Testé par	Antoine Laverdière	
Nom échantillon	Concassé malartic B1-3	

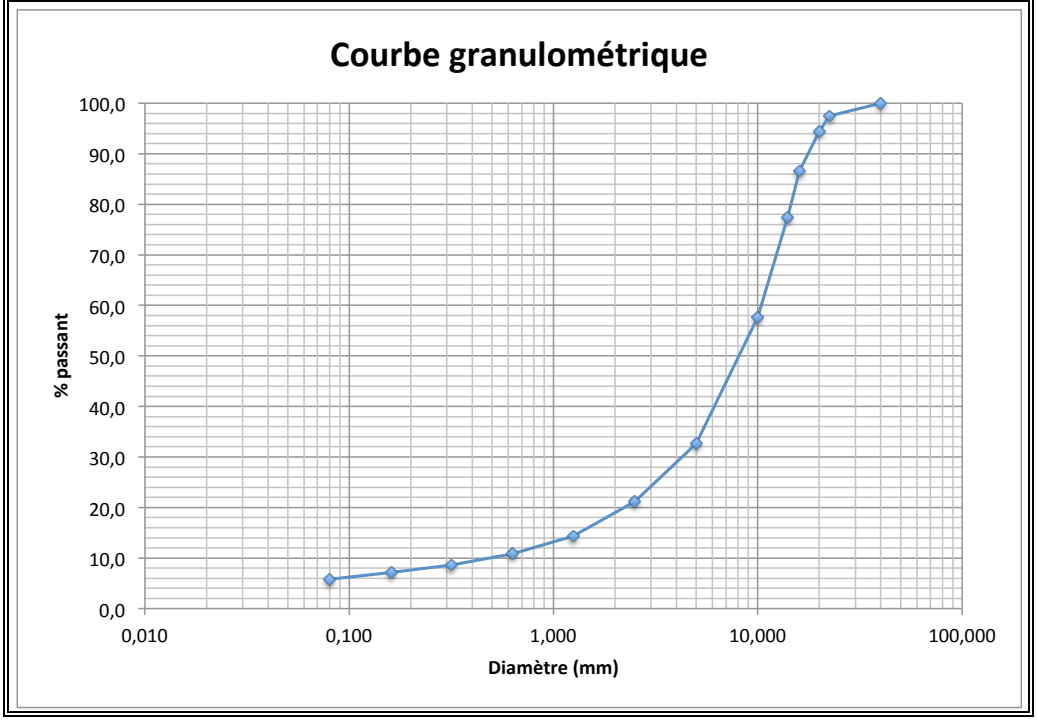
Masse sèche (g)	891,1		
Tamis (mm)	Retenu cumul(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
40,000	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
20,000	14,1	1,6	98,4
16,000	112,2	12,6	87,4
14,000	180,6	20,3	79,7
10,000	344,4	38,6	61,4
5,000	580,0	65,1	34,9
2,500	699,4	78,5	21,5
1,250	758,7	85,1	14,9
0,630	791,6	88,8	11,2
0,315	814,3	91,4	8,6
0,160	830,0	93,1	6,9
0,080	842,1	94,5	5,5
Contenant (<0,08mm)	893,9	100,3	-0,3



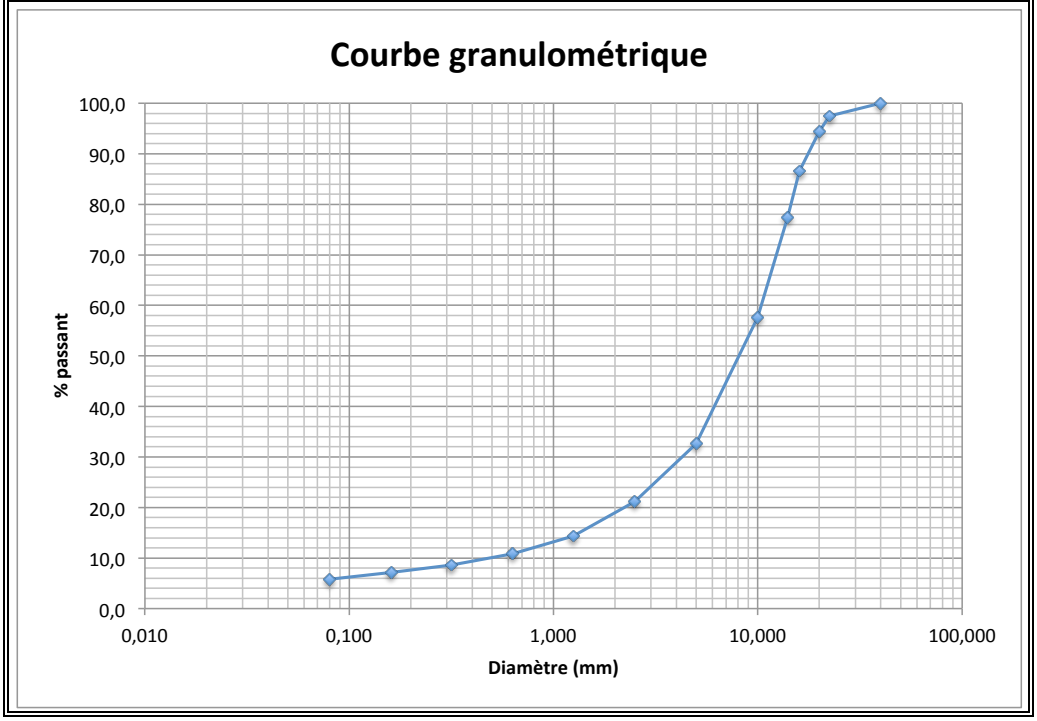
Date:	12-mars 2de4				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Concassé malartic B1-4				
Masse sèche (g)	888,6				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		22,6	2,5	97,5
Premier	20,000		49,8	5,6	94,4
ensemble de	16,000		119,2	13,4	86,6
tamis	14,000		200,0	22,5	77,5
	10,000		376,4	42,4	57,6
	5,000		598,3	67,3	32,7
	2,500	102,6	700,9	78,9	21,1
	1,250	162,7	761,0	85,6	14,4
Deuxième	0,630	194,2	792,5	89,2	10,8
ensemble de	0,315	213,7	812,0	91,4	8,6
tamis	0,160	227	825,3	92,9	7,1
	0,080	238,7	837,0	94,2	5,8
	Contenant (<0,08mm)	290,4	888,7	100,0	0,0



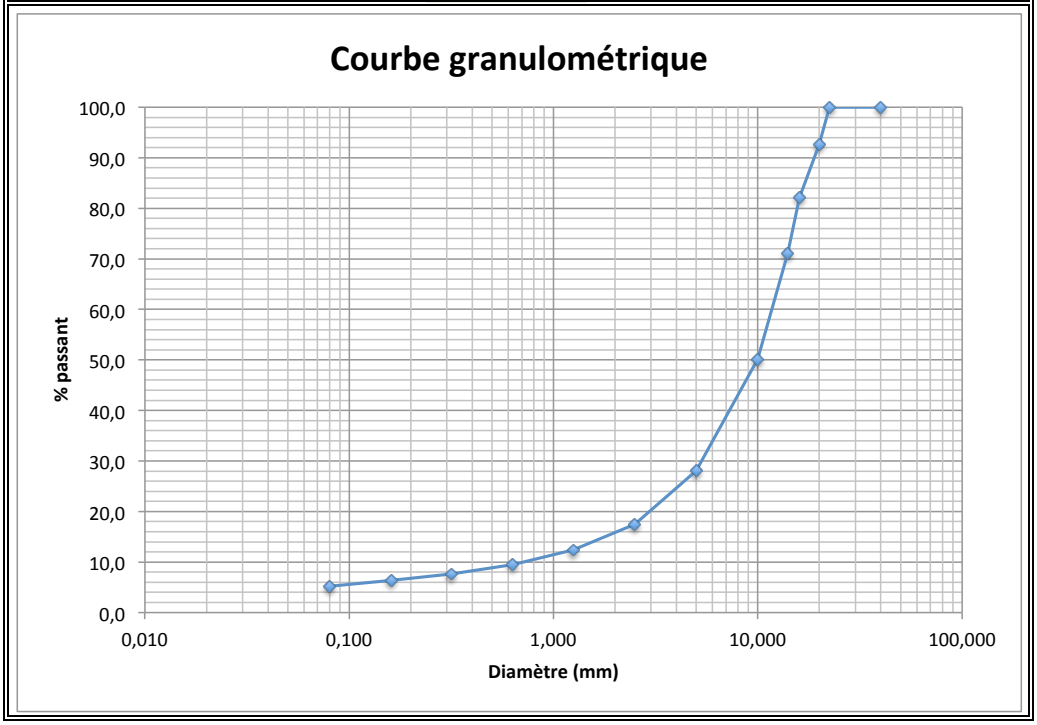
Date:	12-mars 3de4				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Concassé malartic B1-5				
Masse sèche (g)	964,9				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		34,3	3,6	96,4
Premier	20,000		59,3	6,1	93,9
ensemble de	16,000		182,5	18,9	81,1
tamis	14,000		275,0	28,5	71,5
	10,000		456,7	47,3	52,7
	5,000		656,9	68,1	31,9
	2,500	101,1	758,0	78,6	21,4
	1,250	161,1	818,0	84,8	15,2
Deuxième	0,630	194,1	851,0	88,2	11,8
ensemble de	0,315	216	872,9	90,5	9,5
tamis	0,160	231,3	888,2	92,1	7,9
	0,080	244,8	901,7	93,5	6,5
	Contenant (<0,08mm)	304,8	961,7	99,7	0,3



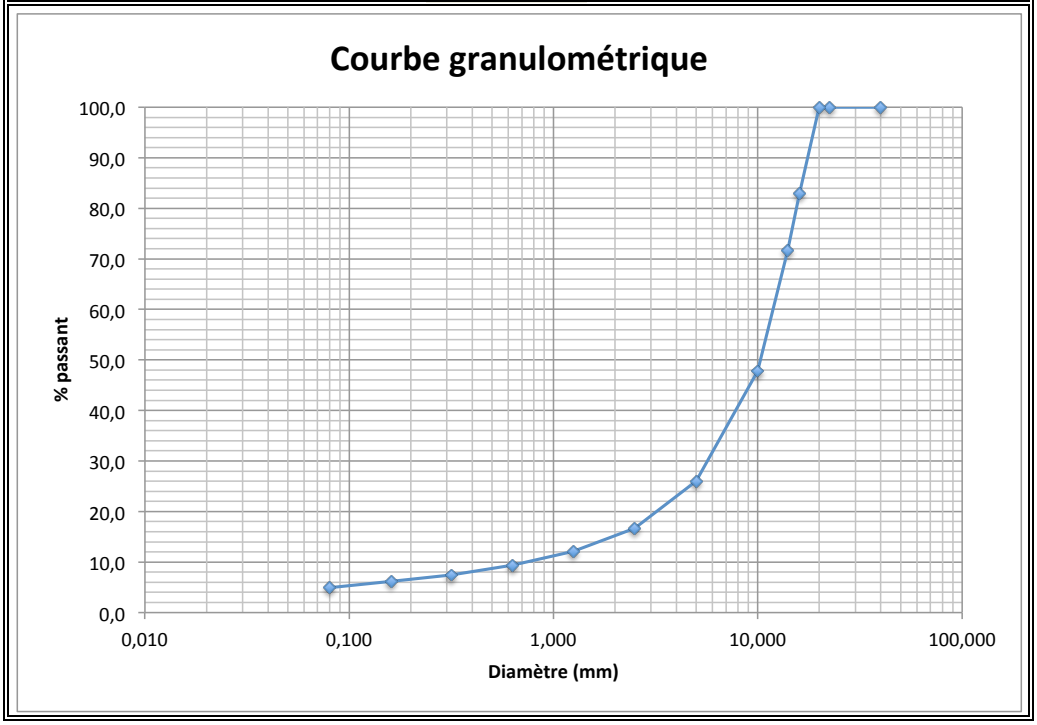
Date:	12-mars 4de4				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Concassé malartic B1-6				
Masse sèche (g)	927,7				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		34,4	3,7	96,3
ensemble de	16,000		129,1	13,9	86,1
tamis	14,000		234,2	25,2	74,8
	10,000		398,0	42,9	57,1
	5,000		584,8	63,0	37,0
	2,500	112,2	697,0	75,1	24,9
	1,250	182,3	767,1	82,7	17,3
Deuxième	0,630	222,8	807,6	87,1	12,9
ensemble de	0,315	248,8	833,6	89,9	10,1
tamis	0,160	266,4	851,2	91,8	8,2
	0,080	281,3	866,1	93,4	6,6
	Contenant (<0,08mm)	338,8	923,6	99,6	0,4



Date:	16-avr 1de2				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	B2-1				
Masse sèche (g)	1013,3				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		74,9	7,4	92,6
ensemble de	16,000		181,7	17,9	82,1
tamis	14,000		293,1	28,9	71,1
	10,000		505,1	49,8	50,2
	5,000		728,8	71,9	28,1
	2,500	107,8	836,6	82,6	17,4
	1,250	159	887,8	87,6	12,4
Deuxième	0,630	188	916,8	90,5	9,5
ensemble de	0,315	207	935,8	92,4	7,6
tamis	0,160	220,4	949,2	93,7	6,3
	0,080	232,2	961,0	94,8	5,2
	Contenant (<0,08mm)	283	1011,8	99,9	0,1

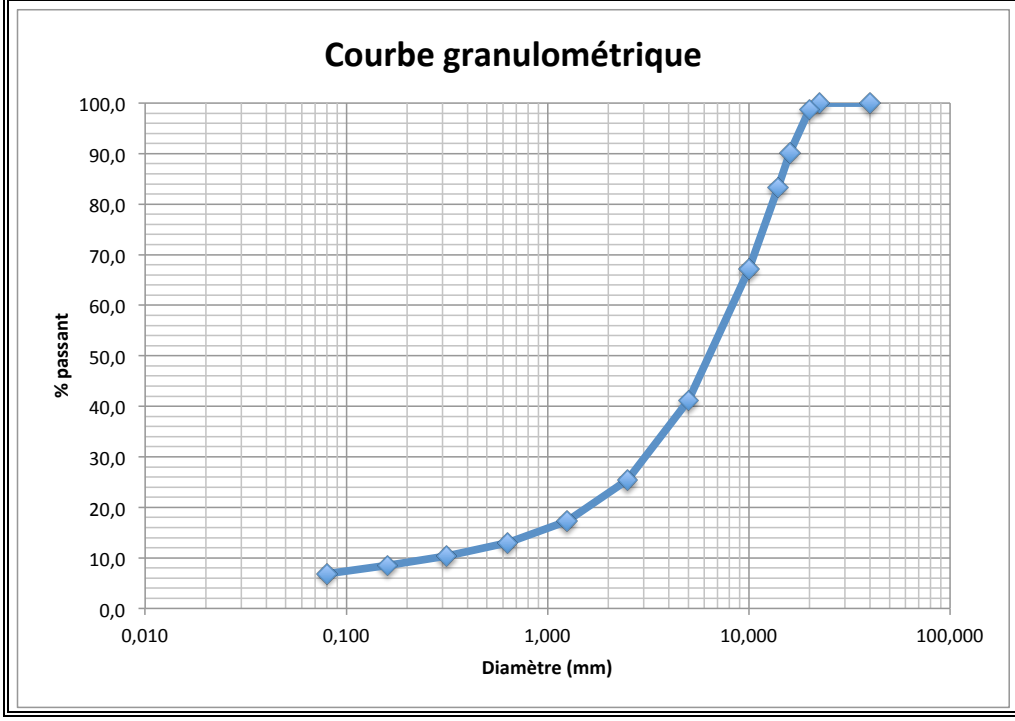


Date:	16-avr 2de2				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	B2-2				
Masse sèche (g)	1156,2				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		0,0	0,0	100,0
ensemble de	16,000		197,4	17,1	82,9
tamis	14,000		327,8	28,4	71,6
	10,000		603,6	52,2	47,8
	5,000		855,0	73,9	26,1
	2,500	108	963,0	83,3	16,7
	1,250	161,7	1016,7	87,9	12,1
Deuxième	0,630	193,2	1048,2	90,7	9,3
ensemble de	0,315	214,6	1069,6	92,5	7,5
tamis	0,160	230,2	1085,2	93,9	6,1
	0,080	244,2	1099,2	95,1	4,9
	Contenant (<0,08mm)	301,2	1156,2	100,0	0,0

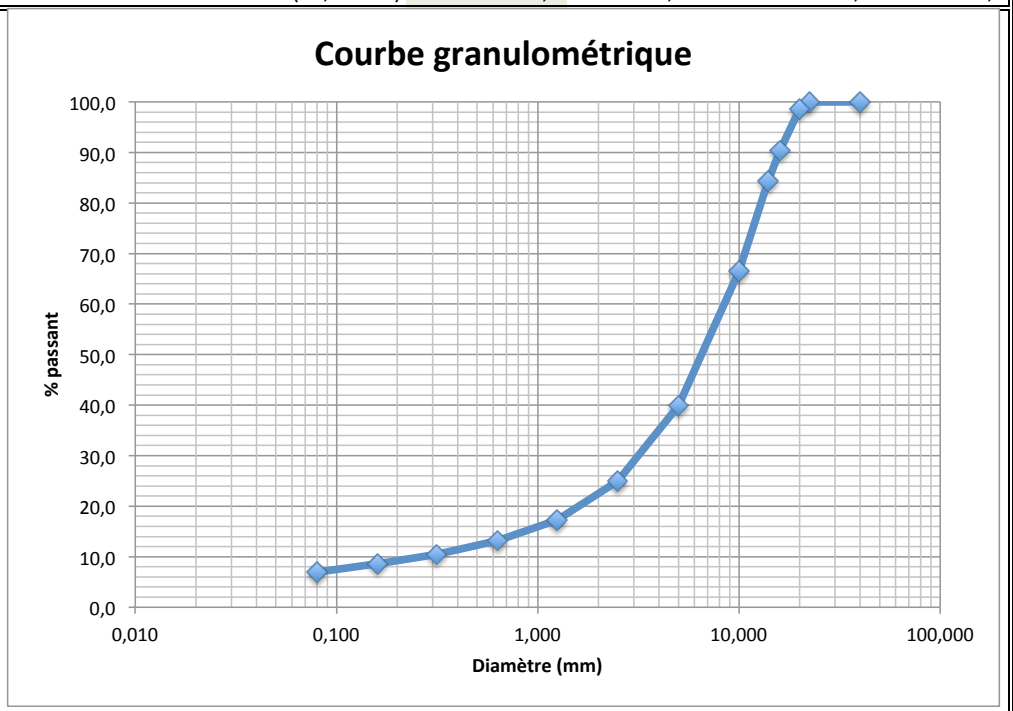


A.2 : Courbes post-compaction

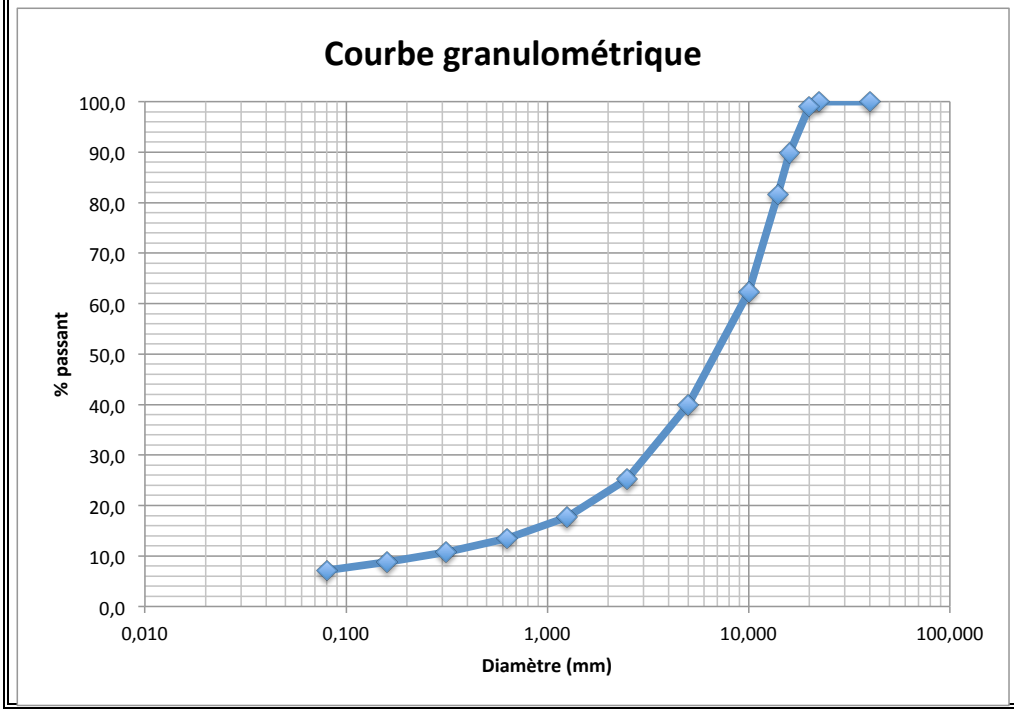
Date:	27-févr				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Concassé malartic post CBR- compaction modifié à w=3,38%				
Masse sèche (g)	2250,8				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		28,2	1,3	98,7
ensemble de	16,000		221,4	9,8	90,2
tamis	14,000		376,8	16,7	83,3
	10,000		739,8	32,9	67,1
	5,000		1323,8	58,8	41,2
	2,500	354,1	1677,9	74,5	25,5
	1,250	538,7	1862,5	82,7	17,3
Deuxième	0,630	634,5	1958,3	87,0	13,0
ensemble de	0,315	694,4	2018,2	89,7	10,3
tamis	0,160	736,3	2060,1	91,5	8,5
	0,080	773,1	2096,9	93,2	6,8
	Contenant (<0,08mm)	927	2250,8	100,0	0,0



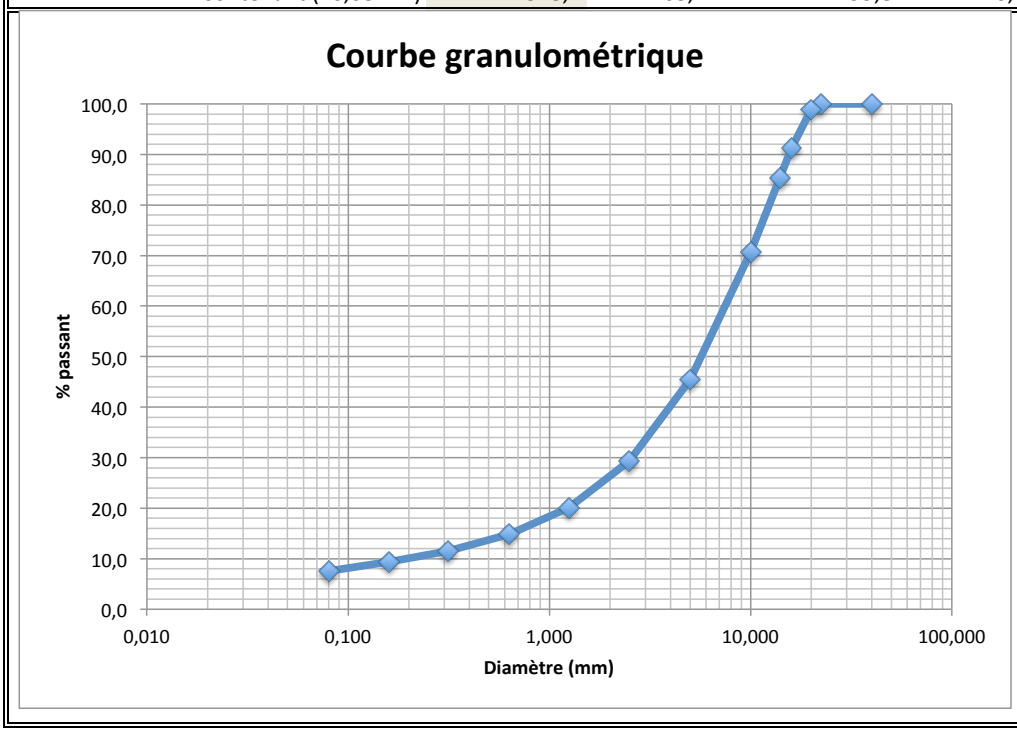
Date:	27-févr 2de2				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Concassé malartic post-CBR compaction modifié à w=3,18%				
Masse sèche (g)	2465,3				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		34,0	1,4	98,6
ensemble de	16,000		236,4	9,6	90,4
tamis	14,000		385,3	15,6	84,4
	10,000		825,5	33,5	66,5
	5,000		1480,2	60,0	40,0
	2,500	370,8	1851,0	75,1	24,9
	1,250	559,3	2039,5	82,7	17,3
Deuxième	0,630	660,9	2141,1	86,8	13,2
ensemble de	0,315	726,5	2206,7	89,5	10,5
tamis	0,160	773,2	2253,4	91,4	8,6
	0,080	814,7	2294,9	93,1	6,9
	Contenant (<0,08mm)	985,1	2465,3	100,0	0,0



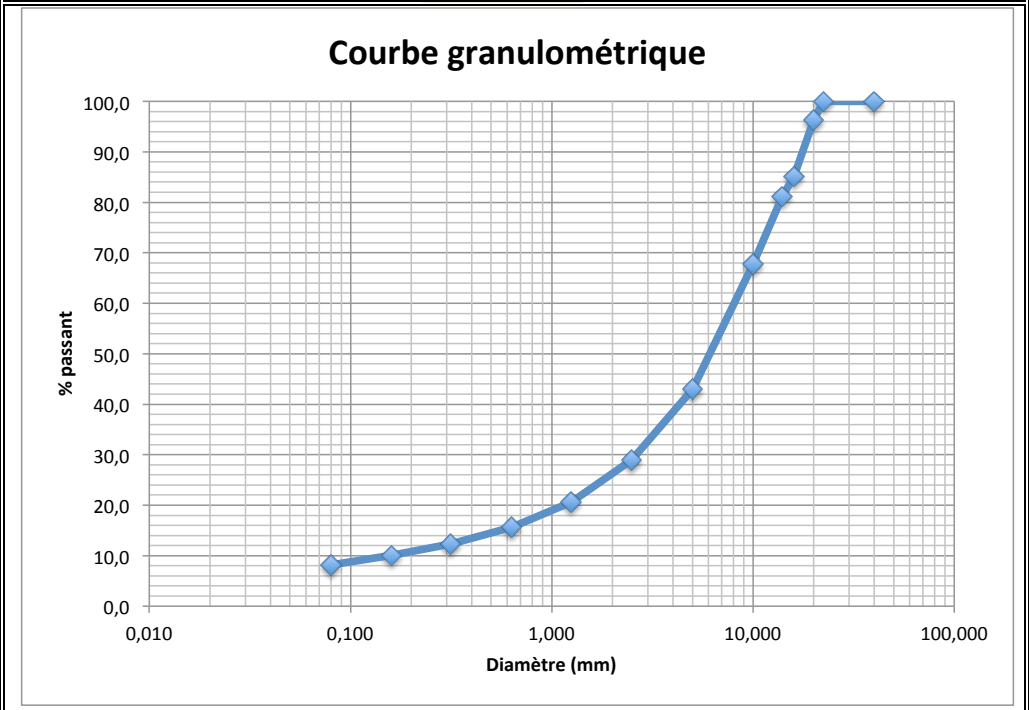
Date:	granulo:18/04 Proct:28/02				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	post proctor modifié				
Masse sèche (g)	1227,2				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		12,0	1,0	99,0
ensemble de	16,000		124,6	10,2	89,8
tamis	14,000		225,8	18,4	81,6
	10,000		461,6	37,6	62,4
	5,000		737,3	60,1	39,9
	2,500	179,5	916,8	74,7	25,3
	1,250	272,8	1010,1	82,3	17,7
Deuxième	0,630	324	1061,3	86,5	13,5
ensemble de	0,315	357,8	1095,1	89,2	10,8
tamis	0,160	381,7	1119,0	91,2	8,8
	0,080	402,6	1139,9	92,9	7,1
	Contenant (<0,08mm)	487,6	1224,9	99,8	0,2



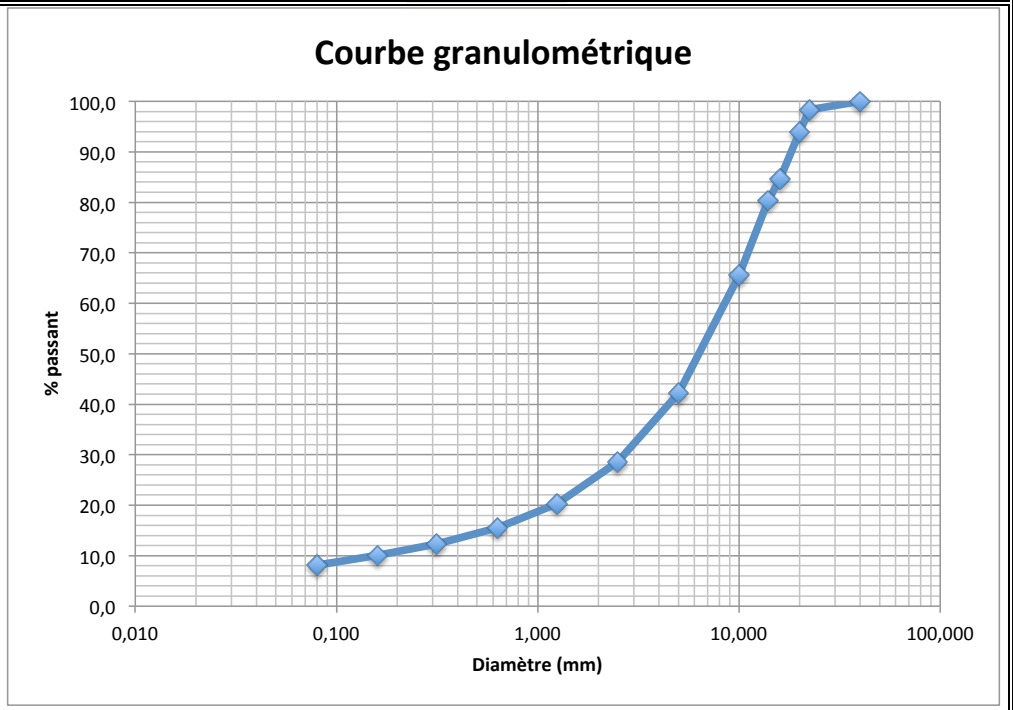
Date:	granulo:18/04 Proct:01/03				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Post proctor standard 1er mars				
Masse sèche (g)	1265,6				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		13,9	1,1	98,9
ensemble de	16,000		111,1	8,8	91,2
tamis	14,000		186,2	14,7	85,3
	10,000		369,8	29,2	70,8
	5,000		690,1	54,5	45,5
	2,500	204,8	894,9	70,7	29,3
	1,250	321,3	1011,4	79,9	20,1
Deuxième	0,630	387,6	1077,7	85,2	14,8
ensemble de	0,315	429,4	1119,5	88,5	11,5
tamis	0,160	456,7	1146,8	90,6	9,4
	0,080	479,7	1169,8	92,4	7,6
	Contenant (<0,08mm)	573,1	1263,2	99,8	0,2



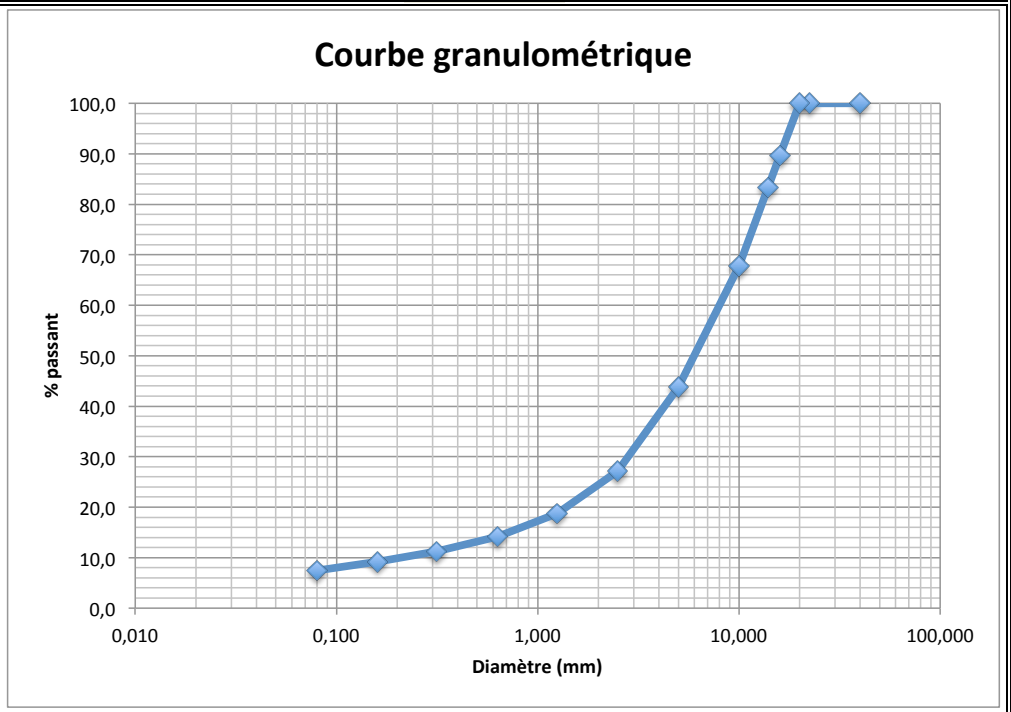
Date:	granulo:18/04 Proct:02/03				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	post proctor +				
Masse sèche (g)	1175,5				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		42,9	3,6	96,4
ensemble de	16,000		174,5	14,8	85,2
tamis	14,000		222,4	18,9	81,1
	10,000		378,2	32,2	67,8
	5,000		670,8	57,1	42,9
	2,500	164,7	835,5	71,1	28,9
	1,250	262,6	933,4	79,4	20,6
Deuxième	0,630	320,7	991,5	84,3	15,7
ensemble de	0,315	359,5	1030,3	87,6	12,4
tamis	0,160	385,8	1056,6	89,9	10,1
	0,080	408,6	1079,4	91,8	8,2
	Contenant (<0,08mm)	501,1	1171,9	99,7	0,3



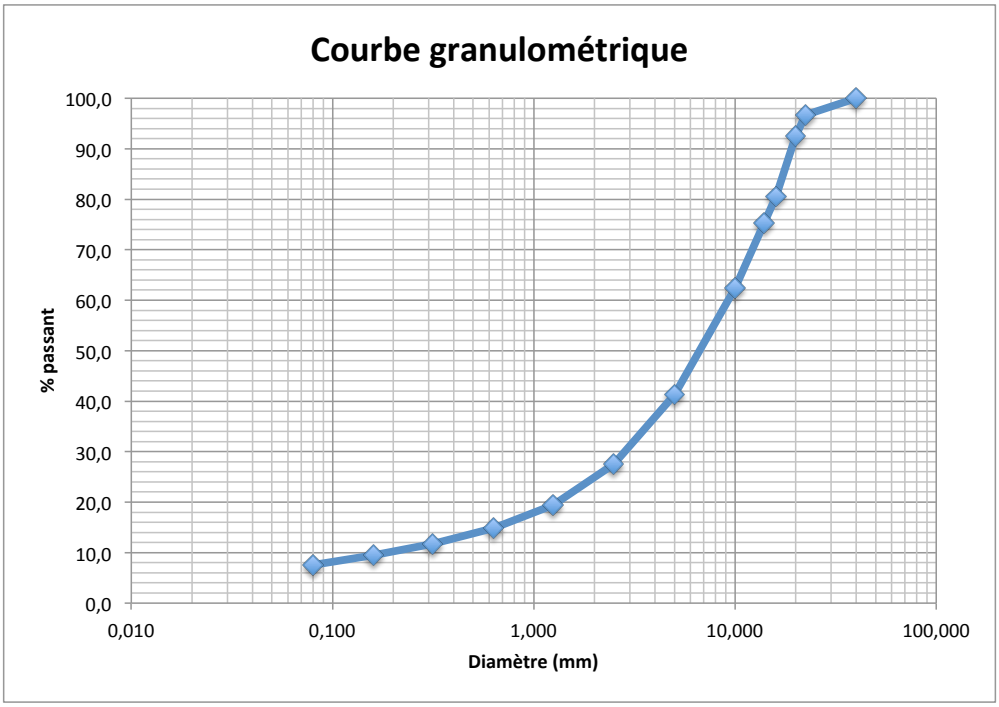
Date:	granulo:18/04 Proct:05/03				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Post CBR modifié				
Masse sèche (g)	1459,6				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		23,6	1,6	98,4
Premier	20,000		87,6	6,0	94,0
ensemble de	16,000		224,6	15,4	84,6
tamis	14,000		286,4	19,6	80,4
	10,000		502,3	34,4	65,6
	5,000		844,4	57,9	42,1
	2,500	198,6	1043,0	71,5	28,5
	1,250	318,3	1162,7	79,7	20,3
Deuxième	0,630	388	1232,4	84,4	15,6
ensemble de	0,315	434,8	1279,2	87,6	12,4
tamis	0,160	467,8	1312,2	89,9	10,1
	0,080	497,2	1341,6	91,9	8,1
	Contenant (<0,08mm)	611,3	1455,7	99,7	0,3



Date:	granulo:18/04 Proct:06/03				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Post CBR standard				
Masse sèche (g)	1262,3				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		0,0	0,0	100,0
Premier	20,000		0,0	0,0	100,0
ensemble de	16,000		129,7	10,3	89,7
tamis	14,000		210,3	16,7	83,3
	10,000		406,3	32,2	67,8
	5,000		708,5	56,1	43,9
	2,500	211,2	919,7	72,9	27,1
	1,250	317,8	1026,3	81,3	18,7
Deuxième	0,630	375,6	1084,1	85,9	14,1
ensemble de	0,315	412,4	1120,9	88,8	11,2
tamis	0,160	437,6	1146,1	90,8	9,2
	0,080	459,6	1168,1	92,5	7,5
	Contenant (<0,08mm)	550,8	1259,3	99,8	0,2



Date:	granulo:18/04 Proct:08/03				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Post CBR +				
Masse sèche (g)	1417,5				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	40,000		0,0	0,0	100,0
	22,400		46,7	3,3	96,7
Premier	20,000		106,3	7,5	92,5
ensemble de	16,000		276,2	19,5	80,5
tamis	14,000		349,9	24,7	75,3
	10,000		532,2	37,5	62,5
	5,000		831,6	58,7	41,3
	2,500	196,5	1028,1	72,5	27,5
	1,250	310,8	1142,4	80,6	19,4
Deuxième	0,630	376	1207,6	85,2	14,8
ensemble de	0,315	420,1	1251,7	88,3	11,7
tamis	0,160	451,4	1283,0	90,5	9,5
	0,080	478,7	1310,3	92,4	7,6
	Contenant (<0,08mm)	585,9	1417,5	100,0	0,0



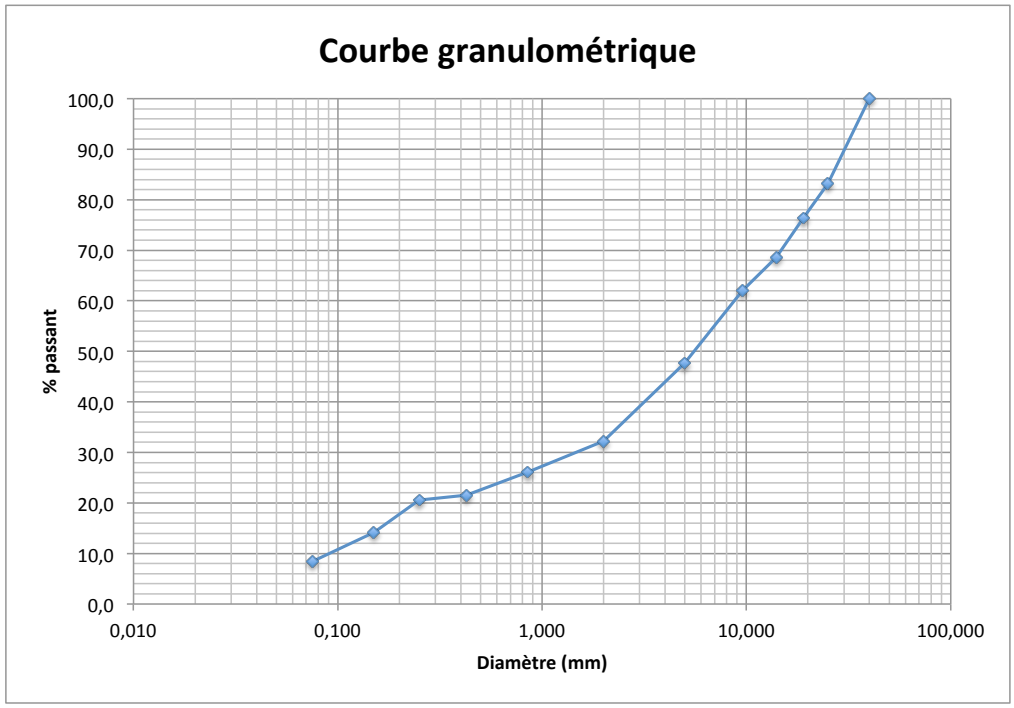
A.3 : Échantillons prélevés directement sur le terrain

À remplir

Testé par: Antoine Laverdière
échantillon Cône de sable 1

Masse sèche (g) 1597,4

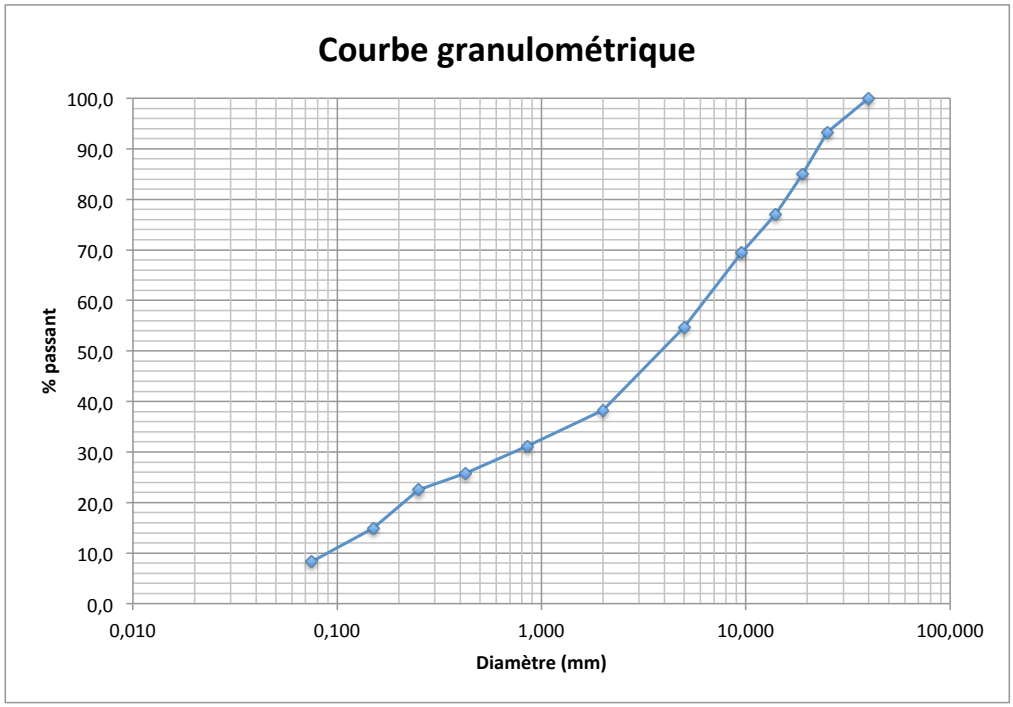
	Tamis (mm)	Retenu cumulé(g)		Retenu cumul(%)	Passant (%)
Premier ensemble de tamis	40,000		0,0	0,0	100,0
	25,000		260,4	16,8	83,2
	19,000		366,3	23,6	76,4
	14,000		487,0	31,4	68,6
	9,520		589,6	38,0	62,0
	5,000		811,2	52,3	47,7
	2,000		1050,7	67,8	32,2
Deuxième ensemble de tamis	0,850	95,3	1146,0	73,9	26,1
	0,425	164,7	1215,4	78,4	21,6
	0,250	181,2	1231,9	79,5	20,5
	0,150	279,4	1330,1	85,8	14,2
	0,075	368,8	1419,5	91,6	8,4
	Passant 0,075	499,3	1550,0	100,0	0,0



À remplir

Testé par: Antoine Laverdière
échantillon Cône de sable 2

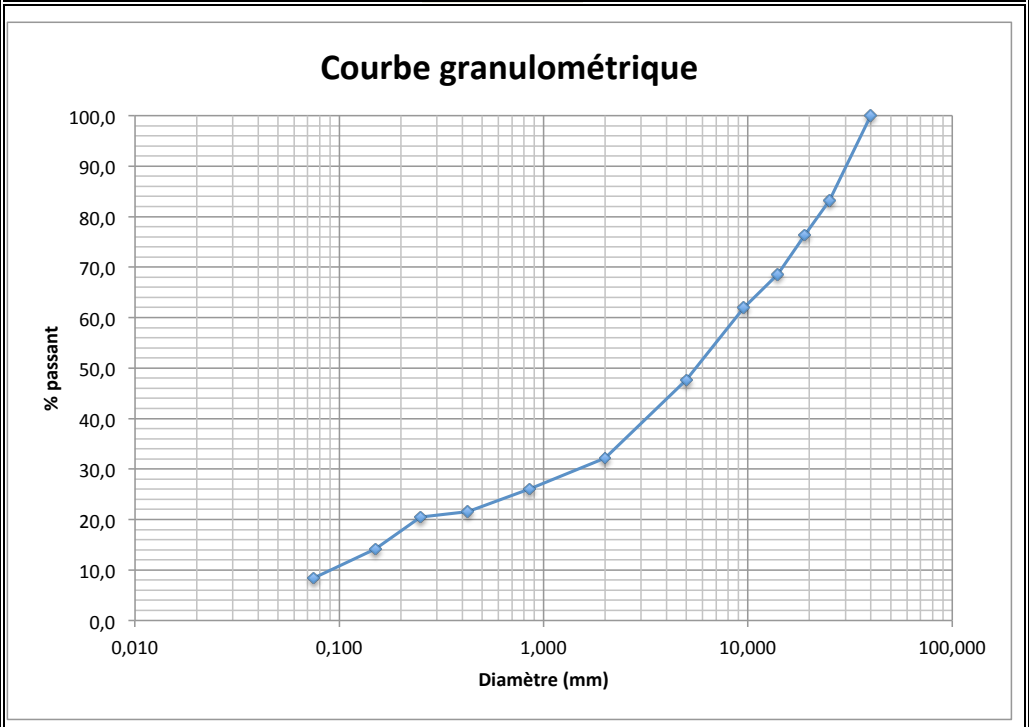
Masse sèche (g)	1743,4				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
Premier ensemble de tamis	40,000		0,0	0,0	100,0
	25,000		114,8	6,7	93,3
	19,000		256,2	14,9	85,1
	14,000		393,4	23,0	77,0
	9,520		522,5	30,5	69,5
	5,000		776,9	45,3	54,7
	2,000		1057,8	61,7	38,3
Deuxième ensemble de tamis	0,850	122,1	1179,9	68,8	31,2
	0,425	214,1	1271,9	74,2	25,8
	0,250	270,2	1328,0	77,5	22,5
	0,150	400,5	1458,3	85,1	14,9
	0,075	514,3	1572,1	91,7	8,3
	Passant 0,075	656,1	1713,9	100,0	0,0



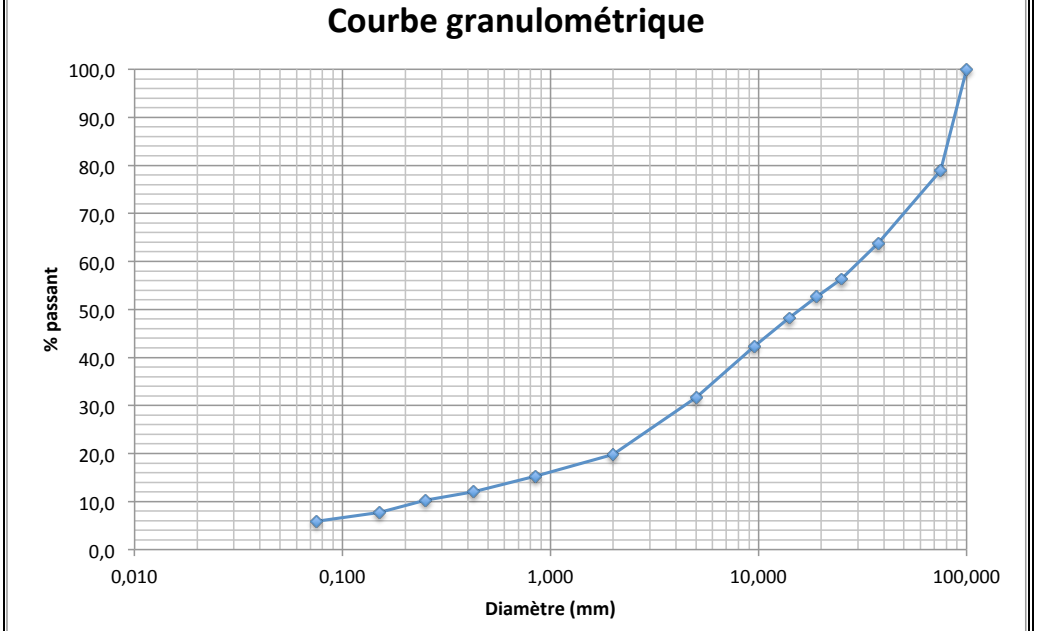
À remplir

Testé par: Antoine Laverdière
échantillon Cône de sable 3

Masse sèche (g)	2240,2				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
Premier ensemble de tamis	40,000		0,0	0,0	100,0
	25,000		78,3	3,7	96,3
	19,000		205,7	9,7	90,3
	14,000		394,6	18,6	81,4
	9,520		615,6	29,0	71,0
	5,000		949,8	44,7	55,3
	2,000		1300,1	61,2	38,8
Deuxième ensemble de tamis	0,850	147,6	1447,7	68,2	31,8
	0,425	260,7	1560,8	73,5	26,5
	0,250	283	1583,1	74,5	25,5
	0,150	435	1735,1	81,7	18,3
	0,075	556	1856,1	87,4	12,6
	Passant 0,075	824	2124,1	100,0	0,0



Date:	25-sept				À remplir
Testé par:	Antoine Laverdière				
# échantillon	Échantillon 30 kg terrain				
Masse sèche (g)	36045,0				
	Tamis (mm)		Retenu cumulé(g)	Retenu cumul(%)	Passant (%)
	100,000		0,0	0,0	100,0
	75,000		7605,2	21,1	78,9
	37,500		13069,0	36,3	63,7
Premier ensemble de tamis	25,000		15740,4	43,7	56,3
	19,000		17089,2	47,4	52,6
	14,000		18663,3	51,8	48,2
	9,520		20784,4	57,7	42,3
	5,000		24641,5	68,4	31,6
	2,000		28897,6	80,2	19,8
	0,850	1636,4	30534,0	84,7	15,3
	0,425	2826,5	31724,1	88,0	12,0
Deuxième ensemble de tamis	0,250	3449,6	32347,2	89,7	10,3
	0,150	4371,7	33269,3	92,3	7,7
	0,075	5029,2	33926,8	94,1	5,9
	Contenant (<0,075mm)	7147,4	36045,0	100,0	0,0



ANNEXE B : DENSITÉ RELATIVE DES GRAINS SOLIDES

B.1 : Grains ayant un diamètre inférieur à 4,75 mm

Date:	22-mars			À remplir	
Testé par :	Antoine Laverdière			Cal. Ou tables	
Nom échantillon:	Concassé Malartic B1				
No pycnomètre	N14	17	21		
Mpycnomètre+ eau +sol (g)	733,17	731,86	731,9		
Température (°C)	25,3	25,6	25,7		
Masse pycnomètre +eau (g)	677,187	671,612	673,206		
No tare	64	62	63		
Mtare (g)	318,25	320,97	315,35		
Mtare+sol sec	406,54	415,35	407,2		
Msol sec (g)	88,29	94,38	91,85		
Masse vol eau à T°	0,9969675	0,9968893	0,9968631		
Masse vol eau à 20°C	0,9982041	0,9982041	0,9982041		
Dr	2,73	2,77	2,77	Moyenne	
Densité relative corrigée 20°C	2,73	2,76	2,77		2,75

Date:	18-avr			À remplir	
Testé par :	Antoine Laverdière			Cal. Ou tables	
Nom échantillon:	Concassé Malartic B2				
No pycnomètre	N14	17	21		
Mpycnomètre+ eau +sol (g)	730,26	713,99	720,58		
Température (°C)	25,6	25,9	25,7		
Masse pycnomètre +eau (g)	677,14408	671,5751247	673,20563		
No tare	MM	V14	B2		
Mtare (g)	377,5	364,5	432,7		
Mtare+sol sec	461,1	431,5	507,3		
Msol sec (g)	83,6	67	74,6		
Masse vol eau à T°	0,9968900	0,9968100	0,9968700		
Masse vol eau à 20°C	0,9982041	0,9982041	0,9982041		
Dr	2,74	2,73	2,74	Moyenne	
Densité relative corrigée 20°C	2,74	2,72	2,74		2,73

Date:	11-sept			À remplir	
Testé par :	Antoine Laverdière			Cal. Ou tables	
Nom échantillon:	Concassé Malartic B2				
No pycnomètre	1	2	3		
Mpycnomètre+ eau +sol (g)	717,37	722,61	726,05		
Température (°C)	24,2	24,2	24,1		
Masse pycnomètre +eau (g)	659,6055	667,04194	667,24221		
No tare	23	64	66		
Mtare (g)	328,59	318,22	328,64		
Mtare+sol sec	418,94	405,09	420,6		
Msol sec (g)	90,35	86,87	91,96		
Masse vol eau à T°	0,9972500	0,9972500	0,9972700		
Masse vol eau à 20°C	0,9982041	0,9982041	0,9982041		
Dr	2,77	2,78	2,77	Moyenne	
Densité relative corrigée 20°C	2,77	2,77	2,77		2,77

B.2 : Grains ayant un diamètre supérieur à 4,75 mm

Date:	22-mars				
Testé par :	Antoine Laverdière				
Nom échantillon:	Concassé Malartic B1				
Échantillon	A	B	C		
Mtare (g)	879,8	891,4	880,6		
MSSS+ tare (g)	4066,7	4112,1	4123,9		
MSSS sol (g)	3186,9	3220,7	3243,3		
M SSS dans eau (g)	1993,8	2006,4	2017,8		
Msol sec +tare (g)	4036,1	4064,9	4066,3		
Msol sec (g)	3156,3	3173,5	3185,7		
				Moyennes	
Dr (bulk)	2,65	2,61	2,60		2,62
Dr (SSD)	2,67	2,65	2,65		2,66
Dr (apparent)	2,72	2,72	2,73		2,72
Absorbtion (%)	1,0	1,5	1,8		1,42

Date:	17-avr					
Testé par :	Antoine Laverdière					
Nom échantillon:	Concassé Malartic B2					
Échantillon	A	B	C	D		
Mtare (g)	890	891,1	879,6	879,8		
MSSS+ tare (g)	4049,6	3773,5	3940,6	4102,6		
MSSS sol (g)	3159,6	2882,4	3061	3222,8		
M SSS dans eau (g)	1968,1	1806,3	1915,7	2014,8		
Msol sec +tare (g)	3995,3	3741,5	3909,7	4062,2		
Msol sec (g)	3105,3	2850,4	3030,1	3182,4		
					Moyennes	
Dr (bulk)	2,61	2,65	2,65	2,63		2,63
Dr (SSD)	2,65	2,68	2,67	2,67		2,67
Dr (apparent)	2,73	2,73	2,72	2,73		2,73
Absorbtion (%)	1,7	1,1	1,0	1,3		1,29

Date:	01-août					
Testé par :	Antoine Laverdière					
Nom échantillon:	Concassé Malartic B2					
Échantillon	1	2				
Mtare (g)	890,2	879,6				
MSSS+ tare (g)	5911,6	5752				
MSSS sol (g)	5021,4	4872,4				
M SSS dans eau (g)	3176,6	3089,4				
Msol sec +tare (g)	5867,5	5725,9				
Msol sec (g)	4977,3	4846,3				
					Moyennes	
Dr (bulk)	2,70	2,72				2,71
Dr (SSD)	2,72	2,73				2,73
Dr (apparent)	2,76	2,76				2,76
Absorbtion (%)	0,9	0,5				0,71

ANNEXE C : ESSAIS DE COMPACTION

C.1 Compaction Proctor standard (STD)

Date: 28-févr-18
Testé par: Antoine Laverdière
Type de compaction : Standard

Dimensions du moule

D (cm)	H (cm)	M (g)	V (cm^3)
15,171	11,64	6691	2117,40897
15,224	11,64		
15,251	11,65		
15,215	11,65		

	A	B	C
$M_{h+moule}$ (g)	11138,4	11309	11410,2
M_h (g)	4447,4	4618	4719,2
m_{tare}	890	891	879,6
$m_{tare+sol}$	5333,4	5501,3	5581,8
$m_{sol\ h}$	4443,4	4610,3	4702,2
$m_{tare\ +sol\ S}$	5161,5	5290,5	5328,9
M_s	4271,5	4399,5	4449,3
w (%)	4,02	4,79	5,68
ρ_h	2100,40	2180,97	2228,76
ρ_d	2019,14	2081,25	2108,89

Date:	7-8-9 mars 2018			
Testé par:	Antoine Laverdière			
Type de compaction :	Standard			
		Dimensions du moule		
D (cm)	**H (cm)**	**M (g)**	**V (cm^3)**	
15,171	11,64	6691	2117,40897	
15,224	11,64			
15,251	11,65			
15,215	11,65			
	07-mars	**08-mars**	**09-mars**	
$M_{h+moule}$ (g)	11580,9	11447,8	11688,7	
M_h (g)	4889,9	4756,8	4997,7	
m_{tare}	880	879,8	891,2	
$m_{tare+sol}$	5754,9	5618,4	5872,3	
$m_{sol\ h}$	4874,9	4738,6	4981,1	
$m_{tare\ +sol\ S}$	5328,3	5173,6	5441,4	
M_s	4448,3	4293,8	4550,2	
w (%)	9,59	10,36	9,47	
ρ_h	2309,38	2246,52	2360,29	
ρ_d	2107,29	2035,64	2156,11	

C.2 Compaction Proctor modifié (MOD)

Date:	23-févr-18			
Testé par:	Antoine Laverdière			
Type de compaction :	Modifié			
		Dimensions du moule		
D (cm)	**H (cm)**	**M (g)**	**V (cm^3)**	
15,171	11,64	6691	2117,40897	
15,224	11,64			
15,251	11,65			
15,215	11,65			
	A	**B**	**C**	
$M_{h+moule}$ (g)	11432	11594	11916	
M_h (g)	4741	4903	5225	
m_{tare}	132	126	126	
$m_{tare+sol}$	306	378	430	
$m_{sol\ h}$	174	252	304	
$m_{tare\ +sol\ S}$	302	368	410	
M_s	170	242	284	
w (%)	2,35	4,13	7,04	
ρ_h	2239,06	2315,57	2467,64	
ρ_d	2187,58	2223,68	2305,29	

Date: 27-févr-18
Testé par: Antoine Laverdière
Type de compaction : Modifié

Dimensions du moule

D (cm)	H (cm)	M (g)	V (cm^3)
15,171	11,64	6691	2117,408967
15,224	11,64		
15,251	11,65		
15,215	11,65		

	A	C	D	B	D
$M_{h+moule}$ (g)	11333,8	11405,6	11570,7	11622,5	11852,2
M_h (g)	4642,8	4714,6	4879,7	4931,5	5161,2
m_{tare}	479,9	890,8	890,3	880	880,1
$m_{tare+sol}$	5121,6	5601,4	5764	5798,8	6029,4
$m_{sol\ h}$	4641,7	4710,6	4873,7	4918,8	5149,3
$m_{tare\ +sol\ S}$	5017	5456,1	5573,6	5576,6	5692,6
M_s	4537,1	4565,3	4683,3	4696,6	4812,5
w (%)	2,31	3,18	4,07	4,73	7,00
ρ_h	2192,68	2226,59	2304,56	2329,03	2437,51
ρ_d	2143,27	2157,91	2214,53	2223,82	2278,08

Date: 1,7 et 13 mars 2018
Testé par: Antoine Laverdière
Type de compaction : Modifié

Dimensions du moule

D (cm)	H (cm)	M (g)	V (cm^3)
15,171	11,64	6691	2117,40897
15,224	11,64		
15,251	11,65		
15,215	11,65		

	A	A	B	A
Date	01-mars	07-mars	07-mars	13-mars
$M_{h+moule}$ (g)	11653,5	11969,5	11851,5	11880,6
M_h (g)	4962,5	5278,5	5160,5	5189,6
m_{tare}	479,8	890,1	891,4	891
$m_{tare+sol}$	5429	6149,2	6031,5	6062,7
$m_{sol\ h}$	4949,2	5259,1	5140,1	5171,7
$m_{tare\ +sol\ S}$	5165,7	5785	5660,2	5668
M_s	4685,9	4894,9	4768,8	4777
w (%)	5,62	7,44	7,79	8,26
ρ_h	2343,67	2492,91	2437,18	2450,92
ρ_d	2218,98	2320,27	2261,13	2263,87

Date:	12-juill-18			
Testé par:	Antoine Laverdière			
Type de compaction :	MOD	Baril 2		

Dimensions du moule			
D (cm)	**H (cm)**	**M (g)**	**V (cm^3)**
15,171	11,64	6691	2117,40897
15,224	11,64		
15,251	11,65		
15,215	11,65		

	A	**B**	**C**	**D**
$M_{h+moule}$ (g)	11399,9	11439,1	11783,9	11929,3
M_h (g)	4711,1	4750,3	5095,1	5240,5
m_{tare}	879,7	850,3	480,8	1538,8
$m_{tare+sol}$	5588,7	5591,8	5563,1	6760,2
$m_{sol\ h}$	4709	4741,5	5082,3	5221,4
$m_{tare\ +sol\ S}$	5480,3	5403,6	5246	6397,6
M_s	4600,6	4553,3	4765,2	4858,8
w (%)	2,36	4,13	6,65	7,46
	108,4	188,2	317,1	362,6
ρ_h	2224,94	2243,45	2406,29	2474,96
ρ_d	2173,72	2154,40	2256,15	2303,09

C.2 Compaction Proctor modifié avec 81 coups par couche (MOD81)

Date:	06-mars-18			
Testé par:	Antoine Laverdière			
Type de compaction :	MOD81			

Dimensions du moule			
D (cm)	**H (cm)**	**M (g)**	**V (cm^3)**
15,171	11,64	6691	2117,40897
15,224	11,64		
15,251	11,65		
15,215	11,65		

	A	**B**	**C**	**D**
$M_{h+moule}$ (g)	11548,5	11608,3	11734,1	11762,6
M_h (g)	4857,5	4917,3	5043,1	5071,6
m_{tare}	890	891,1	879,6	880
$m_{tare+sol}$	5742,1	5803,5	5912,8	5951,5
$m_{sol\ h}$	4852,1	4912,4	5033,2	5071,5
$m_{tare\ +sol\ S}$	5609,7	5627,8	5692,5	5694,8
M_s	4719,7	4736,7	4812,9	4814,8
w (%)	2,81	3,71	4,58	5,33
ρ_h	2294,08	2322,32	2381,73	2395,19
ρ_d	2231,48	2239,26	2277,48	2273,96

Date: 7 et 13 mars2018
Testé par: Antoine Laverdière
Type de compaction : MOD81

Dimensions du moule			
D (cm)	**H (cm)**	**M (g)**	**V (cm^3)**
15,171	11,64	6691	2117,40897
15,224	11,64		
15,251	11,65		
15,215	11,65		

	07-mars	**13-mars**	**13-mars**
$M_{h+moule}$ (g)	11989,7	11950,6	11898,4
M_h (g)	5298,7	5259,6	5207,4
m_{tare}	880	879,6	879,7
$m_{tare+sol}$	6160,7	6121,3	6068,9
$m_{sol\ h}$	5280,7	5241,7	5189,2
$m_{tare\ +sol\ S}$	5821,4	5782,2	5717,9
M_s	4941,4	4902,6	4838,2
w (%)	6,87	6,92	7,25
ρ_h	2502,45	2483,98	2459,33
ρ_d	2341,66	2323,28	2292,98

ANNEXE D : ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Essai de perméabilité à charge constante, perméamètre à paroi rigide

Date: 14-05-2018

Par Antoine Laverdière

Perméamètre: P1

Échantillon

D (mm):	151,6925	Mh (g):	8525,0	e:	0,43
H (mm):	237,67	Ms (g):	8181,4	n:	0,30
A (mm^2):	18072,4944	Vs (cm3):	2996,8		
V (cm^3):	4295,28975	Vw (cm3):	1298,4		

Essai 1

	mm	**cm**		**mm**	**cm**
Hsortie	325	32,5	**Hmariotte**	345	34,5
gradient i	0,08				

laps	min	s	t (s)	mL	k (cm/s)
1	2	22,79	142,79	5	2,30E-03
2	2	38,65	158,65	5	2,07E-03
3	2	30,94	150,94	5	2,18E-03
4	2	29,44	149,44	5	2,20E-03
5	2	37,98	157,98	5	2,08E-03
6	2	48	168	5	1,96E-03
7	2	39,85	159,85	5	2,06E-03
8	2	34,48	154,48	5	2,13E-03
				MOYENNE	2,12E-03

Essai 2

	mm	**cm**		**mm**	**cm**
Hsortie	325	32,5	**Hmariotte**	345	34,5
gradient i	0,08				

laps	min	s	t (s)	mL	k (cm/s)
1	2	30,26	150,26	5	2,19E-03
2	2	26,56	146,56	5	2,24E-03
3	2	21,67	141,67	5	2,32E-03
4	2	17,66	137,66	5	2,39E-03
5	2	24,55	144,55	5	2,27E-03
6	2	15,98	135,98	5	2,42E-03
7	2	13,08	133,08	5	2,47E-03
8	2	8,82	128,82	5	2,55E-03
				MOYENNE	2,36E-03

				Essai 3				
	mm		**cm**		**mm**		**cm**	
Hsortie	356		35,6	**Hmariotte**	325		32,5	
gradient i	0,13							
	laps	min	s	t (s)	mL		k (cm/s)	
	1	0	21,41	21,41	5		9,91E-03	
	2	0	17,97	17,97	5		1,83E-02	
	3	0	17,05	17,05	5		1,93E-02	
	4	0	17,37	17,37	5		1,89E-02	
	5	0	18,35	18,35	5		1,79E-02	
	6	0	18,89	18,89	5		1,74E-02	
	7	0	17,69	17,69	5		1,86E-02	
	8	0	17,08	17,08	5		1,92E-02	
					MOYENNE		1,74E-02	
				Essai 4				
	mm		**cm**		**mm**		**cm**	
Hsortie	356		35,6	**Hmariotte**	325		32,5	
gradient i	0,13							
	laps	min	s	t (s)	mL		k (cm/s)	
	1	0	14,95	14,95	5		2,20E-02	
	2	0	19,89	19,89	5		1,65E-02	
	3	0	16,51	16,51	5		1,99E-02	
	4	0	17,31	17,31	5		1,90E-02	
	5	0	17,94	17,94	5		1,83E-02	
	6	0	17,16	17,16	5		1,92E-02	
	7	0	16,84	16,84	5		1,95E-02	
	8	0	16,91	16,91	5		1,94E-02	
					MOYENNE		1,92E-02	

ANNEXE E : ESSAIS DE PORTANCE CALIFORNIEN (CBR)

E.1 : Classification des essais

Afin de simplifier la lecture de l'article présenté au chapitre 4, les essais CBR ont été classés selon un ordre différent que l'ordre chronologique qui a été utilisé au laboratoire. Le tableau suivant montre l'équivalence entre les numéros d'essais chronologiques et ceux présentés dans l'article. Les essais à l'annexe sont présentés en ordre chronologique :

No. essai chronologique	No. essai Chapitre 4	No. essai chronologique	No. essai Chapitre 4
1	3	23	20
2	4	24	21
4	5	25	24
6	6	26	25
7	1	27	22
9	2	28	23
10	14	29	26
11	15	30	27
12	10	31	28
13	11	32	29
14	7	33	32
15	12	34	33
16	13	35	36
17	8	36	37
18	9	37	38
19	18	38	39
20	19	39	30
21	16	40	31
22	17	41	34
		42	35

E.2 Résultats de l'essai de portance californien (CBR)

Date:	26-févr		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	3,00	
# Essai:	1		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	7,2
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2300

Mise en place

	Masses volumiques			Teneurs en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	A
Moule ID		B		$M_{réc.}$	436
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	5448
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5284
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	164
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	4848
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	3,38
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19336,3			
M_{sol} (g)		5012			
ρ (kg/m^3):		2161			
ρ_d (kg/m^3):		2090			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

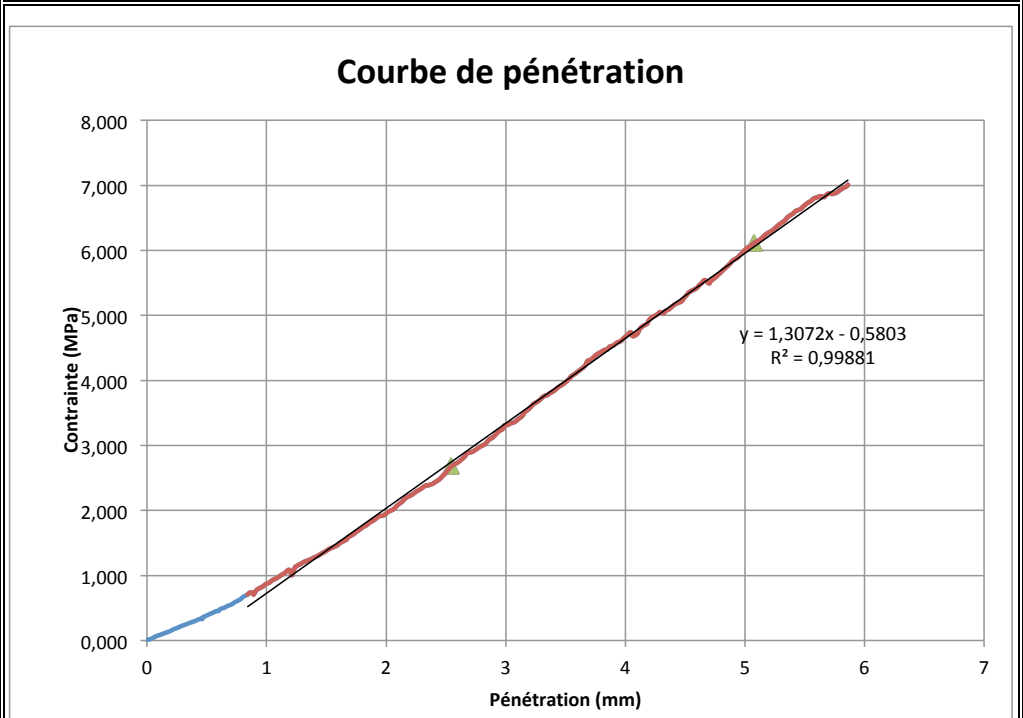
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	5161,935	2,679	6,9	38,83
5,08	11782	6,116	10	61,16

Correction courbe concave		corr (mm)	0,44	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,98	6267,465	3,253	6,9	47,15
5,52	12985,355	6,740	10	67,40

Valeur CBR (%) :	67,40

Graphique


Courbe de pénétration
8,000
7,000
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 1,3072x - 0,5803
R² = 0,99881

Date:	26-févr		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	3,00	
# Essai:	2		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	7,2
# Moule	F	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2300

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	A
Moule ID	F			$M_{réc.}$	432
D_{Moule} (mm)	152,54	152,41	152,51	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	5496
H_{Moule} (mm)	177,43	177,53	177,51	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5340
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	156
Volume (m^3)	0,002316			M_s (sol sec)	4908
M_{moule} (g)	7288,1			w (%)	3,18
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19287,2				
M_{sol} (g)	5064				
ρ (kg/m^3):	2186				
ρ_d (kg/m^3):	2119				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

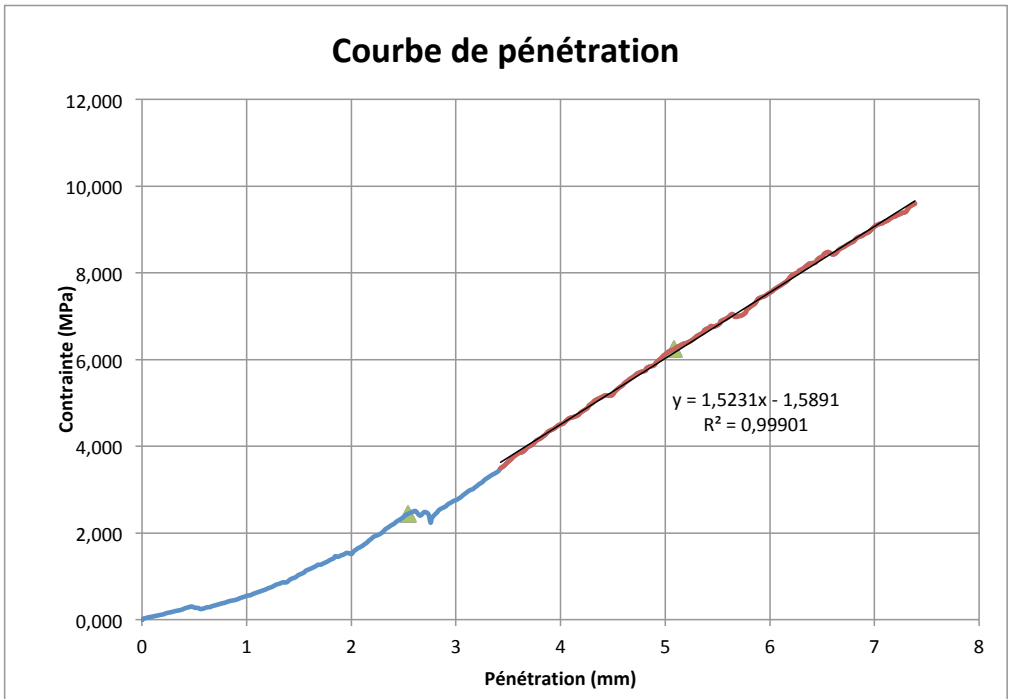
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	4684,635	2,432	6,9	35,24
5,08	12030,97	6,245	10	62,45

Correction courbe concave		corr (mm)	1,04	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,58	7324,19	3,802	6,9	55,10
6,12	14938,415	7,754	10	77,54

Valeur CBR (%) :	77,54

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 1,5231x - 1,5891
R² = 0,99901

Date:	05-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	5,50	
# Essai:	4		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	7,2
# Moule	C	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2300

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P2
Moule ID		C		$M_{réc.}$	891,4
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6200,9
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5948,7
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	252,2
Volume (m^3)		0,002318		M_s (sol sec)	5057,3
M_{moule} (g)		7209,3		w (%)	4,99
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19497			
M_{sol} (g)		5352,6			
ρ (kg/m^3):		2309			
ρ_d (kg/m^3):		2199			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

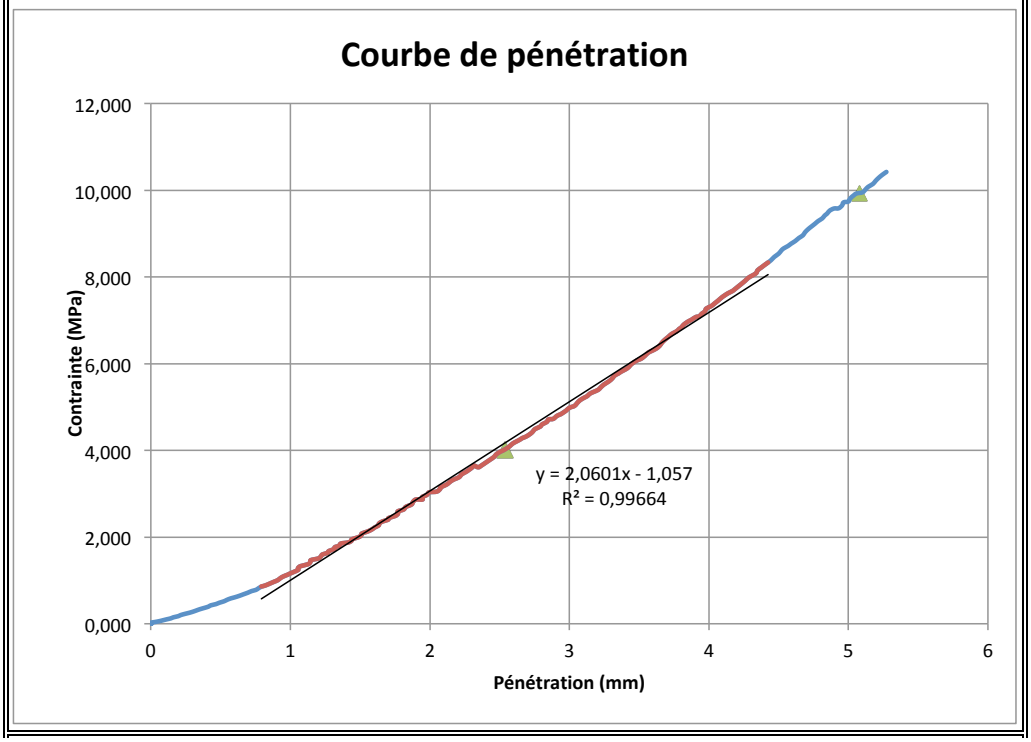
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	7714,2	4,004	6,9	58,03
5,08	19132,85	9,931	10	99,31

Correction courbe concave		corr (mm)	0,51	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,05	7324,19	3,802	6,9	55,10
5,27	20084,87	10,426	10	104,26

Valeur CBR (%) :	104,26

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
Pénétration (mm)
y = 2,0601x - 1,057
R² = 0,99664

Date:	05-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	5,50	
# Essai:	6		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	7,2
# Moule	F	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2300

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P4
Moule ID		D		$M_{réc.}$	880,2
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6150,3
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5898,3
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	252
Volume (m^3)		0,002317		M_s (sol sec)	5018,1
M_{moule} (g)		7439,7		w (%)	5,02
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19804,9			
M_{sol} (g)		5430,1			
ρ (kg/m^3):		2343			
ρ_d (kg/m^3):		2231			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

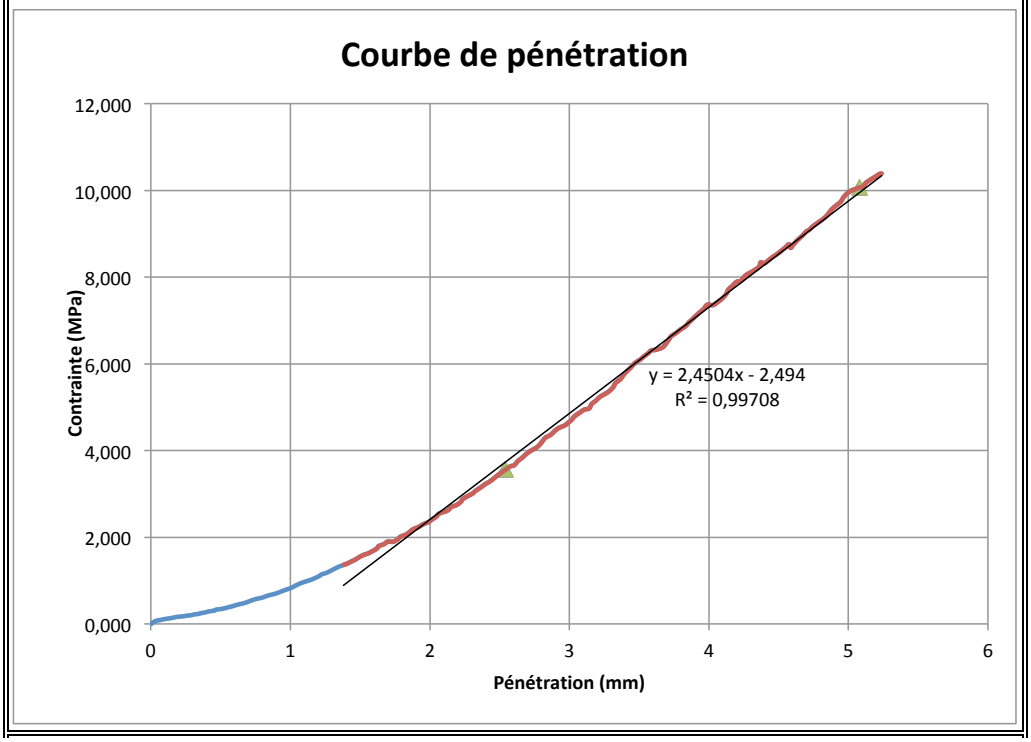
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	6858,715	3,560	6,9	51,60
5,08	19401,815	10,071	10	100,71

Correction courbe concave		corr (mm)	1,02	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,56	12036,775	6,248	6,9	90,55
5,23	20017,575	10,391	10	103,91

Valeur CBR (%) :	103,91

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
Pénétration (mm)
y = 2,4504x - 2,494
R² = 0,99708

Date:	06-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,00	
# Essai:	7		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Standard	Nb couches:	3	w_{opt} (%):	8,5
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2200

Mise en place

	Masses volumiques			Teneurs en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P1
Moule ID		B		$M_{réc.}$	890,2
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	5855
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5599,3
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	255,7
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	4709,1
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	5,43
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19347,2			
M_{sol} (g)		5022,9			
ρ (kg/m^3):		2166			
ρ_d (kg/m^3):		2054			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

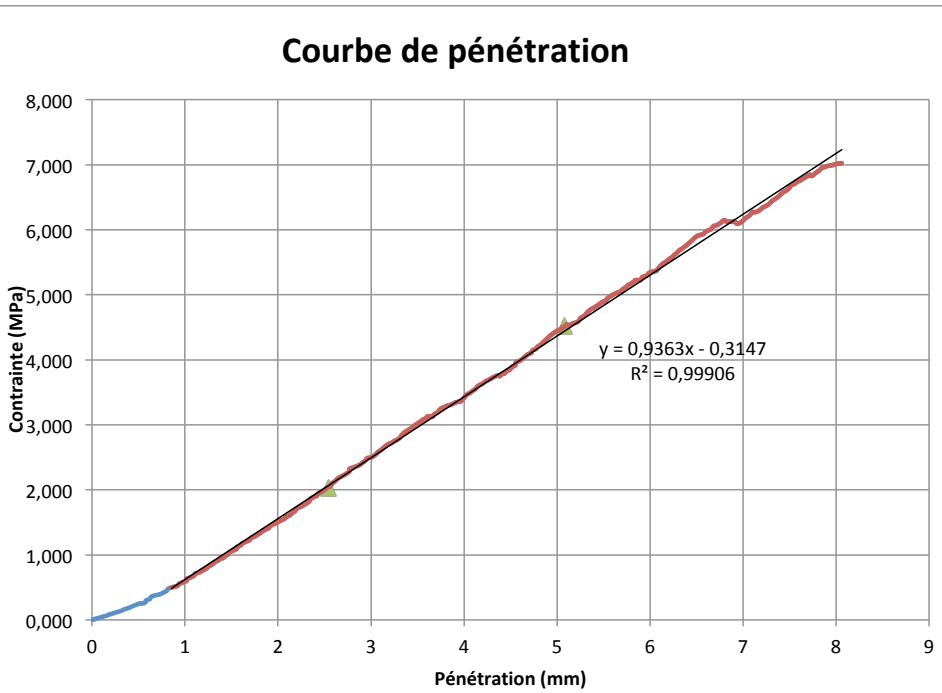
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	3922,245	2,036	6,9	29,51
5,08	8708,145	4,520	10	45,20

Correction courbe concave		corr (mm)	0,34		
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)	
2,88	4601,86	2,389	6,9	34,62	
5,42	9284,13	4,819	10	48,19	

Valeur CBR (%) :	48,19

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 0,9363x - 0,3147
R² = 0,99906
8,000
7,000
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9

Date:	06-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,00	
# Essai:	9		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Standard	Nb couches:	3	w_{opt} (%):	8,5
# Moule	D	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2200

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID		D		$M_{réc.}$	879,9
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	5952
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5686,9
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	265,1
Volume (m^3)		0,002317		M_s (sol sec)	4807
M_{moule} (g)		7439,7		w (%)	5,51
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19510			
M_{sol} (g)		5135,2			
ρ (kg/m^3):		2216			
ρ_d (kg/m^3):		2100			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

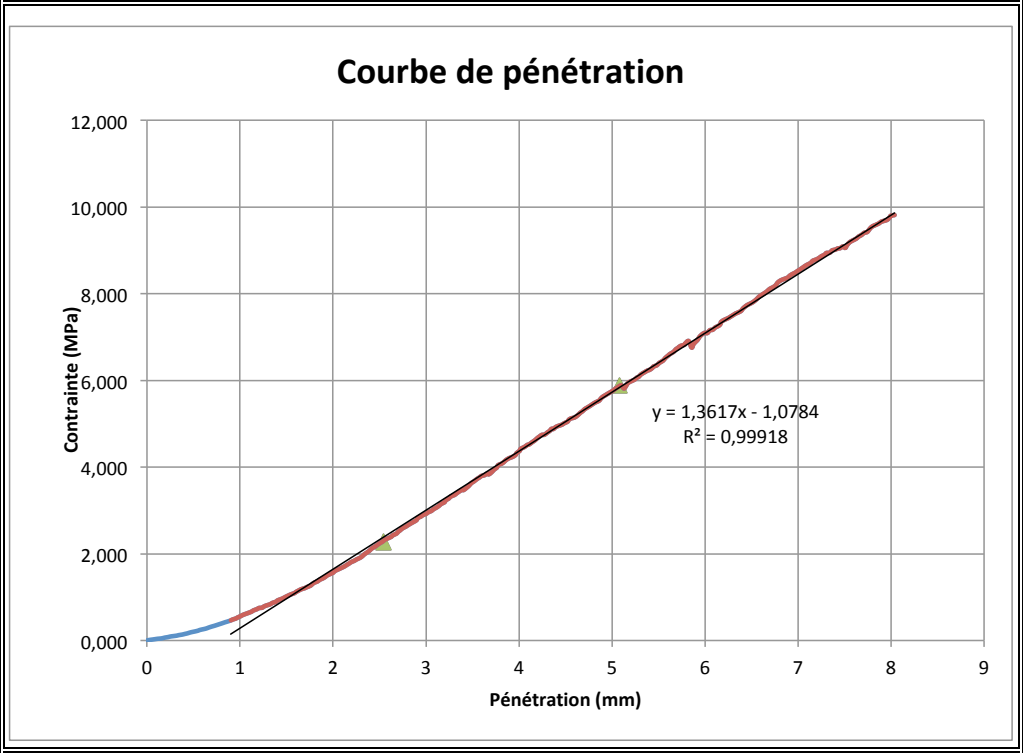
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	4389,01	2,278	6,9	33,02
5,08	11341,895	5,887	10	58,87

Correction courbe concave		corr (mm)	0,79

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,33	6545,675	3,398	6,9	49,24
5,87	13189,175	6,846	10	68,46

Valeur CBR (%) :	68,46

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Pénétration (mm)
y = 1,3617x - 1,0784
R² = 0,99918

Date:	08-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,30	
# Essai:	10		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	+	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	6,5
# Moule	B	coups/couche:	81	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2400

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P1
Moule ID		B		$M_{réc.}$	890,3
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6482,4
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	6200,5
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	281,9
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	5310,2
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	5,31
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19992,1			
M_{sol} (g)		5667,8			
ρ (kg/m^3):		2444			
ρ_d (kg/m^3):		2321			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

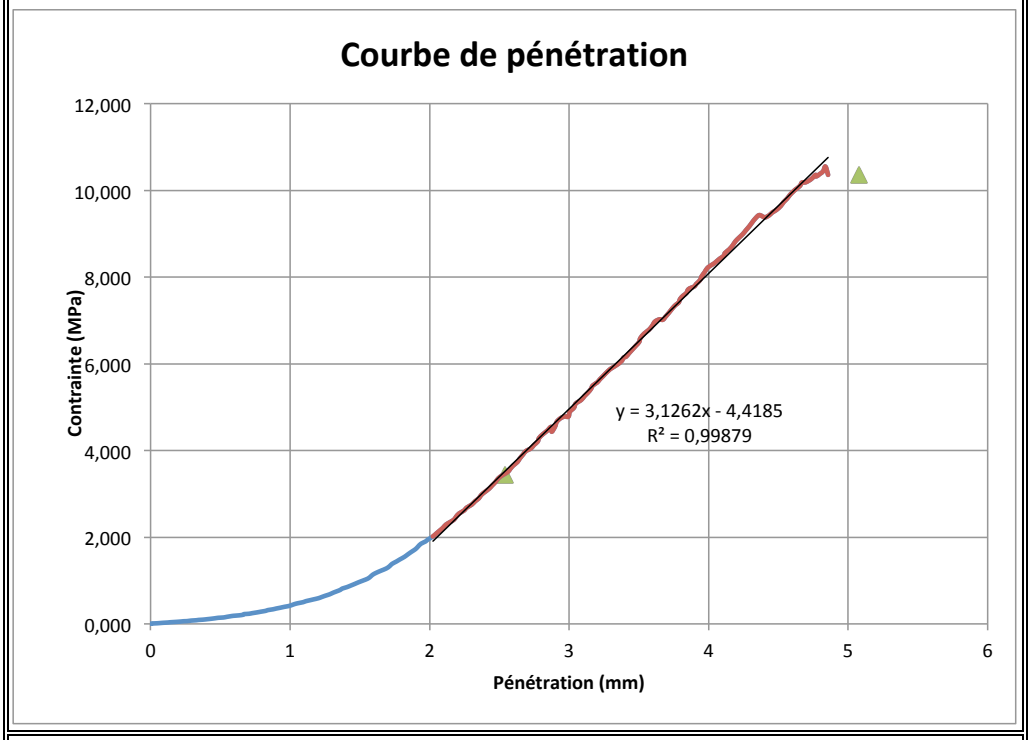
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	6606,305	3,429	6,9	49,70
5,08	19961,675	10,362	10	103,62

Correction courbe concave		corr (mm)	1,41

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,95	15436,57	8,013	6,9	116,13
6,49		0,000	10	0,00

Valeur CBR (%) :	116,13

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
Pénétration (mm)
y = 3,1262x - 4,4185
R² = 0,99879

Date:	08-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,30	
# Essai:	11		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	+	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	6,5
# Moule	C	coups/couche:	81	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2400

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P2
Moule ID		C		$M_{réc.}$	891,1
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6480,9
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	6168,3
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	312,6
Volume (m^3)		0,002318		M_s (sol sec)	5277,2
M_{moule} (g)		7209,3		w (%)	5,92
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19791,6			
M_{sol} (g)		5647,2			
ρ (kg/m^3):		2436			
ρ_d (kg/m^3):		2300			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

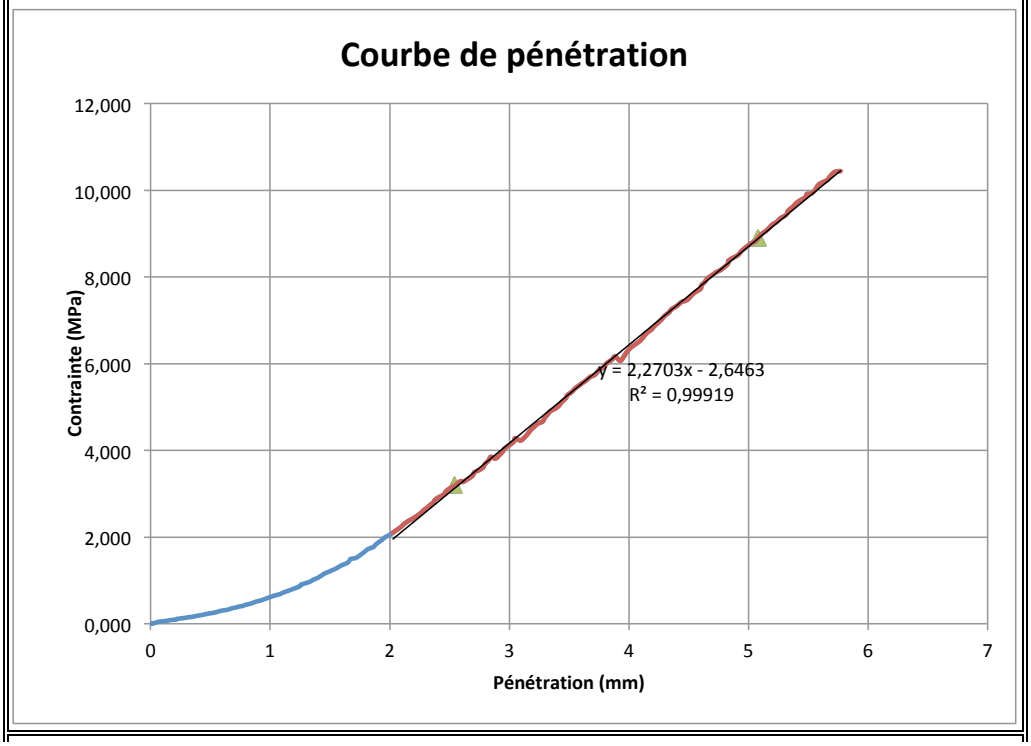
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	6150,075	3,192	6,9	46,27
5,08	17144,1	8,899	10	88,99

Correction courbe concave		corr (mm)	1,17	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,71	11030,145	5,725	6,9	82,98
5,77	20121,205	10,444	10	104,44

Valeur CBR (%) :	104,44

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 2,2703x - 2,6463
R² = 0,99919

Date:	15-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,30	
# Essai:	12		Trempage	non ☐	oui ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	7,2
# Moule	D	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2300

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P1
Moule ID		D		$M_{réc.}$	889,8
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6437,9
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	6112,5
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	325,4
Volume (m^3)		0,002317		M_s (sol sec)	5222,7
M_{moule} (g)		7439,7		w (%)	6,23
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19999,5			
M_{sol} (g)		5624,7			
ρ (kg/m^3):		2427			
ρ_d (kg/m^3):		2285			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

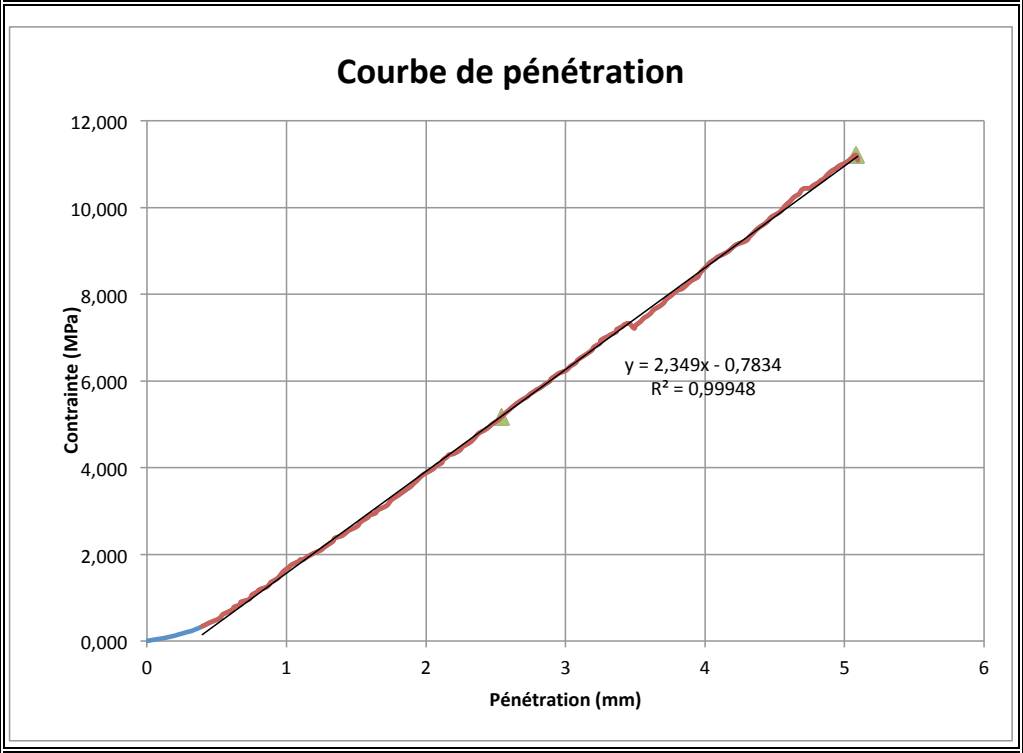
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	9965,035	5,173	6,9	74,97
5,08	21603,845	11,214	10	112,14

Correction courbe concave		corr (mm)	0,33	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,87	11554,96	5,998	6,9	86,93
5,41	21372,29	11,094	10	110,94

Valeur CBR (%) :	110,94

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
Pénétration (mm)
y = 2,349x - 0,7834
R² = 0,99948

Date:	15-mars		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,30	
# Essai:	2		Trempage	Oui ☑	Non ☐

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	7,2
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2300

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P4
Moule ID		B		$M_{réc.}$	879,4
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6282,3
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5974
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	308,3
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	5094,6
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	6,05
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19813,6			
M_{sol} (g)		5489,3			
ρ (kg/m^3):		2367			
ρ_d (kg/m^3):		2232			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

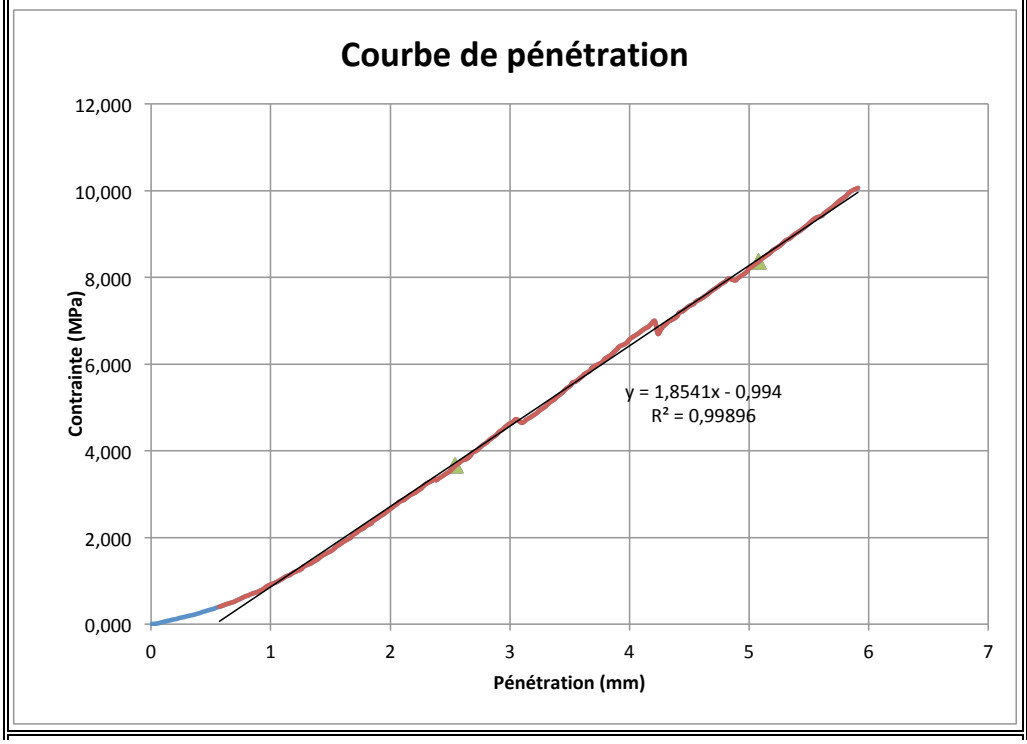
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	7063,61	3,667	6,9	53,14
5,08	16112,745	8,364	10	83,64

Correction courbe concave		corr (mm)	0,54	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,08	8951,525	4,647	6,9	67,34
5,62	18234,58	9,465	10	94,65

Valeur CBR (%) :	94,65

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 1,8541x - 0,994
R² = 0,99896

Date:	12-avr		Matériau:	Courbe complète Baril #2	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,00	
# Essai:	14		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	inconnu
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	inconnu

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID	B			$M_{réc.}$	879,4
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6112
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5824,3
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	287,7
Volume (m^3)	0,002319			M_s (sol sec)	4944,9
M_{moule} (g)	7389,2			w (%)	5,82
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19707,8				
M_{sol} (g)	5383,5				
ρ (kg/m^3):	2321				
ρ_d (kg/m^3):	2194				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

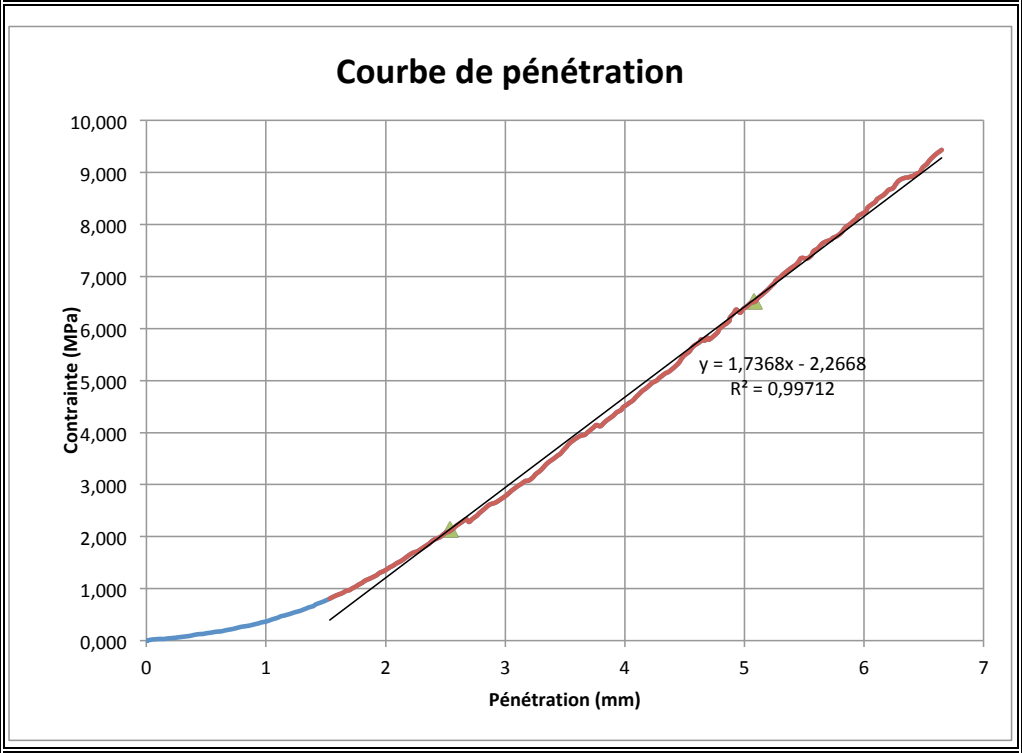
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	4117,68	2,137	6,9	30,98
5,08	12560,515	6,520	10	65,20

Correction courbe concave		corr (mm)	1,31	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,85	8142,48	4,227	6,9	61,25
6,39	17207,955	8,932	10	89,32

Valeur CBR (%) :	89,32

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 1,7368x - 2,2668
R² = 0,99712
10,000
9,000
8,000
7,000
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7

Date:	19-juill		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,00	
# Essai:	15		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	7,2
# Moule	F	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	2300

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	p1
Moule ID		D		$M_{réc.}$	890,3
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6436,3
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	6156,1
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	280,2
Volume (m^3)		0,002317		M_s (sol sec)	5265,8
M_{moule} (g)		7439,7		w (%)	5,32
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19955,1			
M_{sol} (g)		5580,3			
ρ (kg/m^3):		2408			
ρ_d (kg/m^3):		2286			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

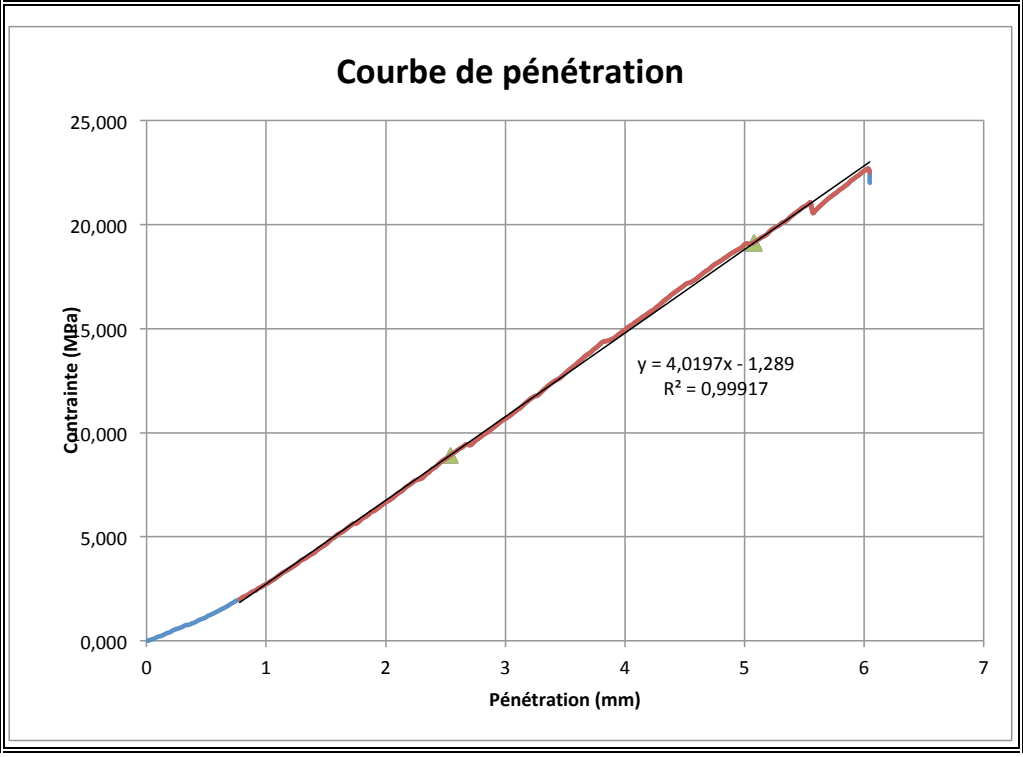
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	17149,5	8,902	6,9	129,01
5,08	36859,5	19,133	10	191,33

Correction courbe concave		corr (mm)	0,32	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,86	19440	10,091	6,9	146,24
5,4	39492	20,499	10	204,99

Valeur CBR (%) :	204,99

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 4,0197x - 1,289
R² = 0,99917

Date:	19-juill		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,00	
# Essai:	16		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Plus	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	C	coups/couche:	81	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID	C			$M_{réc.}$	879,8
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6391
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6112,7
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	278,3
Volume (m^3)	0,002318			M_s (sol sec)	5232,9
M_{moule} (g)	7209,3			w (%)	5,32
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19689,6				
M_{sol} (g)	5545,2				
ρ (kg/m^3):	2392				
ρ_d (kg/m^3):	2271				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

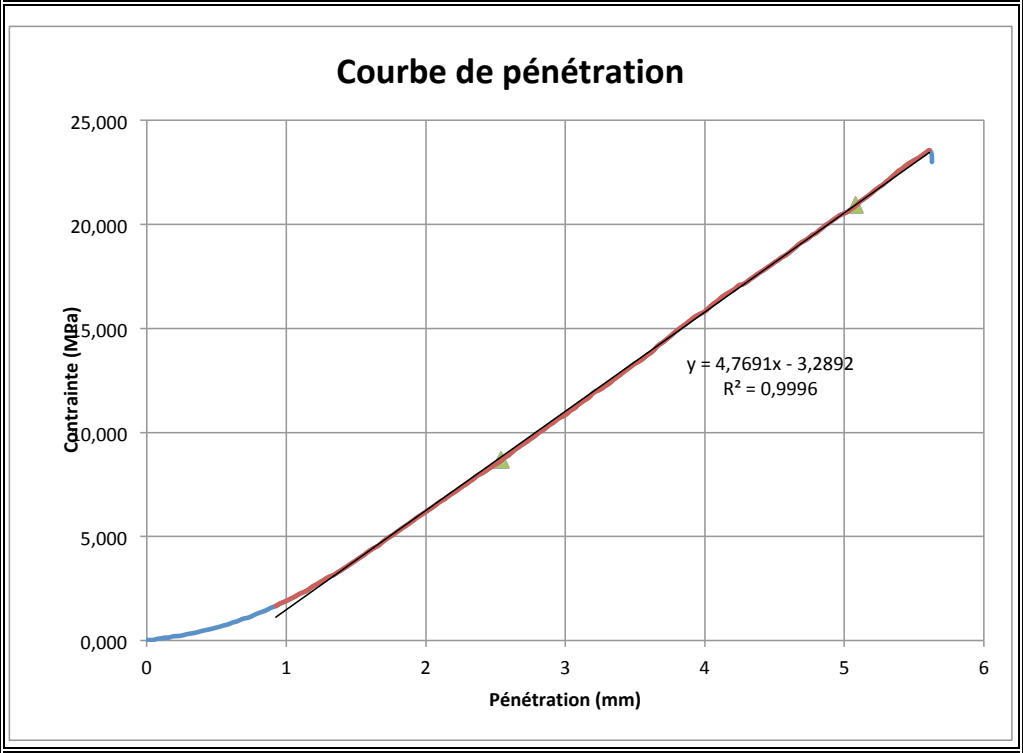
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	16708,5	8,673	6,9	125,70
5,08	40315,5	20,927	10	209,27

Correction courbe concave		corr (mm)	0,69	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,23	23188,5	12,037	6,9	174,44
5,77	44311,5	23,001	10	230,01

Valeur CBR (%) :	230,01

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
Pénétration (mm)
y = 4,7691x - 3,2892
R² = 0,9996

Date:	19-juill		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,00	
# Essai:	17		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	C4
Moule ID		B		$M_{réc.}$	850,3
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6280,1
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5967,2
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	312,9
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	5116,9
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	6,12
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19787,4			
M_{sol} (g)		5463,1			
ρ (kg/m^3):		2355			
ρ_d (kg/m^3):		2220			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

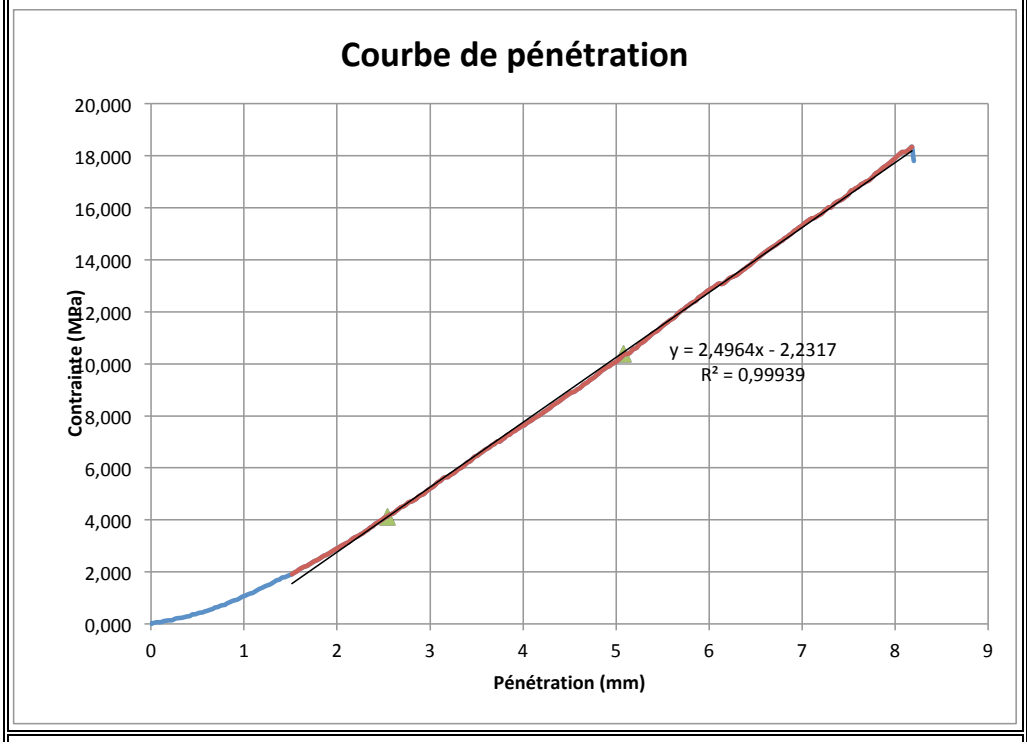
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	7938	4,120	6,9	59,72
5,08	19998	10,381	10	103,81

Correction courbe concave		corr (mm)	0,89	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,43	12055,5	6,258	6,9	90,69
5,97	24579	12,758	10	127,58

Valeur CBR (%) :	127,58

Graphique


Courbe de pénétration
20,000
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Pénétration (mm)
y = 2,4964x - 2,2317
R² = 0,99939

Date:	19-juill		Matériau:	Courbe complète	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,00	
# Essai:	18		Trempage	non ☐	Oui ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	F	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID		F		$M_{réc.}$	879,4
D_{Moule} (mm)	152,54	152,41	152,51	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6213,9
H_{Moule} (mm)	177,43	177,53	177,51	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5916
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	297,9
Volume (m^3)		0,002316		M_s (sol sec)	5036,6
M_{moule} (g)		7288,1		w (%)	5,91
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19607			
M_{sol} (g)		5383,8			
ρ (kg/m^3):		2324			
ρ_d (kg/m^3):		2195			

Trempage

Lecture ini	0	Lecture fin	0	Gonflement (mm)	0
				Gonflement (%)	0

CBR

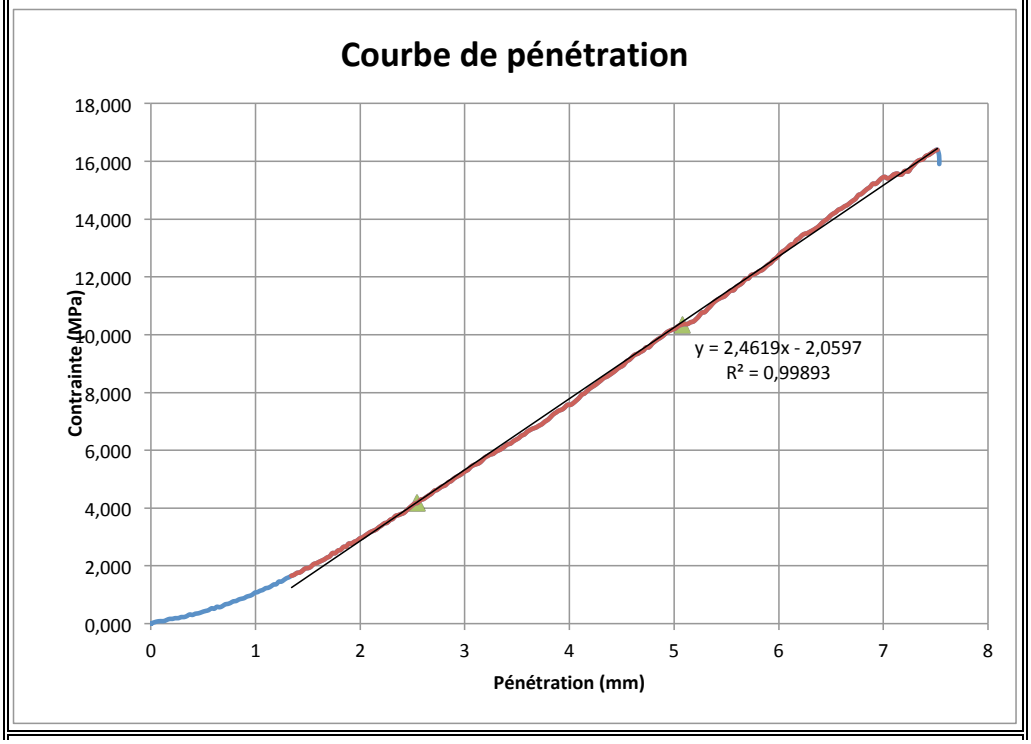
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	8014,5	4,160	6,9	60,29
5,08	19926	10,343	10	103,43

Correction courbe concave		corr (mm)	0,84	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,38	11835	6,143	6,9	89,03
5,92	24043,5	12,480	10	124,80

Valeur CBR (%) :	124,80

Graphique


Courbe de pénétration
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 2,4619x - 2,0597
R² = 0,99893

Date:	23-juill		Matériau:	dmax=10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,00	
# Essai:	19		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P4
Moule ID	B			$M_{réc.}$	880,2
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6421,2
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6072,7
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	348,5
Volume (m^3)	0,002319			M_s (sol sec)	5192,5
M_{moule} (g)	7389,2			w (%)	6,71
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19916,2				
M_{sol} (g)	5591,9				
ρ (kg/m^3):	2411				
ρ_d (kg/m^3):	2259				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

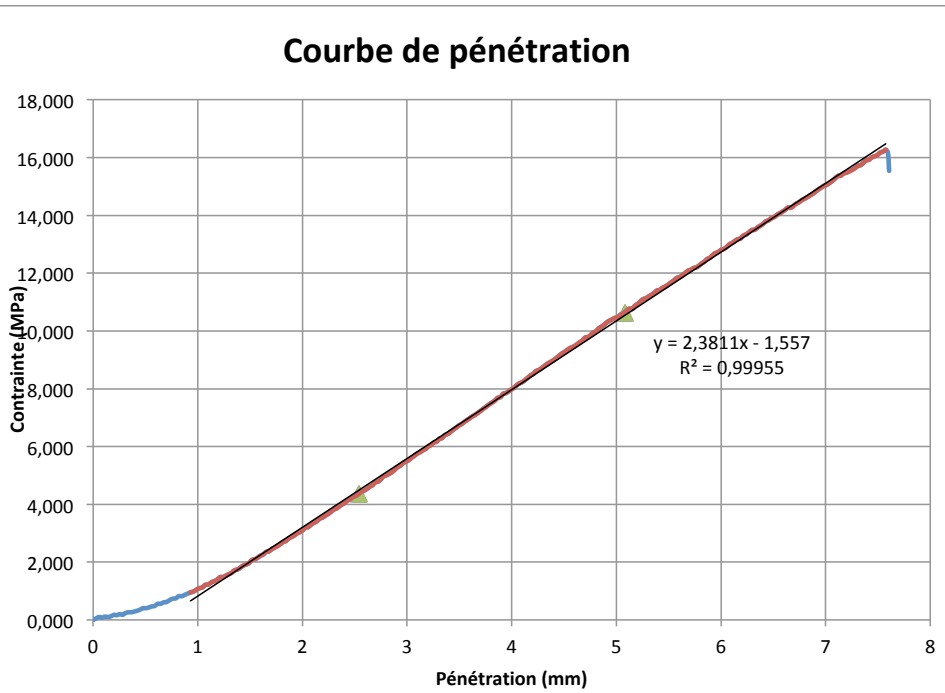
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	8401,5	4,361	6,9	63,20
5,08	20461,5	10,621	10	106,21

Correction courbe concave		corr (mm)	0,65		
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)	
3,19	11569,5	6,005	6,9	87,04	
5,73	23458,5	12,177	10	121,77	

Valeur CBR (%) :	121,77

Graphique


Courbe de pénétration
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 2,3811x - 1,557
R² = 0,99955

Date:	23-juill		Matériau:	dmax=10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	8,00	
# Essai:	20		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	D	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P1
Moule ID		D		$M_{réc.}$	890,2
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6306,8
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5964,8
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	342
Volume (m^3)		0,002317		M_s (sol sec)	5074,6
M_{moule} (g)		7439,7		w (%)	6,74
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19848,9			
M_{sol} (g)		5474,1			
ρ (kg/m^3):		2362			
ρ_d (kg/m^3):		2213			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

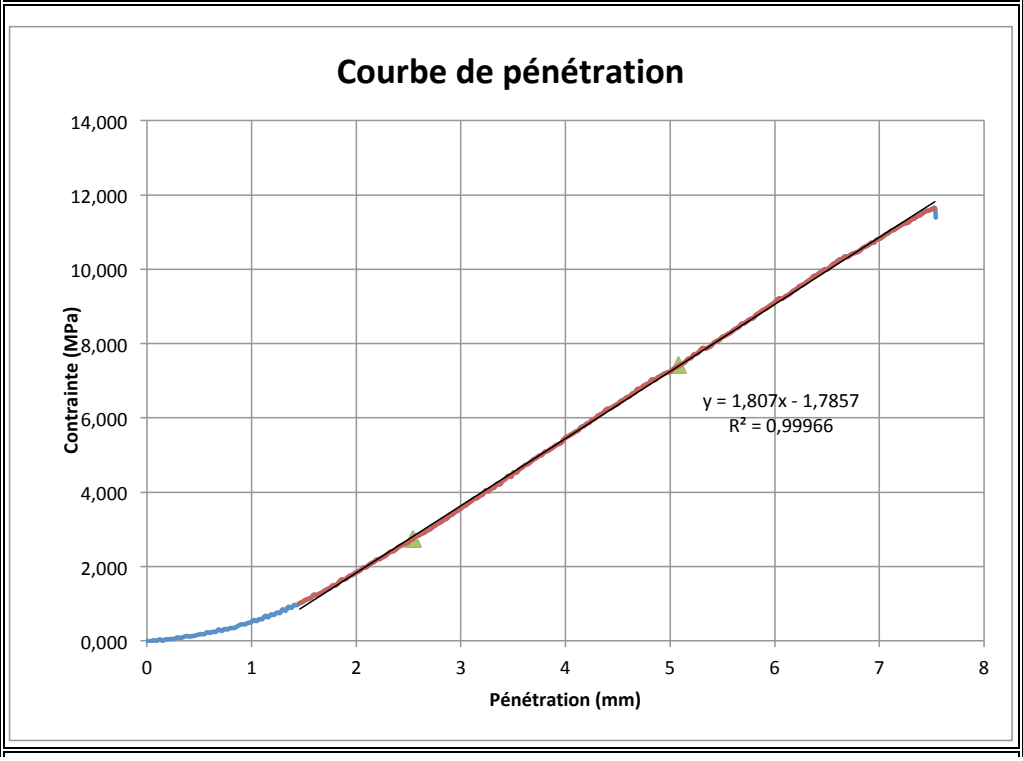
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	5283	2,742	6,9	39,74
5,08	14296,5	7,421	10	74,21

Correction courbe concave		corr (mm)	0,99	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,53	8721	4,527	6,9	65,61
6,07	17734,5	9,206	10	92,06

Valeur CBR (%) :	92,06

Graphique


Courbe de pénétration
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 1,807x - 1,7857
R² = 0,99966

Date:	26-juill		Matériau:	dmax=10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,00	
# Essai:	21		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Standard	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P2
Moule ID		B		$M_{réc.}$	891,1
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	5832,9
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5565,1
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	267,8
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	4674
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	5,73
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19311,2			
M_{sol} (g)		4986,9			
ρ (kg/m^3):		2150			
ρ_d (kg/m^3):		2034			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

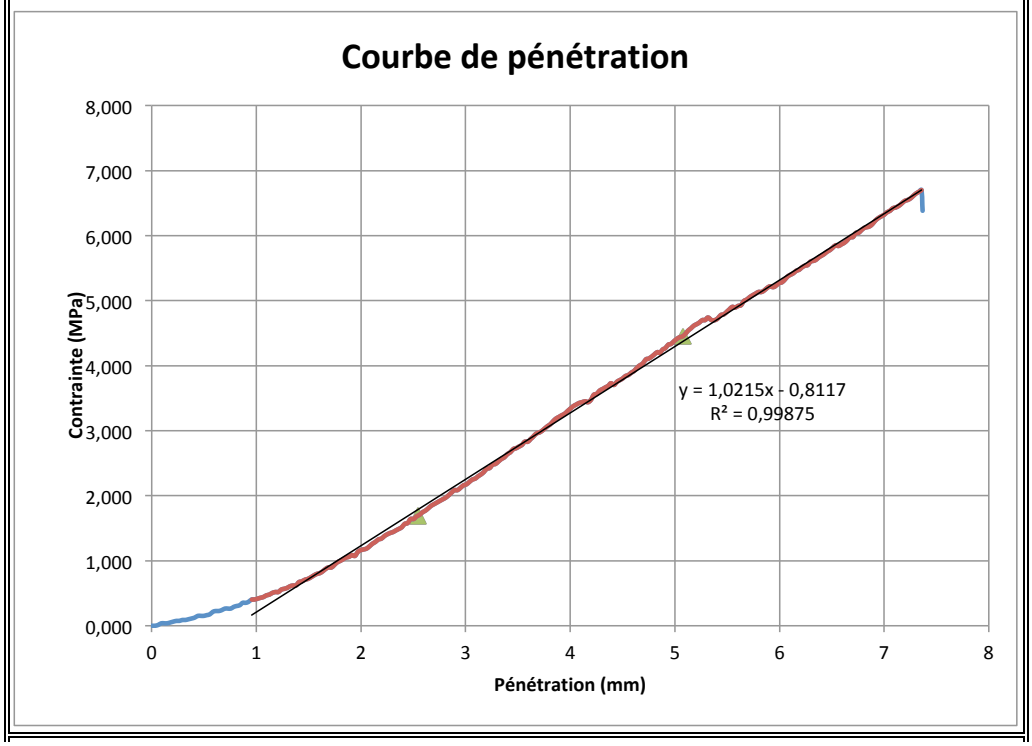
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	3240	1,682	6,9	24,37
5,08	8572,5	4,450	10	44,50

Correction courbe concave		corr (mm)	0,79	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,33	4945,5	2,567	6,9	37,20
5,87	10012,5	5,197	10	51,97

Valeur CBR (%) :	51,97

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 1,0215x - 0,8117
R² = 0,99875
8,000
7,000
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8

Date:	26-juill		Matériau:	dmax=10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	7,00	
# Essai:	22		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Standard	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	C	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P1
Moule ID	C			$M_{réc.}$	890,3
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	5862,5
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5584,7
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	277,8
Volume (m^3)	0,002318			M_s (sol sec)	4694,4
M_{moule} (g)	7209,3			w (%)	5,92
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19174,4				
M_{sol} (g)	5030				
ρ (kg/m^3):	2170				
ρ_d (kg/m^3):	2049				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

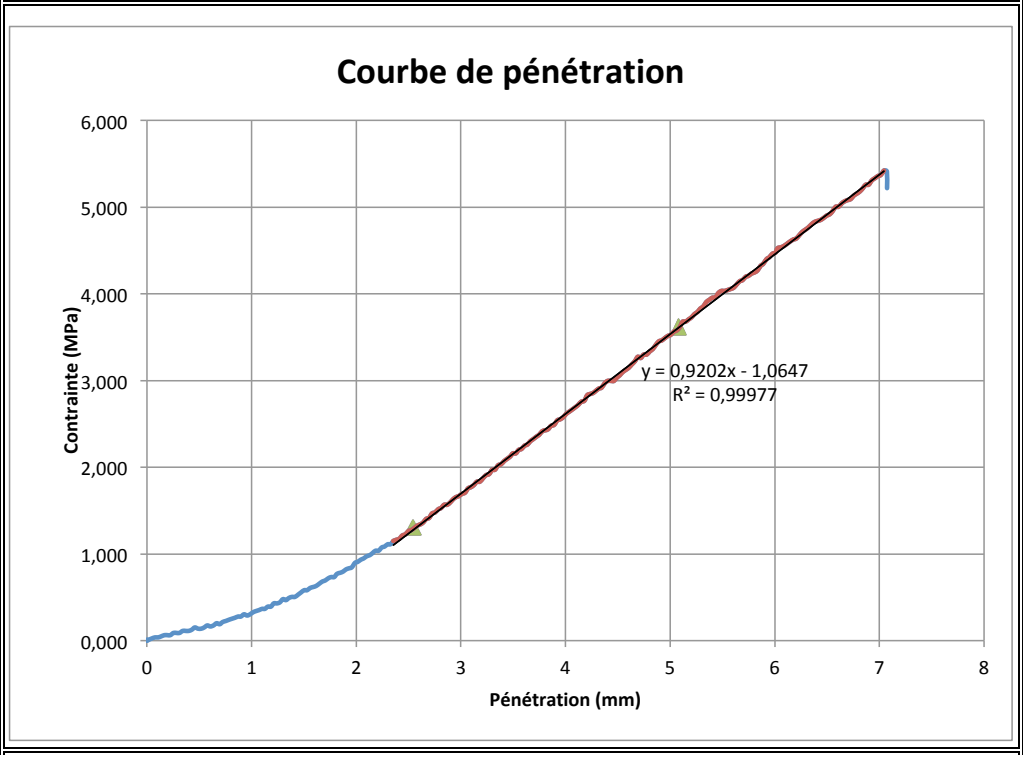
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	2506,5	1,301	6,9	18,86
5,08	6966	3,616	10	36,16

Correction courbe concave		corr (mm)	1,16	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,7	4531,5	2,352	6,9	34,09
6,24	9013,5	4,679	10	46,79

Valeur CBR (%) :	46,79

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 0,9202x - 1,0647
R² = 0,99977
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8

Date:	26-juill		Matériau:	Dmax=10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,00	
# Essai:	23		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	+	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	D	coups/couche:	81	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID	D			$M_{réc.}$	879,7
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6304,3
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	6029,8
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	274,5
Volume (m^3)	0,002317			M_s (sol sec)	5150,1
M_{moule} (g)	7439,7			w (%)	5,33
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19830,5				
M_{sol} (g)	5455,7				
ρ (kg/m^3):	2354				
ρ_d (kg/m^3):	2235				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

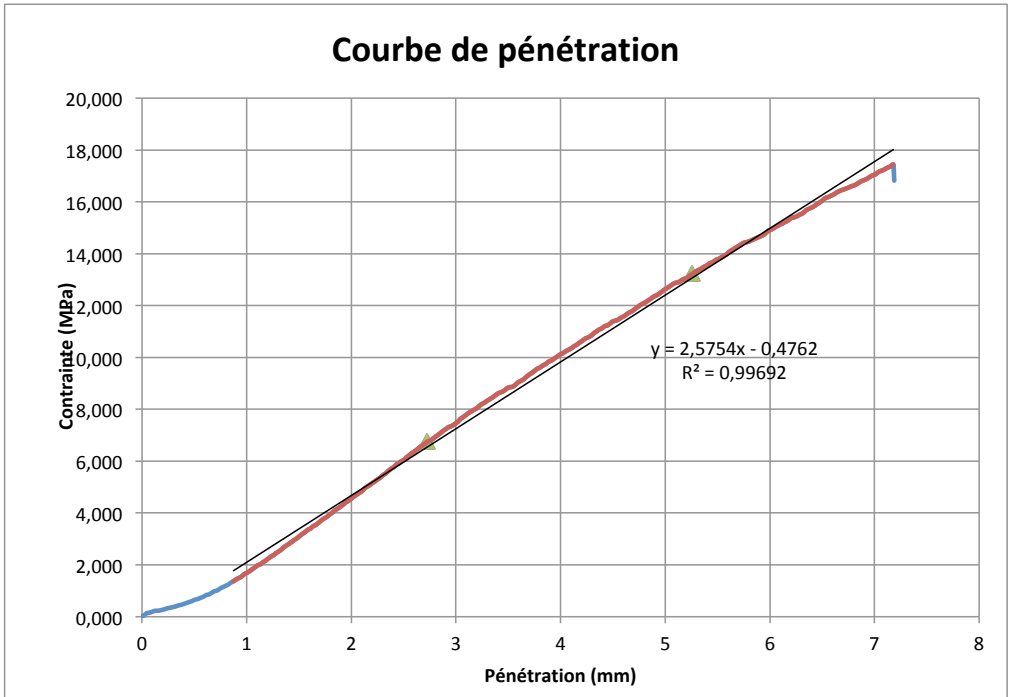
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	11839,5	6,146	6,9	89,07
5,08	24799,5	12,873	10	128,73

Correction courbe concave		corr (mm)	0,18	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,72	13009,5	6,753	6,9	97,87
5,26	25483,5	13,228	10	132,28

Valeur CBR (%) :	132,28

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 2,5754x - 0,4762
R² = 0,99692
20,000
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8

Date:	26-juill		Matériau:	Dmax=10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,00	
# Essai:	24		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	+	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	F	coups/couche:	81	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	C4
Moule ID		F		$M_{réc.}$	850,6
D_{Moule} (mm)	152,54	152,41	152,51	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6245,2
H_{Moule} (mm)	177,43	177,53	177,51	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5971,5
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	273,7
Volume (m^3)		0,002316		M_s (sol sec)	5120,9
M_{moule} (g)		7288,1		w (%)	5,34
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19659,9			
M_{sol} (g)		5436,7			
ρ (kg/m^3):		2347			
ρ_d (kg/m^3):		2228			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

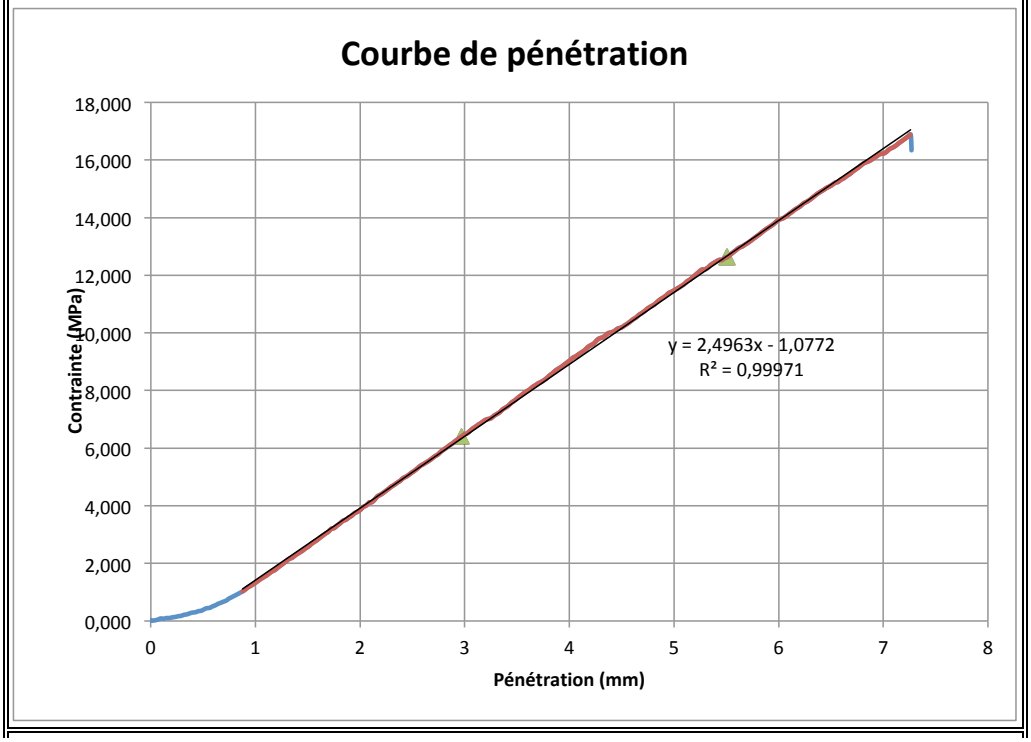
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	10206	5,298	6,9	76,78
5,08	22387,5	11,621	10	116,21

Correction courbe concave		corr (mm)	0,43

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,97	12325,5	6,398	6,9	92,72
5,51	24336	12,632	10	126,32

Valeur CBR (%) :	126,32

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 2,4963x - 1,0772
R² = 0,99971
0,000
2,000
4,000
6,000
8,000
10,000
12,000
14,000
16,000
18,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8

Date:	30-juill		Matériau:	PF4%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	25		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID		B		$M_{réc.}$	879,6
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6372,5
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6075,5
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	297
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	5195,9
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	5,72
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19875,8			
M_{sol} (g)		5551,5			
ρ (kg/m^3):		2394			
ρ_d (kg/m^3):		2264			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

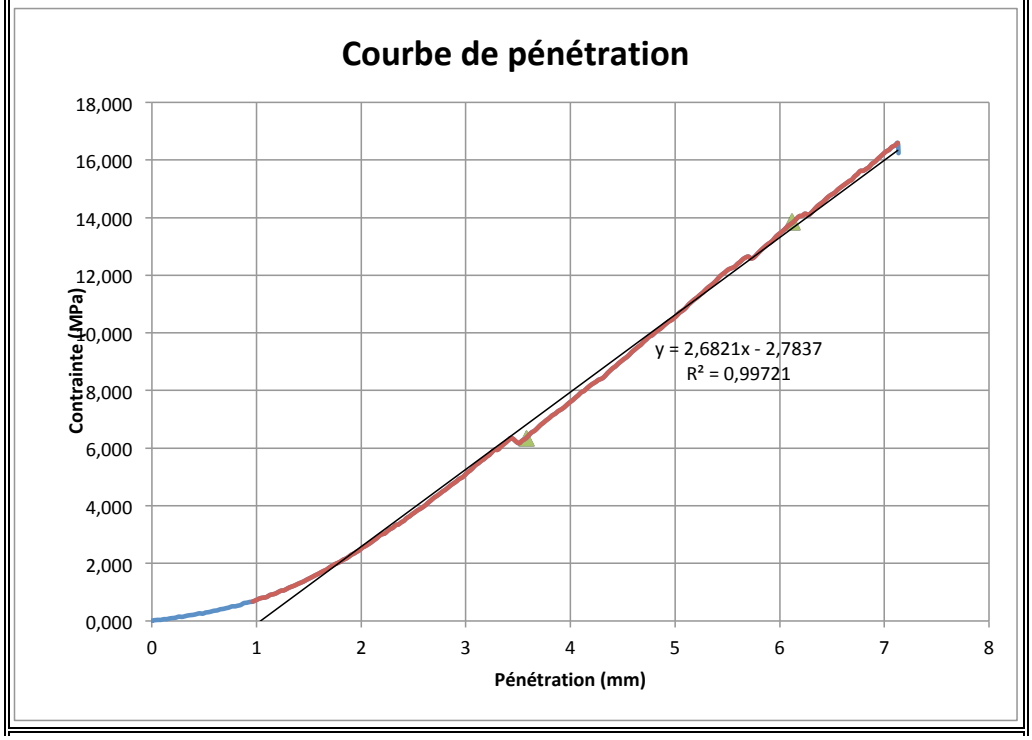
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	7407	3,845	6,9	55,72
5,08	20754	10,773	10	107,73

Correction courbe concave		corr (mm)	1,04	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,58	12204	6,335	6,9	91,81
6,12	26676	13,847	10	138,47

Valeur CBR (%) :	138,47

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 2,6821x - 2,7837
R² = 0,99721
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8

Date:	30-juill		Matériau:	PF4%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	26		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	C	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P2
Moule ID		C		$M_{réc.}$	891
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6278,4
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6012,9
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	265,5
Volume (m^3)		0,002318		M_s (sol sec)	5121,9
M_{moule} (g)		7209,3		w (%)	5,18
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19590,7			
M_{sol} (g)		5446,3			
ρ (kg/m^3):		2350			
ρ_d (kg/m^3):		2234			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

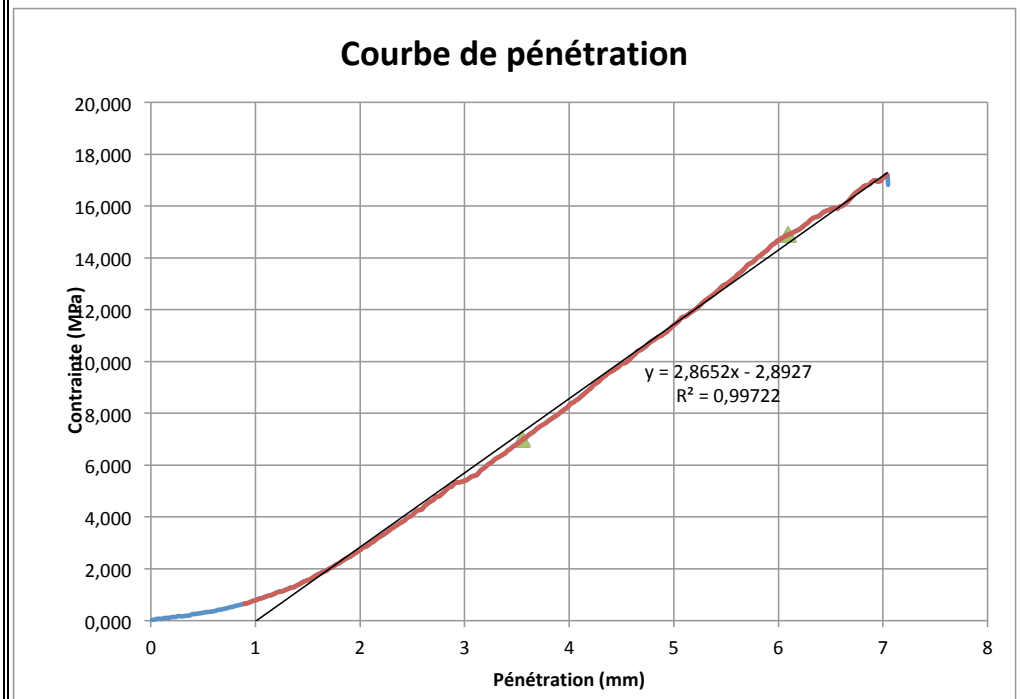
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	8091	4,200	6,9	60,87
5,08	22536	11,698	10	116,98

Correction courbe concave		corr (mm)	1,01	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,55	13495,5	7,005	6,9	101,52
6,09	28696,5	14,896	10	148,96

Valeur CBR (%) :	148,96

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 2,8652x - 2,8927
R² = 0,99722
20,000
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
8

Date:	02-août		Matériau:	PF2%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	27		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID		B		$M_{réc.}$	880,8
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6167,9
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5907,8
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	260,1
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	5027
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	5,17
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19667,4			
M_{sol} (g)		5343,1			
ρ (kg/m^3):		2304			
ρ_d (kg/m^3):		2190			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

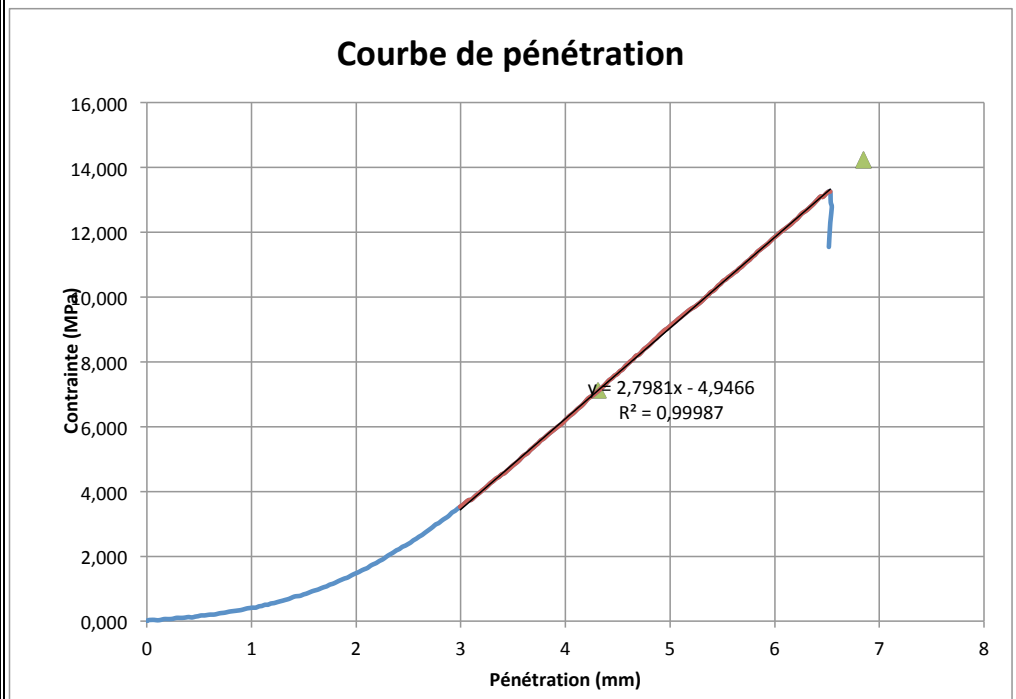
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	4797	2,490	6,9	36,09
5,08	17950,5	9,318	10	93,18

Correction courbe concave		corr (mm)	1,77	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
4,31	13711,5	7,117	6,9	103,15
6,85	22239	14,220	10	142,20

Valeur CBR (%) :	142,20

Graphique


Courbe de pénétration
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 2,7981x - 4,9466
R² = 0,99987

Date:	02-août		Matériau:	PF2%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	28		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	C	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	z2
Moule ID	C			$M_{réc.}$	480,4
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	5782,3
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5537,7
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	244,6
Volume (m^3)	0,002318			M_s (sol sec)	5057,3
M_{moule} (g)	7209,3			w (%)	4,84
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19503,1				
M_{sol} (g)	5358,7				
ρ (kg/m^3):	2312				
ρ_d (kg/m^3):	2205				

Trempage

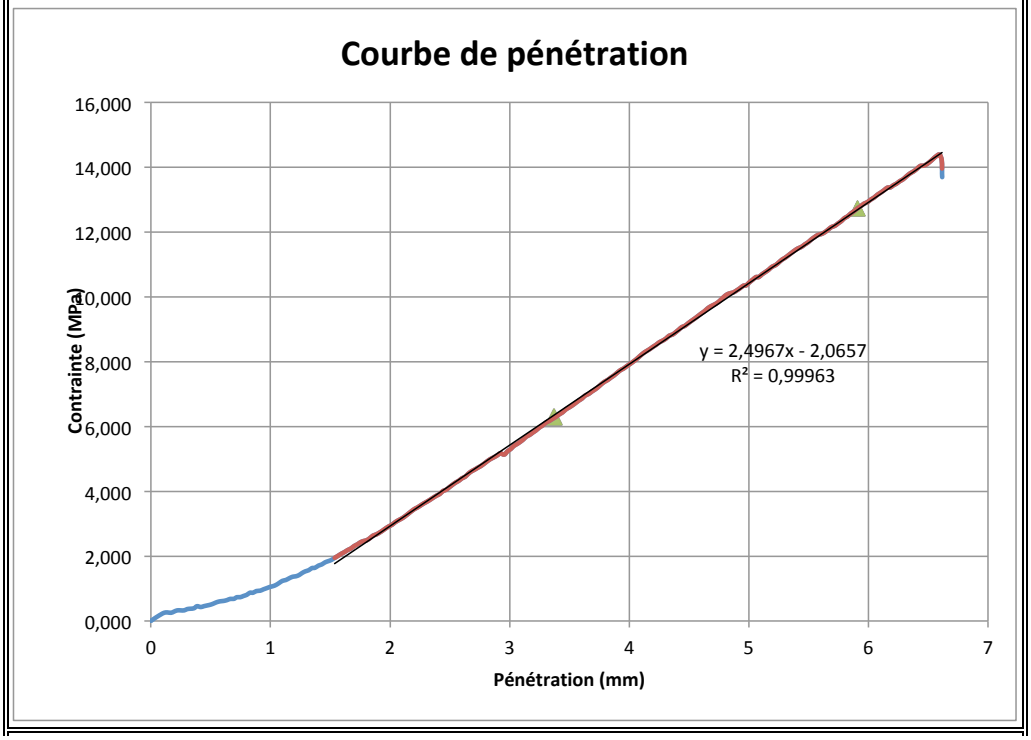
Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

	1	2	3	Moyenne		Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49		49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3					
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)		
2,54	8230,5	4,272	6,9		61,92	
5,08	20439	10,609	10		106,09	
Correction courbe concave		corr (mm)	0,83			
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)		
3,37	12132	6,297	6,9		91,27	
5,91	24529,5	12,733	10		127,33	

Valeur CBR (%) :	127,33

Graphique


Courbe de pénétration
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 2,4967x - 2,0657
R² = 0,99963

Date:	02-août		Matériau:	PF6%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	29		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	D	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P2
Moule ID		D		$M_{réc.}$	891,1
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6505,2
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	6202,7
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	302,5
Volume (m^3)		0,002317		M_s (sol sec)	5311,6
M_{moule} (g)		7439,7		w (%)	5,70
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		20027,7			
M_{sol} (g)		5652,9			
ρ (kg/m^3):		2439			
ρ_d (kg/m^3):		2308			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

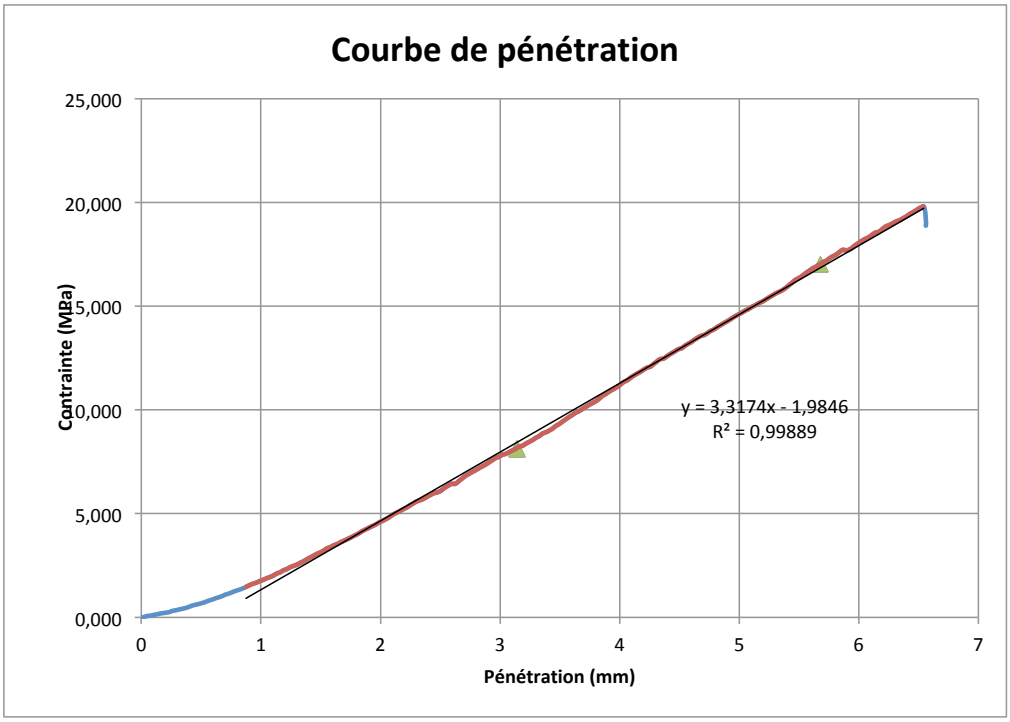
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	12037,5	6,248	6,9	90,56
5,08	28624,5	14,858	10	148,58

Correction courbe concave		corr (mm)	0,6	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,14	15642	8,119	6,9	117,67
5,68	32764,5	17,007	10	170,07

Valeur CBR (%) :	170,07

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 3,3174x - 1,9846
R² = 0,99889

Date:	02-août		Matériau:	PF6%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	30		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	F	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P4
Moule ID		F		$M_{réc.}$	880,1
D_{Moule} (mm)	152,54	152,41	152,51	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6515,6
H_{Moule} (mm)	177,43	177,53	177,51	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6211,5
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	304,1
Volume (m^3)		0,002316		M_s (sol sec)	5331,4
M_{moule} (g)		7288,1		w (%)	5,70
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19894,8			
M_{sol} (g)		5671,6			
ρ (kg/m^3):		2449			
ρ_d (kg/m^3):		2316			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

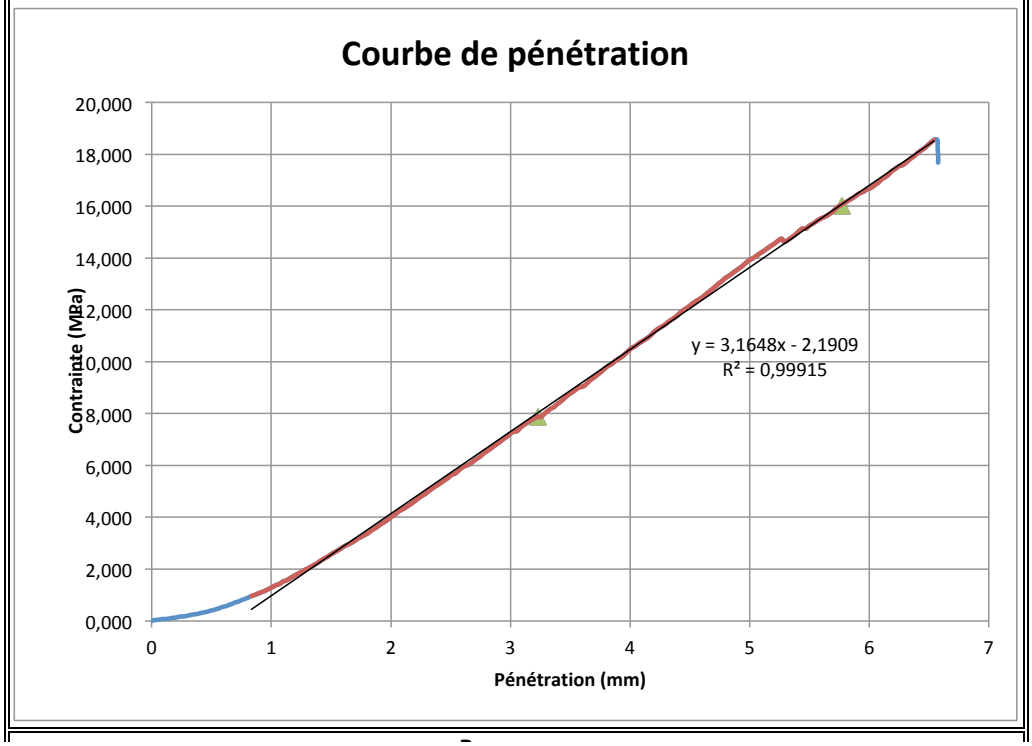
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	10962	5,690	6,9	82,47
5,08	27310,5	14,176	10	141,76

Correction courbe concave		corr (mm)	0,69	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,23	15178,5	7,879	6,9	114,19
5,77	30843	16,010	10	160,10

Valeur CBR (%) :	160,10

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
Pénétration (mm)
y = 3,1648x - 2,1909
R² = 0,99915
20,000
18,000
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7

Date:	07-août		Matériau:	PF8%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	31		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P1
Moule ID		B		$M_{réc.}$	890
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6603,7
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6312,3
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	291,4
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	5422,3
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	5,37
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		20069,6			
M_{sol} (g)		5745,3			
ρ (kg/m^3):		2477			
ρ_d (kg/m^3):		2351			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

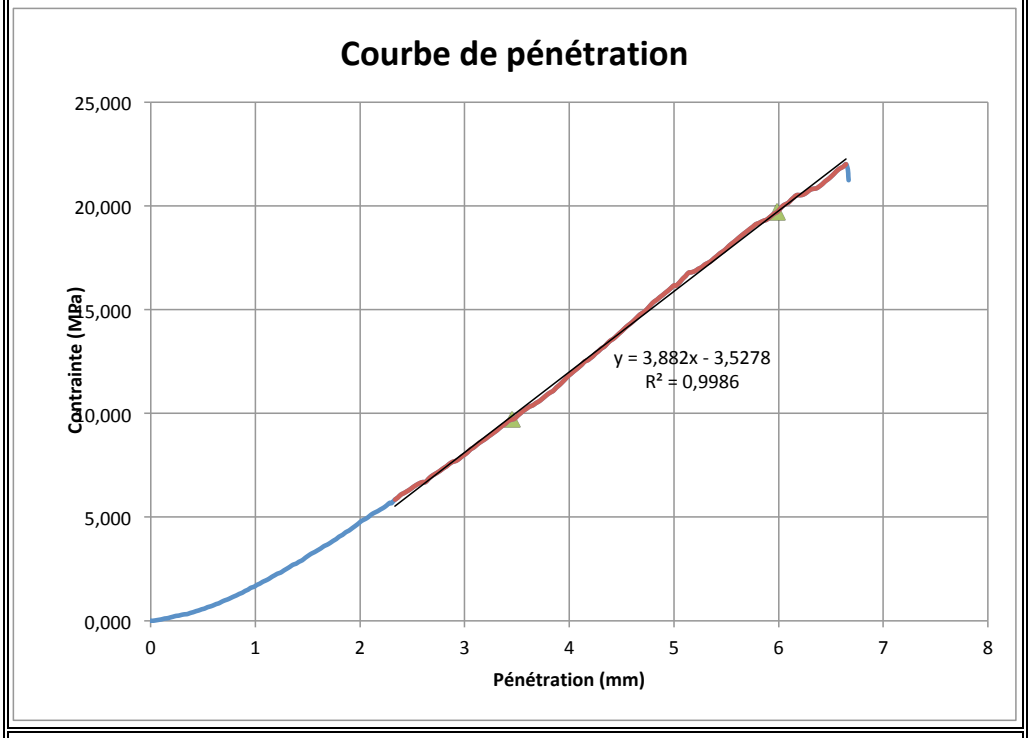
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	12591	6,536	6,9	94,72
5,08	31788	16,500	10	165,00

Correction courbe concave		corr (mm)	0,91	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,45	18684	9,698	6,9	140,56
5,99	37975,5	19,712	10	197,12

Valeur CBR (%) :	197,12

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 3,882x - 3,5278
R² = 0,9986

Date:	07-août		Matériau:	PF8%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	32		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	C	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	Z2
Moule ID	C			$M_{réc.}$	480,6
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6252,7
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5958,8
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	293,9
Volume (m^3)	0,002318			M_s (sol sec)	5478,2
M_{moule} (g)	7209,3			w (%)	5,36
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19957,8				
M_{sol} (g)	5813,4				
ρ (kg/m^3):	2508				
ρ_d (kg/m^3):	2380				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

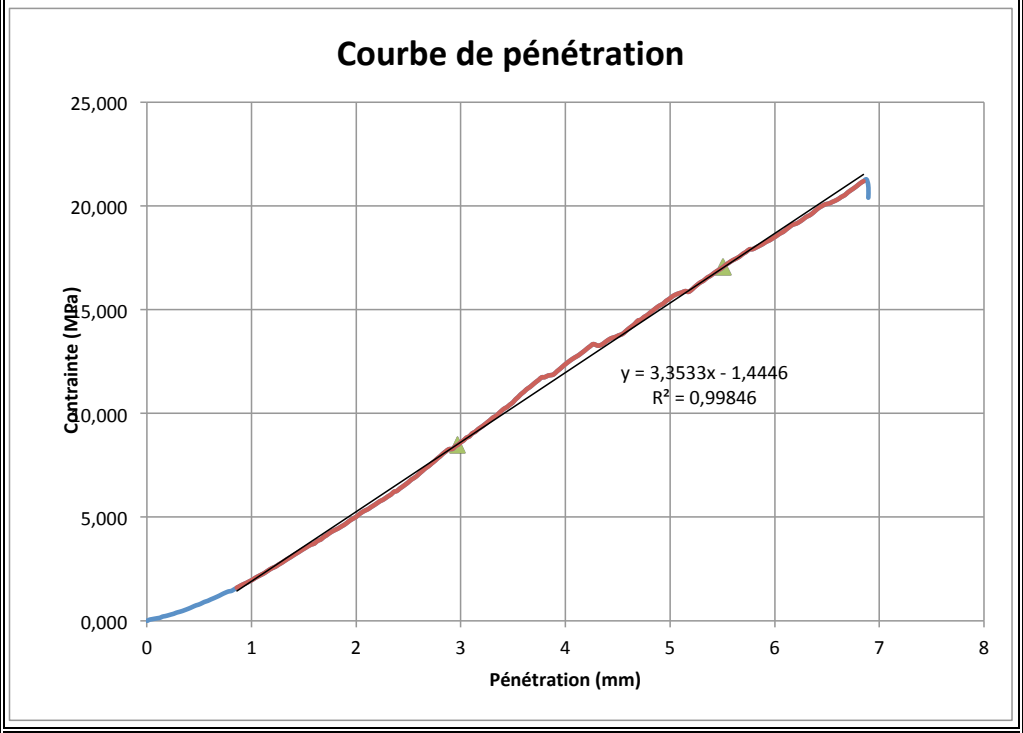
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	13108,5	6,804	6,9	98,61
5,08	30402	15,781	10	157,81

Correction courbe concave		corr (mm)	0,43		
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)	
2,97	16371	8,498	6,9	123,16	
5,51	32841	17,047	10	170,47	

Valeur CBR (%) :	170,47

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 3,3533x - 1,4446
R² = 0,99846

Date:	07-août		Matériau:	PF10%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	33		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	D	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID	D			$M_{réc.}$	879,4
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6660,5
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6366,1
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	294,4
Volume (m^3)	0,002317			M_s (sol sec)	5486,7
M_{moule} (g)	7439,7			w (%)	5,37
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	20196,4				
M_{sol} (g)	5821,6				
ρ (kg/m^3):	2512				
ρ_d (kg/m^3):	2384				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

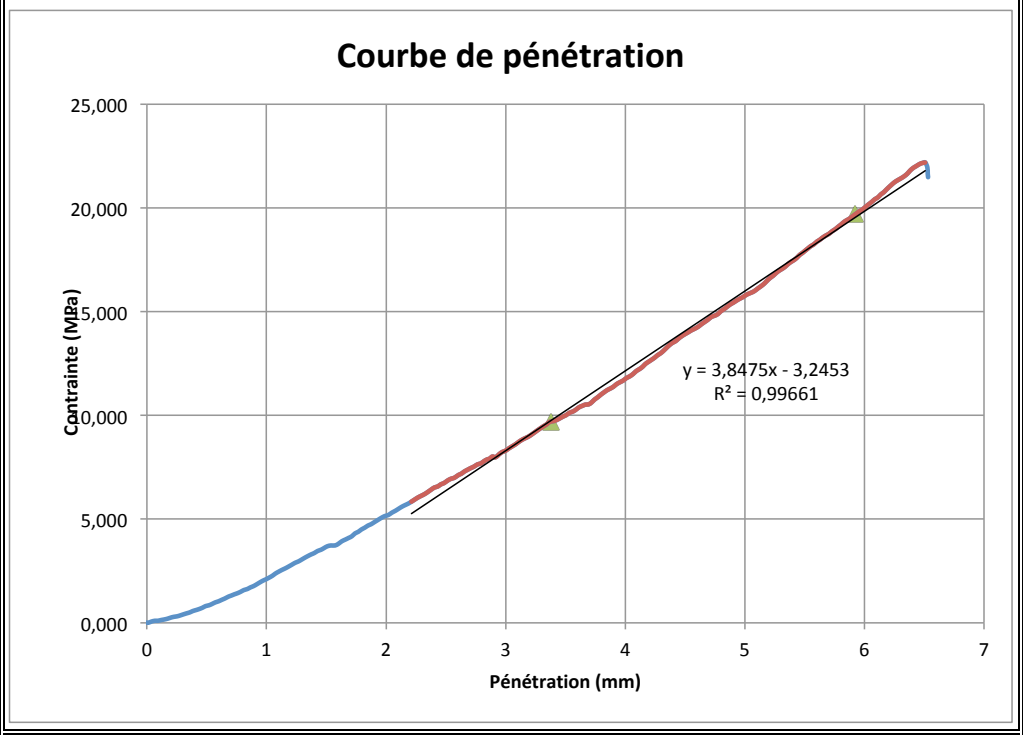
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	13374	6,942	6,9	100,61
5,08	30865,5	16,022	10	160,22

Correction courbe concave		corr (mm)	0,84	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,38	18661,5	9,687	6,9	140,39
5,92	38002,5	19,726	10	197,26

Valeur CBR (%) :	197,26

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 3,8475x - 3,2453
R² = 0,99661

Date:	07-août		Matériau:	PF10%	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	34		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	F	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	5
Moule ID	F			$M_{réc.}$	273
D_{Moule} (mm)	152,54	152,41	152,51	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6078,6
H_{Moule} (mm)	177,43	177,53	177,51	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5785,8
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	292,8
Volume (m^3)	0,002316			M_s (sol sec)	5512,8
M_{moule} (g)	7288,1			w (%)	5,31
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	20063,4				
M_{sol} (g)	5840,2				
ρ (kg/m^3):	2521				
ρ_d (kg/m^3):	2394				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

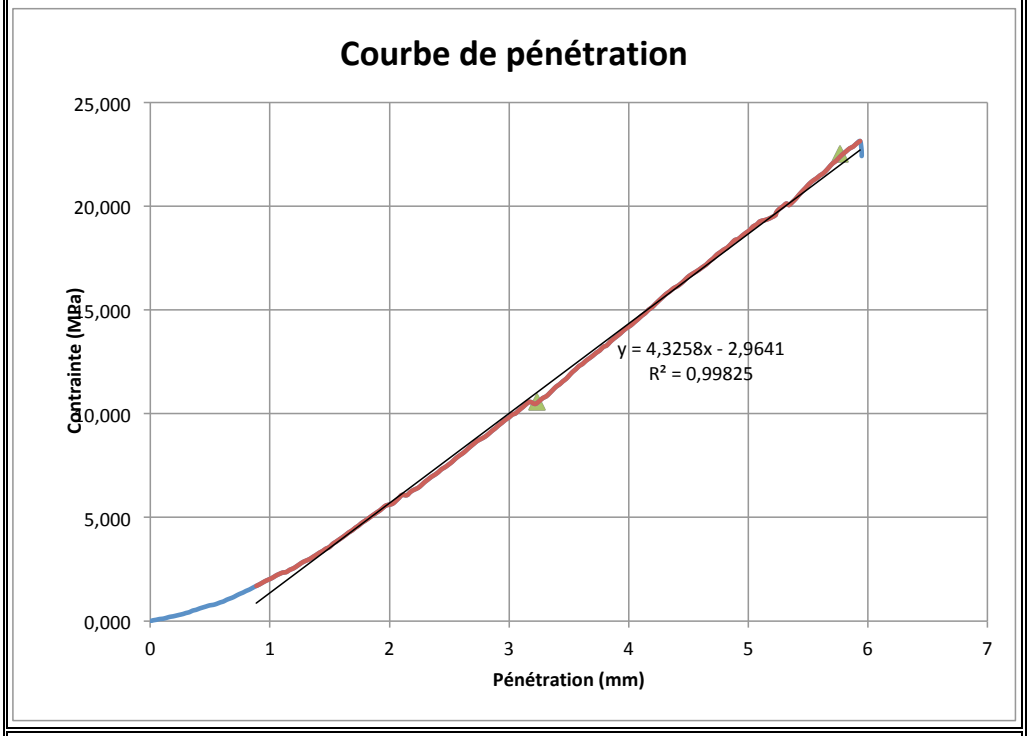
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	15057	7,816	6,9	113,27
5,08	36832,5	19,119	10	191,19

Correction courbe concave		corr (mm)	0,69	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,23	20389,5	10,584	6,9	153,39
5,77	43362	22,508	10	225,08

Valeur CBR (%) :	225,08

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 4,3258x - 2,9641
R² = 0,99825

Date:	14-août		Matériau:	PF12	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	35		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	K6
Moule ID		B		$M_{réc.}$	890,1
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6666,4
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6375,2
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	291,2
Volume (m^3)		0,002319		M_s (sol sec)	5485,1
M_{moule} (g)		7389,2		w (%)	5,31
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		20137			
M_{sol} (g)		5812,7			
ρ (kg/m^3):		2506			
ρ_d (kg/m^3):		2380			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

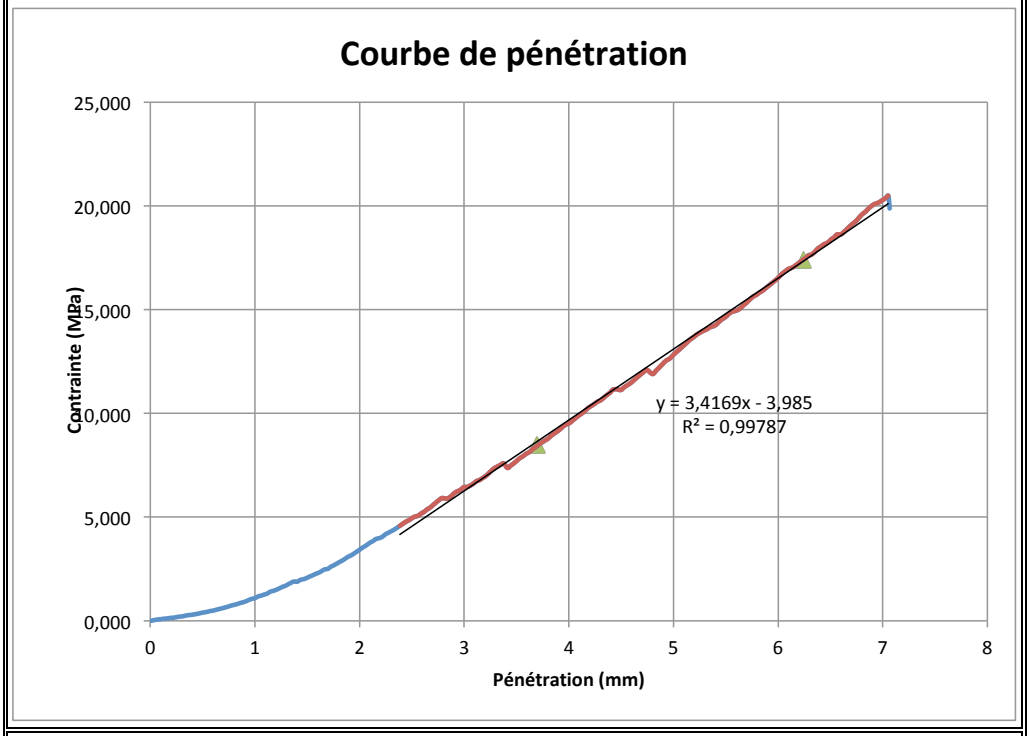
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	9747	5,059	6,9	73,33
5,08	25384,5	13,177	10	131,77

Correction courbe concave		corr (mm)	1,16	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,7	16371	8,498	6,9	123,16
6,24	33520,5	17,400	10	174,00

Valeur CBR (%) :	174,00

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 3,4169x - 3,985
R² = 0,99787

Date:	14-août		Matériau:	PF12	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	36		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	C	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	Z2
Moule ID		C		$M_{réc.}$	480,4
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6279,1
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	5990,2
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	288,9
Volume (m^3)		0,002318		M_s (sol sec)	5509,8
M_{moule} (g)		7209,3		w (%)	5,24
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		19987,6			
M_{sol} (g)		5843,2			
ρ (kg/m^3):		2521			
ρ_d (kg/m^3):		2395			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

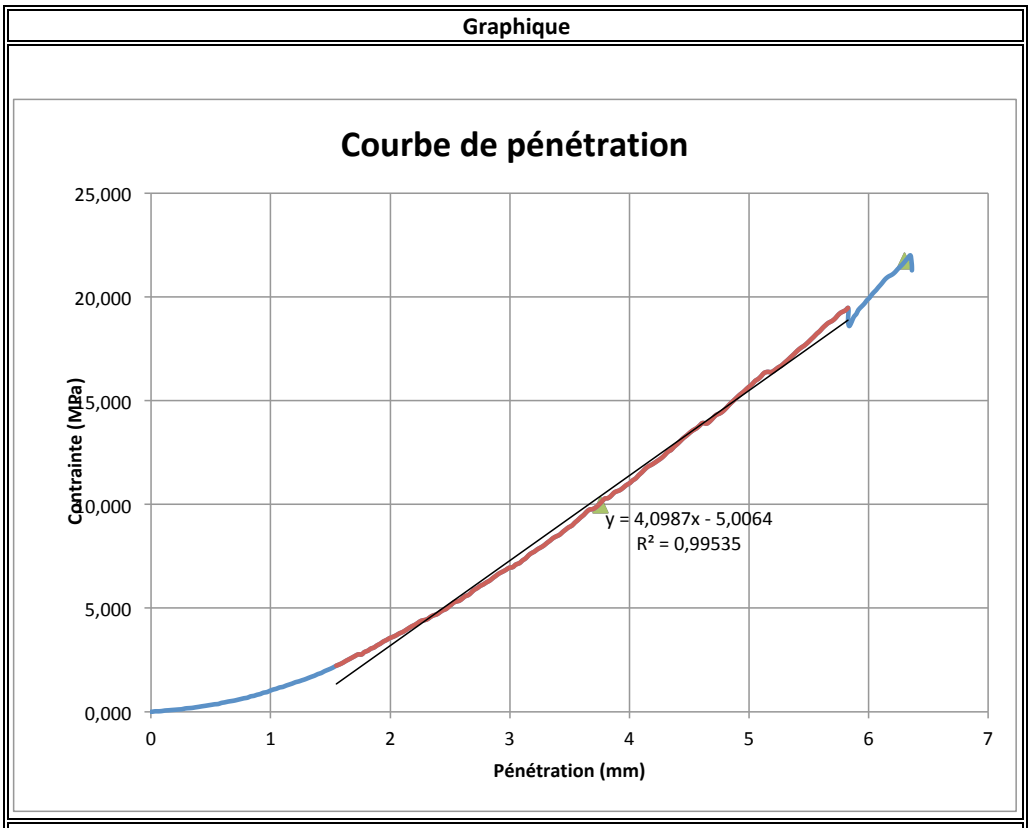
CBR

	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	4873,5	2,530	6,9	36,66
5,08	30915	16,047	10	160,47

Correction courbe concave		corr (mm)	1,22	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,76	19246,5	9,990	6,9	144,79
6,3	41850	21,723	10	217,23

Valeur CBR (%) :	217,23


Graphique
Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 4,0987x - 5,0064
R² = 0,99535

Date:	14-août		Matériau:	PF14	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	37		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	D	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	K5
Moule ID	D			$M_{réc.}$	879,9
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6688
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6391,6
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	296,4
Volume (m^3)	0,002317			M_s (sol sec)	5511,7
M_{moule} (g)	7439,7			w (%)	5,38
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	20232,7				
M_{sol} (g)	5857,9				
ρ (kg/m^3):	2528				
ρ_d (kg/m^3):	2399				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

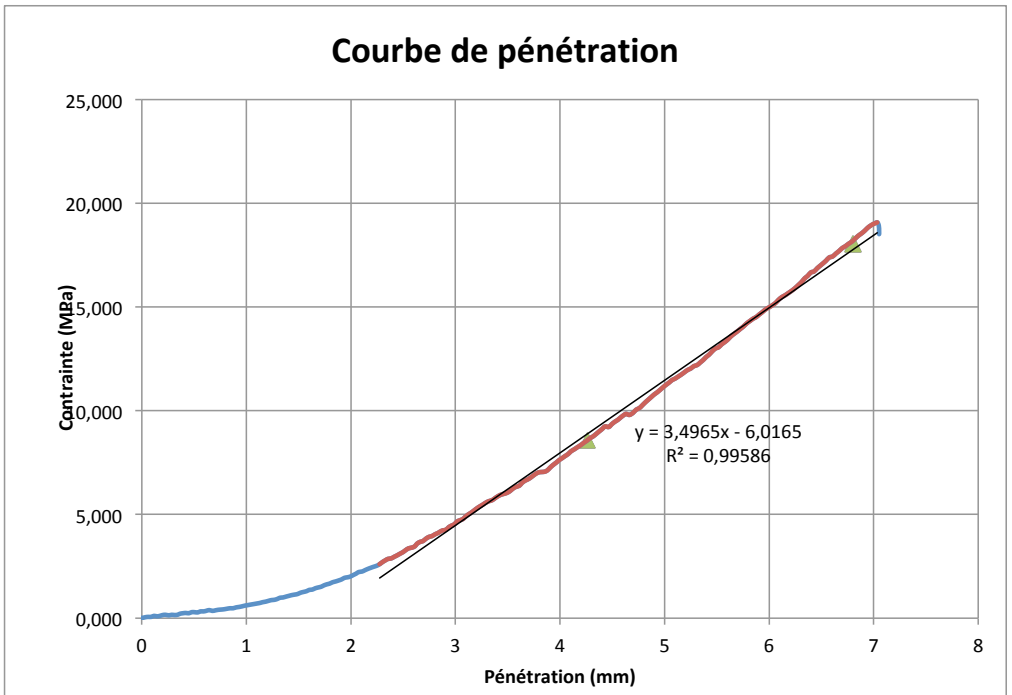
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	6480	3,364	6,9	48,75
5,08	22117,5	11,481	10	114,81

Correction courbe concave		corr (mm)	1,72	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
4,26	16488	8,559	6,9	124,04
6,8	34762,5	18,044	10	180,44

Valeur CBR (%) :	180,44

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 3,4965x - 6,0165
R² = 0,99586

Date:	14-août		Matériau:	PF14	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	38		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Modifié	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	F	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	K4
Moule ID	F			$M_{réc.}$	850,1
D_{Moule} (mm)	152,54	152,41	152,51	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6592,3
H_{Moule} (mm)	177,43	177,53	177,51	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6298,3
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	294
Volume (m^3)	0,002316			M_s (sol sec)	5448,2
M_{moule} (g)	7288,1			w (%)	5,40
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	20013,5				
M_{sol} (g)	5790,3				
ρ (kg/m^3):	2500				
ρ_d (kg/m^3):	2372				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

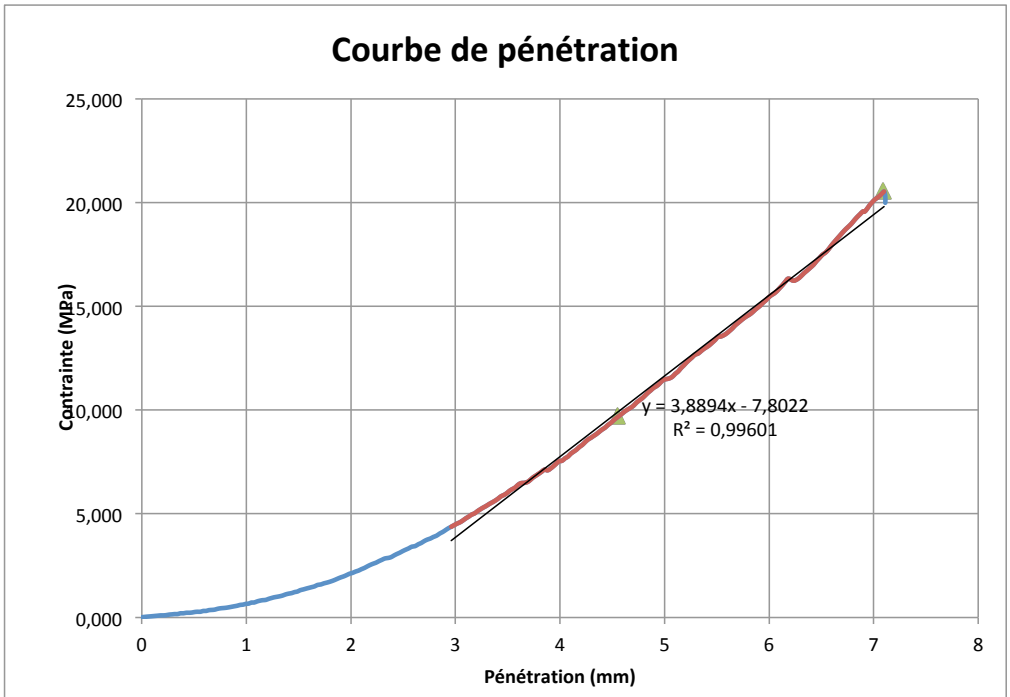
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	6309	3,275	6,9	47,46
5,08	22365	11,609	10	116,09

Correction courbe concave		corr (mm)	2,01	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
4,55	18711	9,712	6,9	140,76
7,09	39564	20,537	10	205,37

Valeur CBR (%) :	205,37

Graphique


Courbe de pénétration
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 3,8894x - 7,8022
R² = 0,99601

Date:	04-oct		Matériau:	PF10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	39		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Standard	Nb couches:	3	w_{opt} (%):	
# Moule	B	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P5
Moule ID	B			$M_{réc.}$	1538,9
D_{Moule} (mm)	152,35	152,44	152,42	$M_{sol\text{-}hum}$ +$M_{réc.}$	6994,4
H_{Moule} (mm)	177,87	177,67	177,85	$M_{sol\text{-}sec}$ +$M_{réc.}$	6707,2
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	287,2
Volume (m^3)	0,002319			M_s (sol sec)	5168,3
M_{moule} (g)	7389,2			w (%)	5,56
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19805,1				
M_{sol} (g)	5480,8				
ρ (kg/m^3):	2363				
ρ_d (kg/m^3):	2239				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

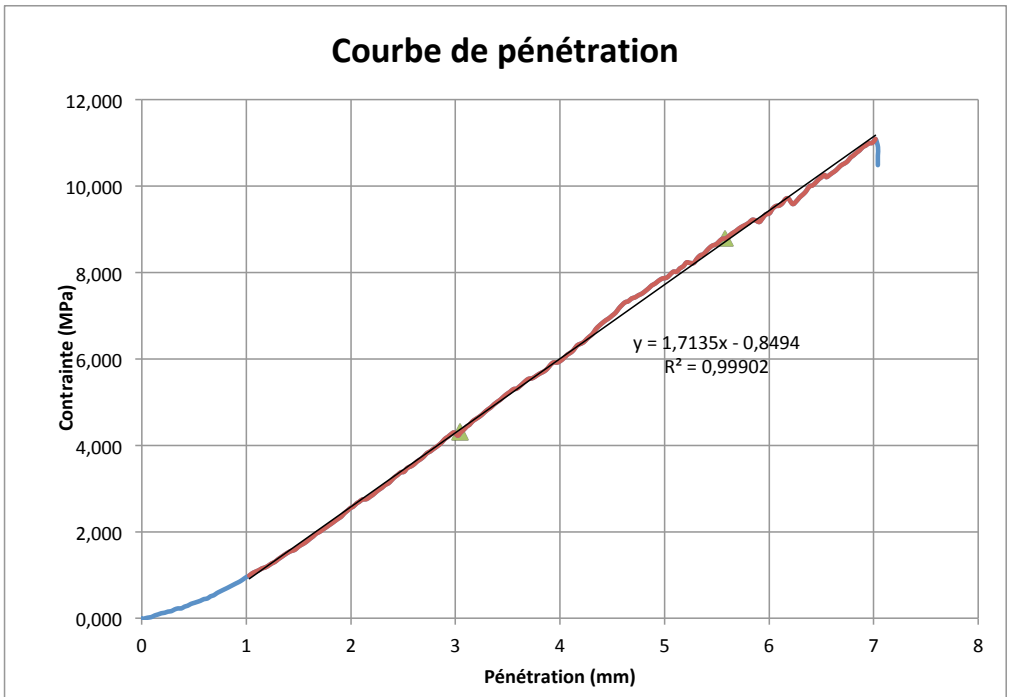
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	6700,5	3,478	6,9	50,41
5,08	15444	8,017	10	80,17

Correction courbe concave		corr (mm)	0,5	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,04	8280	4,298	6,9	62,29
5,58	16929	8,787	10	87,87

Valeur CBR (%) :	87,87

Graphique


Courbe de pénétration
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 1,7135x - 0,8494
R² = 0,99902

Date:	04-oct		Matériau:	PF10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	40		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Standard	Nb couches:	3	w_{opt} (%):	
# Moule	C	coups/couche:	56	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P3
Moule ID	C			$M_{réc.}$	879,7
D_{Moule} (mm)	152,28	152,43	152,76	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6241,2
H_{Moule} (mm)	177,51	177,59	177,65	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	5968,4
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	272,8
Volume (m^3)	0,002318			M_s (sol sec)	5088,7
M_{moule} (g)	7209,3			w (%)	5,36
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	19538,8				
M_{sol} (g)	5394,4				
ρ (kg/m^3):	2327				
ρ_d (kg/m^3):	2209				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

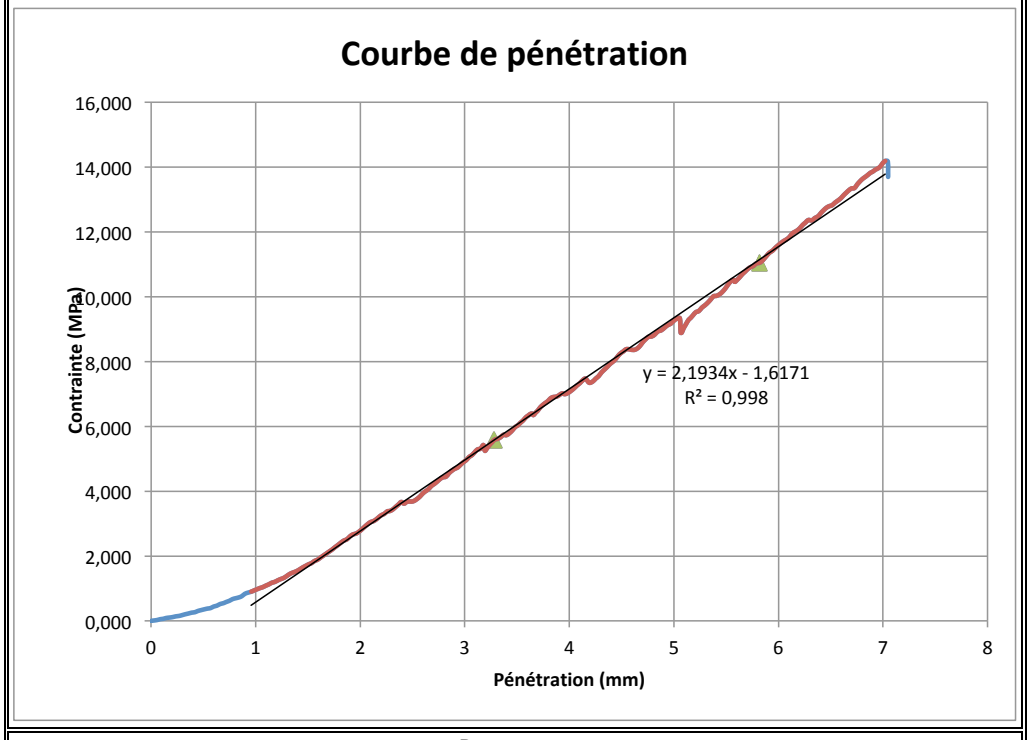
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	7236	3,756	6,9	54,44
5,08	17127	8,890	10	88,90

Correction courbe concave		corr (mm)	0,74	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,28	10768,5	5,590	6,9	81,01
5,82	21267	11,039	10	110,39

Valeur CBR (%) :	110,39

Graphique


Courbe de pénétration
16,000
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Pénétration (mm)
y = 2,1934x - 1,6171
R² = 0,998

Date:	04-oct		Matériau:	PF10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	41		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Plus	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	D	coups/couche:	81	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P2
Moule ID		D		$M_{réc.}$	890,9
D_{Moule} (mm)	152,55	152,66	152,44	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6719,5
H_{Moule} (mm)	177,48	177,41	177,45	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6438,1
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	281,4
Volume (m^3)		0,002317		M_s (sol sec)	5547,2
M_{moule} (g)		7439,7		w (%)	5,07
M_{disque} (g)		6935,1			
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)		20241			
M_{sol} (g)		5866,2			
ρ (kg/m^3):		2531			
ρ_d (kg/m^3):		2409			

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)	
				Gonflement (%)	

CBR

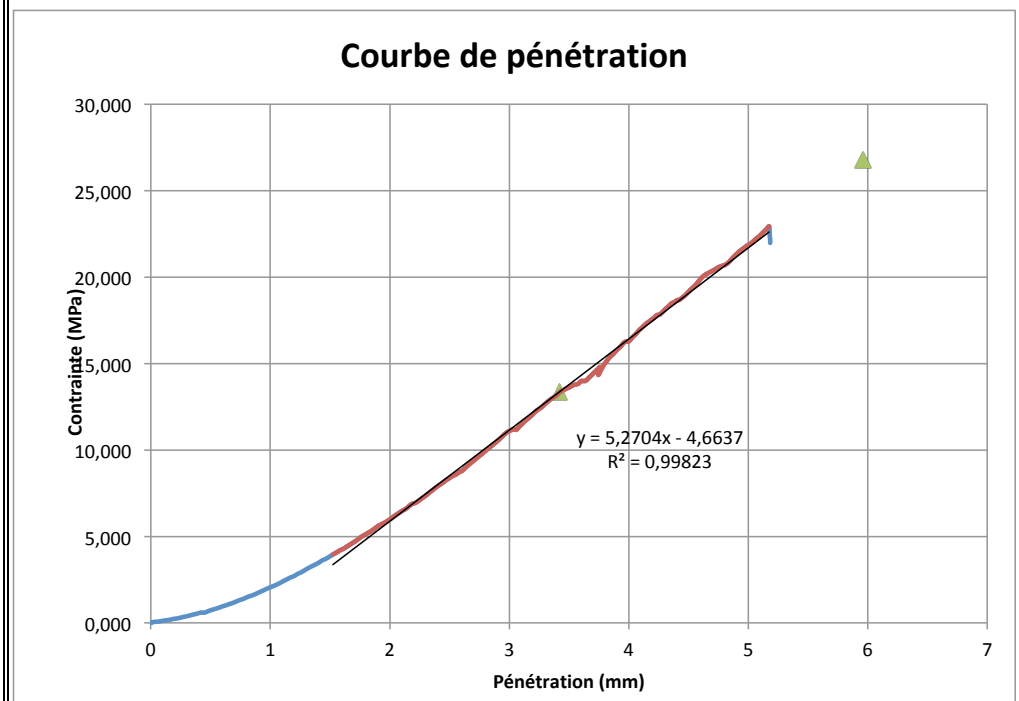
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	16542	8,587	6,9	124,44
5,08	42970,5	22,305	10	223,05

Correction courbe concave		corr (mm)	0,88	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,42	25771,5	13,377	6,9	193,88
5,96	51529,9	26,748	10	267,48

Valeur CBR (%) :	267,48

Graphique


Courbe de pénétration
Contrainte (MPa)
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 5,2704x - 4,6637
R² = 0,99823

Date:	04-oct		Matériau:	PF10	
Testé par:	Antoine Laverdiere		$w_{compactage}$(%)	6,50	
# Essai:	42		Trempage	Oui ☐	Non ☑

Compaction

Méthode	Plus	Nb couches:	5	w_{opt} (%):	
# Moule	F	coups/couche:	81	ρ_{dmax}(kg/m^3):	

Mise en place

	Masses volumiques			Teneur en eau finale	
	1	2	3	ID récipient	P6
Moule ID	F			$M_{réc.}$	885,9
D_{Moule} (mm)	152,54	152,41	152,51	$M_{sol-hum}$ +$M_{réc.}$	6734
H_{Moule} (mm)	177,43	177,53	177,51	$M_{sol-sec}$ +$M_{réc.}$	6451,7
H_{disque} (mm)	50,63	50,67	50,67	M_w (eau)	282,3
Volume (m^3)	0,002316			M_s (sol sec)	5565,8
M_{moule} (g)	7288,1			w (%)	5,07
M_{disque} (g)	6935,1				
M_{moule} + M_{sol} +M_{disque}(g)	20108,8				
M_{sol} (g)	5885,6				
ρ (kg/m^3):	2541				
ρ_d (kg/m^3):	2418				

Trempage

Lecture ini	-	Lecture fin	-	Gonflement (mm)
				Gonflement (%)

CBR

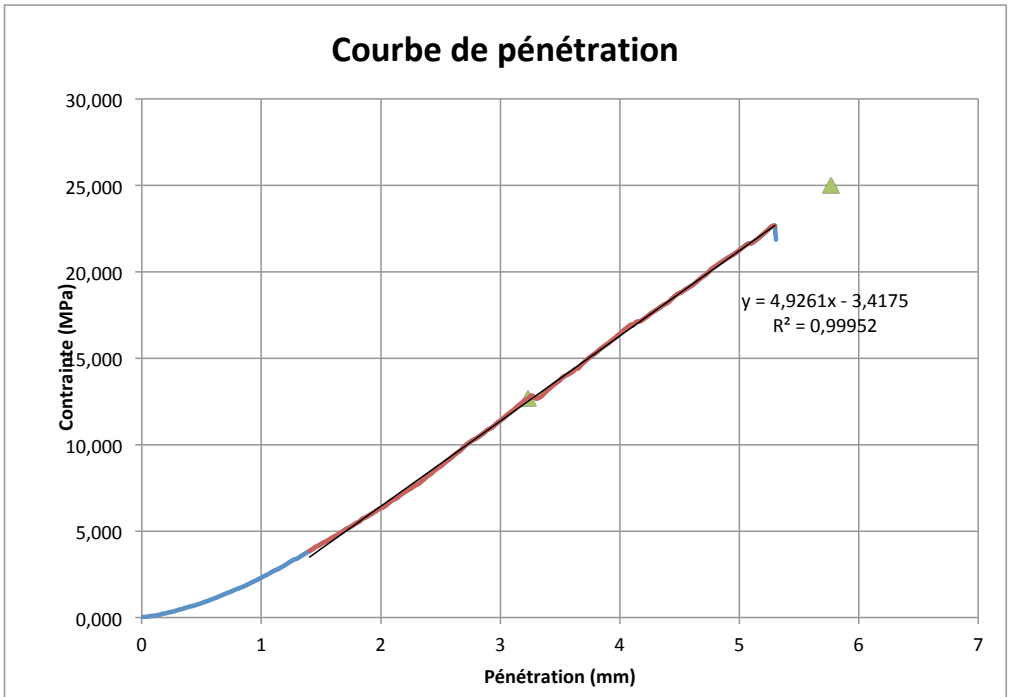
	1	2	3	Moyenne	Aire (mm^2)
D piston (mm)	49,57	49,52	49,49	49,53	1926,5
Vitesse (mm/min)	1,3				

Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
2,54	17442	9,054	6,9	131,21
5,08	41634	21,611	10	216,11

Correction courbe concave		corr (mm)	0,69	
Pénétration (mm)	Force (N)	σ (MPa)	$\sigma_{réf}$ (MPa)	CBR (%)
3,23	24408	12,670	6,9	183,62
5,77	48174,0	25,006	10	250,06

Valeur CBR (%) :	250,06

Graphique

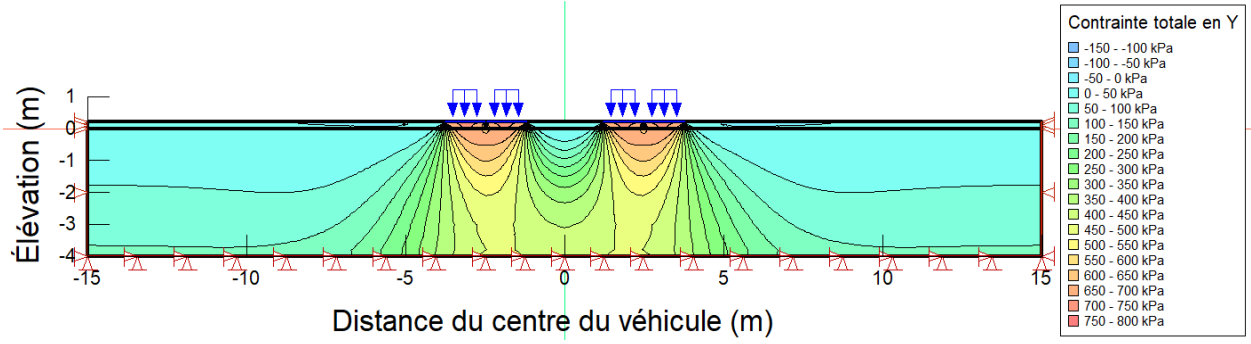

Courbe de pénétration
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0,000
Contrainte (MPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
Pénétration (mm)
y = 4,9261x - 3,4175
R² = 0,99952

ANNEXE F : ESSAIS AU CÔNE DE SABLE

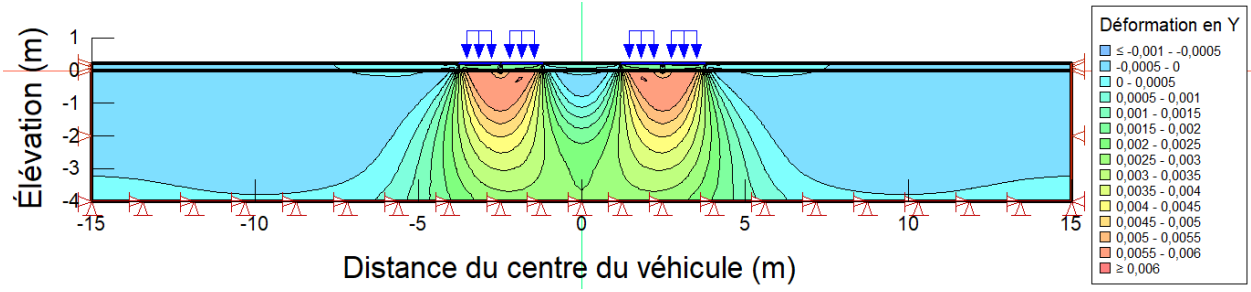
Cône de sable							
Date:	22-août			**Densité sable (g/cm3):**			1,3738
Emplacement	Malartic			**$M_{calibration\ sable}$(g):**			1565,77
# Essai	1	2	3				
$M_{Ini\ cône+réservoir}$	6,175	6,15	6,21				
M_{tare}	21,3	21,7	21,1				
$M_{échantillon+tare}$	1,67	1,82	2,365				
$M_{Fin\ cône+réservoir}$	3,58	3,515	3,305				
M_{sable} (g)	2595	2635	2905				
$M_{Matériau}$ (g)	1648,7	1798,3	2343,9				
$V_{excavation}$ (cm3)	749,2	778,3	974,8				
# tare	Bol 12	Bol24	V				
M_{tare}	305,8	317,8	279,9				
$M_{tare+sol\ H}$	1953,4	2120,2	2620,1				
$M_{tare\ +\ sol\ S}$	1903,2	2061,2	2520,1				
$M_{sol\ h}$	1647,6	1802,4	2340,2				
$M_{sol\ S}$	1597,4	1743,4	2240,2	MOYENNE	MAX	MIN	
w (%)	3,14	3,38	4,46	3,66	4,46		3,14
ρ (kg/m3)	2199,2	2315,8	2400,6	2305,20	2400,61		2199,19
$ρ_d$ (kg/m3)	2132,2	2240,0	2298,0	2223,41	2298,03		2132,18

ANNEXE G : RÉSULTATS DES ANALYSES NUMÉRIQUES

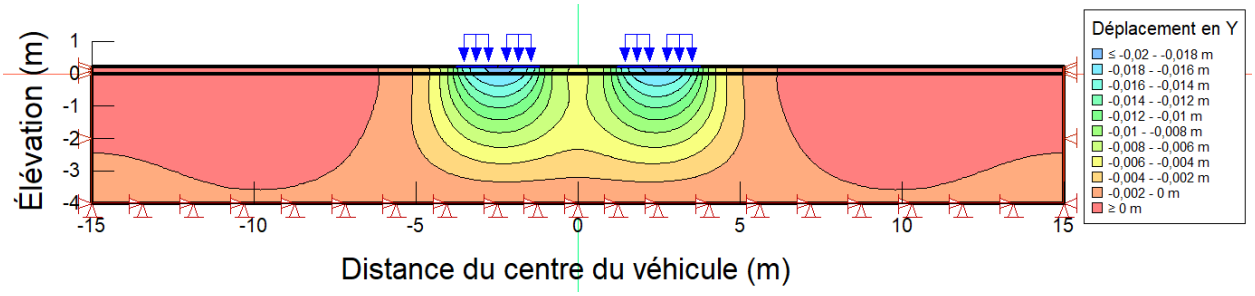
G.1. Épaisseur de la surface de roulement de 20 cm, matériau DMAX10, compaction STD.



Isocontours des contraintes totales en y

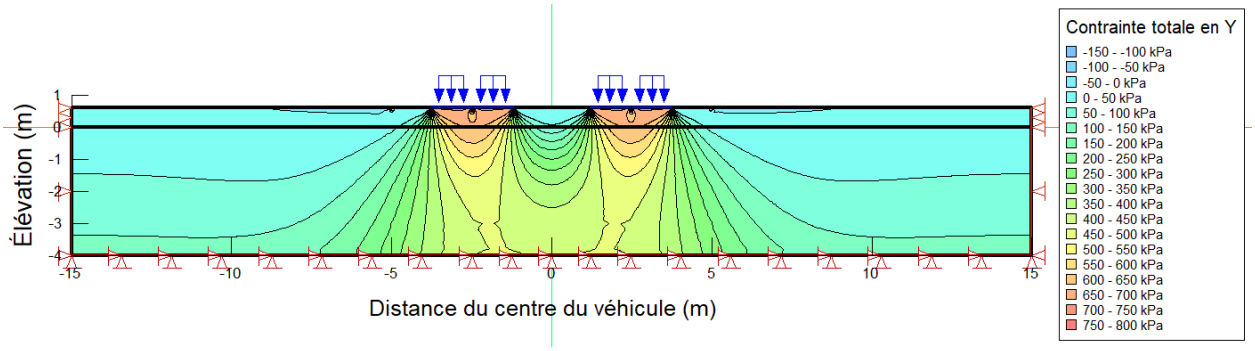


Isocontours des déformations en y

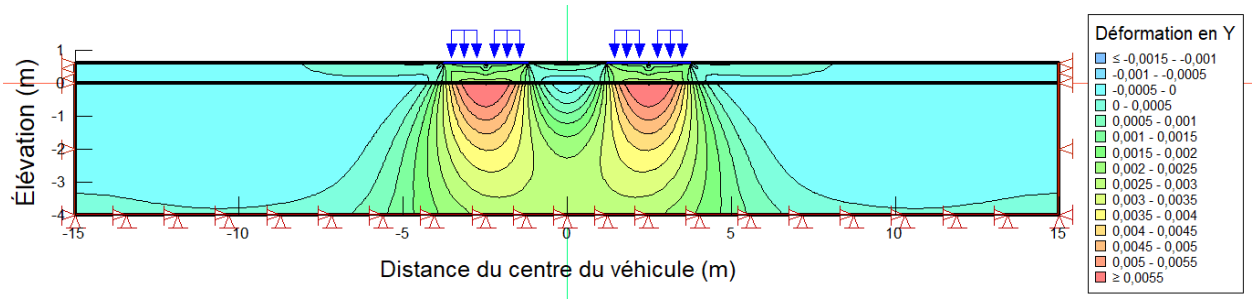


Isocontour des déplacements en y

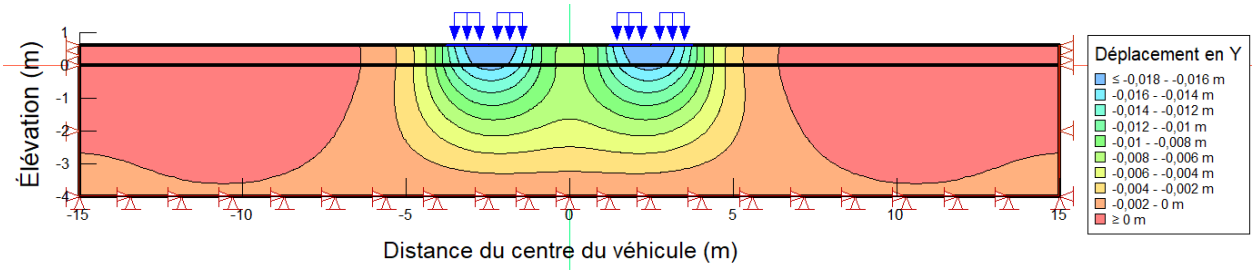
G.2. Épaisseur de la surface de roulement de 60 cm, matériau DMAX10 compaction STD.



Isocontours des contraintes totales en y

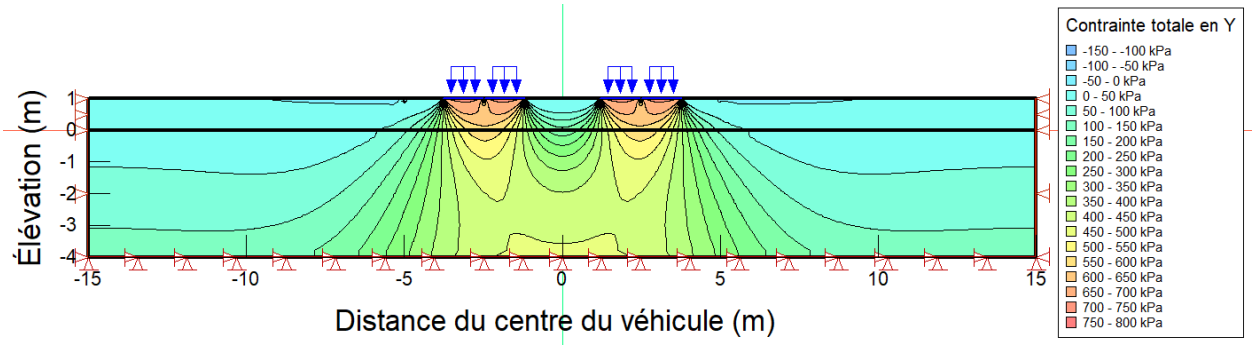


Isocontours des déformations en y

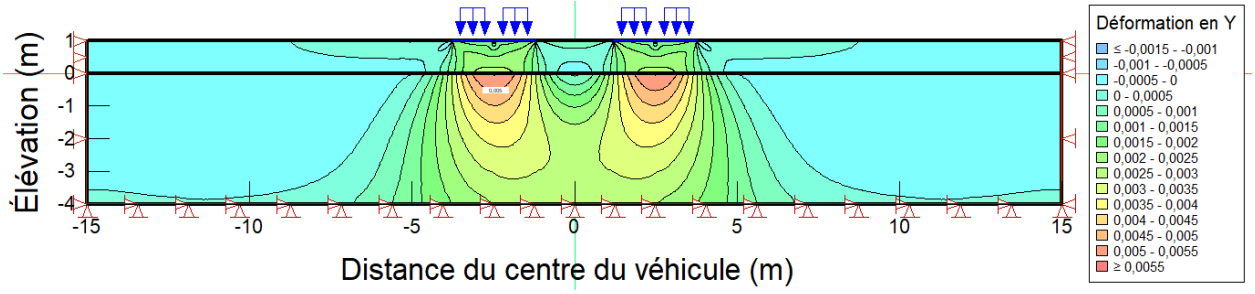


Isocontour des déplacements en y

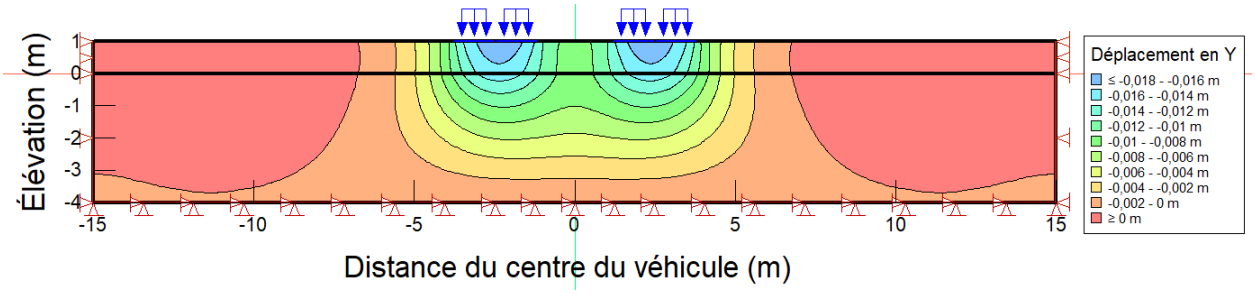
G.3. Épaisseur de la surface de roulement de 100 cm, matériau DMAX10 compaction STD.



Isocontours des contraintes totales en y

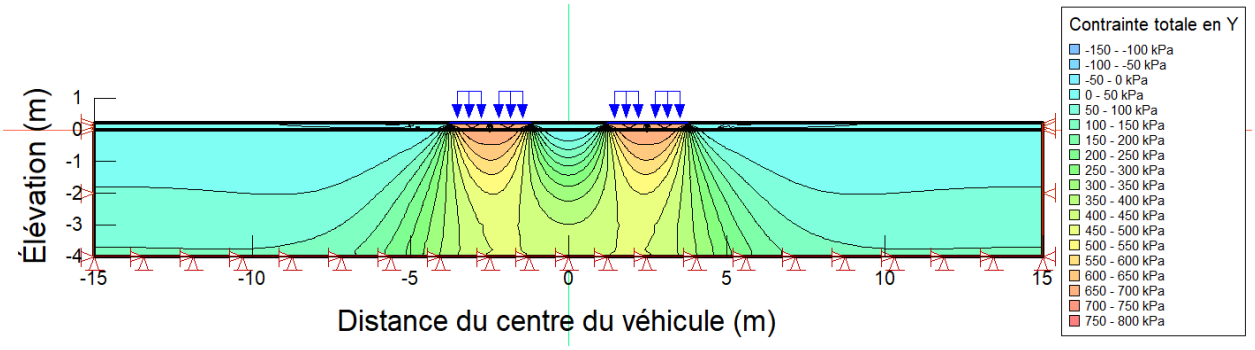


Isocontours des déformations en y

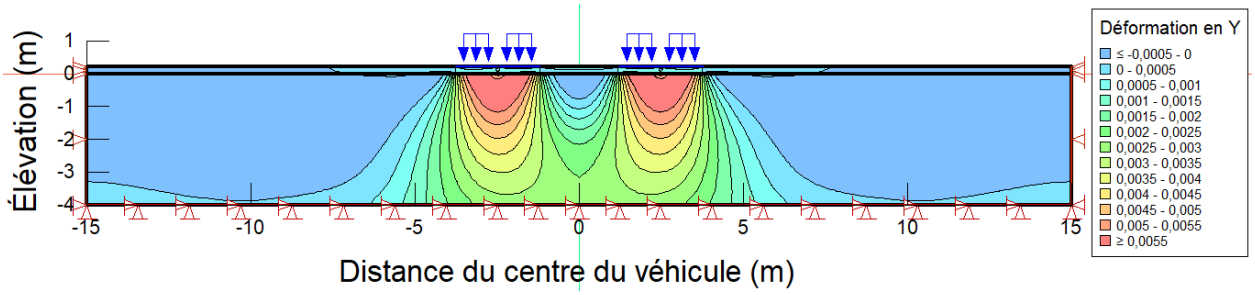


Isocontour des déplacements en y

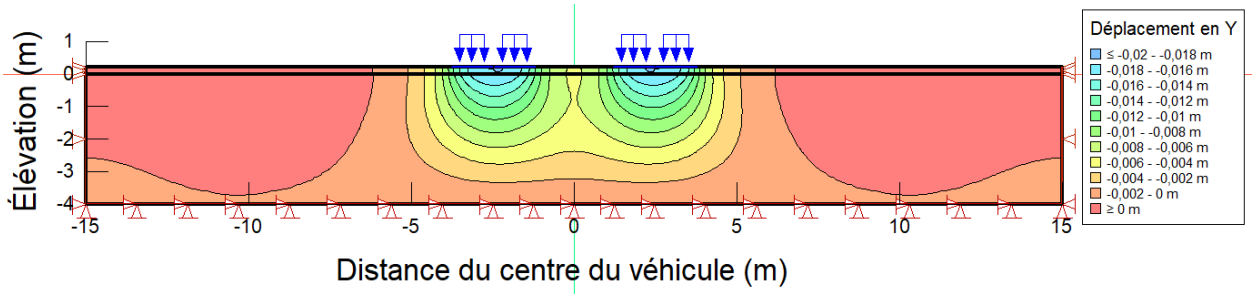
G.4 Épaisseur de la surface de roulement de 20 cm, matériau original, compaction MOD81



Isocontours des contraintes totales en y

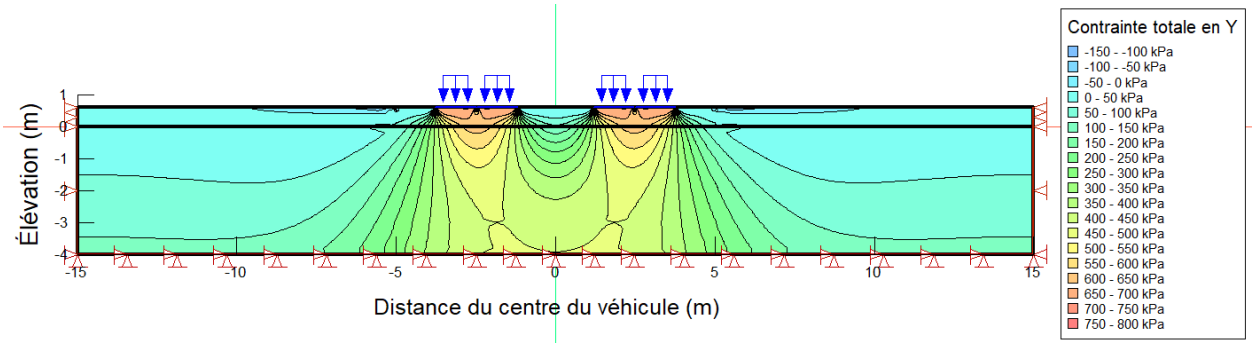


Isocontours des déformations en y

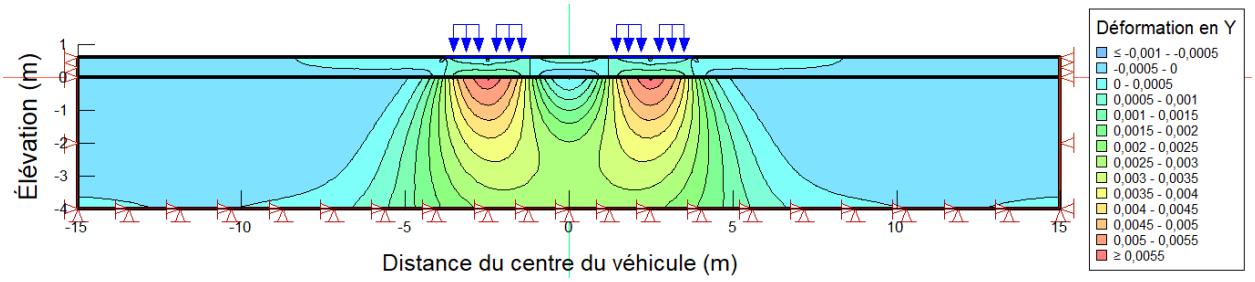


Isocontour des déplacements en y

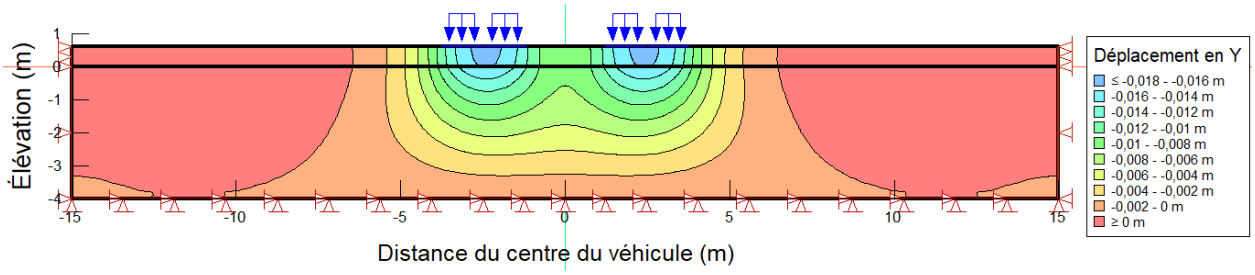
G.5. Épaisseur de la surface de roulement de 60 cm, matériau original, compaction MOD81



Isocontours des contraintes totales en y

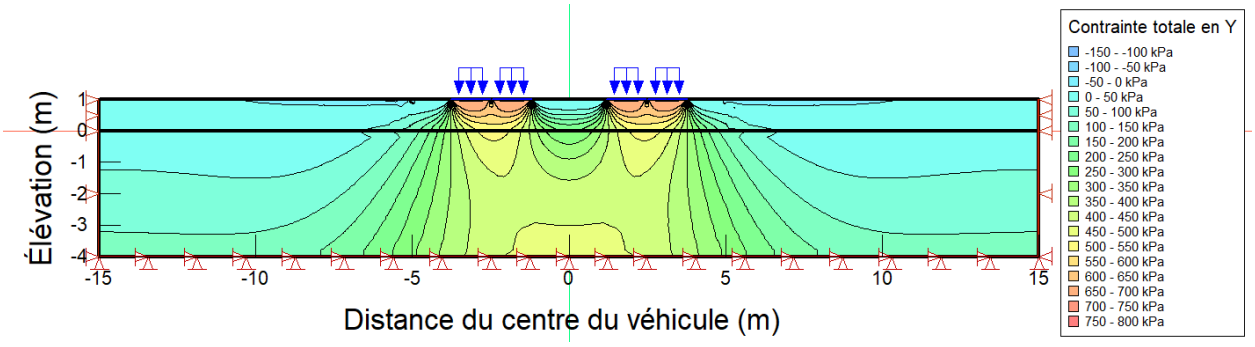


Isocontours des déformations en y

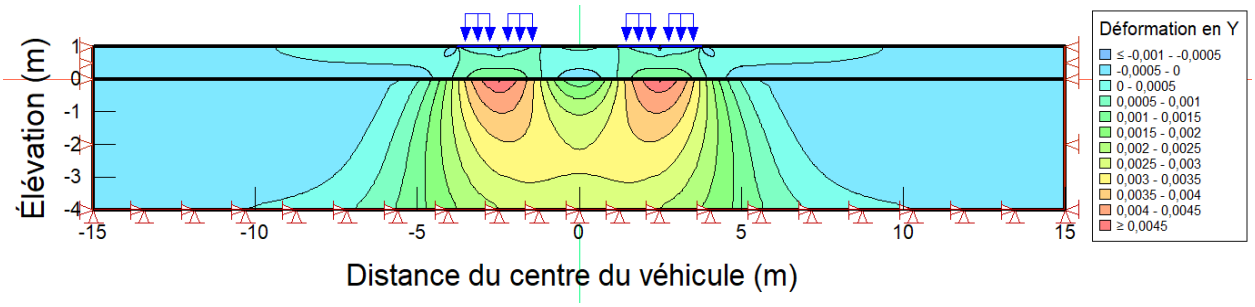


Isocontour des déplacements en y

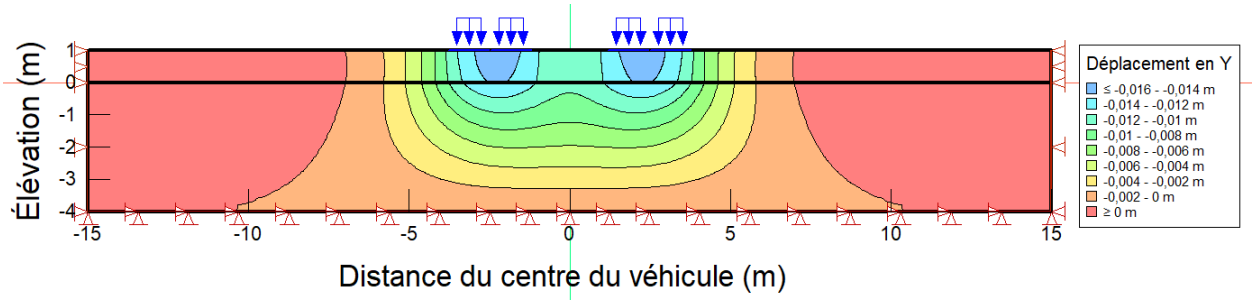
G.6. Épaisseur de la surface de roulement de 100 cm, matériau original, compaction MOD81



Isocontours des contraintes totales en y

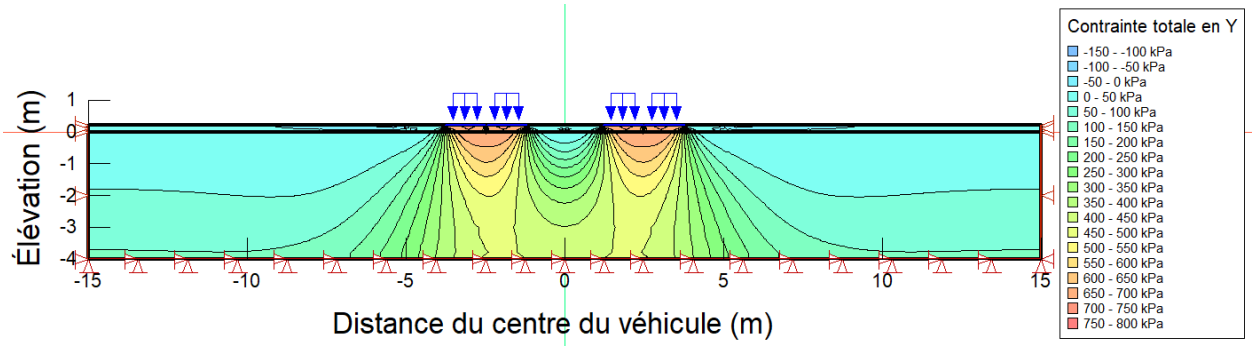


Isocontours des déformations en y

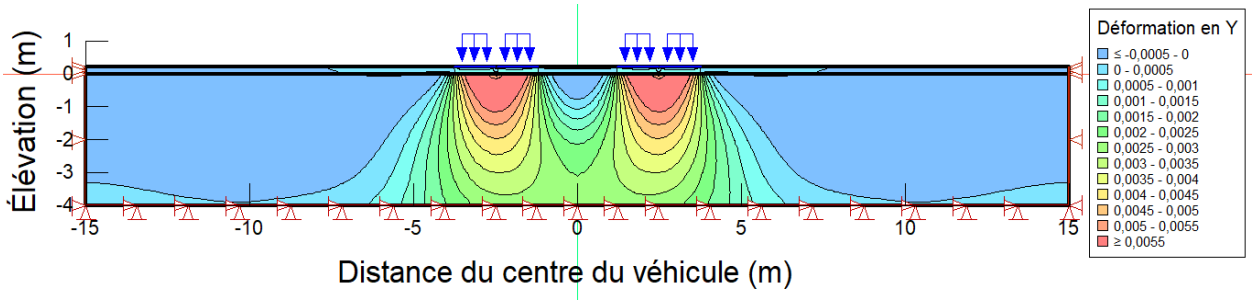


Isocontour des déplacements en y

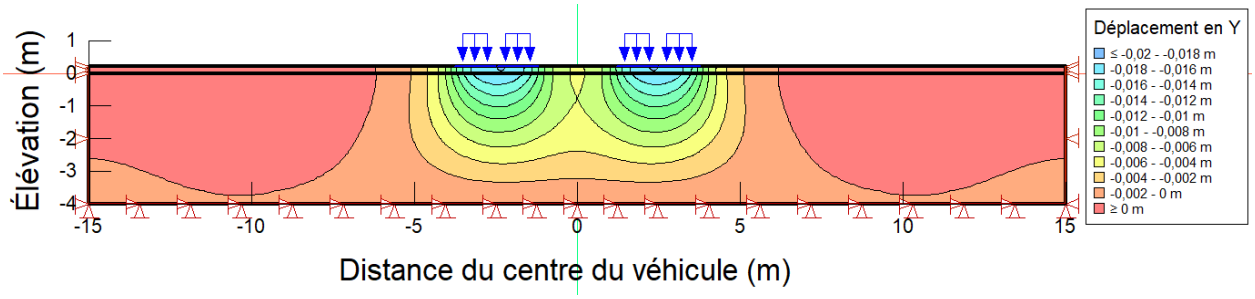
G.7. Épaisseur de la surface de roulement de 20 cm, matériau PF10, compaction MOD81



Isocontours des contraintes totales en y

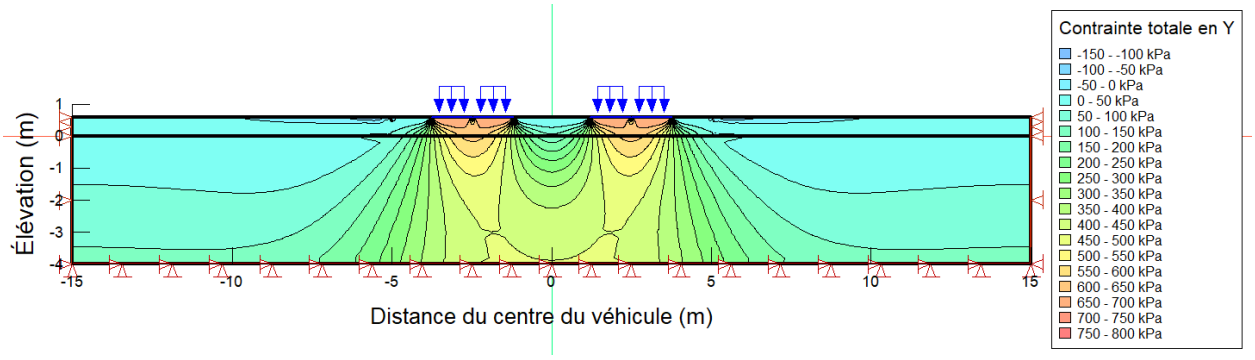


Isocontours des déformations en y

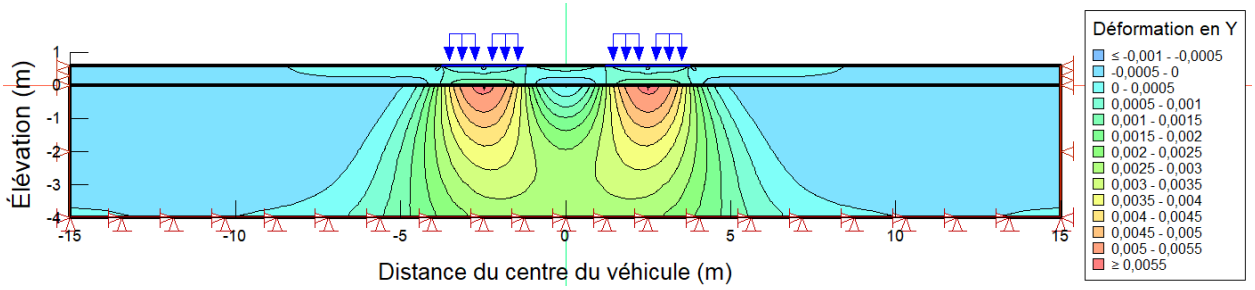


Isocontour des déplacements en y

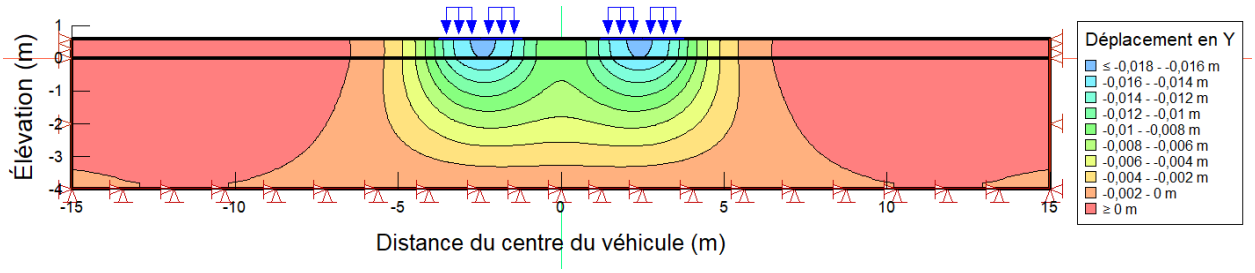
G.8. Épaisseur de la surface de roulement de 60 cm, matériau PF10, compaction MOD81



Isocontours des contraintes totales en y

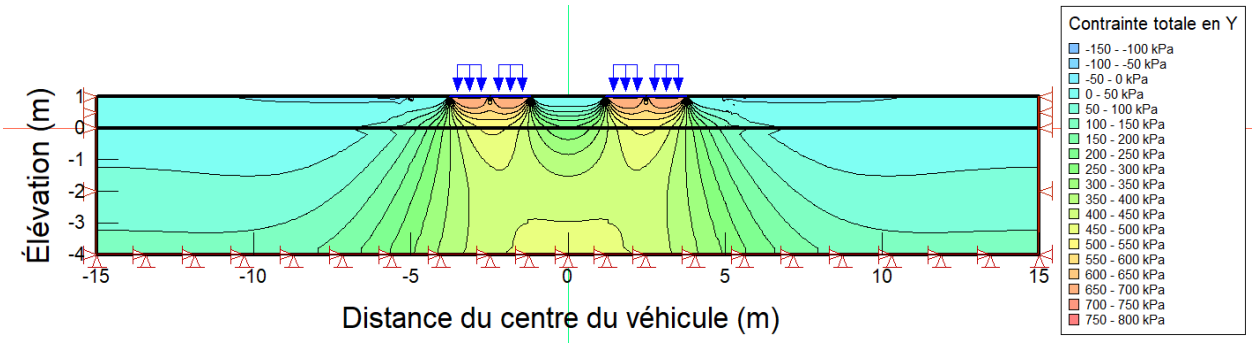


Isocontours des déformations en y

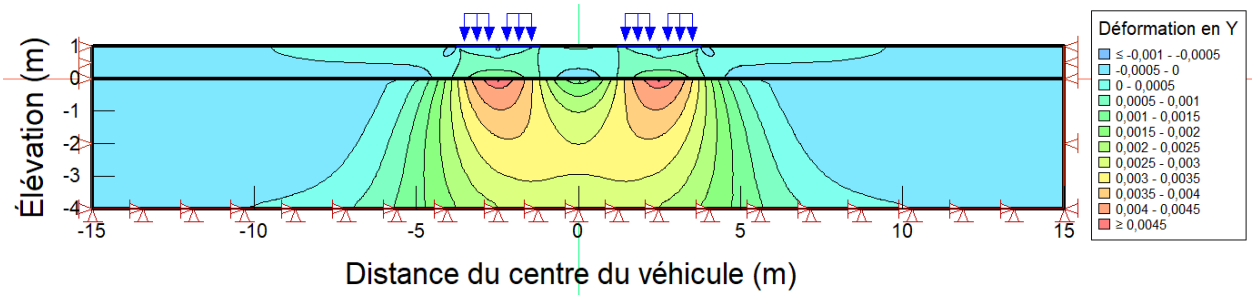


Isocontour des déplacements en y

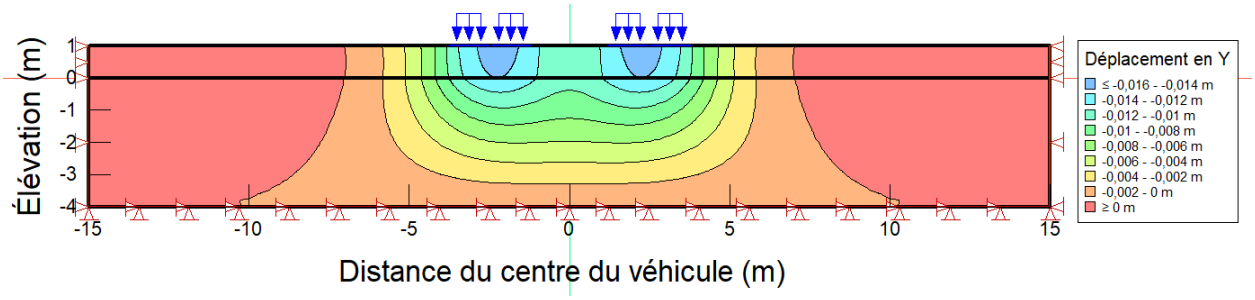
G.9. Épaisseur de la surface de roulement de 100 cm, matériau PF10, compaction MOD81



Isocontours des contraintes totales en y



Isocontours des déformations en y



Isocontour des déplacements en y